

太陽電池駆動 InGaP/GaAs ヘテロ接合フォト
トランジスタの作製および信頼性に関する研究

**A Study on Fabrication and Reliability of the
InGaP/GaAs Heterojunction Phototransistor
Powered by an On-Chip GaAs Solar Cell**

THAN HONG PHUC

電気通信大学大学院 情報理工学研究科 先進理工学専攻

博士(工学)学位申請論文

2016年3月

太陽電池駆動 InGaP/GaAs ヘテロ接合フォト
トランジスタの作製および信頼性に関する研究

**A Study on Fabrication and Reliability of the
InGaP/GaAs Heterojunction Phototransistor
Powered by an On-Chip GaAs Solar Cell**

博士論文審査委員会

先進理工学専攻	教授	野崎 眞次 (主査)
先進理工学専攻	教授	石橋 孝一郎
先進理工学専攻	教授	水柿 義直
先進理工学専攻	教授	奥野 剛史
先進理工学専攻	准教授	内田 和男

著作權所有者

THAN HONG PHUC

2016 年

ABSTRACT

Heterojunction phototransistors (HPTs) are more attractive as a photosensor than photodiodes since they can be easily integrated with heterojunction bipolar transistors (HBTs), and provide a high photoresponse even at a low bias voltage and are immune from an avalanche noise. In particular, the GaAs-based HBTs and HPTs with an AlGaAs emitter demonstrated a high performance. Recently, the InGaP emitter has replaced the AlGaAs emitter in AlGaAs/GaAs HBTs and HPTs due to its superior material properties.

Although the reliability of the InGaP/GaAs HBT has been widely studied and reported, few or no reports were reported for the reliability of InGaP/GaAs HPT. In this study, the DC current gain β and collector photocurrent ΔI_C under photoirradiation of the fabricated HPTs were measured in the temperature range of 300K~400K. We also discuss the phototransistor characteristics before and after the electrical stress applied at room temperature and at high temperature, and also assess the effectiveness of the emitter-ledge passivation, which was found to keep the InGaP/GaAs HBTs' performance from degrading at higher temperature or by the electrical stress.

The photosensor may be widely used in space, where it needs to be operated without a battery. In this study, an InGaP/GaAs HPT and a GaAs solar cell were monolithically integrated on an HPT epitaxial wafer, and the battery-free operation of the HPT was demonstrated. Although the thickness and doping of the layers were optimized for the HBT's performance but not for those of the solar cell, the obtained short-circuit current was high enough to operate the InGaP/GaAs HPT in the two-terminal (2T) configuration. For a potential application of the InGaP/GaAs HPT powered by an on-chip GaAs solar cell as a photosensor in space, the device was irradiated with electrons of 1 MeV energy and 10^{15} cm^{-2} fluence. No significant degradation of the fabricated InGaP/GaAs 2T-HPT after the high-energy electron irradiation guarantees its battery-free operation in space.

Furthermore, InGaP/GaAs HPTs are expected to be potential applications in the space-based communication systems. Therefore, reliability of HPTs when exposed to high-energy radiation is of major concern. Although the radiation effects on HBTs have been studied extensively, to our knowledge there is no study on HPTs exposed to high-energy radiation. In this study, we also report the effects of high-energy electron irradiation on the characteristics of InGaP/GaAs HPTs.

概要

ローカルエリア・ネットワークやマルチチップ・モジュールにおける光検出器としての PIN フォトダイオード、APD アバランシェフォトダイオード、フォトトランジスタなどがある。しかし、PIN フォトダイオードは利得を持たないために、入射光が弱いと感度が悪くなるという欠点を持っている。また、APD はアバランシェ降伏による利得を持つが、同時にノイズが発生するという問題がある。一方、フォトトランジスタ、特に高周波用として高濃度ドーピングした GaAs をベースとしたヘテロ接合フォトトランジスタ(HPT)は、低電圧での高利得、低ノイズ、高信頼性といった利点を持つことから、local area network のような可視光領域での光通信、光配線において PIN フォトダイオード、APD アバランシェフォトダイオードの代替りとなる光検出器として期待されている。特に、HPT は、超高周波ヘテロ接合バイポーラトランジスタ(HBT)を使ったアナログやデジタル回路と集積しやすいという利点を持つため、これまでに HPT と HBT を同じエピ基板に集積し、光検出器の HPT の出力を HBT の増幅器で増幅する超広帯域受光器なども作製された。

上述の光通信分野での HPT の応用では、レーザーの様な単色光に対する応用が重要となるが、本研究では、InGaP/GaAs HPT の上述の光通信分野での応用の様な単色光ではなく、白色光に対する光応答検出器を検討する。

HBT 同様、HPT も AlGaAs をエミッタにした AlGaAs/GaAs HPT が主であったが、エミッタ・ベース接合で電子注入の障壁となる伝導帯のオフセットを少なくするための Al 組成のグレーディングが必要であり、また AlGaAs と GaAs のエッチングにおける選択性が少ないので作製が容易ではないなどの理由で、近年は、InGaP/GaAs HPT の研究開発がより盛んとなっている。InGaP/GaAs HBT は、その特性が温度に大きく依存され、高周波領域での高出力アンプなどに使用されるため、信頼性の要素である温度特性や電氣的ストレスの影響の評価は重要となっている。しかし、HPT の温度特性や電氣的ストレスの影響についてはほとんど報告されていない。本研究では、白色光に対する光応答の高感度検出への応用を目的に、InGaP/GaAs HPT を作製し、300～400 K の温度範囲で InGaP/GaAs HPT の電流利得 β 及び光照射によるコレクタ電流の増加分 ΔI_c (暗状態(Dark)と光照射状態(Light)の出力電流 (コレクタ電流) の差) を測定した。その結果、電流利得 β は温度とともに減少し、 ΔI_c は 320 K まで増加するがその後は減少した。これらの実験結果は、HPT の三端子等価回路により説明された。また、HBT において露出した高濃度 GaAs ベース表面でのキャリアの再結合を抑制し、電流利得 β を高めるエミッタレッジパッシベーションの HPT における効果も検証した。エミッタレッジパッシベーションは、HPT においても全ての測定温度で高い電流利得 β 及び ΔI_c を維持するのに有効であった。特にエミッタレッジパッシベーションは、HBT 以上に HPT の高性能化に貢献することが明らかとなった。

電氣的ストレス実験では、室温で 1 時間の電氣的ストレスを印加前後、HPT の特性の変化を解析した。さらに、電氣的ストレスの影響の詳細研究のために、420K の高温で 15 分間の電氣的ストレスを印加前後、300K～400K の温度範囲で HPT の特性の温度特性を測定した。室温でのストレス実験は室温での 1 時間で 37 A/cm^2 の電流密度を保ち、電氣的ストレスをかけた。HBTs のストレス実験と比較すると、HPTs のストレス実験は 2～3 桁程度小さいため、室温でのストレス効果が見られなかった。しかし、室温でのストレス印加後の HPT を 420 K の高温で測定すると、InGaP/GaAs HPT の特性の劣化が観測できた。ストレスによる劣化を加速するために、420 K で

高温でのストレス実験を両 HPT に与えた。高温でのストレスの電流密度が 37 A/cm^2 であり、ストレス時間を 15 分に短くさせたにも関わらず、高温でのストレスによる両 HPT の電流利得 β 及び ΔI_C の低下は $300 \sim 400 \text{ K}$ の全ての温度範囲で大きい。エミッタレッジパッシベーションはエミッタ周辺の再結合電流を抑制し、電流利得を向上させる効果を持つ。HBT 同様に、HPT では、エミッタレッジパッシベーションが大変有効であることが分かった。

一般的には、HPT を動作するためには、電源が必要となる。本研究では、GaAs 太陽電池駆動 2 端子動作 InGaP/GaAs HPT が試作できた。近年、GaAs や化合物半導体太陽電池は高変換効率を有し、放射線に対しても劣化が少ないため、宇宙への応用を目的とした研究が盛んになっている。これまでよく使われている太陽電池の材料としての Si と比べると、同じ電子線照射のエネルギーやフルエンスで化合物半導体の方はより優れた耐放射線特性を持っている。InGaP/GaAs HPT はフローティングベースの 2 端子動作またベースにベース電流を入力する 3 端子動作がともに使われているが、3 端子動作は 2 端子動作より電流利得 β 及び ΔI_C が高い。しかし、GaAs 太陽電池と同じウェハー上で集積する場合には、HPT の 2 端子動作の方が適する。GaAs 太陽電池は HPT 用エピの InGaP 層を窓層とし、HPT エピのベース層とコレクタ層で作製された。エピ層の厚さとドーピング濃度は太陽電池用ではなく、HBT 用のために最適化されていたが、得られた GaAs 太陽電池の短絡電流が 0.89 mA 、開放電圧が 0.9 V 、変換効率が 5.8% であった。この値は 2 端子動作の InGaP/GaAs HPT を動作するのに十分であった。また、太陽電池駆動 InGaP/GaAs 2T-HPT の宇宙応用を検討するために、日本原子力研究開発機構高崎量子応用研究所で作製した太陽電池駆動 InGaP/GaAs 2T-HPT に 1 MeV フルエンス $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ の電子線を照射した。高エネルギー電子線照射による GaAs 太陽電池も InGaP/GaAs 2T-HPT も劣化が少ないため、太陽電池駆動 InGaP/GaAs 2T-HPT への宇宙応用において光センサーとして期待される。

最終的に、InGaP/GaAs HPT に高エネルギー電子線照射し、電子線照射による HPT の劣化の詳細研究を行った。AlGaAs/GaAs HBT への電子線照射の詳細な研究結果はこれまで多く調べられ、報告されているが、InGaP/GaAs HBT、InGaP/GaAs HPT への電子線照射の詳細な研究結果についてはほとんど報告例がない。本研究では、電子線照射による劣化がエミッタ周辺での欠陥生成またはバルク欠陥生成のどちらによるのかを調べるために、電流利得 β 及び ΔI_C と I_{FA} の依存性を調べた。また、エミッタレッジパッシベーションの及ぼす電子線照射についても調べ、その効果を検討した。作製された HPT を 1 MeV 電子線のフルエンスを 1.0×10^{14} 、 5.0×10^{14} 、 $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ と変化させ照射し、電子線照射の前後、HPT の電流利得 β 及び ΔI_C の劣化メカニズムを調べた。その結果より、HPT の電流利得 β 及び ΔI_C と I_{FA} との依存性、電子線照射のフルエンスとの依存性、電極間距離との依存性について明らかにした。

以上より、本研究では白色光に対する光応答の高感度検出への応用を目的に、InGaP/GaAs HPT を作製し、測定及び評価を行った。HPT の高効率化や HPT への電氣的ストレス及び温度変化の信頼性も確認できた。太陽電池駆動 InGaP/GaAs 2T-HPT を試作し、測定した。この HPT を使った光センサーの宇宙応用を検討するために、電子線を照射し、その影響を詳細に解析した。

目次

第1章 序論.....	1
1.1 研究背景	1
1.2 本論文の構成.....	1
第2章 InGaP/GaAs ヘテロ接合フォトトランジスタ	4
2.1 フォトトランジスタ	4
2.2 InGaP/GaAs ヘテロ接合フォトトランジスタ(HPT).....	5
2.3 ヘテロ接合バイポーラトランジスタ(HBT)の信頼性.....	7
第3章 InGaP/GaAs ヘテロ接合フォトトランジスタの作製.....	13
3.1 マスクパターン	14
3.2 エピタキシャル基板	16
3.3 作製プロセス	17
3.3.1 メサ形成	19
3.3.2 電極形成	21
3.3.3 エッチング	23
第4章 InGaP/GaAs ヘテロ接合フォトトランジスタの測定及び特性	25
4.1 暗状態 HPT の特性	25
4.2 光照射状態 HPT の特性	25
第5章 InGaP/GaAs HPT の特性及び信頼性評価	29
5.1 はじめ	29
5.2 InGaP/GaAs HPT の温度特性.....	29
5.2.1 HPT の電気特性とエミッタレッジパッシベーションの効果.....	29
5.2.2 HPT の温度特性.....	32
5.3 InGaP/GaAs HPT 特性への電氣的ストレスの影響.....	34
5.3.1 室温での電氣的ストレスの影響.....	35
5.3.2 高温の 420K での電氣的ストレスの影響.....	42
5.4 まとめ	45
第6章 GaAs 太陽電池駆動 InGaP/GaAs 2T-HPT.....	47
6.1 はじめ	47
6.2 フォトトランジスタの太陽電池による動作確認	48
6.3 GaAs 太陽電池の設計	51
6.4 太陽電池駆動 InGaP/GaAs ヘテロ接合フォトトランジスタのマスク設計	55
6.5 太陽電池駆動 InGaP/GaAs 2T-HPT の動作確認.....	57

6.6	まとめ	63
第7章	HPT への電子線照射	66
7.1	はじめ	66
7.2	太陽電池駆動 InGaP/GaAs 2T-HPT への高エネルギー電子線照射の影響	66
7.3	電子線照射の HPT への影響	69
7.4	電子線照射の HPT への影響の詳細な解析	74
7.4.1	電子線照射用 InGaP/GaAs HPT のマスク設計	74
7.4.2	HPT への電子線照射の影響	75
7.4.3	高エネルギー電子線照射による InGaP/GaAs HPT の劣化メカニズム	83
7.4.4	電極間距離による HPT への電子線照射の影響	84
7.4.4(1)	マスク設計	84
7.4.4(2)	HPT への電子線照射の影響	85
7.5	電子線照射による HPT の β 、 ΔI_C の劣化機構	87
7.6	まとめ	90
第8章	結論	92
	謝辞	96
	付録	97
	本研究に関する業績	140

第1章 序論

1.1 研究背景

主に光検出器として使われているフォトダイオードには PIN ダイオードや APD (アバランシェ・フォトダイオード) がある[1.1]–[1.3]。しかし、PIN ダイオードは利得を持たないために、入射光が弱いと感度が悪くなるという欠点を持っている。また、APD はアバランシェ降伏による利得を持つが、同時にノイズが発生するという問題を抱えている[1.4]–[1.6]。それに対し、ヘテロ接合フォトトランジスタ(HPT)はこのようなデバイスに代わる非常に魅力的なデバイスであり、利得を持つが、高いバイアスをかける必要がなく、アバランシェ降伏によりノイズが発生する心配もない[1.7]–[1.9]。フォトトランジスタ、特に高周波用として高濃度ドーブした GaAs をベースとした HPT は、低電圧での高利得、低ノイズ、高信頼性といった利点を持つことから、local area network のような可視光領域での光通信、光配線において PIN フォトダイオード、APD アバランシェフォトダイオードの代わりとなる光検出器として期待されている。特に、HPT は、超高周波ヘテロ接合バイポーラトランジスタ(HBT)を使ったアナログやデジタル回路と集積しやすいという利点を持つため、これまでに HPT と HBT を同じエピ基板の上に集積し、光検出器の HPT の出力を HBT の増幅器で増幅する超広帯域受光器なども作製された[1.10]。InGaP/GaAs HPT は、短波長領域で、ローカルエリア・ネットワークやマルチチップ・モジュールの相互接続における光検出器としての応用があり、電流利得が大きい、ノイズが小さい、信頼性が高い、プロセスが簡便であるといった利点を持ち、PIN フォトダイオード、APD、AlGaAs/GaAs HPT といった光検出器に応用可能な他のデバイスに比べて、優れている。

上述の光通信分野での HPT の応用では、レーザーの様な単色光に対する応用が重要となるが、本研究では、InGaP/GaAs HPT の上述の光通信分野での応用の様な単色光ではなく、今後需要が高まる室内照明や自動車のヘッドライトに使われる白色 LED の強度をバックグラウンドの明るさに合わせて調光する省エネルギー型 LED 調光器の開発を念頭に置いて、白色光に対する光応答を検討する。

HBT 同様、HPT も AlGaAs をエミッタにした AlGaAs/GaAs HPT が主であったが、エミッタ・ベース接合で電子注入の障壁となる伝導帯のオフセットを少なくするための Al 組成のグレーディングが必要であり、また AlGaAs と GaAs のエッチングにおける選択性が少ないので作製が容易ではないなどの理由で、近年は、InGaP/GaAs HPT の研究開発がより盛んとなっている[1.11]–[1.16]。本研究では、白色光に対する光応答の高感度検出への応用を目的に、InGaP/GaAs HPT を作製し、測定及び評価を行なった。さらに、HPT の高効率化や HPT への電氣的ストレス及び温度変化の信頼性も解析した。通常、HPT を動作するためには、電源が必要となるが、本研究では、GaAs 太陽電池駆動 2 端子動作 InGaP/GaAs HPT を試作し、その動作を検証した。さらなる信頼性評価として HPT を使った光センサーの宇宙用への応用を検討するために、独立行政法人日本原子力研究開発機構高崎量子応用研究所 (原子力機構高崎研究所) で電子線を照射し、その影響を詳細に解析する。

1.2 本論文の構成

本論文は 8 章から構成されている。第 2 章では、フォトトランジスタ及び InGaP/GaAs HPT について紹介する。第 3 章では、InGaP/GaAs HPT の作製、マスクパターン、エピタキシャル基

板、作製プロセスについて述べる。第 4 章では、暗状態と光照射状態での HPT の測定及び特性を述べる。第 5 章では、InGaP/GaAs HPT の温度特性及び電氣的ストレスによる信頼性評価を行う。第 6 章では、GaAs 太陽電池を集積した InGaP/GaAs 2T-HPT を作製し、光検知器としての動作を確認する。第 7 章では、太陽電池駆動 InGaP/GaAs 2T-HPT に電子線照射やその動作の耐放射線性を検討し、電子線照射の HPT への影響を詳細に解析する。最後に、第 8 章で論文全体をまとめる。

参考文献

- [1.1] L. M. Lunardi, S. Chandrasekhar, A. H. Gnauck, C. A. Burrus, and R. A. Hamm, "20-Gb/s monolithic p-i-n/HBT photoreceiver module for 1.55- μ m applications," *IEEE Photonics Technol. Lett.*7, 1201 (1995).
- [1.2] A. L. Gutierrez-Aitken, K. Yang, X. Zhang, G. I. Haddad, P. Bhattacharya, and L. M. Lunardi, "16-GHz bandwidth InAlAs-InGaAs monolithically integrated p-i-n/HBT photoreceiver," *IEEE Photonics Technol. Lett.*7, 1339 (1995).
- [1.3] S. Chandrasekhar, L. M. Lunardi, A. H. Gnauck, R. A. Hamm, and G. J. Qua, "High-speed monolithic p-i-n/HBT and HPT/HBT photoreceivers implemented with simple phototransistor structure," *IEEE Photonics Technol. Lett.*5, 1316 (1993).
- [1.4] Y. L. Goh, A. R. J. Marshall, D. J. Massey, J. S. Ng, C. H. Tan, M. Hopkinson, J. P. R. David, S. K. Jones, C. C. Button, and S. M. Pinches, "Excess avalanche noise in In_{0.52}Al_{0.48}As," *IEEE J. Quantum Electron.* 43, 503 (2007).
- [1.5] R. J. McINTYRE, "Multiplication noise in uniform avalanche diodes," *IEEE Trans. Electron Devices* 13, 164 (1966).
- [1.6] H. Melchior and L. K. Anderson, "Noise in high speed avalanche photodiodes," *Proc. IEDM*, 1965, p.40.
- [1.7] L. Y. Leu, J. T. Gardner, and S. R. Forrest, "A high-gain, high-bandwidth In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP heterojunction phototransistor for optical communications," *J. Appl. Phys.* 69, 1052 (1991).
- [1.8] H. A. Khan, A. A. Rezazadeh, and S. Sohaib, "Modeling and analysis of the spectral response for AlGaAs/GaAs HPTs for short wavelength optical communication," *J. Appl. Phys.* 109, 104507 (2011).
- [1.9] R. Sridhara, S. M. Frimel, K. P. Roenker, N. Pan, and J. Elliott, "Performance enhancement of GaInP/GaAs heterojunction bipolar phototransistors using DC base bias," *J. Lightwave Technol.* 16, 1101 (1998).
- [1.10] H. Kamitsuna, "Ultra-wideband monolithic photoreceivers using HBT-compatible HPT's with novel base circuits, and simultaneously integrated with an HBT amplifier," *J. Lightwave Technol.*13, 2301 (1995).
- [1.11] C.-K. Song, S.-H. Lee, K.-D. Kim, J.-H. Park, B.-W. Koo, D.-H. Kim, C.-H. Hong, Y.-K. Kim, and S.-B. Hwang, "Optical characteristics of InGaP/GaAs HPTs," *IEEE Electron*

Device Lett. 22, 315 (2001).

[1.12] S. - W. Tan, H. - R. Chen, W. - T. Chen, M. - K. Hsu, A. - H. Lin, and W. - S. Lour, "Characterization and modeling of three-terminal heterojunction phototransistors using an InGaP layer for passivation," IEEE Trans. Electron Devices 52, 204 (2005).

[1.13] H. R. Chen, S. W. Tan, W. T. Chen, T. S. Lin, and W. S. Lour, "The effect on base bias for InGaP/GaAs heterojunction phototransistors," Proc. COMMAD, 2004, p. 241.

[1.14] H. A. Khan, A. A. Rezazadeh, and Y. Zhang, "Photoresponse modeling and analysis of InGaP/GaAs double-HPTs," IEEE J. Quantum Electron. 50, 1044 (2014).

[1.15] M. S. Park, D. S. Kim, and J. H. Jang, "Floating-base InGaP/GaAs heterojunction phototransistors with low doped extrinsic base," Proc. IPRM, 2010, p.1.

[1.16] S. W. Tan, H. R. Chen, W. T. Chen, M. K. Hsu, A. H. Lin, and W. S. Lour, "The influence of base bias on the collector photocurrent for InGaP/GaAs heterojunction phototransistors," J. Appl. Phys. 97, 034502 (2005).

第2章 InGaP/GaAs ヘテロ接合フォトトランジスタ

ヘテロ接合フォトトランジスタ (HPT) は光通信分野における主に光検出器として応用されている[2.1]–[2.9]。本研究では、光通信分野での応用の様な単色光ではなく、今後需要が高まる室内照明や自動車のヘッドライトに使われる白色 LED の強度をバックグラウンドの明るさに合わせて調光する省エネルギー型 LED 調光器の開発を念頭に置いて、白色光に対する光応答を検討する。

2.1 フォトトランジスタ

光検出器とは光信号を電気信号に変換するものであり、光を使用するシステムでは不可欠な光デバイスである。主な光検出器として、PIN フォトダイオードとアバランシェフォトダイオード (APD)、AlGaAs/GaAs HPT、InGaP/GaAs HPT などがある。PIN フォトダイオードは半導体の光電効果によって生じる電流を利用するものであり、主に中・短距離通信や半導体レーザーのモニタに使われている[2.10]–[2.15]。APD は光電効果で生じる電子・正孔の一部を高電界に印加された結晶層内で走行させ、アバランシェ現象を起こさせることにより電流の増幅作用を持たせたフォトダイオードである。そのため、APD は利得を持ち、高感度という特長があり、長距離光通信用の受光器として使われている[2.16]–[2.21]。

PIN フォトダイオードは p 層と n 層の間にドーピングをしていない i 層を挟んだ形をしており、図 2.1 のような構成となっている。

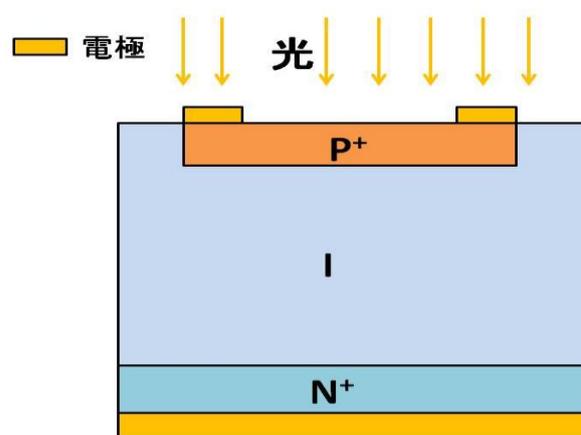


図 2.1 PIN フォトダイオード[2.22]

これにより、PIN ダイオードは広い範囲にドリフト電界がかかり、光電流の大部分をドリフトで高速に引き出せるので、高速な応答性に優れている。しかし、PIN ダイオードは利得を持たないために入射光が弱いと感度が悪くなるという欠点を持っている。

フォトダイオードの逆方向バイアスを大きくしていくと、やがてなだれ増幅現象による電流の増大が見える領域に入る。短波長用 APD は図 2.2 のような構造を持っている[2.22]。p 層から入射する構造になっており、p 層の下に π 層 (光吸収領域) があり、さらに奥に不純物濃度の違う n 層 (アバランシェ領域) がある。APD は逆バイアス電圧を印加したときに生ずる内部増幅作用 (アバランシェ増幅作用) を利用したフォトダイオードである。内部増幅作用とは、pn 接合に逆バイ

アス電圧が印加されていると空乏層で電子・正孔の対が生成されている。電子は n 層へ、正孔は p 層へ流れるが、一部の電子・正孔は他の原子と衝突し、新たな電子・正孔の対を作る。この電子・正孔がさらに原子と衝突し、また新たな電子・正孔を作りというように連鎖反応が起こる。つまり、光電流がなだれ倍増によって数十から数百倍になり、増幅利得を持ったフォトダイオードとして動作が可能である。APD は PIN ダイオードに比べてアバランシェ降伏による利得を持つが、同時にノイズが発生するという欠点を持っている。

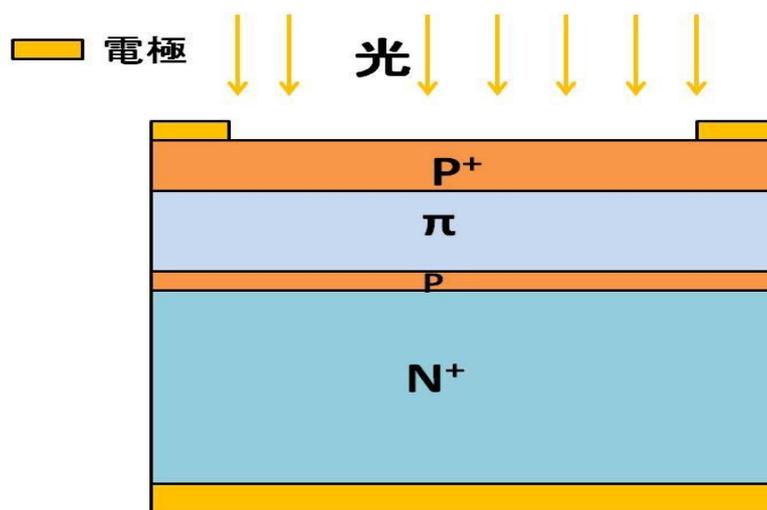


図 2.2 短波長用アバランシェフォトダイオード[2.22]

一方、フォトトランジスタではエミッタ、ベース、コレクタを端子とするバイポーラトランジスタに光を照射して、光検出器として用いられる。実際には、フォトトランジスタはバイポーラトランジスタと構造は類似するものの光検出器として高利得が得られるよう構造が異なっている。特に、高周波用として高濃度ドーピングした GaAs をベースとした HPT は、低電圧での高利得、低ノイズ、高信頼性といった利点を持つことから、local area network のような可視光領域での光通信、光配線において PIN フォトダイオード、APD の代わりとなる光検出器として期待されている。また、HPT は、超高周波 HBT を使ったアナログやデジタル回路と集積しやすいという利点を持つため、これまでに HPT と HBT を同じエピ基板の上に集積し、光検出器の HPT の出力を HBT の増幅器で増幅する超広帯域受光器なども作製された。フォトトランジスタの中でも、エミッタ層にバンドギャップの大きい材料を用いて作られたフォトトランジスタを HPT という。通常使用される HPT には、AlGaAs/GaAs HPT と InGaP/GaAs HPT の 2 種類がある。HPT は、電流利得が大きく、ベース抵抗が低く、カットオフ周波数が高いという数々の利点がある。

2.2 InGaP/GaAs ヘテロ接合フォトトランジスタ(HPT)

HBT 同様、HPT も AlGaAs をエミッタにした AlGaAs/GaAs HPT が主であったが、エミッタ・ベース接合で電子注入の障壁となる伝導帯のオフセットを少なくするための Al 組成のグレーディングが必要であり、また AlGaAs と GaAs のエッチングにおける選択性が少ないので作製が容

易ではないなどの理由で、近年は、InGaP/GaAs HPT の研究開発がより盛んとなっている[2.23], [2.24]。エミッタ層に1.83~1.916 [eV]の大きなバンドギャップである InGaP 材料を用いることで、ベース・エミッタ接合間でのより大きい価電子帯不連続によりベースからエミッタへのホールの逆注入を抑えることができる。したがって、ベースのホールの再結合を抑制できるので、ベース濃度が高くて、エミッタ注入効率が高く、より高い電流利得を得ることが可能となる。また、InGaP/GaAs HPT は選択的エッチングを行うことができるため作製を容易に行うことができる。

図 2.3(a)に本研究で作製した InGaP/GaAs HPT の断面図を示す。作製プロセスの詳細は第 3 章で述べる。図 2.3(b)に InGaP/GaAs HPT のエネルギーバンド図を示す。

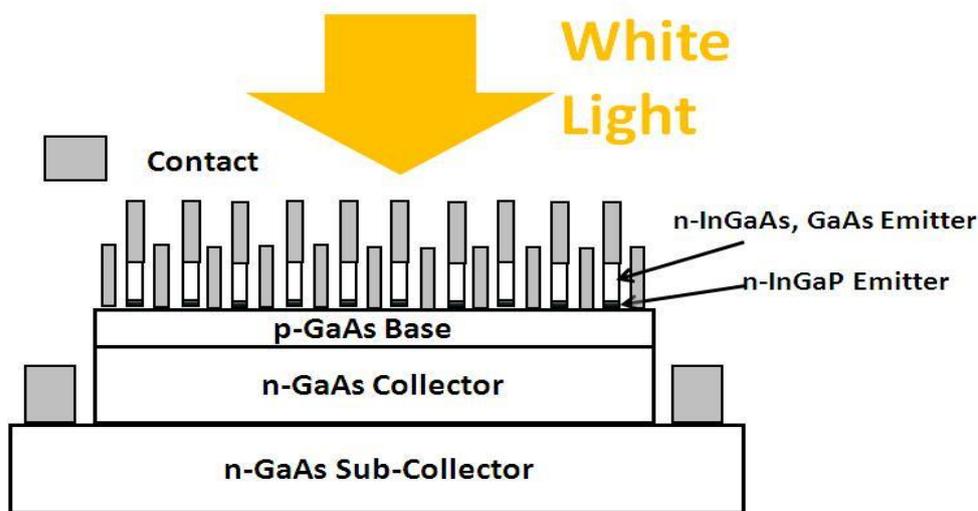


図 2.3(a) 本研究で作製した InGaP/GaAs HPT の断面図

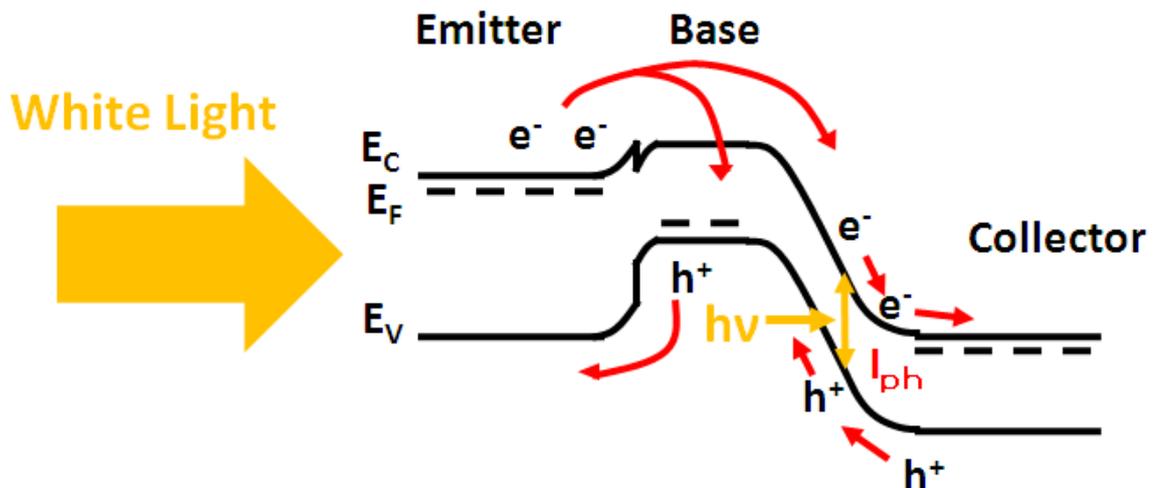


図 2.3(b) InGaP/GaAs HPT のエネルギーバンド図

図 2.3(b)に示すように、入射光がほぼベース・コレクタの空乏層と空乏層外のコレクタ側の少数キャリアの拡散長の領域で吸収される。

フォトトランジスタに次式(2-1)に満足できる光が入射すると、ベース・コレクタ接合空乏層領域及び空乏層コレクタ側の端点から拡散長の範囲内で吸収した光により生成した光電流がベースに流れ込み、ベースポテンシャルを押し上げることによる自己バイアスによってエミッタ注入効率を増加させることができる。

$$E_g < \frac{hc}{\lambda} \quad (2-1)$$

ここで、 E_g はエネルギーバンドギャップ、 h はプランク定数、 c は光速、 λ は入射光の波長である。

2.3 ヘテロ接合バイポーラトランジスタ(HBT)の信頼性

ヘテロ接合バイポーラトランジスタ(HBT)の信頼性に関しては、多くの論文が報告されたが[2.25]–[2.36]、HPTの信頼性に関する論文は全くない。まずは参考のために、HBTにおける電氣的ストレスの特性への影響についてここでは簡単に述べ、第5章では本研究で得られたHPTへの電氣的ストレスの影響と比較・考察する。

HBTのエミッタ材料としてAlGaAsは低電圧においてベース電流が増加することが報告されている[2.37]。この原因は、再結合電流により発生したエネルギーがエミッタ近傍のベース層に放出され、そのエネルギーにより欠陥が発生するためである。そのため、InGaPをエミッタに使う構造が主流となっている。AlGaAsとInGaPの利得の通電時間による変化を比較した結果を図2.4に示す[2.25]。図2.4に見られるようにInGaPをエミッタに用いた方が良好な信頼性が得られる。しかし、InGaPをエミッタに用いた場合においても、転位(ディスロケーション)密度の増加によるバルク接合欠陥やヘテロ界面欠陥等が原因で電氣的ストレスによる電流利得の減少も報告されている[2.25]。また、デバイス構造面では再結合電流を減らす方法として、外部ベース表面のエミッタレッジパッシベーション方法が提案されている。図2.5に示すようにHBTにおいてはInGaPエミッタの一部を残し、高濃度カーボンドープGaAs外部ベースの露出部を少なくさせることがこれまでの研究[2.38]より知られており、そのようなエミッタレッジパッシベーションは、InGaP/GaAs HPTでもまた、その特性改善に有効であることが報告されているが[2.24]、詳細な電氣的ストレスに対する効果については報告されていない。

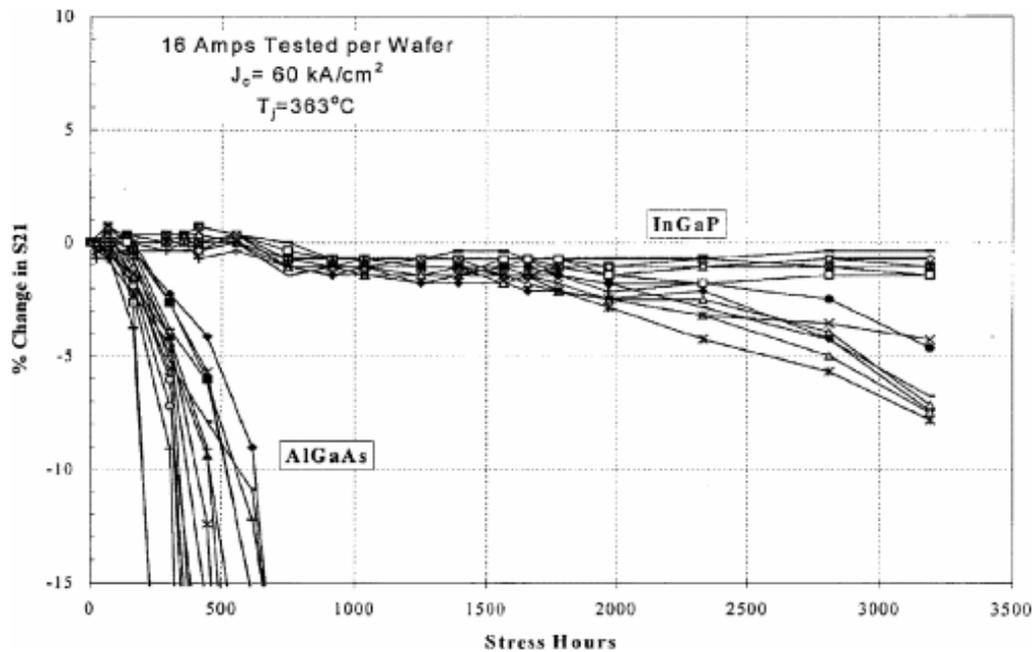


図 2.4 AlGaAs/GaAs HBT と GaInP/GaAs HBT の電氣的ストレスに対する信頼性の比較[2.25]

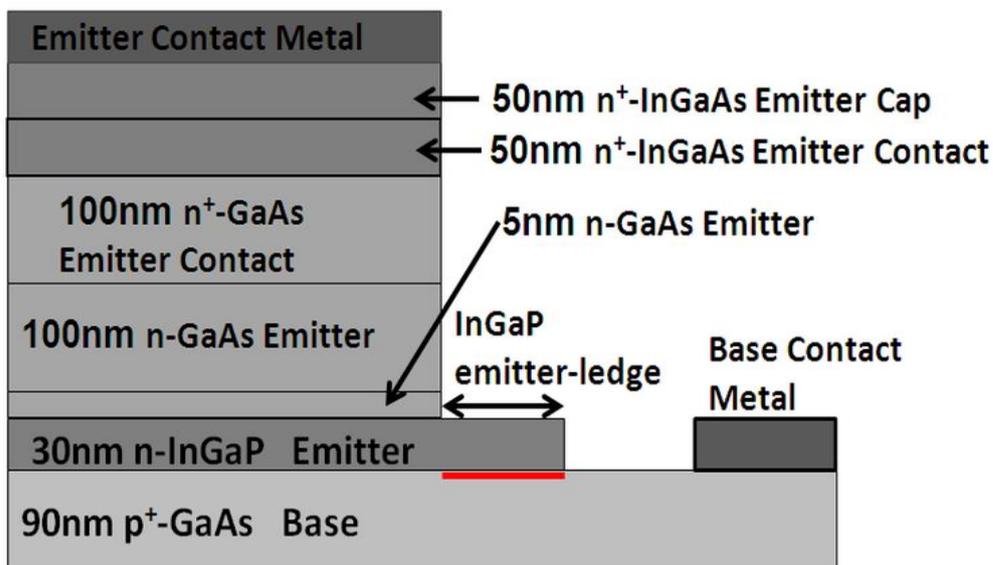


図 2.5 エミッタレッジパッシベーションの断面図

次に、HBTの信頼性に関するバーンイン効果について述べる。水素原子による不純物イオンの不活性化（パッシベーション）の問題はHBTの信頼性に影響を与える。水素原子はSiイオンやCイオンを中性化し、キャリア濃度を低下させてしまう。MOVPE成長でCをベース層にドーピングする場合は、水素がC-Hの結合状態で残ることが多い。このとき、HBT動作時に注入された少数キャリアの電子がC-H結合を切り、キャリア濃度を増加させることで電流利得を増加させると報告された。この現象は一般的にバーンイン効果と呼ばれる。バーンイン効果とは、電流利

得の初期変動のことであり、HBTの実用化に際して大きな障壁となる。この変動のメカニズムを解明すると共に、エピタキシャル膜の成長時のベース中の水素濃度を制御する技術や HBT 作製プロセスの面からバーンイン効果を制御する方法が研究されている [2.39], [2.40]。

また、InGaP/GaAs HBT の温度特性については多くの報告例がある [2.27]。図 2.6 は温度を変化し、InGaP/GaAs HBT と AlGaAs/GaAs HBT の電流利得 β のコレクタ電流 I_C 依存性を示す図である [2.27]。HBT の特性が温度に大きく依存され、高周波領域での高出力アンプなどに使用されるため、温度特性の評価は重要となっている。HBT は、高温では正孔のエミッタへの逆注入量が増加し、電流利得 β は低下する。

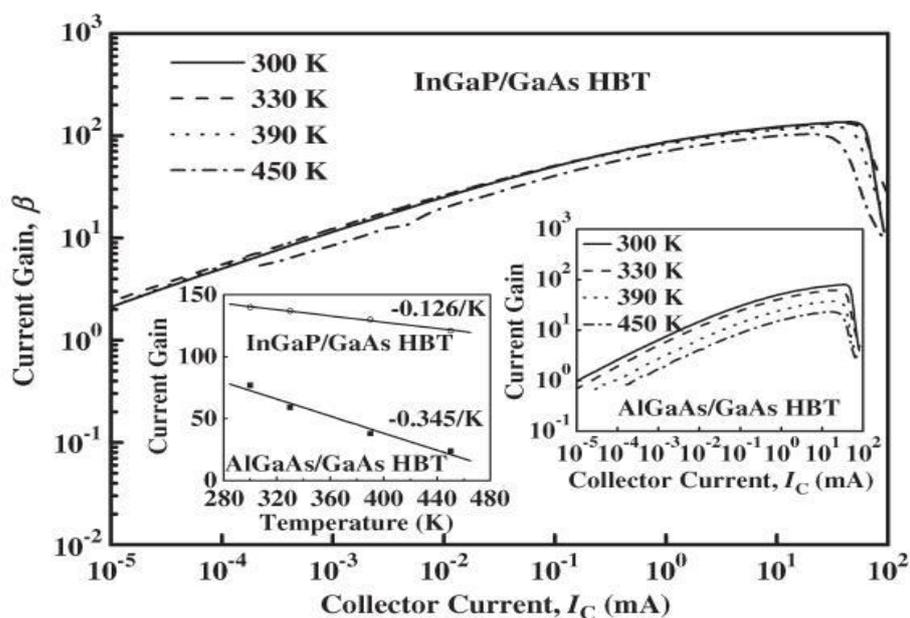


図 2.6 InGaP/GaAs HBT の電流利得 β のコレクタ電流 I_C の依存性 [2.27]

最後に、HBT 特性への電子線・陽子線・中性子線照射の影響はこれまで多く調べられ、報告されているが [2.28]–[2.36]、InGaP/GaAs HBT 特性への電子線・陽子線・中性子線照射の影響について全く報告例がない。低いフルエンスの陽子線と中性子線の照射後、低ベース電流側において電流利得 β は僅かに増加した。高いフルエンスの陽子線と中性子線の照射後、 β は減少した。電子線照射の後、低ベース電流側においては β が僅かに増加したのに対して、高ベース電流側においては β が僅かに減少した。低ベース電流や低フルエンスに β の増加は電離効果の原因であると考えられた。高ベース電流や高フルエンスに β の減少ははじき出し損傷効果によると報告された [2.28]。第 7 章では電子線照射の HBT への影響を詳細に解析する。さらに、InGaP/GaAs HBT に対して InGaP エミッタレッジパッシベーションの及ぼす電子線照射の影響についても検討する。

参考文献

[2.1] J. Thuret, C. Gonzalez, J. L. Benchimol, M. Riet, and P. Berdagger, “High-speed

- InP/InGaAs heterojunction phototransistor for millimetre-wave fibre radio communications”, Proc. IPRM, 1999, p.389.
- [2.2] M. Konagai, K. Katsukawa, and K. Takahashi, “(GaAl)As/GaAs heterojunction phototransistors with high current gain,” J. Appl. Phys. 48, 4389 (1977).
- [2.3] J. C. Campbell, A. G. Dentai, C. A. Burrus Jr., and J. F. Ferguson, “InP-InGaAs heterojunction phototransistors,” IEEE J. Quantum Electron. 17, 264 (1981).
- [2.4] H. Wang, C. Bacot, C. Gerard, J. L. Lievin, C. Dubon-Chevallier, D. Ankri, and A. Scavennec, “GaAs/GaAlAs heterojunction bipolar phototransistor for monolithic photoreceiver operating at 140 Mbit/s,” IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 34 , 1344 (1986).
- [2.5] A. Sasaki and M. Kuzuhara, “InGaAsP-InP heterojunction phototransistors and light amplifiers,” Jpn. J. Appl. Phys. 20, 283 (1981).
- [2.6] A. Sasaki, K. Matsuda, Y. Kimura, and S. Fujita, “High-current InGaAsP-InP phototransistors and some monolithic optical devices,” IEEE Trans. Electron Devices. 29, 1382 (1982).
- [2.7] S. Sakai, M. Naitoh, M. Kobayashi, and M. Umeno, “InGaAsP/InP phototransistor-based detectors,” IEEE Trans. Electron Devices 30, 404 (1983).
- [2.8] J. C. Campbell and A. G. Dentai, “InP/InGaAs heterojunction phototransistor with integrated light emitting diode,” Appl. Phys. Lett. 41, 192 (1982).
- [2.9] K. Tabatabaie-Alavi and C. G. Fonstad, “Recent advances in InGaAsP/InP phototransistors,” Proc. SPIE, 1981, p. 38.
- [2.10] M. Kyomasu, “Development of an integrated high speed Silicon PIN photodiode sensor,” IEEE Trans. Electron Devices 42, 1093 (1995).
- [2.11] Y. S. Wang, S. J. Chang, C. L. Tsai, M. C. Wu, Y. Z. Chiou, Y. H. Huang, and W. Lin, “High-speed InGaAs P-I-N photodetector with planar buried heterostructure,” IEEE Trans. Electron Devices 56, 1347 (2009).
- [2.12] C. - W. Chen, W. - C. Lee, M. - C. Wu, C. - L. Ho, C. - H. Chuang, and D. - Y. Hsieh, “A novel InGaAs photodiode fabrication and its application,” Proc. 5th IEEE Int. Nanoelectronics Conf., 2013, p.495.
- [2.13] S. C. Patil and B. K. Mishra, “GaAs, InP, InGaAs, GaInP, p⁺-i-n⁺ multiplication measurements for modeling of semiconductor as photo detectors,” Proc. ICWET, 2013, p.34.
- [2.14] T. Hoshida and M. Tsuchiya, “Broad-band millimeter-wave upconversion by nonlinear photodetection using a waveguide p-i-n photodiode,” IEEE Photon. Technol. Lett. 10, 860 (1998).
- [2.15] Y. Muramoto and T. Ishibashi, “InP/InGaAs pin photodiode structure maximising bandwidth and efficiency,” Electron. Lett. 39, 1749 (2003).
- [2.16] L. Xiaolong, S. Zhen, and B. Shanpeng, “Research on the associated feature of APD sensor avalanche gain and photoelectric conversion SNR,” Proc. FSKD, 2012, p. 1913.
- [2.17] R. Sidhu, L. Zhang, N. Tan, N. Duan, J. C. Campbell, A. L. Holmes, Jr., C. - F. Hsu, and M. A. Itzler, “2.4 μ m cutoff wavelength avalanche photodiode on InP substrate,” Electron. Lett.

42, 181 (2006).

[2.18] Y. L. Goh, J. S. Ng, C. H. Tan, J. P. R. David, R. Sidhu, A. L. Holmes, Jr., and J. C. Campbell, "InP-based avalanche photodiodes with $> 2.1 \mu\text{m}$ detection capability," Proc. IPRM, 2007, p. 293.

[2.19] M. Nada, Y. Muramoto, H. Yokoyama, T. Ishibashi, and S. Kodama, "InAlAs APD with high multiplied responsivity-bandwidth product (MR-bandwidth product) of 168 A/W-GHz for 25 Gbit/s high-speed operations," Electron. Lett. 48, 397 (2012).

[2.20] D. T. Ekholm, J. M. Geary, J. N. Hollenhorst, V. D. Mattered, Jr., and R. Pawelek, "High bandwidth planar InP/InGaAs avalanche photodiodes," IEEE Trans. Electron Devices 35, 2433 (1988).

[2.21] J. C. Campbell, S. Demiguel, F. Ma, A. Beck, X. Guo, S. Wang, X. Zheng, X. Li, J. D. Beck, M. A. Kinch, A. Huntington, L. A. Coldren, J. Decobert, and N. Tschertner, "Recent advances in avalanche photodiodes," IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron. 10, 777 (2004).

[2.22] <http://www.nteku.com/photo/photo-diode-kouzou.aspx>.

[2.23] C. - K. Song, S. - H. Lee, K. - D. Kim, J. - H. Park, B. - W. Koo, D. - H. Kim, C. - H. Hong, Y. - K. Kim, and S. - B. Hwang, "Optical characteristics of InGaP/GaAs HPTs," IEEE Electron Device Lett. 22, 315 (2001).

[2.24] S. - W. Tan, H. - R. Chen, W. - T. Chen, M. - K. Hsu, A. - H. Lin, and W. - S. Lour, "Characterization and modeling of three-terminal heterojunction phototransistors using an InGaP layer for passivation," IEEE Trans. Electron Devices 52, 204 (2005).

[2.25] H. Livingston, "A survey of heterojunction bipolar transistor (HBT) device reliability," IEEE Trans. Compon. and Packag. Technol. 27, 225 (2004).

[2.26] N. Pan, J. Elliott, M. Knowles, D. P. Vu, K. Kishimoto, J. K. Twynam, H. Sato, M. T. Fresina, and G. E. Stillman, "High reliability InGaP/GaAs HBT," IEEE Trans. Electron Device Lett. 19, 115 (1998).

[2.27] Y. - S. Lin and J. - J. Jiang, "Temperature dependence of current gain, ideality factor, and offset voltage of AlGaAs/GaAs and InGaP/GaAs HBTs," IEEE Trans. Electron Devices 56, 2945 (2009).

[2.28] S. Vuppala, C. Li, P. Zwacknagl, and S. Subramanian, "Neutron, proton, and electron irradiation effects in InGaP/GaAs single heterojunction bipolar transistors," IEEE Trans. Nucl. Sci. 50, 1846 (2003).

[2.29] G. A. Schrantz, N. W. van Vonno, W. A. Krull, M. A. Rao, S. I. Long, and H. Kroemer, "Neutron irradiation effects on AlGaAs/GaAs heterojunction bipolar transistors," IEEE Trans. Nucl. Sci. 35, 1657 (1988).

[2.30] Y. Song, M. E. Kim, A. K. Oki, M. E. Hafizi, W. D. Murlin, J. B. Camou, and K. W. Kobayashi, "Effects of neutron irradiation on GaAs/AlGaAs heterojunction bipolar transistors," IEEE Trans. Nucl. Sci. 36, 2155 (1989).

[2.31] A. Sarkar, S. Subramanian, and S. M. Goodnick, "Electron irradiation effects in AlGaAs/GaAs single heterojunction bipolar transistors," IEEE Trans. Electron Devices 47,

2024 (2000).

- [2.32] X. Hu, B. K. Choi, H. J. Barnaby, D. M. Fleetwood, R. D. Schrimpf, K. F. Galloway, R. A. Weller, K. McDonald, U. K. Mishra, and R. W. Dettmer, "Proton-induced degradation in AlGaAs/GaAs heterojunction bipolar transistors," *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 49, 3213 (2002).
- [2.33] A. Bandyopadhyay, S. Subramanian, S. Chandrasekhar, A. G. Dentai, and S. M. Goodnick, "Degradation of DC characteristics of InGaAs/InP single heterojunction bipolar transistors under electron irradiation," *IEEE Trans. Electron Devices* 46, 840 (1999).
- [2.34] A. Shatalov, S. Subramanian, S. Chandrasekhar, A. Dentai, and S. M. Goodnick, "Electron irradiation effects in polyimide passivated InP/InGaAs single heterojunction bipolar transistors," *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 46, 1708 (1999).
- [2.35] A. Shatalov, S. Subramanian, and A. Dentai, "Neutron irradiation effects in InP/InGaAs single heterojunction bipolar transistors," *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 47, 2551 (2000).
- [2.36] A. Shatalov, "Radiation effects in III-V semiconductors and heterojunction bipolar transistors," Ph.D. dissertation, Oregon State Univ, Corvallis, OR, (2000).
- [2.37] J. J. Liou, "Long-term base current instability: a major concern for AlGaAs/GaAs HBT reliability," *Proc. Int. Semiconductor Conf.*, 1998, p.23.
- [2.38] W. Liu, E. Beam, T. Henderson, and S. - K. Fan, "Extrinsic base surface passivation in GaInP/GaAs heterojunction bipolar transistors," *IEEE Electron Device Lett.* 14, 301 (1993).
- [2.39] M. Borgarino, R. Plana, S. Delage, F. Fantini, and J. Graffeuil, "Influence of surface recombination on the burn-in effect in microwave GaInP/GaAs HBT's," *IEEE Trans. Electron Devices* 46, 10 (1999).
- [2.40] M. Borgarino, J. G. Tartarin, S. Delage, R. Plana, F. Fantini, and J. Graffeuil, "Correlation between the burn-in effect and the extrinsic base surface quality in C-doped GaInP/GaAs HBTs," *Proc. EDMO*, 1997, p.43.

第3章 InGaP/GaAs ヘテロ接合フォトトランジスタの作製

本研究では、InGaP/GaAs ヘテロ接合フォトトランジスタ(HPT)のエミッタレッジパッシベーションが InGaP/GaAs HPT の光応答特性に及ぼす影響を調べるために、図 3.1 に示すようにエミッタレッジパッシベーションを行った HPT (L-HPT)とエミッタレッジパッシベーションを行っていない HPT (N-HPT)の 2 種類の HPT を作製した。ベース表面積を 0.42 mm^2 とし、そのそれぞれに対して、コレクタ領域の面積を 0.42 mm^2 とした。また、エミッタ電流集中を抑制するために、エミッタ電極の形状は図 3.2 のように幅 $4 \text{ }\mu\text{m}$ 長さ $2100 \text{ }\mu\text{m}$ 10 本の指を持つ櫛型電極とし、ベース電極の形状は幅 $4 \text{ }\mu\text{m}$ 長さ $2100 \text{ }\mu\text{m}$ 11 本の指を持つ櫛型電極とした。図 3.3 は光学顕微鏡で観察した N-HPT の平面図である。

本研究では、InGaP/GaAs HPT の作製はマスクを使用して実験を行った。エミッタレッジパッシベーションを施す場合、全部で 6 個のマスクを用い、フォトリソグラフィ工程により行う。この章では、初めにマスクを構成する一つ一つの要素を説明し、最後に全てのマスクを組み合わせた場合の説明を行う。次に、本研究で使用したエピタキシャル基板の構造について説明し、レジストのメサ形成の仕方或使用した電極の種類やエッチングに使用した溶液を示し、最後にメサ形成、電極、エッチングをどのように組み合わせてプロセスを行ったか、そのプロセス手順の詳細を説明する。

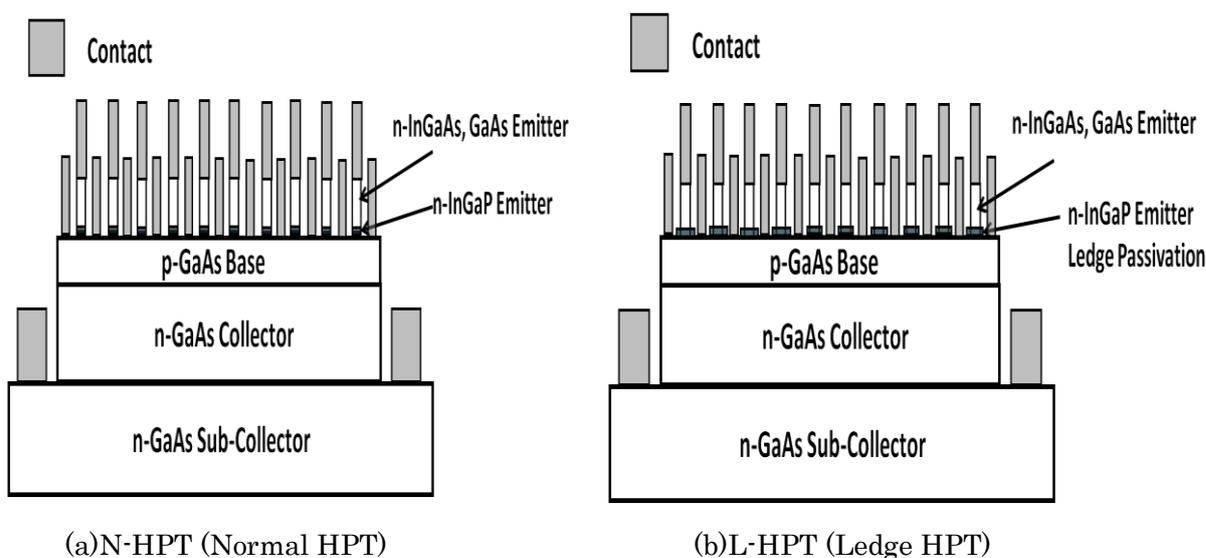


図 3.1 InGaP/GaAs HPT の構造

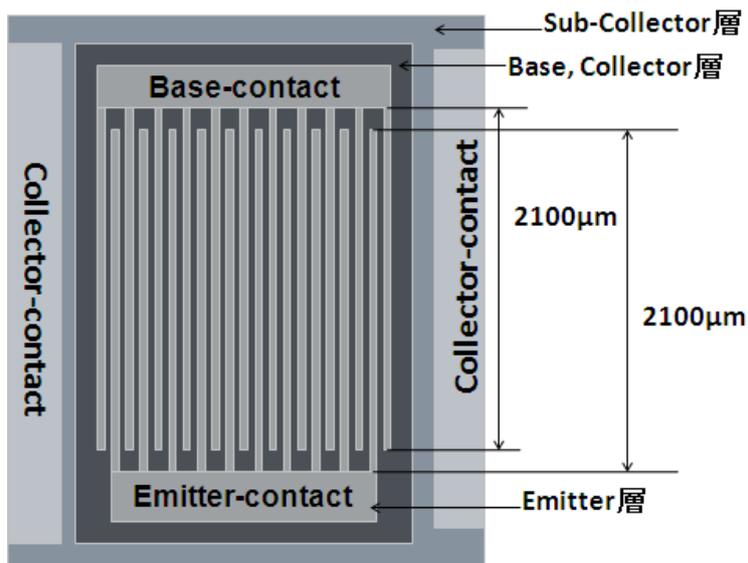


図 3.2 InGaP/GaAs HPT の平面図

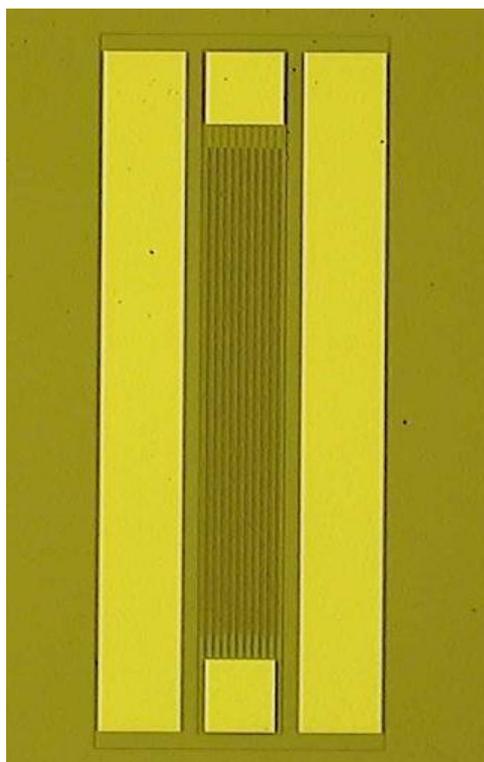


図 3.3 光学顕微鏡で観察した実際に作製された N-HPT の平面図

3.1 マスクパターン

本研究では、AUTOCAD を用いて作成したパターンを業者に送ってガラスマスクを作製してもらった。エミッタ電極用マスク（図 3.4）を用いて、N-HPT、L-HPT を作製した。図 3.4 はエミッタ電極用マスク、図 3.5 エミッタレッジ用マスク、図 3.6 ベース電極用マスク、図 3.7 ベース層用マスク、図 3.8 コレクタ電極用マスク、図 3.9 サブコレクタ用マスクである。図 3.10 は N-HPT 作製用マスクパターンの図を示す。これが、InGaAs/GaAs HPT の完成図である。図 3.11 は L-HPT

作製用マスクパターンの図を示す。基本的に、L-HPT のマスクパターンは N-HPT のマスクパターンと同じであるが、紫色で囲まれた部分のエミッタレッジパッシベーションという 1 枚のマスクが増えるだけである。

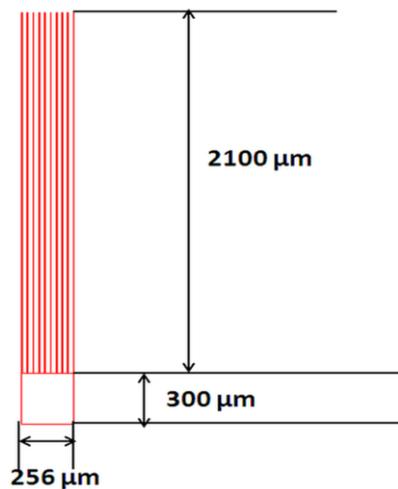


図 3.4 エミッタ電極用マスク

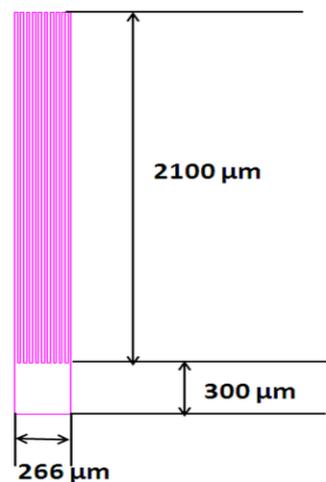


図 3.5 エミッタレッジ用マスク

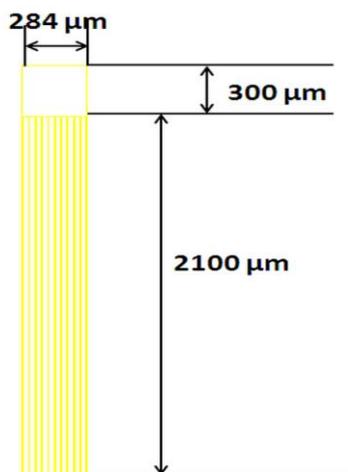


図 3.6 ベース電極用マスク

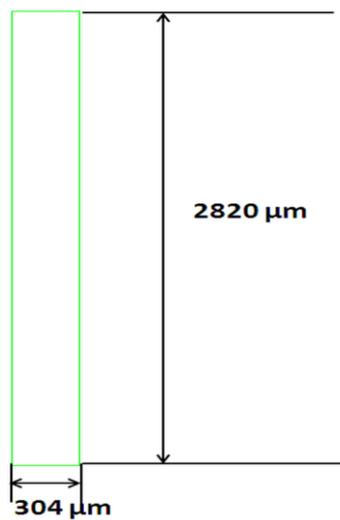


図 3.7 ベース層用マスク

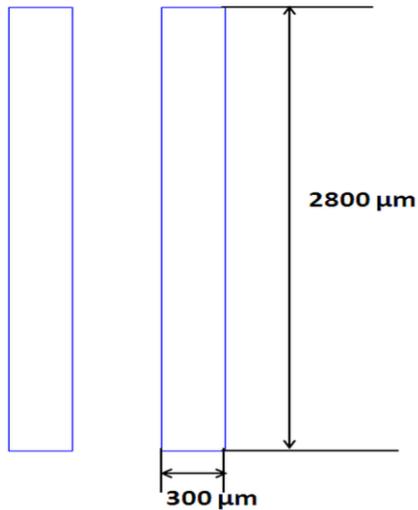


図 3.8 コレクタ電極用マスク

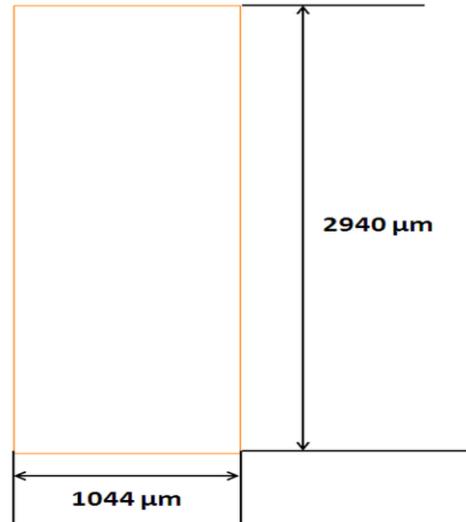


図 3.9 サブコレクタ用マスク

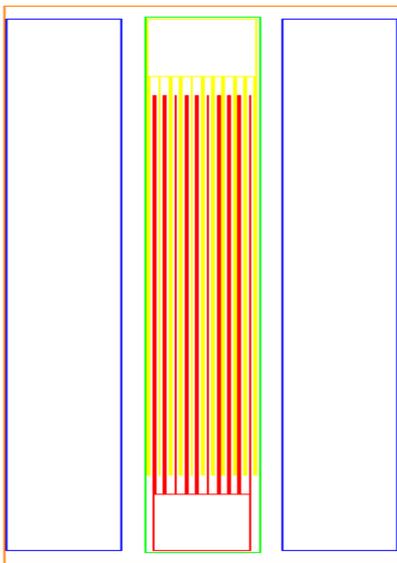


図 3.10 全て重ね合わせた N-HPT 用マスク

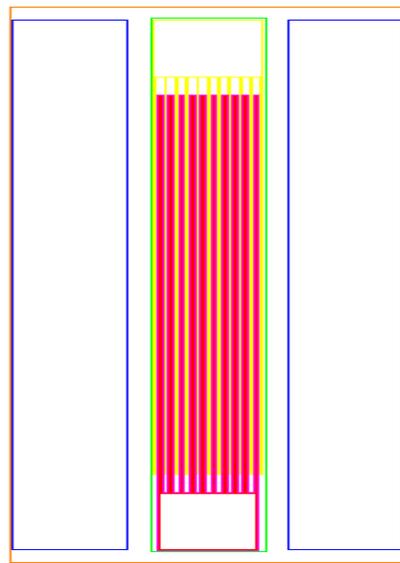


図 3.11 全て重ね合わせた L-HPT 用マスク

3.2 エピタキシャル基板

HPT の作製に用いた InGaP/GaAs HPT のエピ構造は図 3.12 に示し、S. I. GaAs 基板(100)面上に有機金属化学気相成長法(MOCVD)により成長された一般的に市販される高周波用 InGaP/GaAs HBT のものを用いた。2° オフの半絶縁性の GaAs 基板上に i-GaAs バッファ層を 500 Å、i-Al_{0.2}Ga_{0.8}As バッファ層を 300 Å、i-Al_{0.5}Ga_{0.5}As バッファ層を 1000 Å、i-Al_{0.2}Ga_{0.8}As バッファ層を 200 Å、i-GaAs バッファ層を 100 Å、n-GaAs サブコレクタ層を 4000 Å ($3.0 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ で Si ドープ)、n-In_{0.48}Ga_{0.52}P エッチストップ層を 100 Å ($3.0 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ で Si ドープ)、n-GaAs コレクタ層を 200 Å ($3.0 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ で Si ドープ)、n-GaAs コレクタ層を 6000 Å ($1.0 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ で Si ドープ)、p-GaAs ベース層を 900 Å ($3.6 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ で C ドープ)、n-In_{0.48}Ga_{0.52}P エミッタ層を 300 Å ($3.0 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ で Si ドープ)、n-GaAs エミッタ層を 50 Å ($3 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ で Si ド

ープ)、n-GaAs エミッタ層を 1000Å($3.0 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ で Si ドープ)、n-GaAs キャップ層を 1000Å ($3.0 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ で Si ドープ)、n-In_xGa_{1-x}As(x=0~0.5)キャップ層を 500Å($2.0 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ で Si ドープ)、n-In_{0.5}Ga_{0.5}As コンタクト層($2.0 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ で Si ドープ)の順に堆積させてある。

500 Å n-InGaAs cap layer
500 Å n-InGaAs cap layer
2050 Å n-GaAs Emitter
300 Å n-InGaP Emitter
900 Å p-GaAs Base
6000 Å n-GaAs Collector
4000 Å n-GaAs SubCollector
S.I. GaAs Substrate

図 3.12 InGaP/GaAs HPT のエピ構造断面図

3.3 作製プロセス

表 3.1 に示すエピを用い、ウェットエッチングによる通常メサ形成を用い、N-HPT と L-HPT の 2 種類の HPT を作製した。HPT の作製プロセスは基本的に HBT の作製プロセスと同じである[3.1]-[3.3]。

表 3.1 エピタキシャル基板

		Dopant		Doping level [cm ⁻³]	Thickness [Å]
Emitter Contact	n-InGaAs	Si	0.5	2.0×10^{19}	500
	n-InGaAs	Si	0→0.5	2.0×10^{18}	500
	n-GaAs	Si		3.0×10^{18}	1000
	n-GaAs	Si		3.0×10^{17}	1000
	n-GaAs	Si		3.0×10^{18}	50
Emitter	n-InGaP	Si	0.48	3.0×10^{17}	300
Base	p-GaAs	C		3.6×10^{19}	900
Collector	n-GaAs	Si		1.0×10^{16}	6000
	n-GaAs	Si		3.0×10^{18}	200
Etch stop	n-InGaP	Si	0.48	3.0×10^{18}	100
SubCollector	n-GaAs	Si		3.0×10^{18}	4000
	i-GaAs			—	100
	i-AlGaAs		0.2	—	200
	i-AlGaAs		0.5	—	1000
	i-AlGaAs		0.2	—	300
	i-GaAs			—	500
S.I Substrate	S.I. GaAs				

まずは作製プロセス手順を以下のように示す。

(1) エミッタ電極形成及びエミッタ層の作製

逆メサパターン (マスクパターン 1) → エミッタ電極蒸着→エミッタ層エッチング

(2) エミッタレッジパッシベーションの作製

順メサパターン (マスクパターン 2) → エミッタレッジエッチング

(3) ベース電極形成及びベース層・コレクタ層の作製

逆メサパターン (マスクパターン 3) → ベース電極蒸着 → 順メサパターン (マスクパターン 4) → ベース層エッチング→コレクタ層エッチング

(4) コレクタ電極形成

逆メサパターン (マスクパターン 5) → コレクタ電極蒸着

(5) サブコレクタ層の作製

順メサプロセス (マスクパターン 7) → サブコレクタ層エッチング

次に、作製の手順の詳細について述べる。まず、アセトン 5 min、エタノール 5min、純水 3 回 (30 秒/回)で洗浄を行ったエピ基板表面にリフトオフによってエミッタ電極 (Ti/Au) を形成した。このエミッタ電極をマスクとして、InGaAs 層、GaAs 層をそれぞれ $\text{H}_3\text{PO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ 及び $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ で、InGaP 層は HCl 溶液を用いて選択的にエッチングし、ベース表面を露出させた。ベース層は薄いので、InGaP と GaAs のエッチング速度が大きく異なる HCl を用いることにより、ベース層をオーバエッチングすることなしにエミッタメサを形成することができる。AlGaAs/GaAs HPT では、高い選択性のエッチング溶液がなく、ベース層をオーバエッチングせずにベースの面出しをするのが困難である [3.4]-[3.6]。次に露出したベース表面にベース電極 (Ti/Pt/Au) をリフトオフにより形成した。ベース、コレクタを連続してメサエッチングし、サブコレクタを露出させた。その表面に、コレクタ電極 (Ni/AuGe/Ni/Au) を蒸着し、n 形オーミックコンタクトの形成を行った。サブコレクタの面出しがしやすいように、エピ構造には、コレクタとサブコレクタの間にエッチストップ層として薄い高濃度の n 形 InGaP 層を押し入した。InGaP 層を HCl 溶液で選択的にエッチングした後、20 nm だけサブコレクタ層をエッチングし、その表面にコレクタ電極を形成した。このようにエミッタレジパッシベーションのない N-HPT を作製した。

エミッタレジパッシベーションは、InGaAs 及び GaAs エミッタ層をエミッタ電極形成用マスクとして用いて、それぞれ $3\text{H}_3\text{PO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : 25\text{H}_2\text{O}$ 及び $3\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : 150\text{H}_2\text{O}$ を用いて全てエッチングした。そのときの InGaAs 及び GaAs のエッチング速度は共に 200 nm/min であった。その後、エミッタ電極を覆い隠すエミッタレジパッシベーション形成用のマスクを用いて、HCl 溶液で 30 nm の InGaP 層を全てエッチングした。このようにエミッタレジパッシベーションのある L-HPT を作製した。レジ幅は 5 μm とし、ベース露出部の約 50% を InGaP エミッタレジパッシベーションで覆った。その後のプロセスは、N-HPT と同様である。各プロセス手順の詳細を次に示す。

3.3.1 メサ形成

HPT を作製するときには、フォトレジストのパターンを形成して、エッチングや電極形成をする。フォトレジストのパターンの形成は、マスクを用いて、フォトリソグラフィにより行う。フォトレジストのパターンには、順メサパターンと逆メサパターンの 2 種類がある。順メサパターンは、HPT の層のエッチングを行うときに用いるパターンである。一方、逆メサパターンは HPT の電極形成をするときに用いるパターンである。

以下に本研究で用いたフォトレジストの順メサパターンの作製条件と逆メサパターンの作製プロセスを示す。

(a) 順メサプロセス

- 1) InGaP/GaAs HPT の基板をスピナー台の上に設置する。
- 2) スピナー台の上に設置した InGaP/GaAs HPT の基板の表面にプライマー (PRIMER、ROHM AND HAAS ELECTRONIC MATERIALS) を満遍なく塗布する。
- 3) 第 1 段階の回転の回転数を 1000 rpm、回転時間を 2 s に、第 2 段階の回転の回転数を 7000 rpm、回転時間を 30 s に設定し、プライマーを表面に塗布した InGaP/GaAs HPT の基板をスピナー台の上に載せたまま、スピナーを回転させて、プライマーの膜厚

を均一にする。

- 4) スピンナーの回転が止まったら、スピンナー台の上に設置したままで、プライマーを表面に塗布した InGaP/GaAs HPT の基板の表面にプライマーの上からフォトレジスト (PHOTORESIST S1818、ROHM AND HAAS ELECTRONIC MATERIALS)を満遍なく塗布する。
- 5) 第1段階の回転の回転数を 1000 rpm、回転時間を 2 s に、第2段階の回転の回転数を 7000 rpm、回転時間を 30 s に設定し、フォトレジストをプライマーの上から表面に塗布した InGaP/GaAs HPT の基板をスピンナー台の上に載せたまま、スピンナーを回転させて、フォトレジストの膜厚を均一にする。
- 6) スピンナーの回転が止まったら、フォトレジストを表面に塗布した InGaP/GaAs ヘテロ接合バイポーラフォトトランジスタの基板を、ベーク温度を 110°C、ベーク時間を 60 s に設定したベーク炉の中に入れ、ベークする。
- 7) ベークが終わったら、フォトレジストを表面に塗布した InGaP/GaAs HPT の基板をベーク炉から取り出し、マスクアライナー(PEM-800、ユニオン光学もしくはズース・マイクロテック)の試料ホルダの上に設置する。
- 8) マスクアライナーにマスクを取り付け、コンタクトギャップ距離を 0 μm 、アラインギャップを 50 μm 、露光時間を 3.5 s(PEM-800、ユニオン光学の場合)、ソフトコンタクト、アラインギャップを 30 μm 、露光時間を 2.0 s(ズース・マイクロテックの場合)に設定して、マスク合わせを行い、フォトレジストを表面に塗布した InGaP/GaAs HPT の基板を露光する。
- 9) 露光した後、フォトレジストを表面に塗布した InGaP/GaAs HPT の基板を現像液 (MF-320 DEVELOPER、ROHM AND HAAS ELECTRONIC MATERIALS)に 3 分間浸し、現像する。
- 10) 現像が終わったら、フォトレジストを表面に塗布した InGaP/GaAs HPT の基板を脱イオン化水で洗浄する。
- 11) 窒素ガンを窒素をフォトレジストが塗布された表面の InGaP/GaAs HPT の基板に吹き付け、フォトレジストを表面に塗布した InGaP/GaAs HPT の基板の表面を乾燥させる。
- 12) フォトレジストを表面に塗布した InGaP/GaAs HPT の基板を、ベーク温度を 130°C、ベーク時間を 120 s に設定したベーク炉の中に入れ、ベークする。

以上、InGaP/GaAs HPT のフォトレジストの順メサパターンの作製が完成する。

(b) 逆メサプロセス

HPT のフォトレジストの逆メサパターンの作製条件:

- 1) InGaP/GaAs HPT の基板をスピンナー台の上に設置する。
- 2) スピンナー台の上に設置した InGaP/GaAs HPT の基板の表面にプライマー(PRIMER、ROHM AND HAAS ELECTRONIC MATERIALS)を満遍なく塗布する。
- 3) 第1段階の回転の回転数を 1000 rpm、回転時間を 2 s に、第2段階の回転の回転数を 7000 rpm、回転時間を 30 s に設定し、プライマーを表面に塗布した InGaP/GaAs HPT の基板をスピンナー台の上に載せたまま、スピンナーを回転させて、プライマーの膜厚

を均一にする。

- 4) スピンナーの回転が止まったら、スピナー台の上に設置したままで、プライマーを表面に塗布した InGaP/GaAs HPT の基板の表面にプライマーの上からフォトレジスト (PHOTORESIST S1818、ROHM AND HAAS ELECTRONIC MATERIALS)を満遍なく塗布する。
- 5) 第1段階の回転の回転数を 1000 rpm、回転時間を 2 s に、第2段階の回転の回転数を 7000 rpm、回転時間を 30 s に設定し、フォトレジストをプライマーの上から表面に塗布した InGaP/GaAs HPT の基板をスピナー台の上に載せたまま、スピナーを回転させて、フォトレジストの膜厚を均一にする。
- 6) スピンナーの回転が止まったら、フォトレジストを表面に塗布した InGaP/GaAs HPT の基板を現像液 (MF-320 DEVELOPER、ROHM AND HAAS ELECTRONIC MATERIALS)に 15 秒間浸し、脱イオン化水中で 8 秒間攪拌する。
- 7) 窒素ガンで窒素をフォトレジストが塗布された表面の InGaP/GaAs HPT の基板に吹き付け、フォトレジストを表面に塗布した InGaP/GaAs ヘテロ接合バイポーラフォトトランジスタの基板の表面を乾燥させる。
- 8) フォトレジストを表面に塗布した InGaP/GaAs HPT の基板を、ベーク温度を 85°C に設定したホットプレートの上に載せ、60 s ベークする。
- 9) ベークが終わったら、フォトレジストを表面に塗布した InGaP/GaAs HPT の基板をベーク炉から取り出し、マスクアライナー (PEM-800、ユニオン光学もしくはズース・マイクロテック)の試料ホルダの上に設置する。
- 10) マスクアライナーにマスクを取り付け、コンタクトギャップ距離を 0 μm 、アラインギャップを 50 μm 、露光時間を 4.0 s (PEM-800、ユニオン光学の場合)、ソフトコンタクト、アラインギャップを 30 μm 、露光時間を 2.5 s (ズース・マイクロテックの場合)に設定して、マスク合わせを行い、フォトレジストを表面に塗布した InGaP/GaAs HPT の基板を露光する。
- 11) 露光した後、フォトレジストを表面に塗布した InGaP/GaAs HPT の基板を、ベーク温度を 100°C に設定したホットプレートの上に載せ、70 s ベークする。
- 12) ベークが終わったら、フォトレジストを表面に塗布した InGaP/GaAs HPT の基板を現像液 (MF-320 DEVELOPER、ROHM AND HAAS ELECTRONIC MATERIALS)に 4 分間浸し、現像する。
- 13) 現像が終わったら、フォトレジストを表面に塗布した InGaP/GaAs HPT の基板を脱イオン化水で洗浄する。窒素ガンで窒素をフォトレジストが塗布された表面の InGaP/GaAs HPT の基板に吹き付け、フォトレジストを表面に塗布した InGaP/GaAs HPT の基板の表面を乾燥させる。

以上、InGaP/GaAs HPT のフォトレジストの逆メサパターンの作製が完成する。

3.3.2 電極形成

電極は、電子ビーム蒸着法(旧 E-Beam 蒸着装置・新 E-Beam 蒸着装置)及び抵抗加熱蒸着法(新 E-Beam 蒸着装置)を用いて形成した。本研究で用いた電極材料及び膜厚を表 3.2 に示す。

表 3.2 各電極材料と膜厚

	電極材料	ハースラナ材料	膜厚[Å]	蒸着方法
エミッタ電極 (n 電極)	Ti	Ta ハースラナ	500	電子ビーム蒸着(旧 E-Beam 蒸着装置)
	Au	Ta ハースラナ、 Al ₂ O ₃ ハースラナ	4500	電子ビーム蒸着(旧 E-Beam 蒸着装置)
ベース電極 (p 電極)	Ti	Ta ハースラナ	200	電子ビーム蒸着(旧 E-Beam 蒸着装置)
	Pt	Ta ハースラナ、 C ハースラナ	200	電子ビーム蒸着(旧 E-Beam 蒸着装置)
	Au	Ta ハースラナ、 Al ₂ O ₃ ハースラナ	4600	電子ビーム蒸着(旧 E-Beam 蒸着装置)
コレクタ電極 (n 電極)	Ni	Ta ハースラナ、 Al ₂ O ₃ ハースラナ	50	電子ビーム蒸着(新 E-Beam 蒸着装置)
	AuGe (Ge:12%)	W ボート	400	抵抗加熱蒸着(新 E-Beam 蒸着装置)
	Ni	Ta ハースラナ、 Al ₂ O ₃ ハースラナ	300	電子ビーム蒸着(新 E-Beam 蒸着装置)
	Au	Ta ハースラナ、 Al ₂ O ₃ ハースラナ	4250	電子ビーム蒸着(新 E-Beam 蒸着装置)

以下に電極形成の手順の詳細を説明する。

- (1) 電極パターンをフォトリソグラフィにより形成する。
- (2) 蒸着チャンバ内に各電極材料をセットする。抵抗加熱蒸着の材料(AuGe)は電子秤で 1 g 程度量り、チャンバ内の W ボート上にセットする。
- (3) 蒸着するサンプルをサンプルフォルダにアルミテープで貼り付ける。
- (4) チャンバを密閉し、真空引きを開始する。10⁻⁶ Torr 以下になるまで真空引きを行なう。
(旧 E-Beam 蒸着装置：6 時間以上必要、新 E-Beam 蒸着装置：5 時間以上必要)
- (5) 真空度が、10⁻⁶ Torr 以下になったことを確認し、蒸着を開始する。
- (6) 蒸着が終了したら、リフトオフを行う。リムーバをホットプレートの 70℃であらかじめ温めて置き、ホットリムーバ内にサンプルを入れる。
- (7) 2 時間程度浸しておくとも余分な電極が浮いてくるので、電極とサンプルの間に注射器を用いて水圧をかけ、リフトオフを行う。
- (8) リフトオフ後は、アセトン 5 min、エタノール 5 min で順に洗浄し、最後に純水(3 回、30 秒/回)でリンスを行い、N₂ ガスで乾燥する。

3.3.3 エッチング

InGaP/GaAs HPT の作製プロセスにおいて、本研究ではウェットエッチングによる通常のメサプロセスを用い、HPT を作製した。InGaAs 及び GaAs のエッチング溶液として H_3PO_4 系溶液、 NH_4OH 系溶液、InGaP のエッチング溶液に HCl を用いた。 HCl は GaAs と InGaP で選択比が 1000 倍以上と報告されており、GaAs と InGaP の選択的エッチングが可能である。GaAs のエッチングは、反応律速によるエッチングが実現でき、攪拌の有無、パターン効果のないエッチングが可能である。それに対し、InGaP のエッチングは困難である。InGaP のエッチング時には気泡が発生し、その気泡が基板に付着し、削り残しのムラが生じることがある。その影響が深刻な場合、デバイスの動作が得られず問題となる。従来、InGaP のエッチング溶液には、 $\text{HCl} : 15\text{H}_3\text{PO}_4$ の混合溶液を用いてきたが、本研究では、削り残しを防ぐために HCl のみで InGaP のエッチングを行った。 HCl でのエッチング速度はかなり速いが、一気に InGaP 層を削りきってしまうために気泡による影響が生じにくい。

以下に本研究でエッチング溶液及び溶液の割合とエッチングレートを示す。

表 3.3 エッチング溶液及び溶液の割合とエッチングレート

エッチング層	エッチング溶液及び溶液の割合	エッチングレート (R.T.)
InGaAs 層	$\text{H}_3\text{PO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O} = 3 : 1 : 25$	2000 Å/min 程度
GaAs 層	$\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O} = 3 : 1 : 150$	2000 Å/min 程度
GaAs 層	$\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O} = 3 : 1 : 100$	3000 Å/min 程度
InGaP 層	HCl	

次にエッチングの手順を示す。

- (1) メスシリンダで各溶液を量り、エッチング溶液を作る。
- (2) 磁気を帯びた攪拌子ビーカに入れ、スタラ上に置き、よく攪拌する。
- (3) サンプルをピンセットで水平に持ち、エッチングを行う。
- (4) エッチング後は純水でエッチングの進行を止め、純水でリンスし N_2 ガスで乾燥する。
- (5) エッチング終了後、ビーカにリムーバにサンプルを浸し、レジストを除去する。
- (6) 別のビーカに特級アセトン、特級エタノールを準備し、順に洗浄を行い、最後に水洗する(3回、30秒/回)。
- (7) 光学顕微鏡を用いて表面状態を観察し、レジスト等の残留物が無いか確認する。レジスト残留物が存在した場合、(5)からやり直す。

参考文献

[3.1] M. T. Fresina, Q. J. Hartmann, S. Thomas, D. A. Ahmari, D. Caruth, M. Feng, and G. E. Stillman, "InGaP/GaAs HBT with novel layer structure for emitter ledge passivation," Proc. IEDM, 1996, p.207.

- [3.2] M. T. Fresina, Q. J. Hartmann, and G. E. Stillman, "Selective self-aligned emitter ledge formation for heterojunction bipolar transistor," *IEEE Electron Device Lett.* 17, 555 (1996).
- [3.3] J. Gillespie, C. Bozada, J. Sewell, C. Cerny, G. DeSalvo, R. Dettmer, J. Ebel, T. Jenkins, K. Nakano, C. Pettiford, T. Quach, D. Via, R. Welch, "Passivated InGaP/GaAs heterojunction bipolar transistor technology using Pt/Ti/Pt/Au base contacts," *Proc. IEEE Cornell Conf. Adv. Concepts in High Speed Semicond. Devices and Circuits*, 1997, p.99.
- [3.4] B. P. Yan and E. S. Yang, "A self-aligned structure AlGaAs/GaAs HBT's using Silicon Nitride sidewall technique," *Proc. Electron Devices Meeting*, 2000, p.86.
- [3.5] N. Hayama and K. Honjo, "Emitter size effect on current gain in fully self-aligned AlGaAs/GaAs HBT's with AlGaAs surface passivation layer," *IEEE Electron Device Lett.* 11, 388 (1990).
- [3.6] N. Hayama, A. Okamoto, M. Madihian, and K. Honjo, "Submicrometer fully self-aligned AlGaAs/GaAs heterojunction bipolar transistor," *IEEE Electron Device Lett.* 8, 246 (1987).

第4章 InGaP/GaAs ヘテロ接合フォトトランジスタの測定及び特性

作製された HPT の動作には、ベースを開放する 2 端子、HBT のようにベース電流による 3 端子動作があるが、高い利得が得られる 3 端子動作を行った[4.1]。作製された HPT のエミッタ接地の DC 特性を半導体パラメータアナライザ(HP4155A)により行った。

半導体パラメータアナライザでは、それぞれの端子をアース、電流制御、電圧制御に設定することができ、測定範囲を指定し、測定を行う。

4.1 暗状態 HPT の特性

一般に、暗状態の 3 端子動作の HPT の特性は、HBT の特性と同様であるが、本研究における HPT は、受光面積を大きくしており、通常の HBT の特性とは異なる可能性もあるため、暗状態の場合、あえて HBT の特性とはせず、HPT の特性とした。暗状態 HPT の特性は電流利得 β より評価される。

エミッタ接地の場合、HBT/HPT の性能はコレクタ電流の飽和領域で一般に式 (4-1) に示される電流利得 β で評価される。

$$\beta = \frac{I_c}{I_B} \quad (4-1)$$

ここで、 I_B はベース電流であり、 I_c はコレクタ電流である。

4.2 光照射状態 HPT の特性

光通信分野での HPT の応用では、レーザーの様な単色光に対する応用が重要となり、光学利得で HPT 特性を評価する[4.2]-[4.9]。本研究では、HPT の白色光検出器への応用を目的とするため、光照射には照射光強度を一定とした PHILIPS 製のハロゲンランプ (電圧 15 V、強度 150 W) を使用した。リングライトガイドを用いてランプの照射領域直径 74 mm 内の照射強度が均一になるようにした。実験では、同光源を用い、作製された HPT のエミッタ接地のコレクタ電流を各ベース電流において半導体パラメータアナライザ(HP4155)により測定した。HPT 及び第 6 章で述べる太陽電池駆動 HPT の光源としてデバイス全体を均一に照射できる顕微鏡用のリングライトガイド (図 6.24 に示す) を用いたが、交流電源によるコレクタ光電流の振動が見られた。しかしながら、その振幅は、平均値に比べて小さいため、無視し結果の解析・考察を行った。

一般に HPT の光学利得 G は単色光の場合、量子効率を 100% と仮定して式(4-2)に示すように、単位時間内に照射される光子数 n_{ph} に対するコレクタに収集された電子の数 n_e の割合で示される。

$$G = \frac{n_e}{n_{ph}} = \frac{\left(\frac{\Delta I_c}{q} \right)}{\left(\frac{P_{in}}{\frac{hc}{\lambda}} \right)} \quad (4-2)$$

$$= \frac{hc}{q\lambda} \bullet \frac{\Delta I_c}{P_{in}}$$

ここで、 h はプランク定数、 c は光速、 q は電荷素量、 λ は入力光波長、 P_{in} は入力光強度、 ΔI_c は暗状態(Dark)と光照射状態(Light)の出力電流(コレクタ電流)の差であり、すなわち光照射によるコレクタ電流の増加分である。照射光の強度が一定であることから、 P_{in} が一定であると仮定すると、コレクタ電流の飽和領域での ΔI_c が光学利得と等価であると考えられる。

本研究では、白色光を光源として用いているため、実際には単色光のように式(4-2)により光学利得 G を計算することはできない。しかし、白色光のスペクトルに含まれる各波長での量子効率を100%とし、生成されたキャリアの収集効率はHBTの特性のみに依存し、波長には依存せず、また各波長での光学利得は照射強度に依存しないと仮定すると、白色光の光学利得は、単色光の光学利得と同じと考えることができる。

具体的には、白色光のスペクトルに含まれる波長を $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$ とする。各波長での単位時間内に照射されるフォトン数を $n_{ph}(\lambda_1), n_{ph}(\lambda_2), n_{ph}(\lambda_3), \dots, n_{ph}(\lambda_n)$ とし、各波長の照射によりコレクタで単位時間内に収集された電子数を $n_e(\lambda_1), n_e(\lambda_2), n_e(\lambda_3), \dots, n_e(\lambda_n)$ とする。また、波長 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$ により得られた光学利得 $G_1, G_2, G_3, \dots, G_n$ は、それぞれ以下のようになる。

$$G_1 = \frac{n_e(\lambda_1)}{n_{ph}(\lambda_1)}$$

$$G_2 = \frac{n_e(\lambda_2)}{n_{ph}(\lambda_2)}$$

$$G_3 = \frac{n_e(\lambda_3)}{n_{ph}(\lambda_3)}$$

⋮

$$G_n = \frac{n_e(\lambda_n)}{n_{ph}(\lambda_n)} \quad (4-3)$$

白色光の場合、単色光と同様に単位時間に HPT に照射された全フォトン数 n_{ph} に対するコレクタに収集された電子の総数 n_e の割合により光学利得 G は定義されるので、以下のように計算される。

$$\begin{aligned} G &= \frac{n_e}{n_{ph}} = \frac{n_e(\lambda_1) + n_e(\lambda_2) + n_e(\lambda_3) + \dots + n_e(\lambda_n)}{n_{ph}(\lambda_1) + n_{ph}(\lambda_2) + n_{ph}(\lambda_3) + \dots + n_{ph}(\lambda_n)} \\ &= \frac{G_1 n_{ph}(\lambda_1) + G_2 n_{ph}(\lambda_2) + G_3 n_{ph}(\lambda_3) + \dots + G_n n_{ph}(\lambda_n)}{n_{ph}(\lambda_1) + n_{ph}(\lambda_2) + n_{ph}(\lambda_3) + \dots + n_{ph}(\lambda_n)} \end{aligned} \quad (4-4)$$

以上のように、光学利得は波長に依存しないと仮定すると

$$G' = G_1 = G_2 = G_3 = \dots = G_n \quad (4-5)$$

したがって、式(4-4)は

$$\begin{aligned} G &= \frac{G' \{n_{ph}(\lambda_1) + n_{ph}(\lambda_2) + n_{ph}(\lambda_3) + \dots + n_{ph}(\lambda_n)\}}{n_{ph}(\lambda_1) + n_{ph}(\lambda_2) + n_{ph}(\lambda_3) + \dots + n_{ph}(\lambda_n)} \\ &= G' \end{aligned} \quad (4-6)$$

すなわち、白色光に対する光学利得は、白色光に含まれる波長の単色光に対する光学利得と同じになる。各波長での光学利得がそれほど変化しないと仮定すると、 ΔI_C が光学利得と等価であると考えられる。式(4-2)のように一般的に光学利得は単一波長について定義されるが、本研究のように白色光の光検出器としての応用で光学利得の代わりに ΔI_C で評価する。HPT のベース面積が 0.00846 cm^2 であることを考慮すると、HPT の受光強度 P_m は 0.295 mW となる。正確には、金属電極を光は透過しないので、ベース面積ではなく、光を吸収する実効面積を考えなければならないが、金属電極側面での乱反射の影響などを考慮すると、光を吸収する実効面積を求めることは難しい。しかしながら、測定に同じ構造の HPT を用いることにより、式(4-7)より計算される受光感度の絶対値は正確に示せないものの、HPT 受光感度を比較することは可能である。一般的な光検知器の性能を示す場合に用いられる式(4-7)に示すような ΔI_C に比例する受光感度 $S \text{ [A/W]}$ により HPT の特性評価を行った。

$$\begin{aligned}
S &= \frac{\Delta I_c}{P_{in}} & (4-7) \\
&= \frac{\Delta I_c [mA]}{0.295 [mW]}
\end{aligned}$$

式(4-7)において、 P_{in} はHPTの受光強度であり、0.295 mWと一定とした。

参考文献

- [4.1] S. - W. Tan, H. - R. Chen, W. - T. Chen, M. - K. Hsu, A. - H. Lin, and W. - S. Lour, "Characterization and modeling of three-terminal heterojunction phototransistors using an InGaP layer for passivation," *IEEE Trans. Electron Devices* 52, 204 (2005).
- [4.2] C. - K. Song, S. - H. Lee, K. - D. Kim, J. - H. Park, B. - W. Koo, D. - H. Kim, C. - H. Hong, Y. - K. Kim, and S. - B. Hwang, "Optical characteristics of InGaP/GaAs HPTs," *IEEE Electron Device Lett.* 22, 315 (2001).
- [4.3] L. Y. Leu, J. T. Gardner, and S. R. Rorrest, "A high-gain, high-bandwidth $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ heterojunction phototransistor for optical communications," *J. Appl. Phys.* 69, 1052 (1991).
- [4.4] J. C. Campbell, A. G. Dentai, C. A. Burrus, and J. F. Ferguson, "InP/InGaAs heterojunction phototransistors," *IEEE J. Quantum Electron.* 17, 264 (1981).
- [4.5] H. Wang, C. Bacot, C. Chevallier, D. Ankri, "GaAs/GaAlAs heterojunction bipolar phototransistor for monolithic photoreceiver operating at 140 Mbit/s," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.* 34, 1344 (1986).
- [4.6] A. Sasaki and M. Kuzuhara, "InGaAsP-InP heterojunction phototransistors and light amplifiers," *Jpn. J. Appl. Phys.* 20, 283 (1981).
- [4.7] A. Sasaki, K. Matsuda, Y. Kimura, and S. Fujita, "High-current InGaAsP-InP phototransistors and some monolithic optical devices," *IEEE Trans. Electron Devices.* 29, 1382 (1982).
- [4.8] S. Sakai, M. Naitoh, M. Kobayashi, and M. Umeno, "InGaAsP/InP phototransistor-based detectors," *IEEE Trans. Electron Devices* 30, 404 (1983).
- [4.9] J. C. Campbell and A. G. Dentai, "InP/InGaAs heterojunction phototransistor with integrated light emitting diode," *Appl. Phys. Lett.* 41, 192 (1982).

第5章 InGaP/GaAs HPT の特性及び信頼性評価

5.1 はじめに

InGaP/GaAs HBT の温度特性はこれまで多く調べられ、報告されているが[5.1]–[5.9]、InGaP/GaAs HPT の温度特性についてはほとんど報告例がない。本研究では、白色光に対する光応答の高感度検出への応用を目的に、InGaP/GaAs HPT を作製し、300~400 K の温度範囲で InGaP/GaAs HPT の電流利得 β 及び光照射によるコレクタ電流の増加分 ΔI_C (暗状態(Dark)と光照射状態(Light)の出力電流 (コレクタ電流) の差) を測定した。また、HBT において露出した高濃度 GaAs ベース表面でのキャリアの再結合を抑制し、電流利得 β を高めるエミッタレッジパッシベーションの HPT における効果も検証した。

5.2 InGaP/GaAs HPT の温度特性

5.2.1 HPT の電気特性とエミッタレッジパッシベーションの効果

図 5.1、図 5.2 は、それぞれ暗状態、光照射状態での HPT のエミッタ接地電流–電圧特性を示す。入力としてベース電流 I_B を 10、20、30、40、50 μA と変化させ、各 I_B を固定してコレクタ・エミッタ間の電圧 V_{CE} を 0 から 1.5 V に変化させ、 V_{CE} に対するコレクタ電流 I_C を測定した結果である。電流利得 β は、図 5.3 に示すようにベース電流に依存する。HPT の場合、後で述べるようにベース電流は固定されても光照射により HPT 内部のベース電流が増加するため、光照射時には電流利得 β が定義されず、暗状態でのみ電流利得 β は定義される。

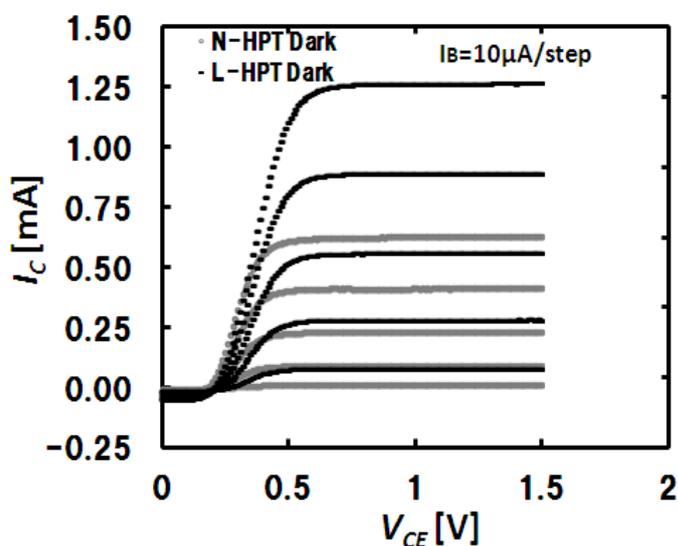


図 5.1 暗状態での N-HPT と L-HPT の電気特性

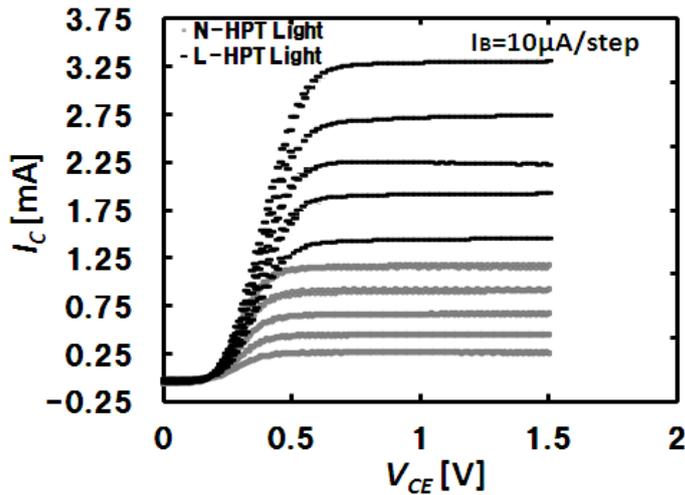


図 5.2 光照射状態での N-HPT と L-HPT の電気特性

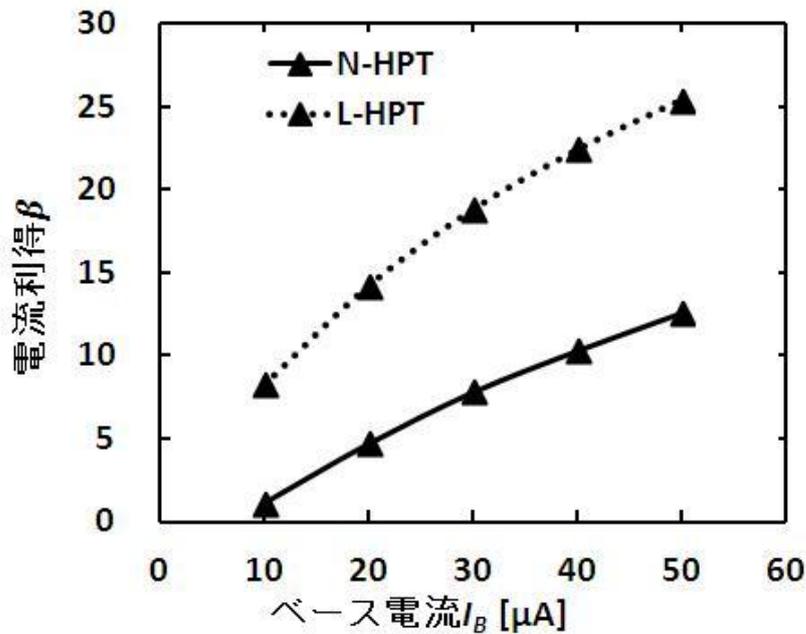


図 5.3 暗状態での HPT の電流利得 β のベース電流 I_B 依存性

L-HPT は全てのベース電流で N-HPT よりも電流利得 β が高く、N-HPT に比べると L-HPT では、ベース電流が増加するにつれ電流利得がより大きく増加することが分かる。エミッタレッジパッシベーションの InGaP/GaAs HBT への影響の詳細は、楊らにより述べられている[5.1]。高濃度カーボンドープされた GaAs 表面では表面準位密度が高く再結合が生じやすい。作製された HPT は前述のようにエミッタの周辺長が長く、高濃度の GaAs ベース層が露出した表面が空乏層内に含まれるため再結合電流が生じ、電流利得 β が低ベース電流と低エミッタ・ベース順バイアスでは低下する。一般には、エミッタ・ベース接合での再結合電流は順バイアスが大きくなると、拡散電流に比べて小さくなるため、電流利得は上昇する。

光照射時のコレクタ電流の解析に図 5.4 の Tan らの HPT の三端子等価回路を用いる[5.10]。

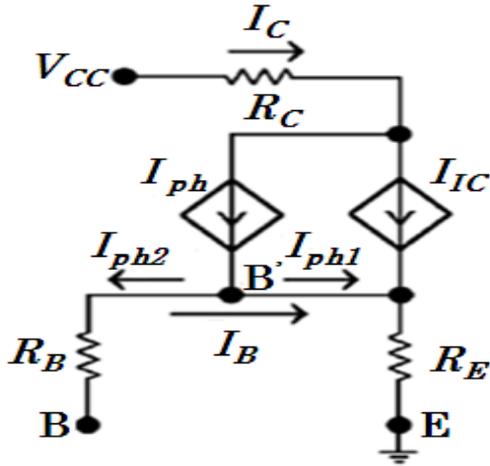


図 5.4 ベースに電流源を用いる三端子 HBT/HPT の等価回路[5.10]

ここで、 R_E はエミッタ抵抗、 R_B はベース抵抗、 R_C はコレクタ抵抗、 I_C は内部コレクタ電流、 I_{ph} はベース・コレクタ間の空乏層に生成された光電流である。暗状態と光照射状態で I_B は R_E を通し流れる。光照射状態でベース・コレクタ間の空乏層に生成された光電流 I_{ph} は B'点に流れ込み、その後 R_E と R_B に分けられるが、電流源の場合、 I_{ph2} は 0 となり、光電流 I_{ph} との全てがベース電流 I_B とともにエミッタ・ベース接合に流れ込む。したがって、光照射状態では、HPT のベース電流はベース電流とベース・コレクタ間の空乏層に生成された光電流 I_{ph} の和となり、光照射時のコレクタ電流 I_C と光照射によるコレクタ電流の増加分 ΔI_C は次の式で与えられることになる。

$$\begin{aligned} I_C &= I_{IC} + I_{ph} \\ &= \beta(I_B + I_{ph}) \times [I_B + I_{ph}] + I_{ph} \quad (5-1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta I_C &= \beta(I_B + I_{ph}) \times [I_B + I_{ph}] - \beta(I_B) \times I_B + I_{ph} \\ &= [\beta(I_B + I_{ph}) - \beta(I_B)] \times I_B + \beta(I_B + I_{ph}) \times I_{ph} + I_{ph} \quad (5-2) \end{aligned}$$

式(5-1)、(5-2)の $\beta(I_B + I_{ph})$ 、 $\beta(I_B)$ は、それぞれが $I_B + I_{ph}$ 、 I_B の値のときの暗状態での β である。図 5.3 よりベース電流の増加とともに電流利得 β は増加するので、式(5-2)の第 1 項は正となる。したがって、式(5-1)より、電流源により流すベース電流は、光照射状態も暗状態も同じであるが、光照射時にはベース・コレクタ pn 接合で生成される光電流に加えて、 $[\beta(I_B + I_{ph}) - \beta(I_B)] \times I_B + \beta(I_B + I_{ph}) \times I_{ph}$ の電流がコレクタ電流として暗状態より余分に得られることが分かる。フォトダイオードの場合の光電流 I_{ph} よりはるかに大きい光照射による電流が HPT では得られることは明らかである。

各ベース電流 I_B でコレクタ電流 I_C がコレクタ・エミッタ間の電圧 V_{CE} に依存せず、飽和する領域で測定された ΔI_C 及び S を図 5.5 に示す。

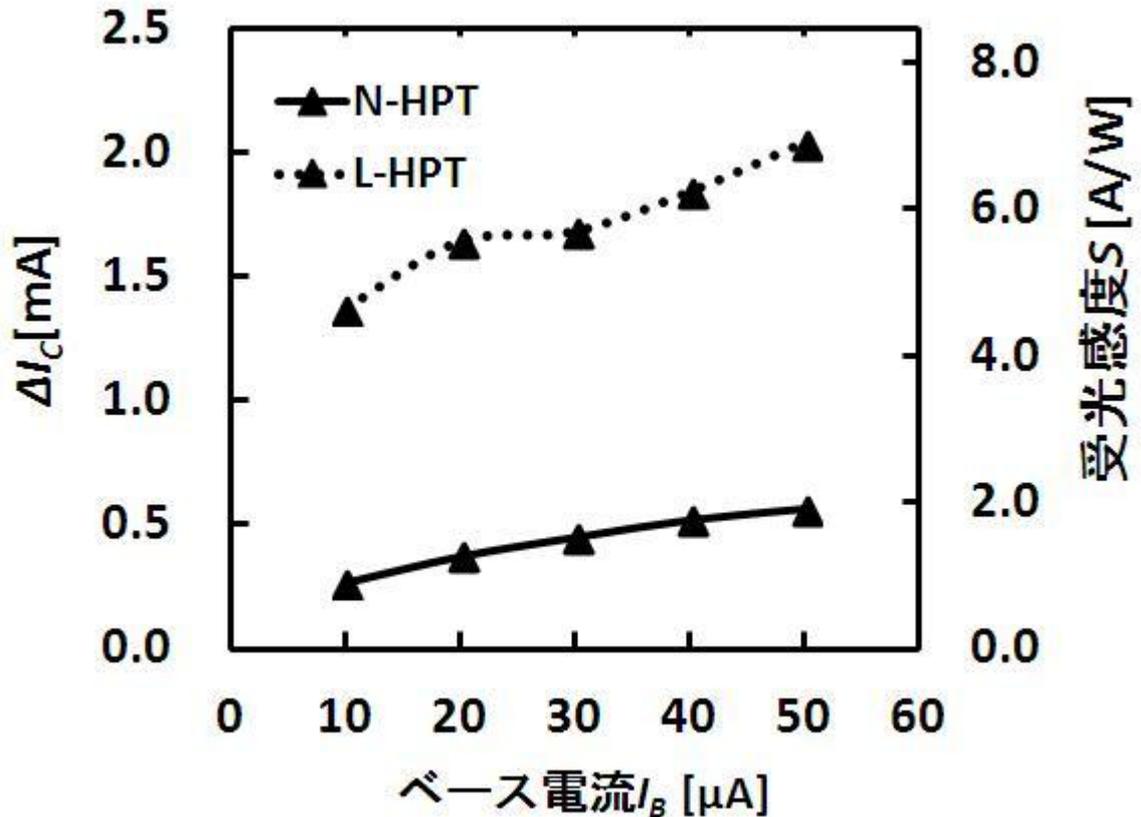


図 5.5 HPT の ΔI_C 及び S のベース電流 I_B 依存性

ベース電流 I_B が増加するにつれ、 ΔI_C は増加する。L-HPT の ΔI_C は、ベース電流 $50 \mu\text{A}$ で N-HPT の 4 倍近い。ベース・コレクタの空乏層で生成される光電流は、L-HPT も N-HPT も同じであるとしても、コレクタに流れる全電流は、L-HPT の方が大きく、式(5-2)の第 1、2 項が N-HPT より大きいことによる。興味深いのは、暗状態の L-HPT の電流利得 β はベース電流 $10 \mu\text{A}$ のときは、N-HPT のベース電流 $50 \mu\text{A}$ の電流利得 β より小さいが、L-HPT の ΔI_C は、ベース電流 $10 \mu\text{A}$ でも N-HPT のベース電流 $50 \mu\text{A}$ の ΔI_C より 2 倍以上になっている点である。すなわち、HBT 以上に、HPT では、エミッタレッジパッシベーションが大変有効である。

5.2.2 HPT の温度特性

両 HPT の温度特性について解析する。まず、暗状態で 300 から 400 K の温度範囲で HPT の V_{CE} を 1.5 V に固定し、ベース電流 I_B を $10, 20, 30, 40, 50 \mu\text{A}$ と変化させ、各温度でのコレクタ電流 I_C を測定した。 V_{CE} が 1.5 V のときは、いずれの温度でも各ベース電流 I_B でコレクタ電流 I_C がコレクタ・エミッタ間の電圧 V_{CE} に依存せず、飽和する領域である。また、いずれの温度でも電流利得 β はベース電流 I_B が増加するとともに増加したので、温度変化については、最小と最大のベース電流 I_B 、すなわち 10 と $50 \mu\text{A}$ の場合の結果のみを図 5.6 に示す。

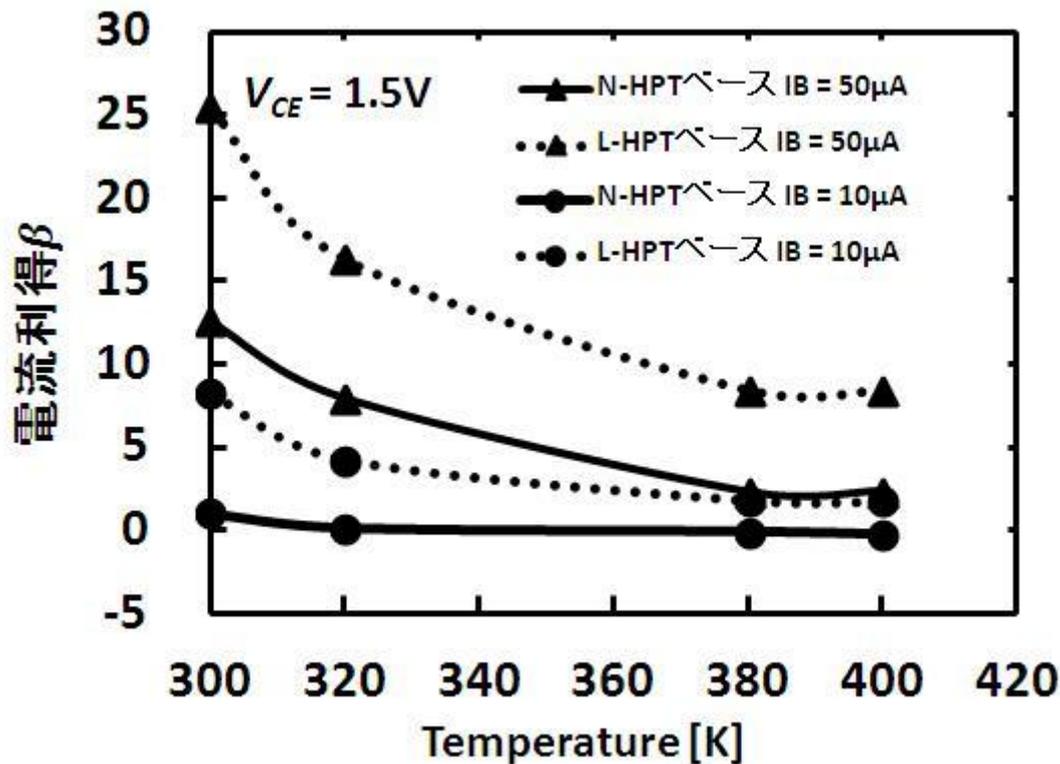


図 5.6 暗状態で HPT での電流利得の温度特性

L-HPT、N-HPT ともに温度の上昇とともに電流利得 β は減少するが、380K 以上では両 HPT の電流利得 β は温度にあまり依存しない。ベース電流 I_B が大きいほど温度の上昇に対する減少は大きく、N-HPT のベース電流 I_B 50 μA の電流利得 β は 300 K では、L-HPT のベース電流 10 μA の電流利得 β より大きいですが、380 K では、L-HPT のベース電流 10 μA の電流利得 β と同じになってしまう。InGaP/GaAs HBT の電流利得 β の温度上昇に対する減少は、これまでも報告されており [5.1], [5.2]、高温になるとエミッタ・ベース接合での価電子帯オフセットを超えてエミッタに注入される正孔が増え、エミッタ注入効率が低くなるからである [5.3]。しかし、同じベース電流では、全ての温度で、L-HPT の電流利得 β は N-HPT の電流利得 β より高くなっており、エミッタレッジパッシベーションは高温での HPT の動作においても電流-電圧特性を改善するのにも有効であることが分かった。Lin ら [5.3] は温度の上昇とともに、AlGaAs/GaAs HBT、InGaP/GaAs HBT 共に電流利得 β が減少すると報告した。InGaP/GaAs HBT の電流利得 β の熱係数は -0.126/K であり、AlGaAs/GaAs HBT の電流利得 β の熱係数 -0.345/K より小さい。

ベース電流 I_B 10 と 50 μA の両 HPT の ΔI_C 及び S の温度依存性を図 5.7 に示す。

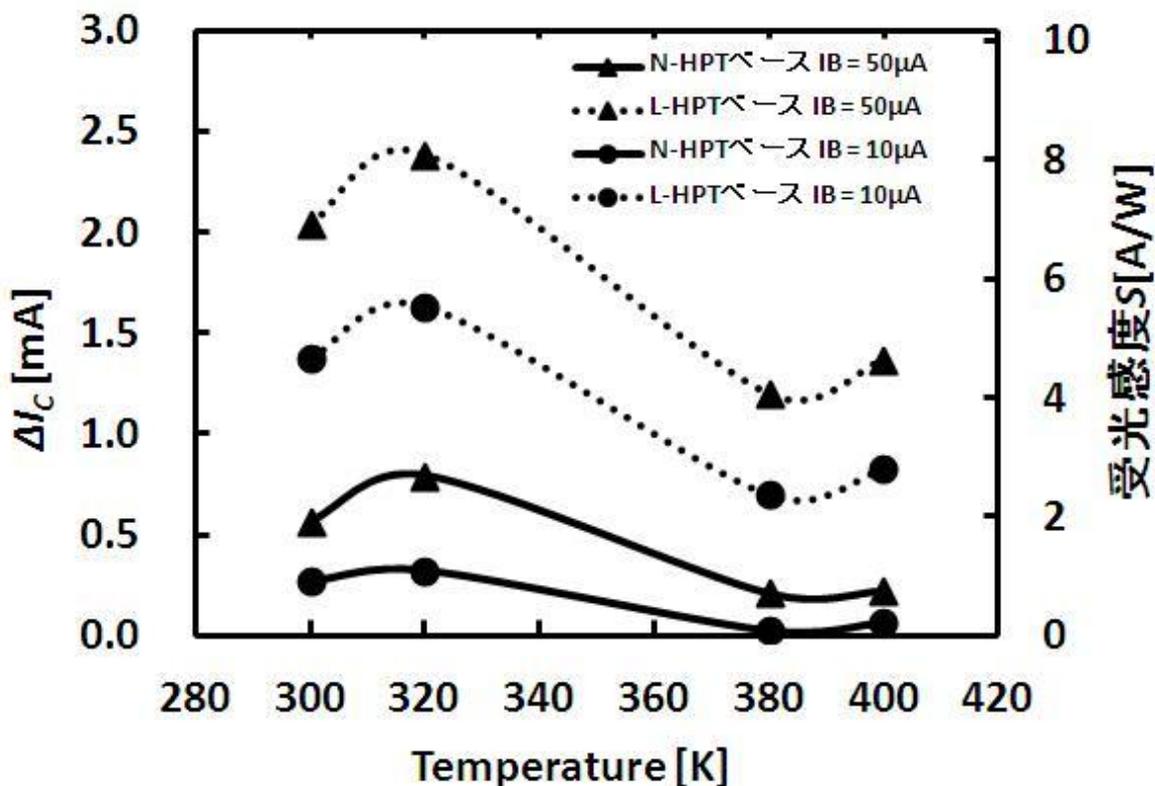


図 5.7 HPT の ΔI_C の温度特性及び受光感度 S

図の全ての曲線において ΔI_C は 320 K まで増加し、その後減少し、また 380 K になると再び増加する傾向がある。温度が上昇すると、少数キャリアの寿命が長くなるのでコレクタ空乏領域外で生成されたキャリアも光電流となる。したがって、式(5-1)の I_{ph} が増加する。しかし、温度の上昇とともに暗状態での電流利得 β が減少するが、 I_{ph} の増加は ΔI_C を増加させる。320 K までは、 I_{ph} の増加が、電流利得 β の減少を上回り、 ΔI_C が増加するが、それ以上の温度では、 I_{ph} の増加が少なく電流利得 β による減少が I_{ph} の増加を上回ると考えられる。また、380 K では、図 5.6 に見られるように電流利得 β はあまり変化しないため、 I_{ph} の増加が ΔI_C を若干増加させる。しかしながら、温度上昇により ΔI_C が減少しても全ての温度でエミッタレッジパッシベーションは高い ΔI_C を保つのに有効であることは、図 5.7 から明らかである。

5.3 InGaP/GaAs HPT 特性への電氣的ストレスの影響

InGaP/GaAs HBT に対してエミッタレッジパッシベーションの及ぼす電氣的ストレスの影響はこれまで多く調べられ、報告されているが[5.2], [5.5]-[5.9]、InGaP/GaAs HPT に対してエミッタレッジパッシベーションの及ぼす電氣的ストレスの影響についてはほとんど報告例がない。本研究では、室温及び高温で電氣的ストレス印加前後、HPT の電流利得 β 及び ΔI_C を測定した。室温でのストレス実験は室温で1時間ストレスの電流密度を 37 A/cm^2 に保った実験である。HBTs のストレス実験と比べると、HPTs のストレス実験でのストレスは 2~3 桁小さい。HPT の面積が大きいため、電流源の電流上限によって電流密度が小さくなる。また、面積が大きいため、発熱量が大きくなり、測定中の温度が上昇してしまう。以上の理由からストレスの電流密度を小さ

く設定した。室温でのストレス印加後の HPT を 420 K の高温で測定する。また、ストレスによる劣化を加速するために、420 K で高温でのストレス実験を両 HPT に与えた。高温でのストレスの電流密度を 37 A/cm^2 とし、ストレス時間を極度な劣化を行さないように 15 分に短くした。N-HPT と L-HPT の 2 種類の HPT を作製した。同光源を用い、作製された HPT のエミッタ接地のコレクタ電流を各ベース電流において半導体パラメータアナライザ(HP4155A)により測定した。ストレスの電流密度 $J_c 37 \text{ A/cm}^2$ に相当するコレクタ電流 $I_c 60 \text{ mA}$ を保ち、室温で 1 時間、高温 420 K で 15 分間電氣的ストレスは HPT に与えられた。実験のために、7 個の N-HPT と 7 個の L-HPT を作製した。まずは室温での電氣的ストレス実験のため、N-HPT、L-HPT をそれぞれ 1 個ずつ選んだ。電氣的ストレスはストレスを与えていないフレッシュな試料に与えた。

5.3.1 室温での電氣的ストレスの影響

図 5.8 は暗状態での DC 電流利得 β を示す図である。図の中に、各ベース電流に対する平均値とエラーバーも計算された。このエラーバーは標準偏差 σ であり、平均 $\pm \sigma$ を表す。室温での電流ストレス実験を行うために、7 個の N-HPT と 7 個の L-HPT の中にそれぞれ 1 個が選ばれた。図 5.9、図 5.10 は、それぞれストレス印加前後、暗状態での選ばれた N-HPT 及び L-HPT のエミッタ接地電流－電圧特性を示す。入力としてベース電流 I_B を 5、10、15、20、25 μA と変化させ、各 I_B を固定してコレクタ・エミッタ間の電圧 V_{CE} を 0 から 1.5 V に変化させ、 V_{CE} に対するコレクタ電流 I_c を測定した結果である。図 5.11、図 5.12 は、それぞれストレス印加前後、光照射状態での選ばれた N-HPT 及び L-HPT のエミッタ接地電流－電圧特性を示す図である。

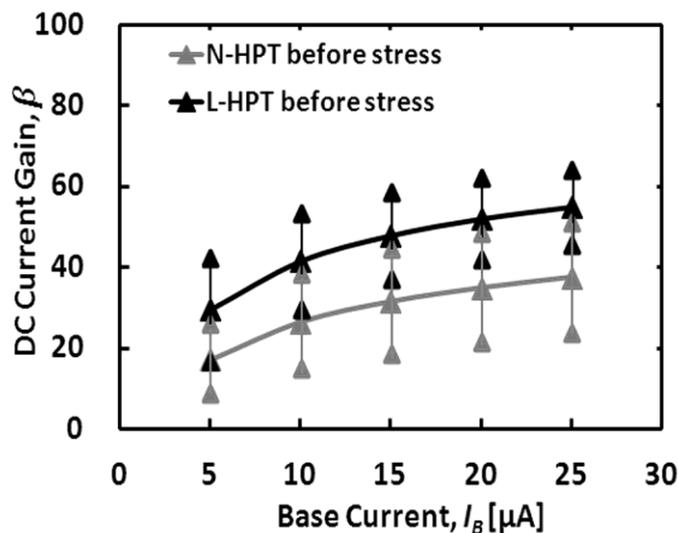


図 5.8 7 個 N-HPT と 7 個 L-HPT の電流利得 β の平均値とその標準偏差のベース電流依存性

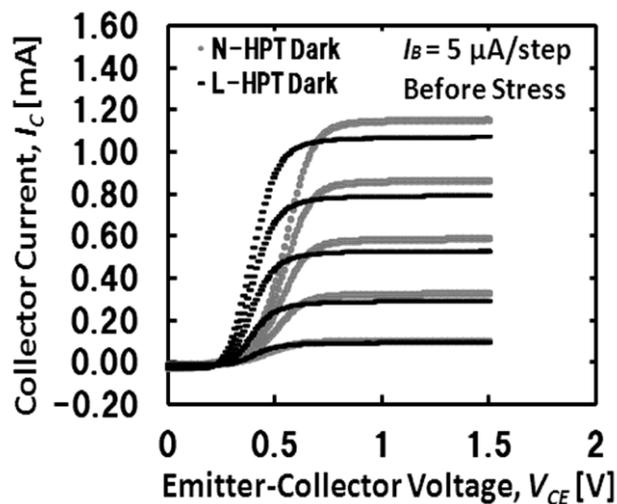


図 5.9 室温でストレス印加前の暗状態での電気特性

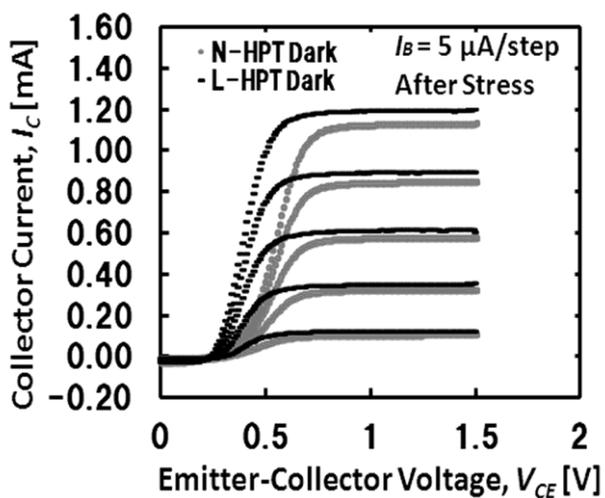


図 5.10 室温でストレス印加後の暗状態での電気特性

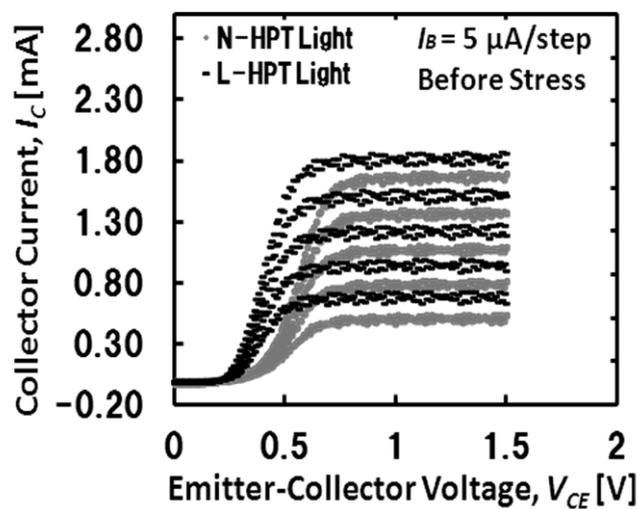


図 5.11 室温でストレス印加前光照射状態での電気特性

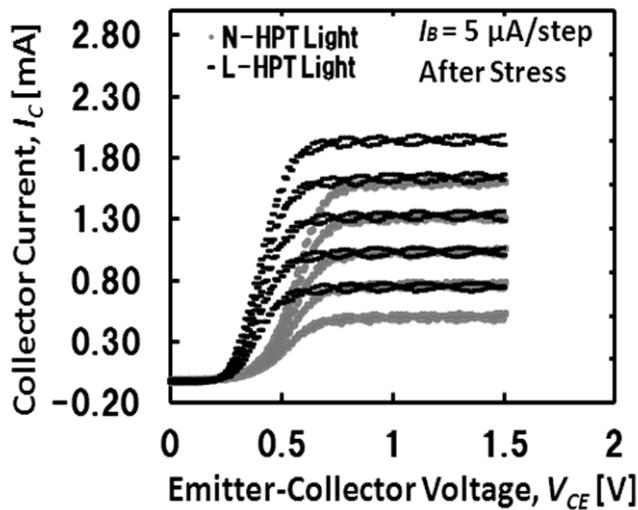


図 5.12 室温でストレス印加後光照射状態での電気特性

L-HPT、N-HPT とともに、暗状態も光照射状態もストレス前後電気特性の変化があまり見えなかった。図より、L-HPT のオフセット電圧 V_{CE} は N-HPT のオフセット電圧より小さいことが分かる。これは、図 1.1 に示すように、エミッタレッジパッシベーションが L-HPT のエミッタ面積 A_E を増加させるためである。McAlister ら [5.11] と Lee ら [5.12] はオフセット電圧 V_{CE} が $\ln(A_C/A_E)$ に比例すると報告した。ここで、 A_C はコレクタ面積である。エミッタレッジがエミッタ面積を増加させ、 A_C/A_E は減少する。そのため、減少した A_C/A_E はオフセット電圧 V_{CE} を小さくさせる。電気特性の変化を明確するために、ストレス印加前後の電流利得 β 及び ΔI_C のベース電流依存性をそれぞれ図 5.13、図 5.14 に示す。

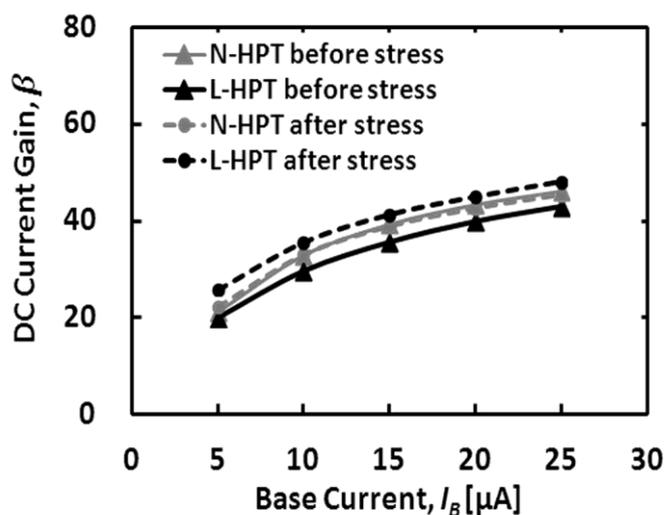


図 5.13 室温でストレス印加前後 HPT の電流利得 β のベース電流依存性

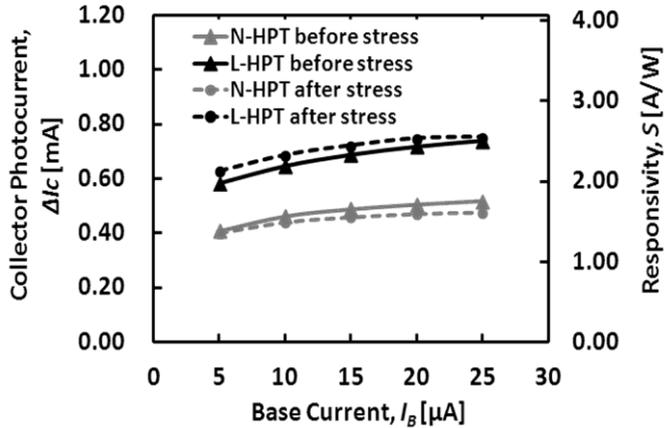


図 5.14 室温でストレス印加前後 HPT の ΔI_c 及び S のベース電流依存性

図 5.13 より、ベース電流が増加するにつれ電流利得が大きく増加することが分かる。また、電氣的ストレス及びエミッタレッジパッシベーションは InGaP/GaAs HPT にあまり影響を与えないこともわかる。これは、印加されたストレスの電流密度 J_c が 37 A/cm^2 であり、通常の HBTs のストレスの電流密度と比べると 2~3 桁程度小さいためである。電流利得 β と異なり、L-HPT の ΔI_c は N-HPT の ΔI_c より高いことが示された。図 5.14 に示すように、エミッタレッジパッシベーションの効果は光応答において増加する。光照射時のコレクタ電流の解析に Tan らの HPT の三端子等価回路を用いて「HPT の受光感度とエミッタレッジパッシベーションの効果」で説明されたように理解できる[5.10]。

次に、室温でストレス印加された HPT を高温の 420 K で測定する。また、比較のためストレス印加されていない HPT も高温の 420 K で測定し、ストレス印加された HPT 及びストレス印加されていない HPT の電流利得 β と ΔI_c を計算した。その結果を図 5.15、図 5.16 にそれぞれ示す。

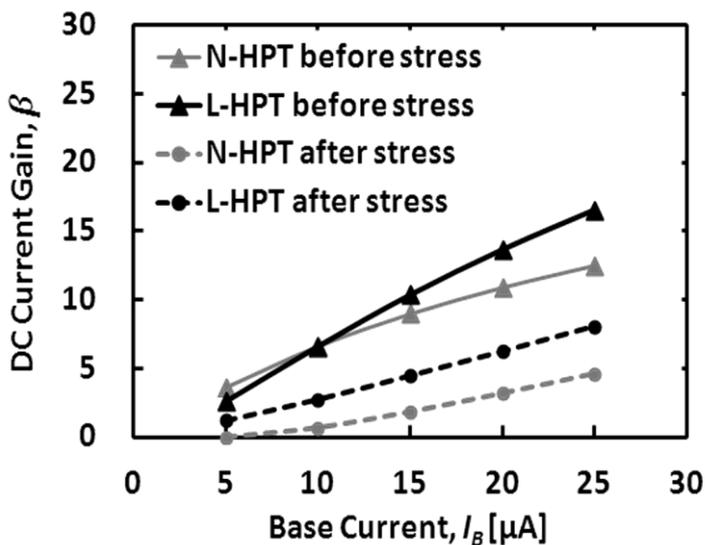


図 5.15 室温でのストレス印加前後 420K で測定した HPT の電流利得 β のベース電流 I_B の依存性

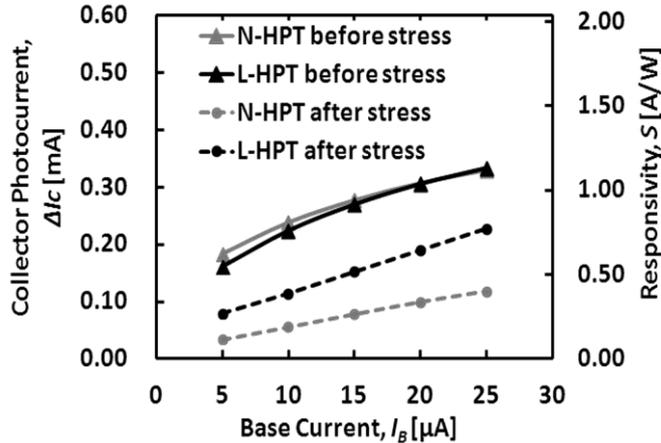


図 5.16 室温でのストレス印加前後 420 K で測定した HPT の ΔI_C のベース電流 I_B の依存性

室温での電氣的ストレスを印加しないにも関わらず、高温の 420 K で両 HPT の β 及び ΔI_C は減少する。また、室温では L-HPT の ΔI_C は N-HPT の ΔI_C より高いが、高温の 420 K で両 HPT の ΔI_C はほとんど同じ値である。このことは、高温の影響がエミッタレッジパッシベーションによるエミッタ周辺での表面再結合の抑制効果より大きいことによる。図 5.13、図 5.14 に見られるようにストレスの電流密度は室温での両 HPT の電氣特性に影響を与えるのに小さすぎるが、図 5.15、図 5.16 に示すように 420 K で電氣的ストレスにより劣化は激しくなった。高温での電氣的ストレスにより HPT の特性の劣化はストレス時の欠陥生成によるからである。そこで、欠陥生成のメカニズムについて解析する。2 種類の欠陥生成があり、一つ目は InGaP/GaAs ヘテロ界面での欠陥生成であり、二つ目はエミッタ周辺での欠陥生成である [5.7], [5.8]。InGaP/GaAs ヘテロ界面での欠陥生成は遅いプロセスであり、主に 1 時間程度長いストレスなどのような長時間ストレスによる引き起こされる [5.7], [5.8]。エミッタ周辺での欠陥生成は短いストレス時間にも関わらず、急激なストレスによる引き起こされる。

これまで、黒川らや楊らは電氣的ストレスによる InGaP/GaAs HBTs の特性劣化に関して研究しており、電氣的ストレスにより欠陥がエミッタ周辺に生成されると報告した [5.1], [5.2]。それは図 5.17 に示すようにエミッタ周辺において、高濃度カーボンドープされた GaAs ベース層と InGaP エミッタ層との格子ミスマッチによる歪がある。GaAs と InGaP は格子整合するが、GaAs が高濃度カーボンドープされると GaAs の格子が縮み、格子ミスマッチが生じる。

N-HPT、L-HPT 共に InGaP 周辺では欠陥ができやすいが、N-HPT の場合エミッタ周辺の InGaP 上に層が積み重なっており、ストレスが大きくダングリングボンドが発生しやすい。

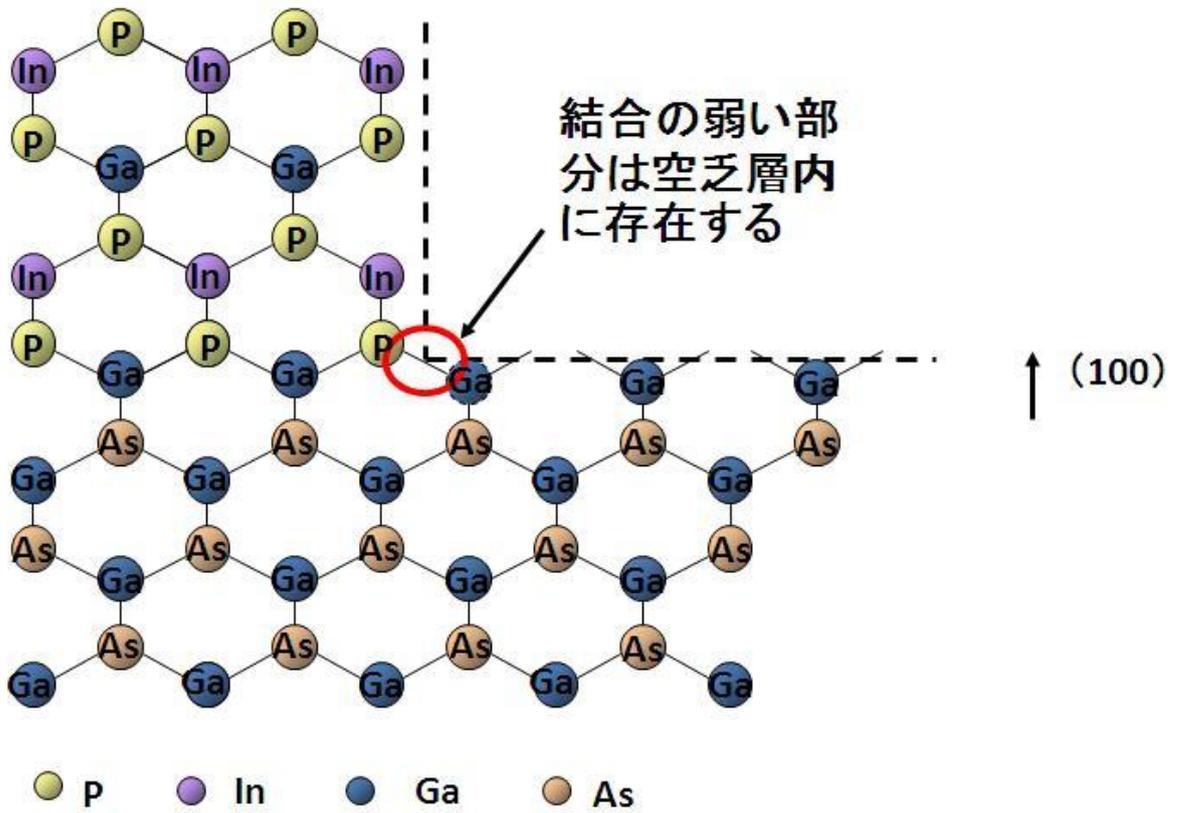


図 5.17(a) エミッタレッジパッシベーションなし HBT の GaAs と InGaP の結合界面

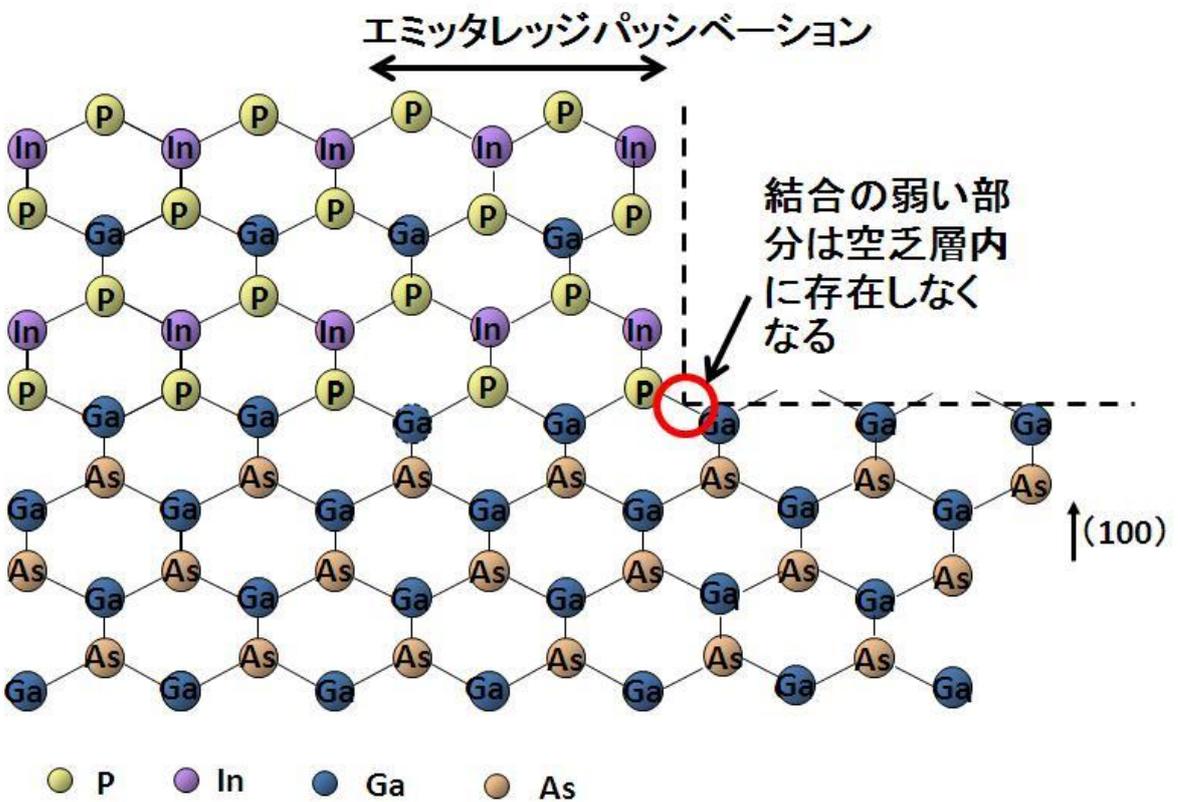


図 5.17(b) エミッタレッジパッシベーションあり HBT の GaAs と InGaP の結合界面

図 5.18 は HPT における電氣的ストレスによる欠陥生成メカニズムを示す図である。露出した高濃度カーボンドープ GaAs ベース層の表面にはダングリングボンドの欠陥が存在し、その欠陥における表面再結合がベース電流の成分となり、HPTs の電流利得 β 及び ΔI_C の減少を引き起こす。しかし、結晶成長時に水素がダングリングボンドを末端化するので、電氣的ストレス印加時それほど問題ない。図 5.17(a)の赤線で囲まれたエミッタ周辺のエミッタ・ベース界面の GaAs 表面を見ると、その部分は通常の InGaP/GaAs の積層界面における結合よりも弱い InGaP 層と結合している。電氣的ストレスを印加すると、この弱い結合はエミッタから注入された電子によって切断されることで、サブ表面空乏層内に欠陥が生じる[5.2]。この欠陥において、エミッタからベースに注入される電子とベース中の多数キャリアである正孔が再結合することで、ベース電流の成分を増加させ、HPT の電流利得 β 及び ΔI_C を減少してしまう。エミッタレッジパッシベーションを施す HPT においては、図 5.17(b)に示すように InGaP エミッタレッジによって、エミッタエッジ部分付近にある露出した高濃度カーボンドープ GaAs ベース層の表面が覆われているため、エミッタからの電子注入に影響されるようなエミッタエッジ付近に弱い結合は存在しない。電氣的ストレスを印加すると、5 μm 長さのエミッタレッジパッシベーションを行うと、結合の弱い部分は空乏層内には存在しなくなる。したがって、エミッタレッジパッシベーションは、ストレスによるベース電流の増加を抑制し、HPTs の電流利得 β と ΔI_C を保つのに有効である。

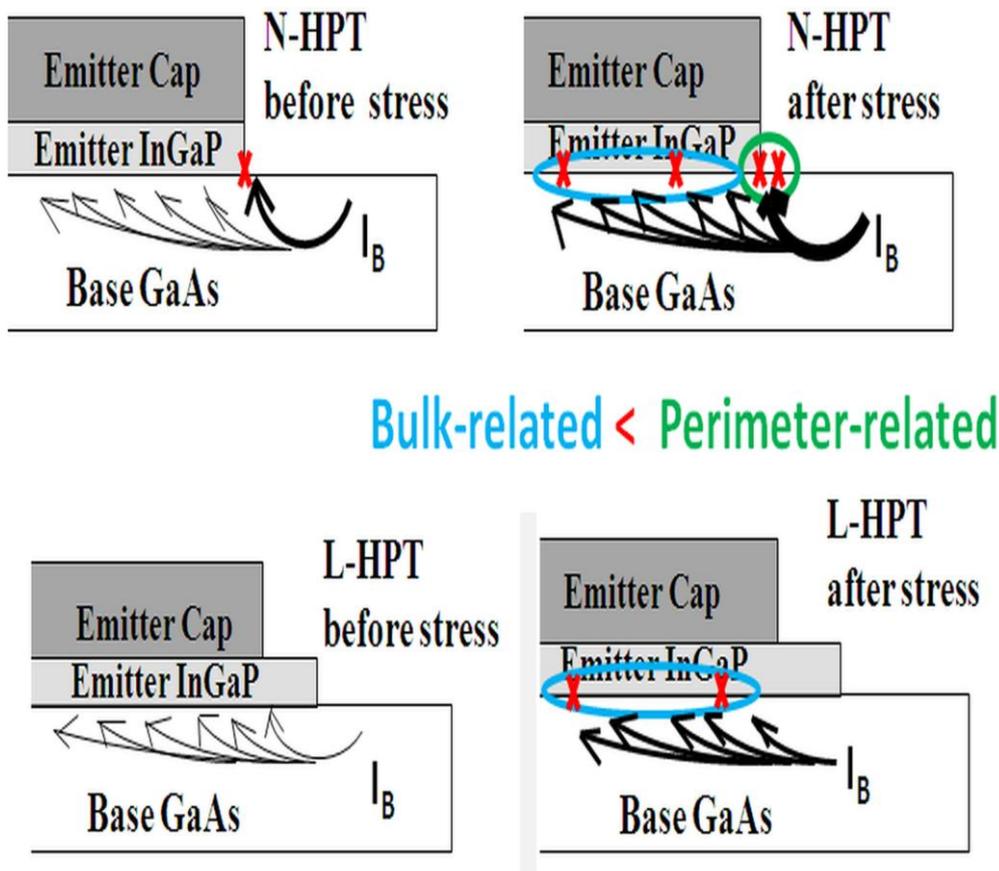


図 5.18 室温での電氣的ストレスによって欠陥生成

一方、高温になるとエミッタ・ベース接合での価電子帯オフセットを超えてエミッタに注入される正孔が増え、両 HPT においてエミッタ注入効率が低くなる [5.4], [5.13], [5.14]。エミッタ周辺での欠陥生成による劣化はエミッタレッジパッシベーションによって抑制できるが、InGaP/GaAs ヘテロ界面での欠陥生成に対してエミッタレッジパッシベーションの効果がない。そのため、長時間電氣的ストレスを印加した後は、420 K で測定した両 HPT の性能は劣化してしまふ。しかしながら、L-HPT は全てのベース電流で N-HPT よりも電流利得 β 及び ΔI_C が高いことが分かった。これは周辺での欠陥生成による劣化が L-HPT では抑制されていることによる。

5.3.2 高温の 420K での電氣的ストレスの影響

前節の「5.3.1」で説明したように、HPT に与えた電氣的ストレスとして印加されたストレスの電流密度が 37 A/cm^2 であり、HBTs に与えた通常の電氣的ストレスと比べると小さいため、室温での電氣的ストレスによる HPT の電流利得 β 及び ΔI_C の低下は見られなかった。HPT の劣化を加速するために、この節では 420 K で 37 A/cm^2 のストレスの電流密度を HPT に与える。デバイスを動作不能にしないように、ストレス時間を短くし 15 分間にした。残りの 6 個の N-HPT と 6 個の L-HPT の中から、1 個ずつの N-HPT と L-HPT を選び、420 K での電氣的ストレスを印加した。

図 5.19、図 5.20 はそれぞれ 420 K での電氣的ストレス印加の前後、室温で測定した N-HPT と L-HPT の電流利得 β と ΔI_C 及び S を示す。

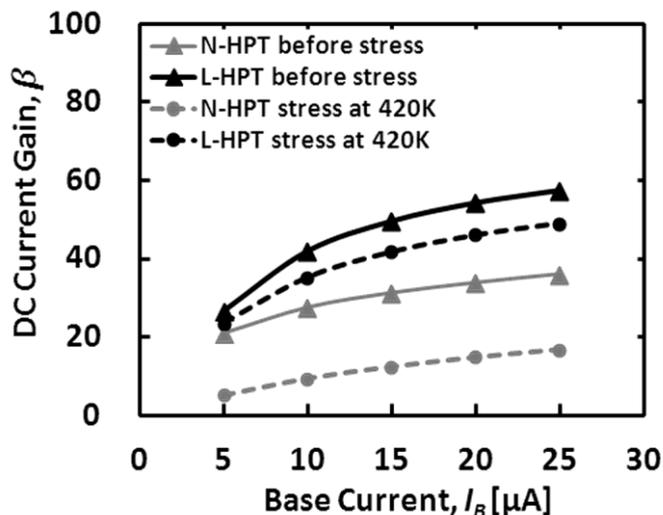


図 5.19 420 K での電氣的ストレス印加前後、室温で測定した HPT の電流利得 β

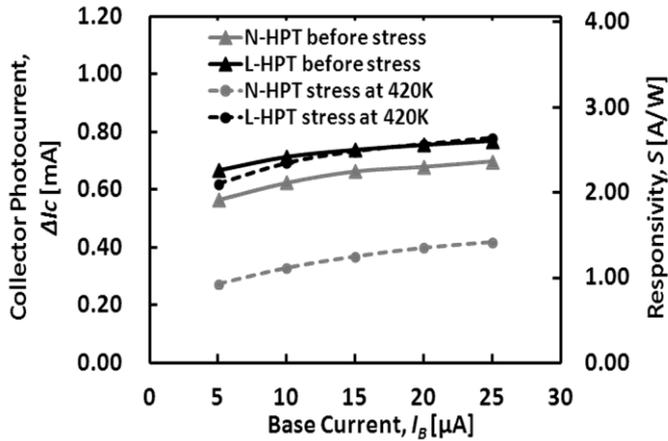


図 5.20 420 K での電氣的ストレス印加前後、室温で測定した HPT の ΔI_c 及び S

室温での電氣的ストレス印加前後の HPT の電流利得 β 及び ΔI_c を示す図 5.13 と図 5.14 と比べると、高温の 420 K での電氣的ストレスの影響が明らかに見える。N-HPT の特性は 420 K での電氣的ストレスによって激しく劣化されたことに対して、L-HPT の特性の劣化は少ないことが分かる。このことは、図 5.21 に示すように HPT において高温でのストレス時間は InGaP/GaAs ヘテロ界面での欠陥生成を引き起こすのに短すぎたことによる。一方、エミッタレッジパッシベーションは短時間の急激なストレスによる HPT の劣化を抑制するのにも有効であることが分かった。

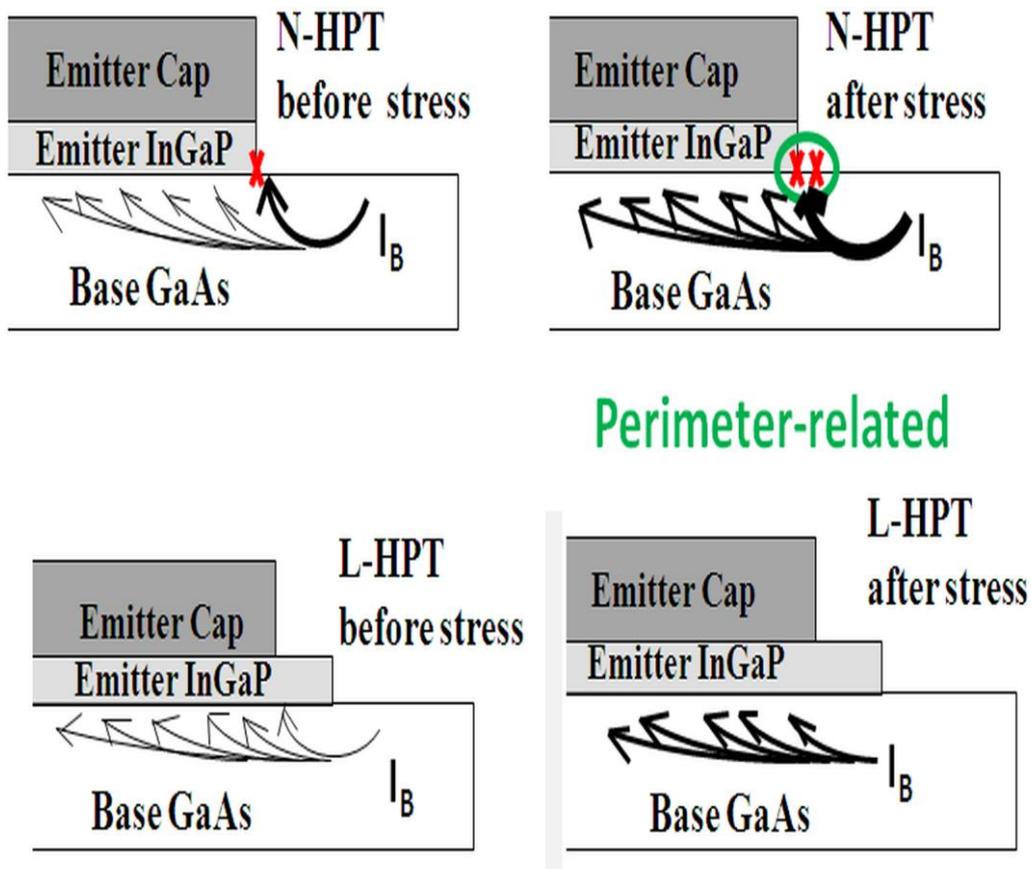


図 5.21 420 K での電氣的ストレスによって欠陥生成

次に、420 K での電氣的ストレス印加前後の 300 から 420 K の温度範囲で、両 HPT の電流利得 β と ΔI_C の測定結果をそれぞれ図 5.22、図 5.23 に示す。

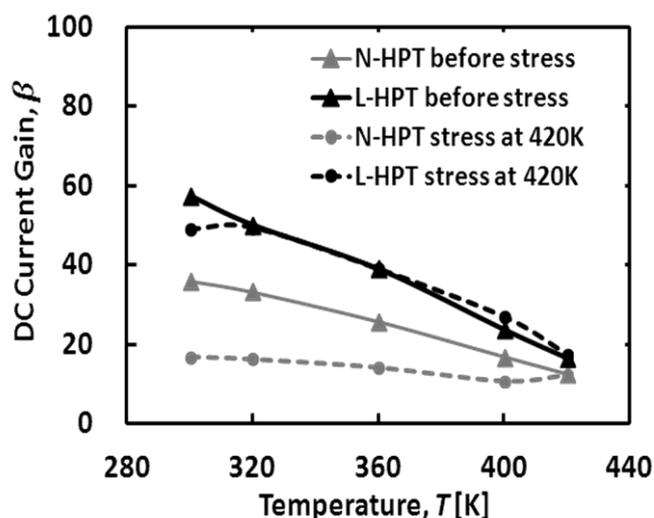


図 5.22 420 K での電氣的ストレス印加前後、N-HPT と L-HPT の電流利得 β の温度特性

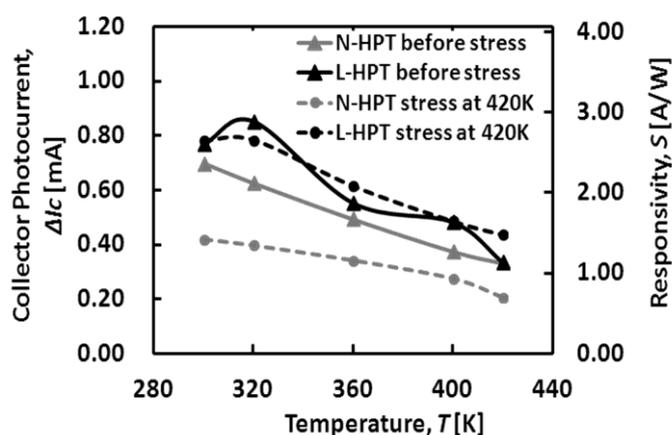


図 5.23 420 K での電氣的ストレス印加前後、N-HPT と L-HPT の ΔI_C 及び S の温度特性

図 5.22、図 5.23 より、どの温度でも高温の電氣的ストレスにおいても L-HPT の温度特性の劣化は少ないことが分かる。低温側において電流利得 β と ΔI_C の温度依存性を見られるように、高温での電氣的ストレスによる N-HPT の劣化はストレス温度の増加によりエミッタ周辺長での欠陥が発生しやすくなったと考えられる。したがって、全ての温度範囲で L-HPT は N-HPT より電流利得 β 及び ΔI_C が高いという結果が得られた。黒川らは室温での電氣的ストレスによる InGaP/GaAs HBT の特性劣化について調べ、報告した[5.2]。室温で N-HBT に電氣的ストレスを印加すると、ベース電流が増加し、電流利得が低下した。室温での電氣的ストレスにより HBT の特性の劣化はストレス時の欠陥生成によるからである。欠陥生成のメカニズムとしては、エミッタ周辺での欠陥が生成され、欠陥における再結合が増加することである。また、エミッタレック

ジパッシベーションを行うことで電氣的ストレスによる InGaP/GaAs HBT の利得の減少を抑制できた。楊らは高温での電氣的ストレスは InGaP/GaAs HBT の劣化を促進させたと報告した[5.1]。レッジパッシベーションは信頼性向上には効果的であるが、高温での電氣的ストレスにはまだ充分ではない。

5.4 まとめ

InGaP/GaAs HPT を作製し、その β 及び ΔI_C の温度特性を調べ、エミッタレッジパッシベーション効果を検証した。暗状態時、L-HPT は全てのベース電流で N-HPT よりも電流利得 β が高く、N-HPT に比べると L-HPT では、ベース電流 I_B が増加するにつれ暗状態での電流利得 β 及び ΔI_C はより大きく増加した。L-HPT の ΔI_C は、ベース電流 I_B 50 μ A で N-HPT の 4 倍であった。

L-HPT、N-HPT 共に温度が上昇するにつれ電流利得 β が減少したが、380 K 以上では両 HPT の電流利得 β は温度にあまり依存しなかった。同じベース電流では、全ての温度で、L-HPT の電流利得 β は N-HPT の電流利得 β より高くなっており、エミッタレッジパッシベーションは高温での HPT の動作においても有効であった。また、L-HPT は全ての温度で N-HPT より高い ΔI_C を示し、エミッタレッジパッシベーションは、室温、高温において HBT 以上に HPT では有効であることが示された。

また、InGaP/GaAs HPT に与える電氣的ストレスの影響についても解析した。室温での 1 時間と 420 K での 15 分間にストレスの電流密度 J_C を 37 A/cm² に保つことで、N-HPT、L-HPT に電氣的ストレスを与えた。室温での電氣的ストレスは N-HPT、L-HPT 特性に影響を与えるのに小さすぎたが、高温の 420 K で測定した時、両 N-HPT、L-HPT の電流利得 β 及び ΔI_C は低下した。電氣的ストレスの影響は高温で加速されることが分かった。しかしながら、電氣的ストレスによる L-HPT の劣化は N-HPT の劣化より少なかった。

室温での電氣的ストレスに対して、同じストレスの電流密度にしても高温での電氣的ストレスは HPT の特性を劣化させた。高温で電氣的ストレスを印加した後室温で測定すると、N-HPT の特性は大きく低下したことに對して、L-HPT の特性は僅かに低下した。300 から 420 K の全ての温度範囲で高温での電氣的ストレスは L-HPT の電流利得 β 及び ΔI_C に影響を与えなかった。L-HPT と異なり、高温でのストレスを印加した N-HPT の β 及び ΔI_C は温度に依存しなかった。このことは、電氣的ストレスの影響が高温の影響より支配することによる。したがって、電氣的ストレスによる劣化を抑制するのにエミッタレッジパッシベーションは HBT 以上に HPT では有効であることを示された。

参考文献

- [5.1] F. -Y. Yang, S. Nozaki, K. Uchida, and A. Koizumi, "Improvement in reliability of InGaP/GaAs HBT's by ledge passivation," IEICE Tech. Rep. ED2007-217 (2008) [in Japanese].
- [5.2] A. Kurokawa, Z. Jin, H. Ono, K. Uchida, S. Nozaki, and H. Morisaki, "Effects of surface recombination on dc characteristics of InGaP/GaAs heterojunction bipolar transistors," IEICE Tech. Rep. ED2005-198 (2006) [in Japanese].
- [5.3] Y. - S. Lin and J. - J. Jiang, "Temperature dependence of current gain, ideality factor, and

offset voltage of AlGaAs/GaAs and InGaP/GaAs HBTs,” IEEE Trans. Electron Devices 56, 2945 (2009).

[5.4] W. Liu, E. Beam, T. Henderson, and S. - K. Fan, “Extrinsic base surface passivation in GaInP/GaAs heterojunction bipolar transistors,” IEEE Electron Device Lett. 14, 301 (1993).

[5.5] O. Ueda, A. Kawano, T. Takahashi, T. Tomioka, T. Fujii, and S. Sasa, “Current status of reliability of InGaP/GaAs HBTs,” Solid - State Electron. 41, 1605 (1997).

[5.6] A. A. Rezazadeh, S. A. Bashar, H. Sheng, F. A. Amin, L. Cattani, and J. J. Liou, “Bias and temperature stress reliability of InGaP/GaAs HBTs,” Proc. IRPS, 2000, p.250.

[5.7] M. G. Adlerstein and J. M. Gering, “Current induced degradation in GaAs HBT’s,” IEEE Trans. Electron Devices 47, 434 (2000).

[5.8] N. Pan, J. Elliott, M. Knowles, D. P. Vu, K. Kishimoto, J. K. Twynam, H. Sato, M. T. Fresina, and G. E. Stillman, “High reliability InGaP/GaAs HBT,” IEEE Trans. Electron Device Lett. 19, 115 (1998).

[5.9] C. - K. Song and P. - J. Choi, “Effects of InGaP heteropassivation on reliability of GaAs HBTs,” Microelectron. Rel. 39, 1817 (1999).

[5.10] S. - W. Tan, H. - R. Chen, W. - T. Chen, M. - K. Hsu, A. - H. Lin, and W. - S. Lour, “Characterization and modeling of three-terminal heterojunction phototransistors using an InGaP layer for passivation,” IEEE Trans. Electron Devices 52, 204 (2005).

[5.11] S. P. McAlister, W. R. McKinnon, and R. Driad, “Interpretation of the common-emitter offset voltage in heterojunction bipolar transistors,” IEEE Trans. Electron Devices 48, 1745 (2001).

[5.12] T. - W. Lee and P. A. Houston, “Generalized analytical transport modeling of the DC characteristics of heterojunction bipolar transistors,” IEEE Trans. Electron Devices 40, 1390 (1993).

[5.13] W. Liu, S. - K. Fan, T. Henderson, and D. Davito, “Temperature dependences of current gains in GaInP/GaAs and AlGaAs/GaAs heterojunction bipolar transistors,” IEEE Trans. Electron Devices 40, 1351 (1993).

[5.14] S. Tiwari, S. L. Wright, and A. W. Kleinsasser, “Transport and related properties of (Ga, Al)As/GaAs double heterostructure bipolar junction transistors,” IEEE Trans. Electron Devices 34, 185 (1987).

第6章 GaAs 太陽電池駆動 InGaP/GaAs 2T-HPT

6.1 はじめに

センサーネットワークなどにおける光検出器のリモートエリアでの利用では電池を使わない光検出器が望ましい。そこで、本章では図 6.1 に示すように InGaP/GaAs HPT と GaAs 太陽電池を HPT のエピ上で集積し、GaAs 太陽電池駆動 2 端子動作 InGaP/GaAs HPT を試作し、光検出器としての動作を確認する。その等価回路を図 6.2 に示す。HPT は通常 3 端子で動作されるが、2 端子での動作も可能である。3 端子動作の場合は、2 端子動作の場合の光により発生する正孔による内部ベース電流とベースから電流源により注入されるベース電流両方が、エミッタ接地電流利得 β により増幅される。第 5 章で述べたように、一般に HBT では、ベース電流が増加するにつれ電流利得も増加するので、外部ベース電流により、光により生じる内部電流も 2 端子の場合に比べてより多く増幅されることになる。しかしながら、第 5 章式(5.2)より明らかなように 2 端子動作でも内部電流がベース電流として機能するので、光電流の増幅が期待できる。これより、2 端子動作は 3 端子動作同様にコレクタ光電流 ΔI_c 、光検出器として応用されている。GaAs 太陽電池駆動 InGaP/GaAs HPT 用には作製の容易さから HPT の 2 端子動作を選択した。二端子で動作する HPT を 2T-HPT と略する。

また、そのような太陽電池駆動光検出器は宇宙応用にも適するので、その耐放射線についても検討する。近年、高変換効率であり耐放射線に優れているため、宇宙への応用を目的に、III-V 族化合物半導体の太陽電池の研究が盛んになっている[6.1]–[6.4]。特に、宇宙応用が期待されている GaAs ヘテロフェイス太陽電池についての研究は多くの研究者による行われている[6.5]–[6.12]。これまで宇宙におけるよく使われている太陽電池の材料として Si と比べると、同じ電子線照射のエネルギーやフルエンスで化合物半導体の方はより優れた耐放射線性を持っている。特に、InGaP の放射線誘起欠陥の遷移エネルギーや欠陥アニールの活性化エネルギーが GaAs より低いため、InGaP は GaAs より耐放射線性が良い[6.13]。したがって、本研究では InGaP 層は GaAs ヘテロフェイス太陽電池の窓層として使う。宇宙応用を検討するためには、日本原子力研究開発機構高崎量子応用研究所で作製された InGaP/GaAs 2T-HPT に $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ フルエンスの 1 MeV 電子線を照射した。その結果については第 7 章で述べる。

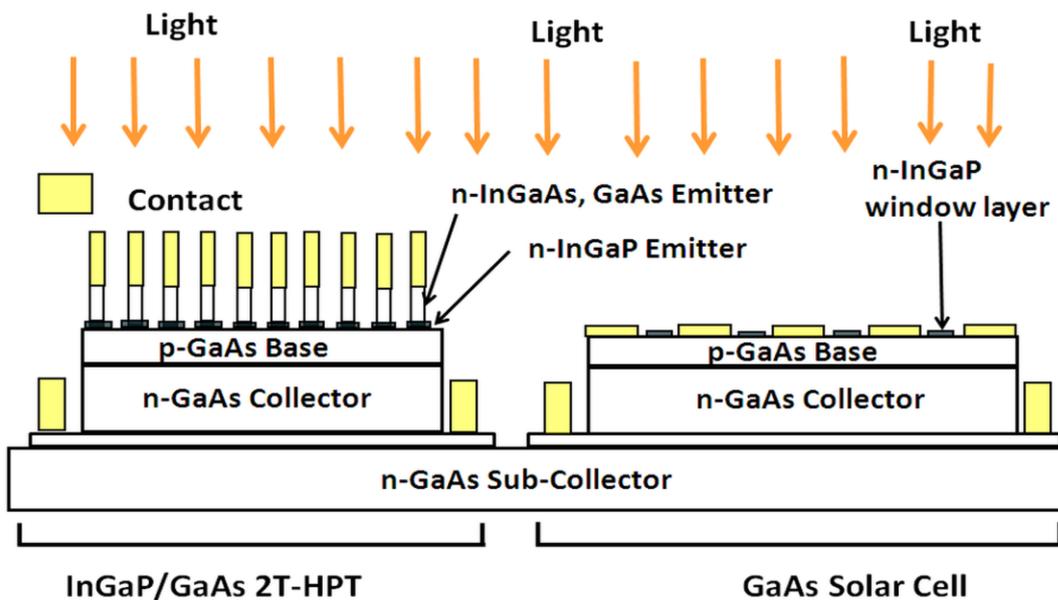


図 6.1 太陽電池駆動 InGaP/GaAs 2T-HPT の構造

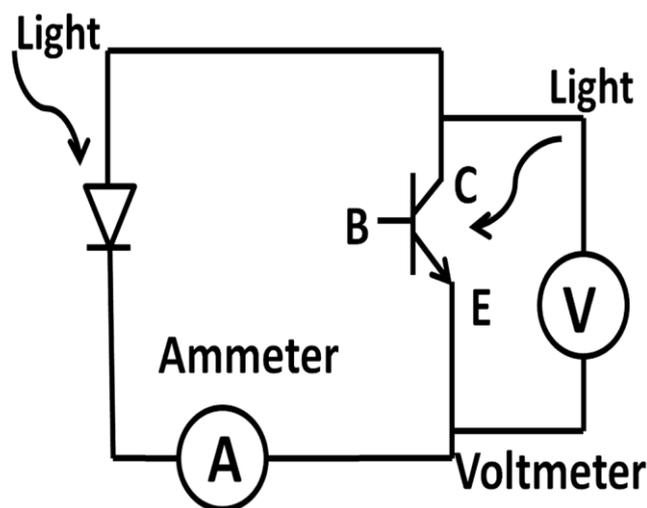


図 6.2 太陽電池駆動 2T-HPT InGaP/GaAs の等価回路

6.2 フォトトランジスタの太陽電池による動作確認

最初に、市販の定格電力 190 mW、開放電圧 6 V のアモルファスシリコン太陽電池 AM-8701CAR 型、最大光電流 8000 μ A、最大暗電流 100 nA のシリコンフォトトランジスタ SD5443-003 型を用いて、太陽電池によるフォトトランジスタの動作確認を行った。図 6.3、図 6.4 は、それぞれ 0–8V の外部電源を印加し、光照射強度を変化させた時の、アモルファスシリコン太陽電池とシリコンフォトトランジスタの 2 端子動作の I-V 特性を示す。図 6.5 は Light Intensity 5 の光照射強度で測定されたアモルファスシリコン太陽電池とシリコンフォトトランジスタの 2 端子動作の I-V 特性を示す。

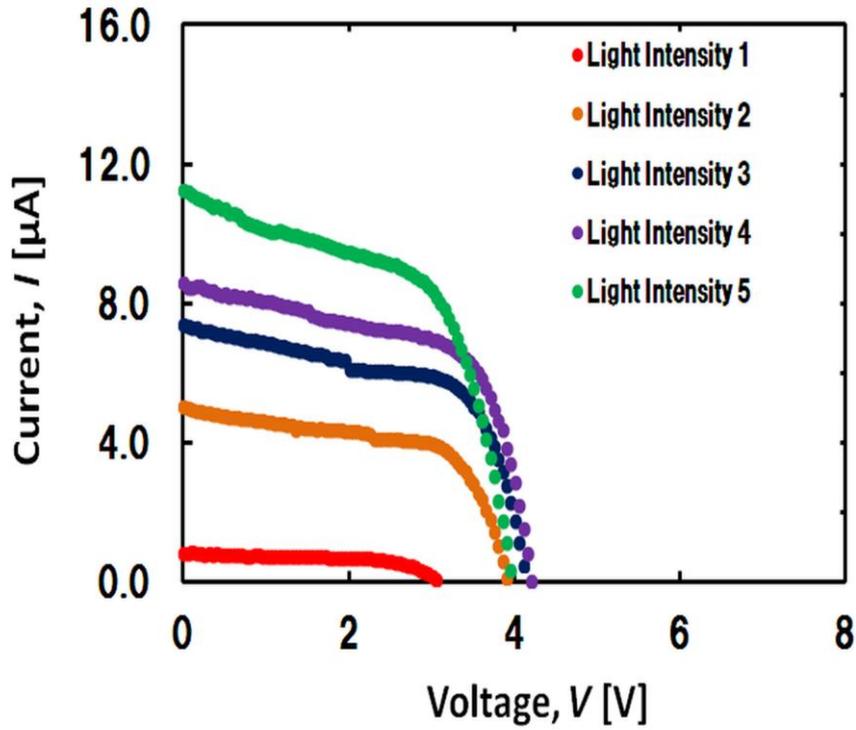


図 6.3 0–8V の外部電源を印加し、光照射強度を変化させ、アモルファスシリコン太陽電池の I-V 特性

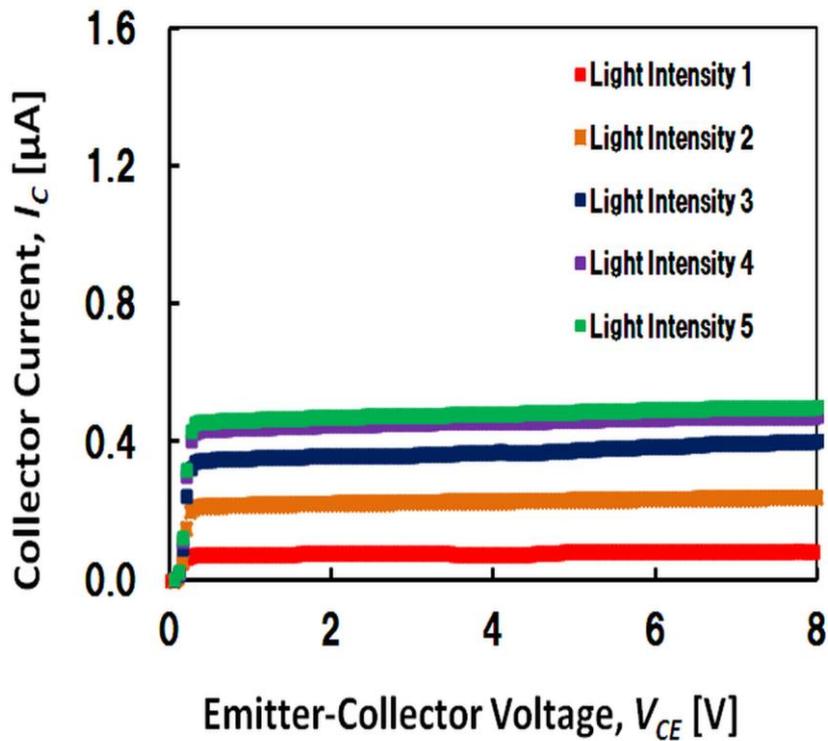


図 6.4 0–8V の外部電源を印加し、光照射強度を変化させ、シリコンフォトトランジスタの I-V 特性

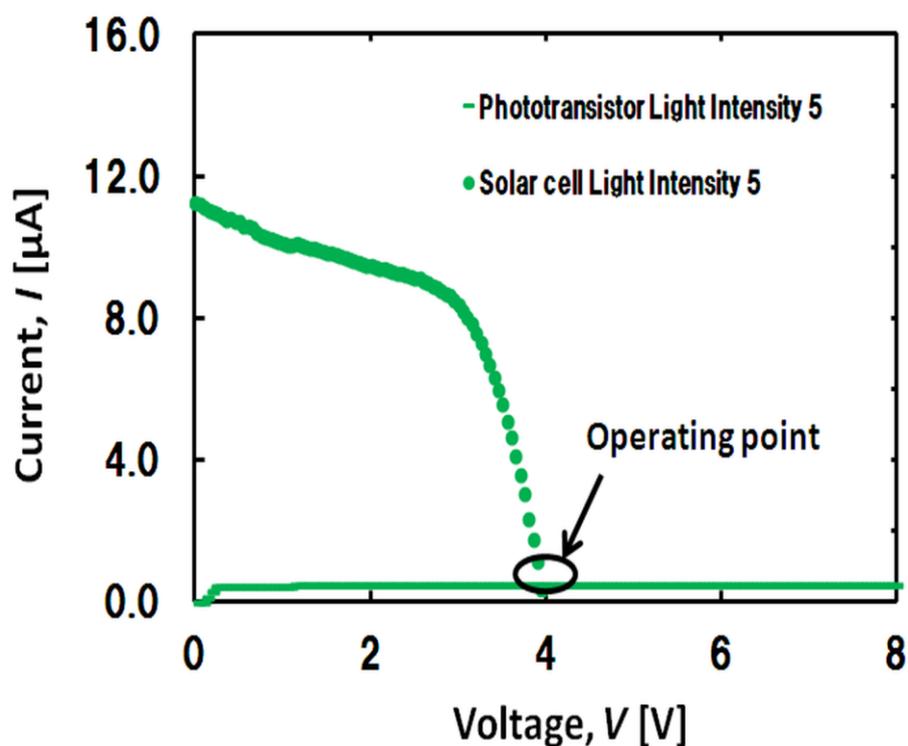


図 6.5 Light Intensity 5 の光照射強度でアモルファスシリコン太陽電池とシリコンフォトトランジスタの 2 端子動作の I-V 特性

図 6.5 より、表 6.1 の Light Intensity 5 の光照射強度でアモルファスシリコン太陽電池とシリコンフォトトランジスタの I-V 特性の交点は、太陽電池によるフォトトランジスタの動作点になる。図 6.3、図 6.4 より、全ての光照射強度において太陽電池によるフォトトランジスタの動作点が存在することが分かる。この結果より、外部電源を使用せず、太陽電池と組み合わせ、フォトトランジスタを動作させる可能であることが確認できた。

次に、図 6.6 に示すように太陽電池、フォトトランジスタを組み合わせ、外部電源を使用せず、照射光強度を変化させ、電流計からの電流値、電圧計からの電圧値を読み取った。太陽電池、フォトトランジスタは市販の白色光の LED で光照射され、照射強度を変化させた。各光照射強度でのフォトトランジスタの動作点を測定した。その結果を表 6.1 に示す。

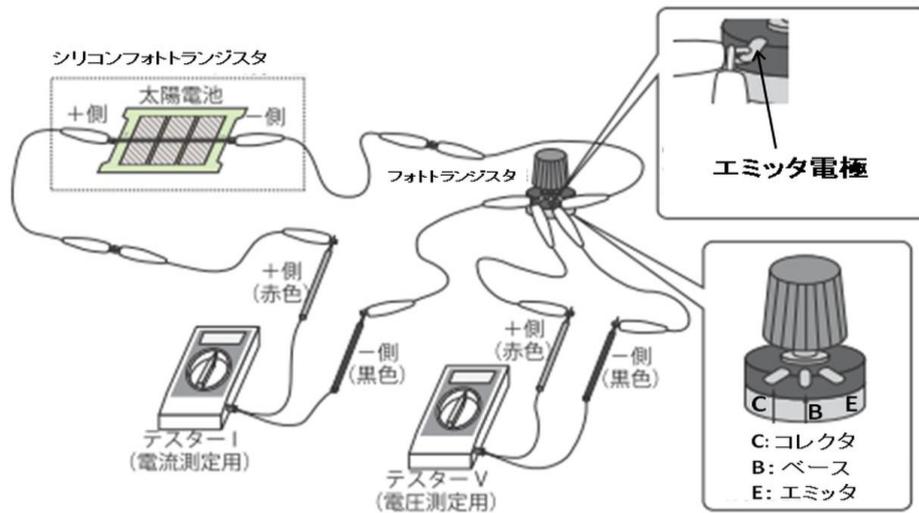


図 6.6 外部電源を使用せず、照射光強度を変化させ、組み合わせ回路の動作点の確認

表 6.1. 外部電源を使用せず、太陽電池によりフォトトランジスタを動作した時の動作点の電圧値及び電流値

光強度	動作点の電圧値[V]	動作点の電流値[μ A]
Light Intensity 1	4.42	0.243
Light Intensity 2	4.23	0.776
Light Intensity 3	4.1	1.05
Light Intensity 4	3.6	1.58
Light Intensity 5	3.27	1.95

図 6.3、図 6.4 から読み取る交点の電圧値及び電流値と比べると、表 6.1 の動作点の電圧値及び電流値は高い。この理由については後述する。

6.3 GaAs 太陽電池の設計

前節で太陽電池によりフォトトランジスタの 2 端子動作が確認されたので、次に HPT の動作を可能とする太陽電池を設計する。InGaP/GaAs HPT は図 3.1(b)に示すように、これまで本研究で作製された HPT と同じ構造及びサイズである。エミッタ電極の形状は幅 $4 \mu\text{m}$ 長さ $2100 \mu\text{m}$ 10 本からなる櫛型電極とし、またベース電極の形状は幅 $4 \mu\text{m}$ 長さ $2100 \mu\text{m}$ 11 本からなる櫛型電極とした。InGaP/GaAs HPT のエミッタサイズは $160,800 \mu\text{m}^2$ である。HPT はエミッタレッジパッシベーションを施した HPT を作製した。エミッタレッジの長さは $5 \mu\text{m}$ 、厚さは 30nm である。図 6.7 は 35mW/cm^2 の光照射状態での InGaP/GaAs HPT の 2 端子動作の I-V 特性を示

す。

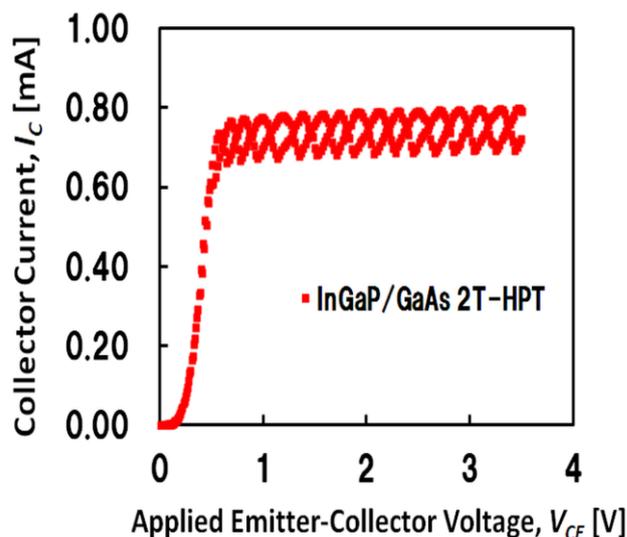


図 6.7 35 mW/cm² の光照射状態での InGaP/GaAs 2T-HPT の 2 端子動作の I-V 特性

図 6.7 に示すような 2 端子動作の HPT を動作させるには、同じ光強度で短絡電流が HPT の飽和電流以上になるよう GaAs 太陽電池の構造を最適化する必要がある。また、できるかぎり太陽電池作製プロセスを HPT 作製プロセスに融合させ、プロセスを簡略化できることが望ましい。まずは HPT の構造に最も類似する図 6.8 に示す。GaAs 太陽電池の構造 1 を検討した。その I-V 特性を図 6.9 に示す。InGaAs 層、GaAs 層、InGaP 層をそれぞれ H₃PO₄:H₂O₂:H₂O、NH₄OH:H₂O₂:H₂O、HCl 溶液を用いて全ての層をエッチングし、ベース層表面を露出させた。コレクタの面積は 4.2 mm² であり、ベース電極の形状は図 6.8 のように幅 4 μm 長さ 2100 μm ベース電極間 204 μm 10 本からなる櫛型電極とした。

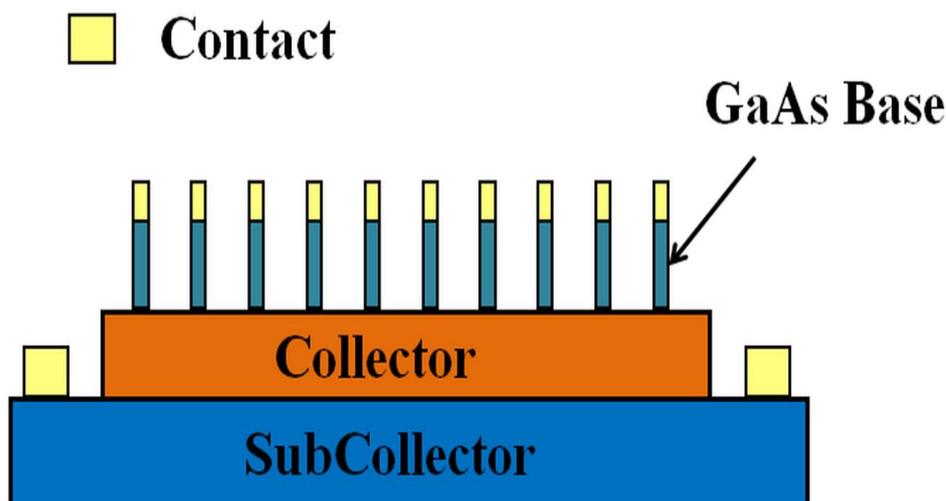


図 6.8 GaAs 太陽電池の構造 1

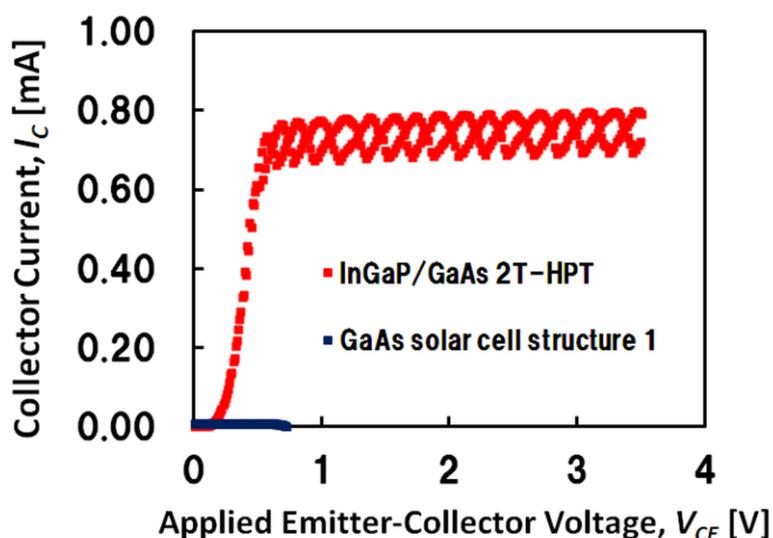


図 6.9 GaAs 太陽電池の構造 1 の 35 mW/cm² の光照射状態での I-V 特性

短絡電流 I_{sc} 0.000282 mA、開放電圧 V_{oc} 0.72 V と太陽電池構造 1 では良い特性が得られなかった。光は金属ベース電極を透過せず、電極間のコレクター一部で生成された正孔が効率良く光電流とならないことが原因であった。

次に、構造 1 の楕型電極とは異なり、構造 2 ではベース電極の外でキャリアが生成されるので、太陽電池の受光面積を大きくし、四角に敷き詰めたベース層の面積を 0.42 mm² に変えることである。ベース電極の大きさはベース面積の大きさに対して 10%の大きさとした。太陽電池の構造 2 を図 6.10 に示し、構造 2 の光照射状態での I-V 特性を図 6.11 に示す。

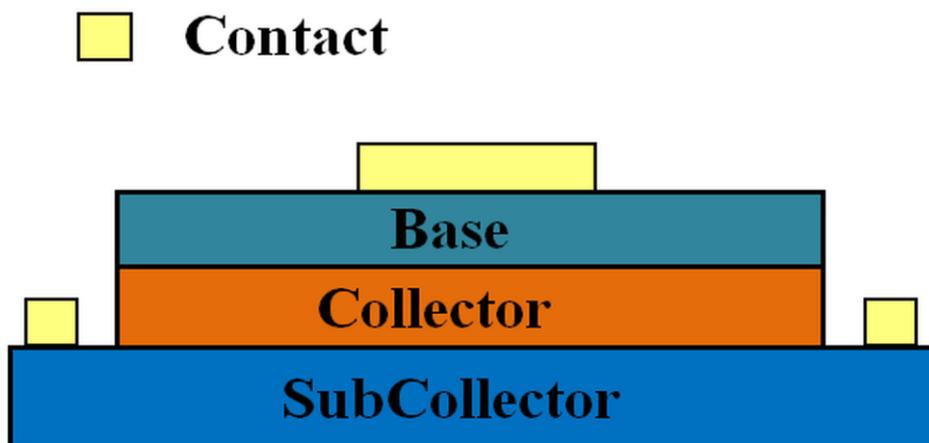


図 6.10 GaAs 太陽電池の構造 2

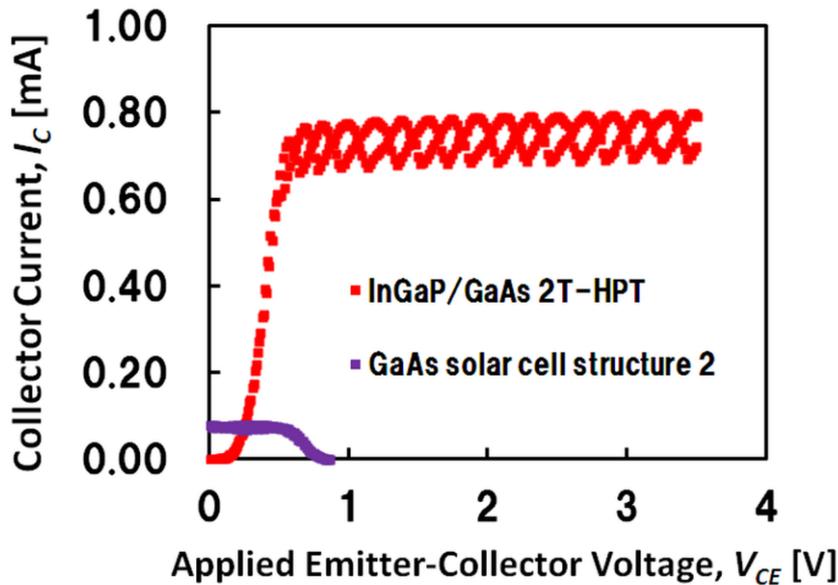


図 6.11 GaAs 太陽電池の構造 2 の 35 mW/cm² の光照射状態での I-V 特性

構造 2 の短絡電流 I_{sc} 0.081 mA、開放電圧 V_{oc} 0.86 V である。構造 2 の短絡電流は構造 1 のものと比べると、大きい。しかし、2T-HPT を動作させるのにまだ不十分である。太陽電池の構造 2 では、光を入射すると、ベース・コレクタに生成された電子・正孔が空乏層端から遠い部分では消滅してしまい、良い特性が得られなかった。また、高濃度カーボンドーピング GaAs ベース表面では表面再結合があるため、GaAs 太陽電池の特性を低下させる。

そこで、図 6.12 に示すようにベース電極間では InGaP 層を窓層として残す構造 3 を作製した。構造 3 の光照射状態での I-V 特性を図 6.13 に示す。構造 3 は構造 1 と類似するが、ベース電極間で生成されたキャリアの表面再結合が抑制され、光電流が増加すると期待される。InGaAs 層、GaAs 層をそれぞれ $H_3PO_4 : H_2O_2 : H_2O$ 、 $NH_4OH : H_2O_2 : H_2O$ を用いて全ての層をエッチングし、InGaP 層は HCl 溶液を用いて選択的にエッチングし、ベース層表面を露出させた。InGaP 窓層は図 6.12 のように幅 7 μm 、長さ 2100 μm 、10 本からなる櫛型形状とし、ベース電極の形状は幅 4 μm 長さ 2100 μm ベース電極間 204 μm 11 本からなる櫛型電極とした。InGaP 窓層とベース電極との距離は 94 μm であるため、露出した GaAs ベース表面の僅かな一部しか覆われない。

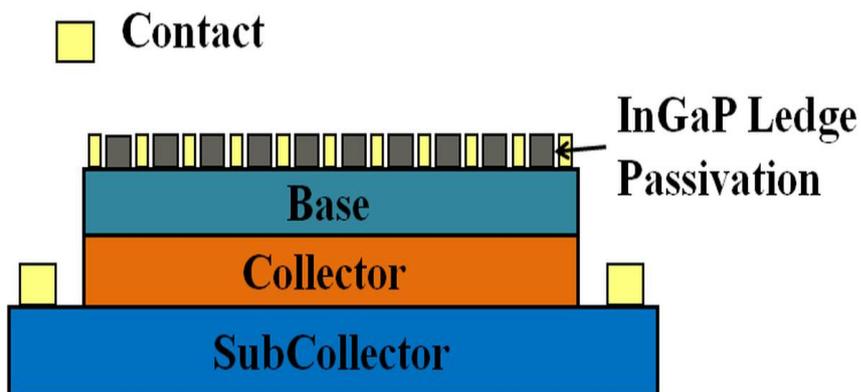


図 6.12 GaAs 太陽電池の構造 3

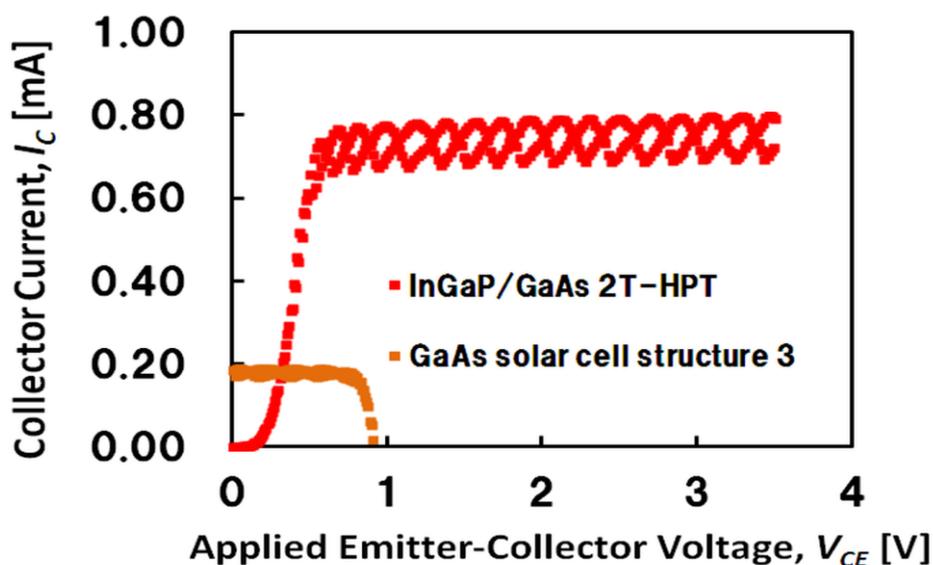


図 6.13 GaAs 太陽電池の構造 3 の 35 mW/cm^2 の光照射状態での I-V 特性

GaAs 太陽電池の構造 3 では短絡電流 I_{sc} 0.2 mA、開放電圧 V_{oc} 0.9 V、構造 1、2 よりも太陽電池の特性がされた。しかし、まだ短絡電流が HPT の飽和電流より低いので、キャリアが生成されるコレクタの部分をもっと大きくする必要がある。従って、InGaP/GaAs 2T-HPT を動作させるために、図 6.13 より GaAs 太陽電池の面積を構造 3 の面積より 6.67 倍程度大きく、GaAs 太陽電池のベース層面積を 0.283 cm^2 にした。露出した高濃度 GaAs ベース表面をほとんど InGaP 窓層で覆い、また、太陽電池の電極抵抗を小さくするため、ベース電極形状をメッシュ型の形状にした。

6.4 太陽電池駆動 InGaP/GaAs ヘテロ接合フォトトランジスタのマスク設計

InGaP/GaAs HPT と GaAs 太陽電池を HPT のエピ上で集積する電池駆動 2T-HPT のマスク設計について説明する。図 6.14～図 6.20 は本研究で設計したマスクパターンを図を示す。これが、GaAs 太陽電池と InGaAs/GaAs 2T-HPT を集積した太陽電池駆動 HPT 完成図である。2T-HPT

のマスクは第3章で述べたものと同じマスクである。

ここで、GaAs 太陽電池の近くに2個の InGaP/GaAs HPT を設計する。これは半導体デバイスの歩留まりが100%ではなく、動作しない場合もあるからである。

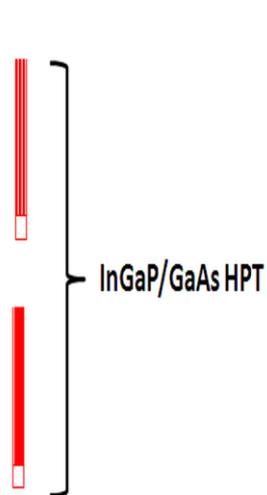


図 6.14 エミッタ電極用マスク

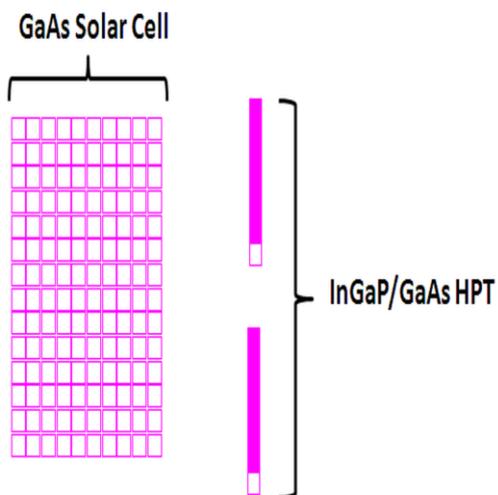


図 6.15 エミッタレジ用マスク

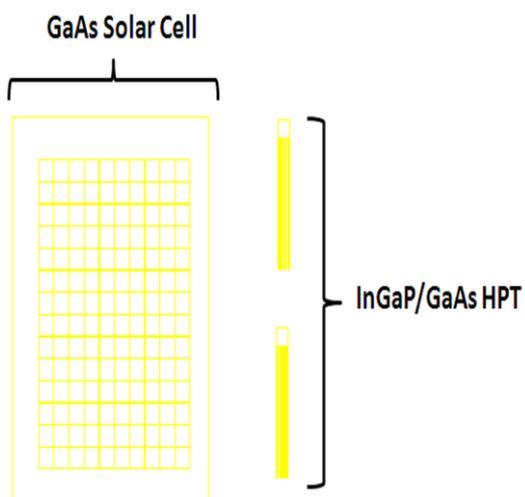


図 6.16 ベース電極用マスク

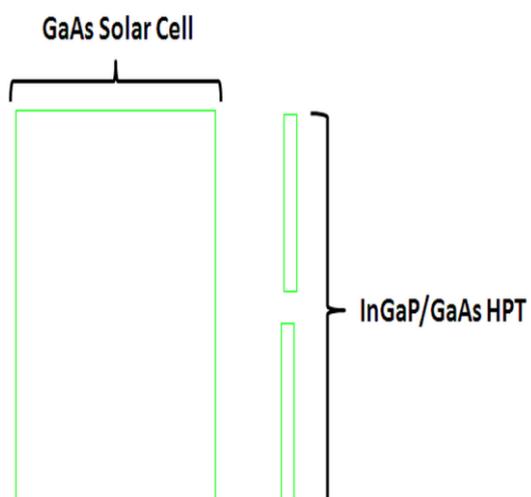


図 6.17 ベース層用マスク

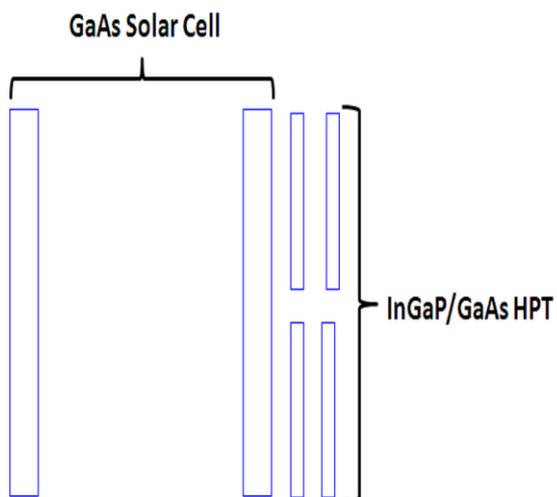


図 6.18 コレクタ電極用マスク

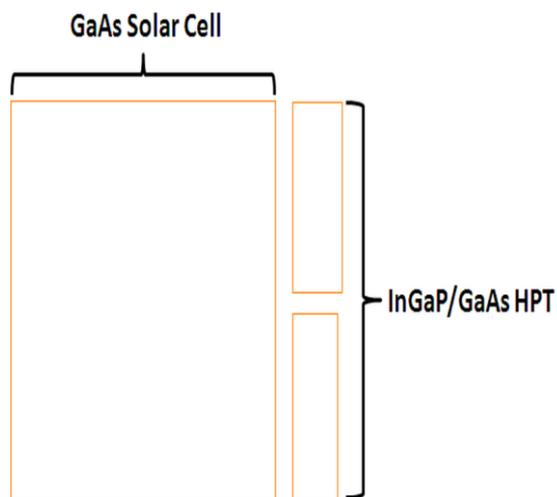


図 6.19 subcollector 用マスク

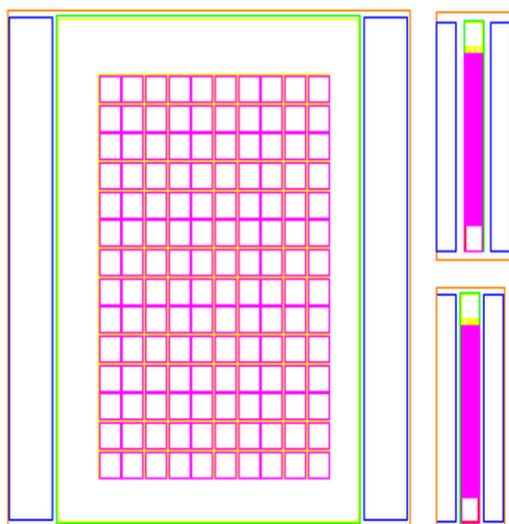


図 6.20 図 6.14～図 6.19 を重ね合わせたマスク

フォトトランジスタの 3 端子動作を確認するために、HPT のベース電極用マスクを設計した。しかし、GaAs 太陽電池と集積する時には、HPT の 2 端子動作としてベース開放にした。

6.5 太陽電池駆動 InGaP/GaAs 2T-HPT の動作確認

作製された InGaP/GaAs 2T-HPT の各デバイスを半導体パラメータアナライザ(HP4155A)により測定した。図 6.21、図 6.22 は、照射光強度を変化し、それぞれ個別に測定した GaAs 太陽電池、InGaP/GaAs 2T-HPT の I-V 特性を示す。

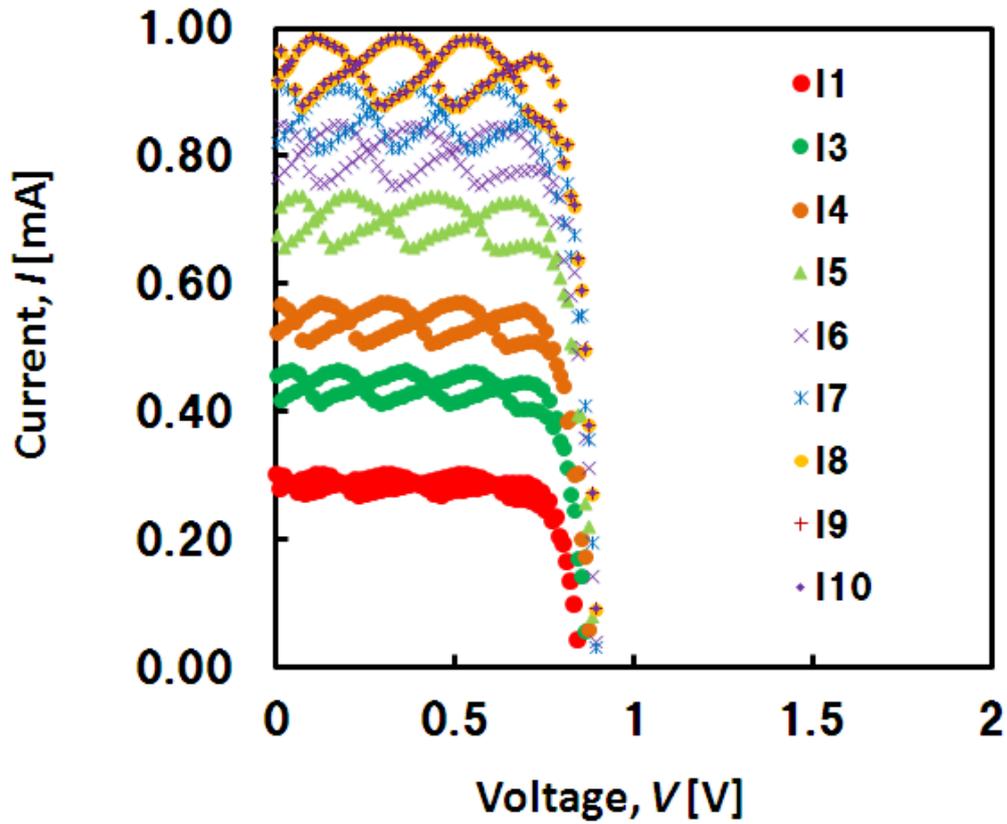


図 6.21(a) 照射光強度を変化し、GaAs 太陽電池の I-V 特性

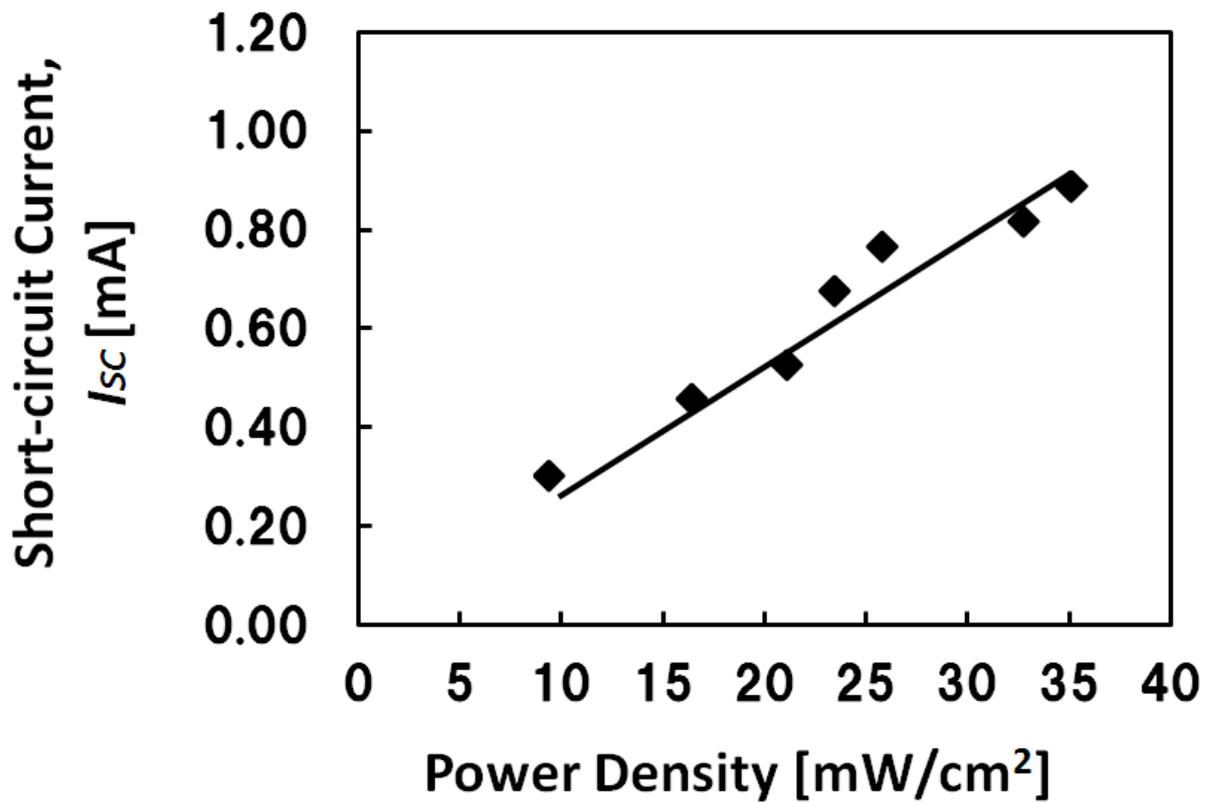


図 6.21(b) GaAs 太陽電池の短絡電流 I_{sc} の照射光強度の依存性

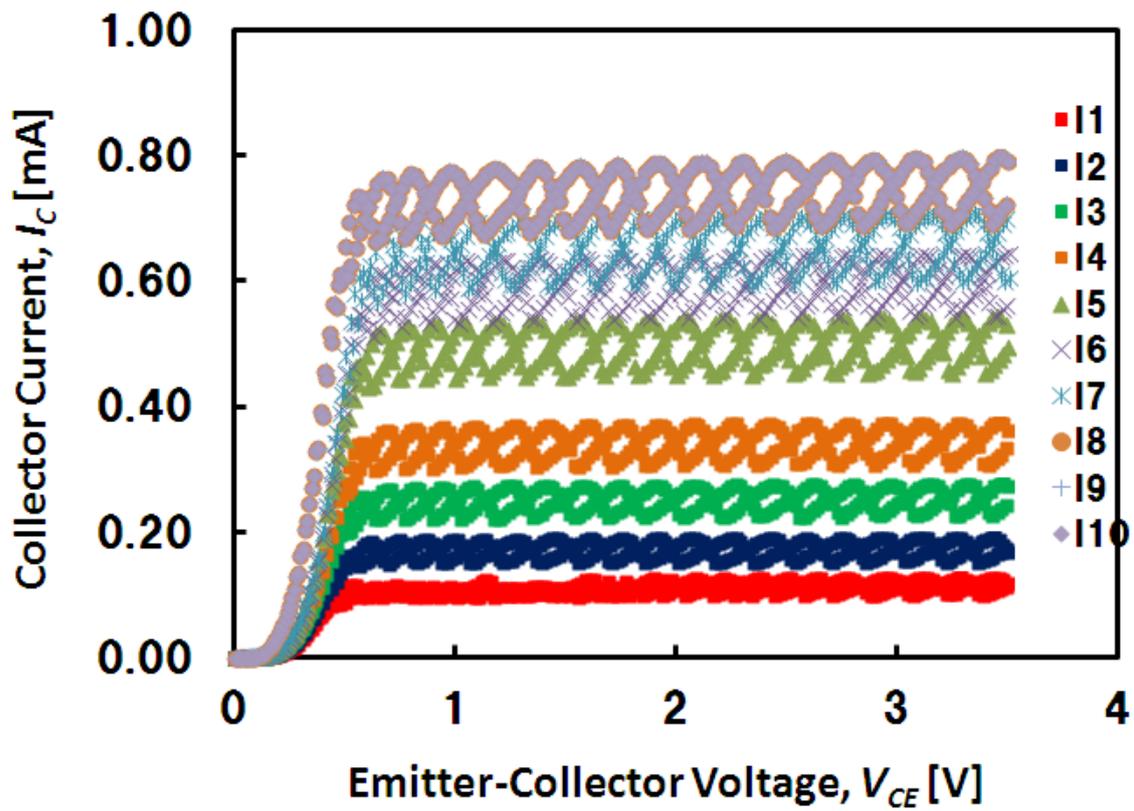


図 6.22(a) 照射光強度を変化し、InGaP/GaAs 2T-HPT の I-V 特性

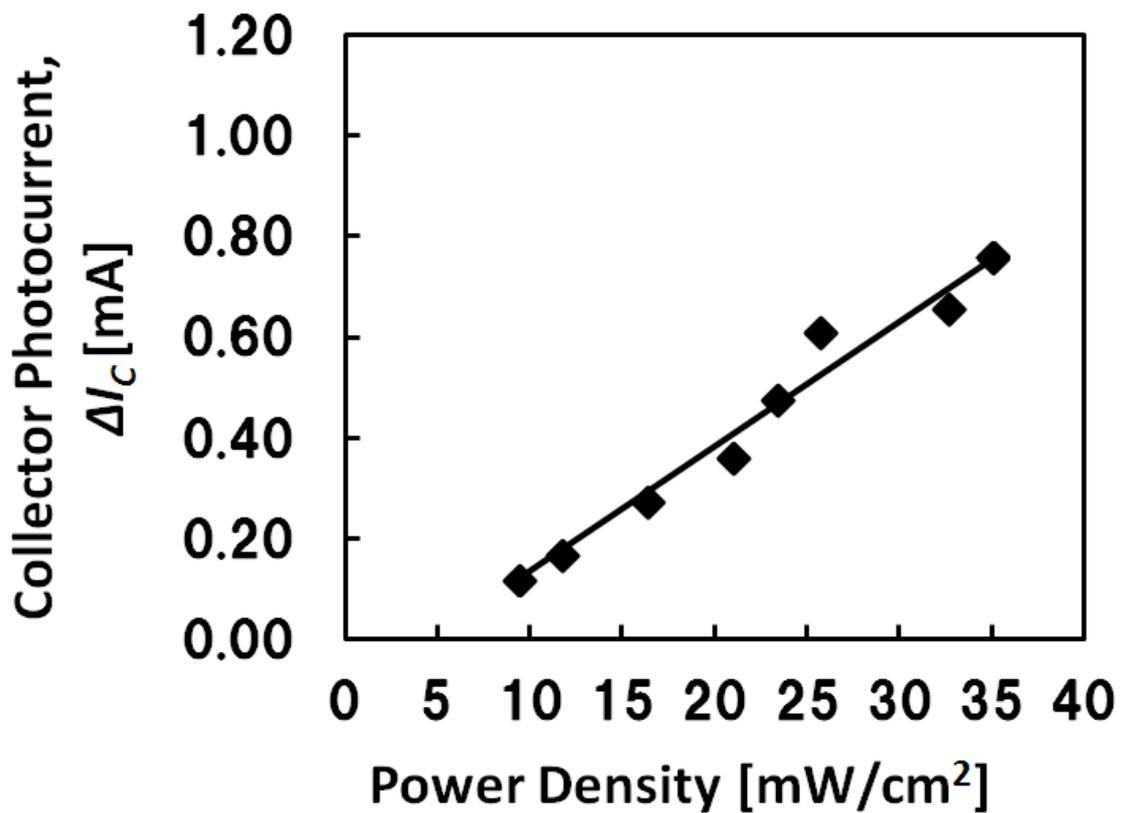


図 6.22(b) InGaP/GaAs 2T-HPT の ΔI_c の照射光強度の依存性

図 6.21(a), 図 6.21(b)は太陽電池に照射光強度を変えて測定した結果であり、このグラフから各光強度に対する短絡電流、開放電圧を表 6.1 にまとめた。

表 6.1 GaAs 太陽電池特性の照射光強度の依存性

Power Density [mW/cm ²]	短絡電流 I_{sc} [mA]	開放電圧 V_{oc} [V]
$I_1 = 9.33$	0.304	0.85
$I_3 = 16.33$	0.46	0.87
$I_4 = 21.00$	0.53	0.88
$I_5 = 23.33$	0.68	0.89
$I_6 = 25.67$	0.77	0.90
$I_7 = 32.67$	0.82	0.90
$I_8 = 35.00$	0.89	0.90
$I_9 = 35.00$	0.89	0.90
$I_{10} = 35.00$	0.89	0.90

照射光強度を増加するにつれ GaAs 太陽電池の短絡電流 I_{sc} は光強度に比例して増加することに対して、開放電圧 V_{oc} は僅かに増加する。表 6.1 より、光強度が 9 (I_1)から 26 mW/cm² (I_6)に増加すると、開放電圧 V_{oc} は 50 mV 程度増加することが分かった。理論的には、開放電圧は kT/q の $\ln(I_6/I_1)$ 倍増加するので、25 mV 程度増加することになる。表 6.1 において、ダイヤル 6 から 8 では光強度は増加するが、開放電圧は変化しない。実際は若干増加しているが、その変化が小さく見られなかった。ダイヤル 8 以上では照射光強度の変化がなく、短絡電流、開放電圧共に変化が見られなかった。図 6.22(a)、図 6.22(b)より、HPT の場合にも照射光の強度の増加とともに ΔI_c は大きくなる。

図 6.23 は 35 mW/cm²の光照射強度で測定された GaAs 太陽電池と InGaP/GaAs 2T-HPT の I-V 特性を示す。

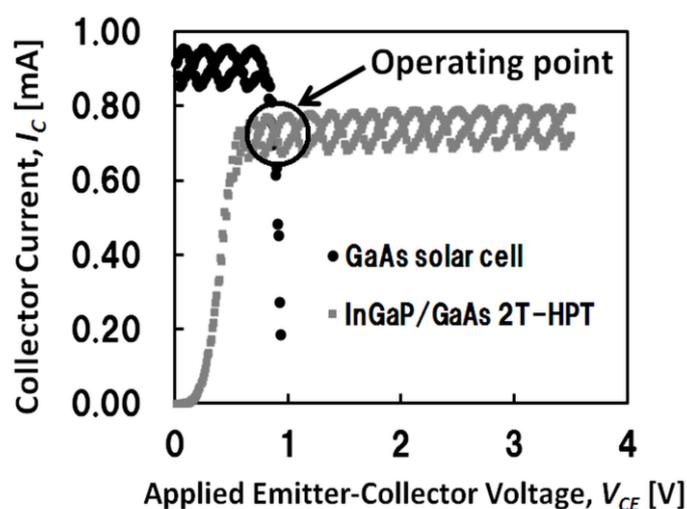


図 6.23 35mW/cm²の光照射強度で GaAs 太陽電池と InGaP/GaAs 2T-HPT の I-V 特性

GaAs 太陽電池の短絡電流 I_{sc} が InGaP/GaAs 2T-HPT の光電流 ΔI_c より高いため、図 6.23 のようにこれらの交点である動作点を見つけることができた。太陽電池の短絡電流 I_{sc} 0.89 mA、開放電圧 V_{oc} 0.9 V、最大出力点における変換効率 5.8%であった。最大出力 P_{max} 0.58 mW、最大出力点の電圧 0.67 V、最大出力点の電流 0.86 mA、曲線因数(F.F) 0.72 である。光照射状態で太陽電池の短絡電流が 2T-HPT の光電流より高くするために、太陽電池の最小面積が 0.283 cm² である。ここで、GaAs 太陽電池のベース層及びコレクタ層の厚さとドーピング濃度は太陽電池のためには最適化されてはおらず、HBT の性能のために最適化されている。コレクタ層のドーピング濃度と厚さは、それぞれ 1.0×10^{16} cm⁻³、600 nm である。高い短絡電流が得られる通常の GaAs 太陽電池と比べると、n 層は非常に薄い[6.21]–[6.23]。しかし、得られた変換効率の 5.8 % は InGaP/GaAs 2T-HPT と GaAs 太陽電池との動作点が出るのに十分高い。35 mW/cm² の光照射強度で交点の動作点の電圧値及び電流値は 0.87 V、0.732 mA と確認できた。

太陽電池駆動 InGaP/GaAs 2T-HPT の光電流、光電圧は図 6.24 のように顕微鏡用照明を設置し、その照明強度を変化させ、測定された。

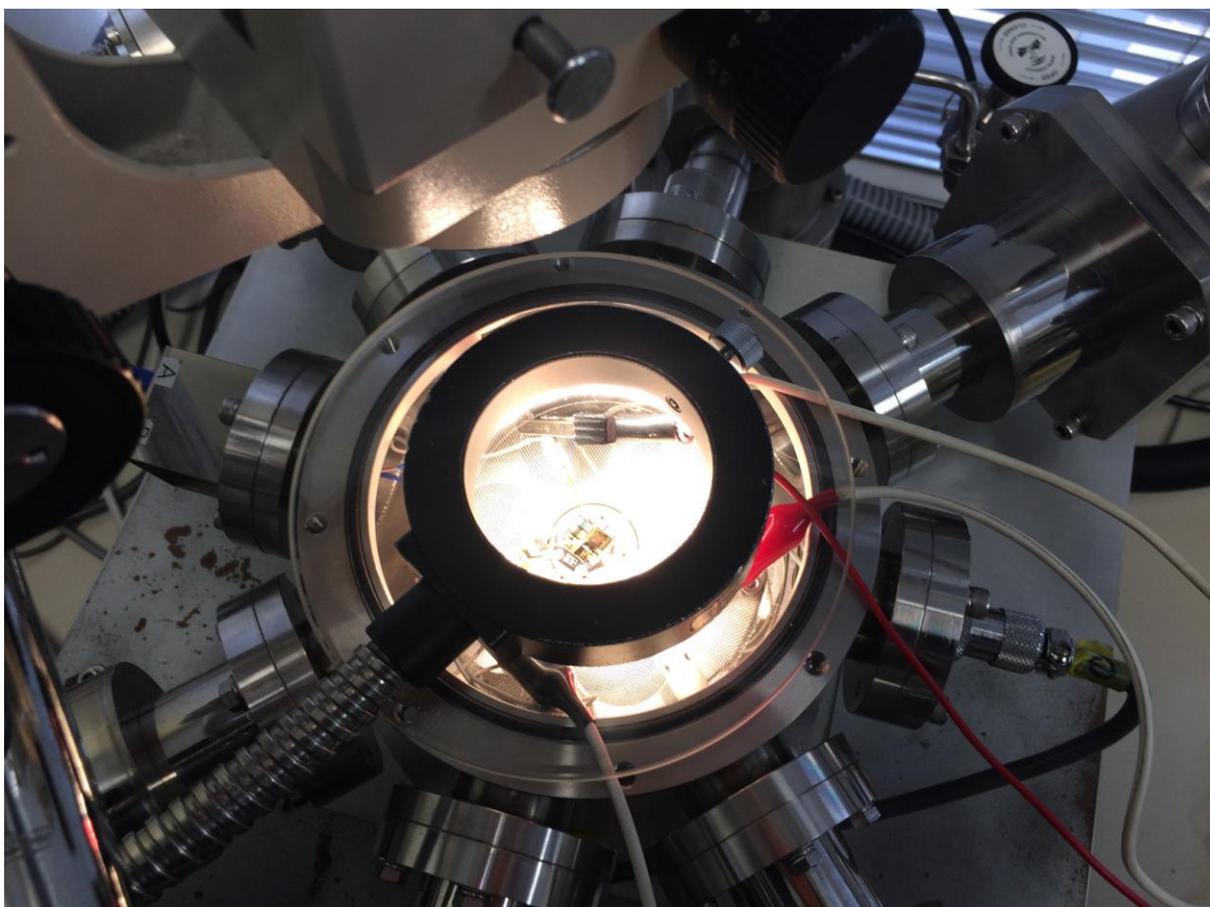


図 6.24 実験の時に外部電源を使用せず、照射光強度を変化させ、組み合わせ回路の動作点の確認の拡大図

図 6.25、図 6.26 は、それぞれ太陽電池駆動 InGaP/GaAs 2T-HPT の光電流、光電圧の光強度の依存性を示す。

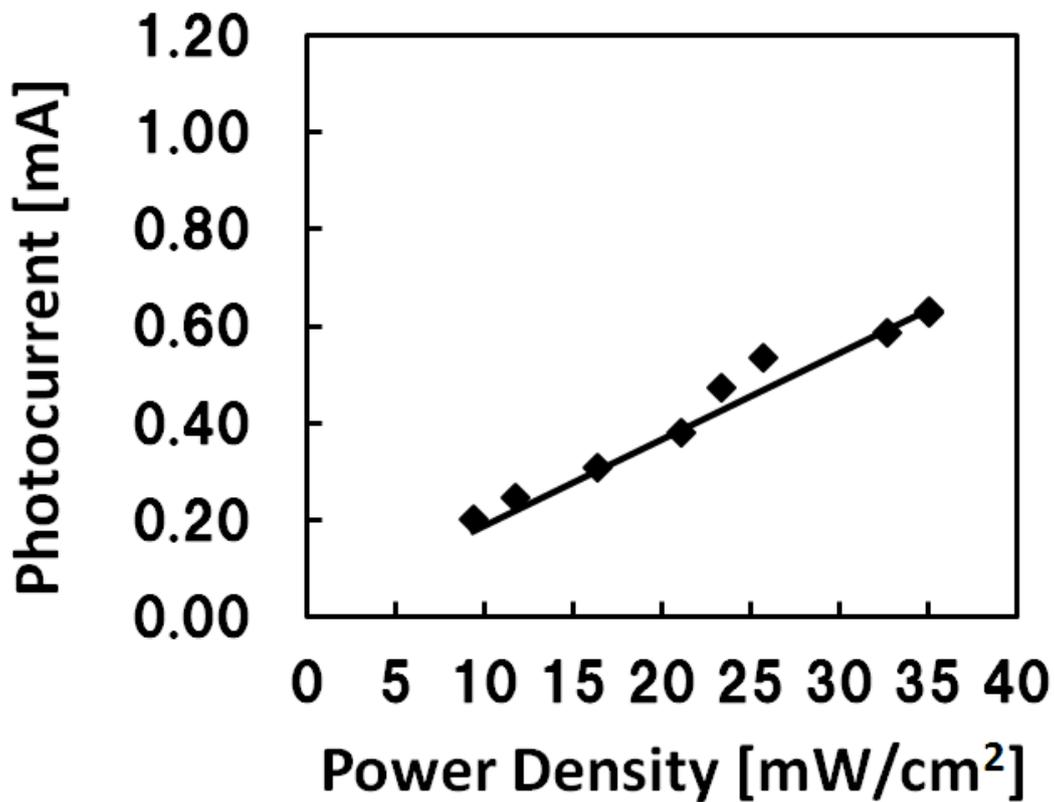


図 6.25 太陽電池駆動 2T-HPT の光電流の照射光強度の依存性

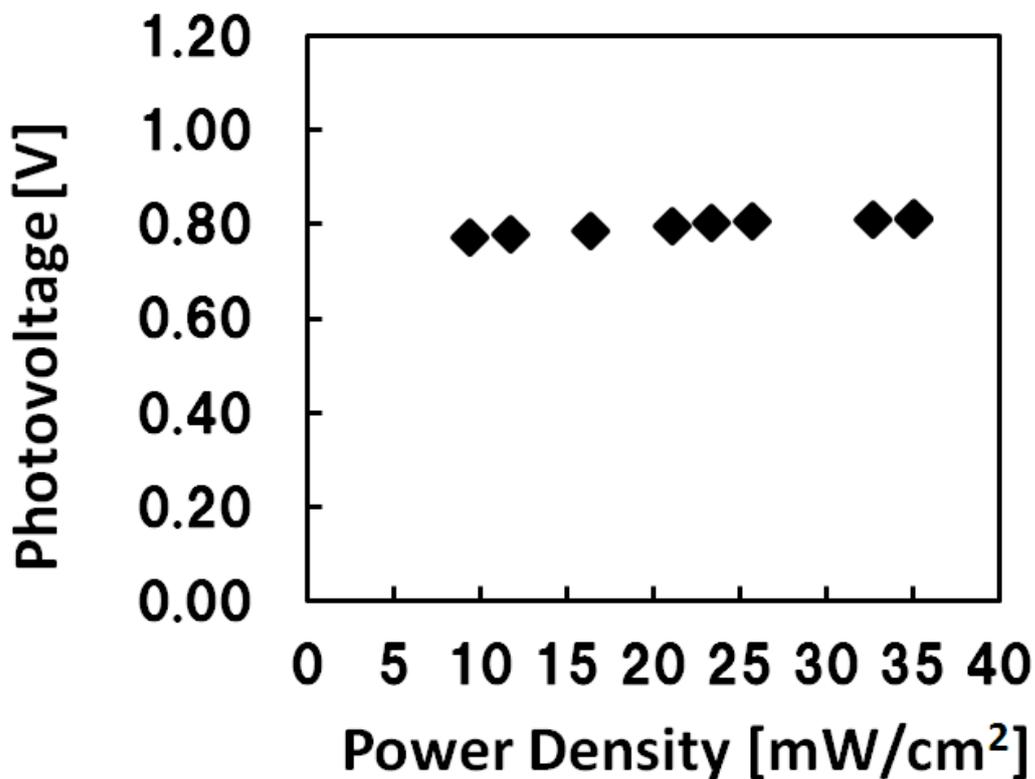


図 6.26 太陽電池駆動 2T-HPT の光電圧の照射光強度の依存性

図 6.25、図 6.26 より、光強度 35 mW/cm² の時、光電流 0.63 mA、光電圧 0.81 V が得られた。

これらの値はいずれも図 6.23 で示される動作点の値より小さいことが分かる。図 6.21(b)、図 6.22(b)にそれぞれ図 6.21(a)、図 6.22(a)から得られる太陽電池の短絡電流及び HPT の光電流 ΔI_c の光強度依存性を示す。HPT の光電流が太陽電池の短絡電流より小さい場合は、図 6.25 では、光電流はほぼ太陽電池の短絡電流に近い値となっている。このことは、図 6.2 に示す測定回路において、電流値には、HPT の光電流のみならず、コレクタに流れ込んでいる太陽電池からの光電流を含んでいることによる。理想的には、太陽電池から HPT には電圧のみ供給されるのだが、実際は太陽電池からコレクタに電流が流れることにより、HPT の特性が動作点を求めた単独の HPT の特性とは異なっている。したがって、図 6.25 に示す測定回路では、太陽電池の短絡電流が HPT の光電流として検出される。2T-HPT の利得を活かした光電流を検出するには太陽電池からは開放電圧のみ HPT に与えられるような回路上での工夫が必要となる。しかしながら、HPT は通常光が当たらなければ電流が流れないので、HPT そのものは太陽電池により駆動していることが検証された。

図 6.25 に示されるように光強度が低い場合は、図 6.22(b)のコレクタ光電流より、図 6.25 の光電流が高くなっており、光強度が高い場合は、その逆になっている。太陽電池で駆動した場合、HPT と太陽電池には相互作用があると考えられる。この相互作用は、HPT に太陽電池からの光電流が流れ込むことにより生じる。通常、2T-HPT はエミッタ・コレクタ間にバイアスだけかけて動作させるが、太陽電池からの光電流が流れ込むと、コレクタに電流を注入する電流源が別に存在することになる。この電流源により電子がエミッタに注入され、ベース・エミッタ間の電圧をより順バイアスにすることになり、電流源がない場合よりも高い光電流が流れ、その電流が電流源の電流となるまで高くなる。すなわち、コレクタ光電流が増加し、2T-HPT の I-V 特性との新たな動作点が生じる。したがって、光強度が低い場合は、相互作用により光電流は高くなる。反対に光強度が高い場合は、ベース内の正孔濃度が高まると、エミッタへの逆注入が増え、電流利得 β が減少する。この現象は、バイポーラトランジスタのコレクタ電流が高い場合に見られる現象である[6.24]。したがって、コレクタ光電流が減少し、2T-HPT の I-V 特性と新たな動作点が生じ、光強度が高い場合は、相互作用により光電流は低くなる。

6.6 まとめ

InGaP/GaAs 2T-HPT と GaAs 太陽電池を HPT のエピ上で集積し、太陽電池駆動 InGaP/GaAs 2T-HPT を試作した。GaAs 太陽電池は、面積 0.283 cm^2 で、HPT エピの InGaP 層を窓層とし、HPT エピのベース層とコレクタ層で作製された。照射光強度が 35 mW/cm^2 の時、GaAs 太陽電池の短絡電流 0.89 mA 、開放電圧 0.9 V 、変換効率 5.8% 、曲線因数(F.F) 0.72 であった。 35 mW/cm^2 の照射光強度の光を照射した時、太陽電池駆動 InGaP/GaAs 2T-HPT の光電流は 0.63 mA 、光電圧 0.81 V であった。動作点の光電流は照射光強度に比例した。この結果より、GaAs 太陽電池駆動 InGaP/GaAs 2T-HPT が光センサーへの応用が期待される。また、太陽電池と HPT には相互作用があり個別の I-V 特性から求めた動作点とは異なる光電流が太陽電池駆動 2T-HPT に生じることが分かった。その結果、HPT の光電流が増加し、太陽電池の短絡電流に近づくことが示された。特に、HPT のコレクタ電流が高い場合には、太陽電池の開放電圧のみがエミッタ・コレクタ間に与えられるような回路上の工夫が必要となる。また、より高い利得が得られる GaAs 太陽電池駆動 3 端子動作 InGaP/GaAs HPT にするような工夫も必要である。1 個の太陽電池の開放電圧

のみが HPT のエミッタ・コレクタ間に与えられ、別の 1 個の太陽電池の短絡電流のみが HPT のベースに電流源として供給されるような回路上の工夫は今後の課題となる。

参考文献

- [6.1] K. A. Bertness, S. R. Kurtz, D. J. Friedman, A. E. Kibbler, C. Kramer, and J. M. Olson, “29.5%-efficient GaInP/GaAs tandem solar cells,” *Appl. Phys. Lett.* 65, 989 (1994).
- [6.2] M. Yamaguchi and A. Luque, “High efficiency and high concentration in photovoltaics,” *IEEE Trans. Electron Devices* 46, 2139 (1999).
- [6.3] S. M. Vernon, S. P. Tobin, V. E. Haven, L. M. Geoffroy, and M. M. Sanfacon, “High-efficiency concentrator cells from GaAs on Si,” *Proc. 22nd IEEE Photovoltaic Specialists Conf.*, 1991, p.353.
- [6.4] H. F. McMillan, H. C. Hamaker, N. R. Kaminar, M. S. Kuryla, M. L. Ristow, D. D. Liu, and G. F. Virshup, “28% efficient GaAs concentrator solar cells,” *Proc. 22nd IEEE Photovoltaic Specialists Conf.*, 1988, p.462.
- [6.5] D. Flood and H. Brandhorst, in *Current Topics in Photovoltaics*, ed. T. J. Coutts and J. D. Meakin (Academic Press, New York, 1987) Vol. 2, p.143.
- [6.6] H. Y. Tada, J. R. Carter, Jr., B. E. Anspaugh, and R. G. Dowing, *Solar Cell Radiation Handbook* (JPL Publication, Pasadena, CA, 1982) 3rd ed., Chap. 1, p. 30.
- [6.7] B. E. Anspaugh, “Proton and electron damage coefficients for GaAs/Ge solar cells,” *Proc. 22nd IEEE Photovoltaic Specialists Conf.*, 1992, p.1593.
- [6.8] A. M. Sekela, D. L. Feucht, and A. G. Milnes, “Efficiency calculations for $Al_xGa_{1-x}As$ -GaAs heteroface solar cells,” *IEEE Trans. Electron Devices* 24, 373 (1977).
- [6.9] S. A. Ringel, A. Rohatgi, and S. P. Tobin, “An approach toward 25-percent efficient GaAs heteroface solar cells,” *IEEE Trans. Electron Devices* 36, 1230 (1989).
- [6.10] P. D. DeMoulin, S. P. Tobin, M. S. Lundstrom, M. S. Carpenter, and M. R. Melloch, “Influence of perimeter recombination on high-efficiency GaAs p/n heteroface solar cells,” *IEEE Electron Device Lett.* 9, 368 (1988).
- [6.11] J. W. Wilson and L. V. Stock, “Equivalent electron fluence for space qualification of shallow junction heteroface GaAs solar cells,” *IEEE Trans. Electron Devices* 31, 622 (1984).
- [6.12] L. Prat, E. G. Moreno, and L. Castafier, “Heteroface Gallium Arsenide solar cells electron induced degradation analytical model,” *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 33, 1058 (1986).
- [6.13] M. Yamaguchi, C. Vargas-Aburto, S. J. Taylor, M. - J. Yang, T. Takamoto, E. Ikeda, H. Kurita, M. Ohmori, R. M. Uribe, D. Brinker, and D. A. Scheiman, “Radiation-resistance of InGaP solar cells,” *Proc. 25th IEEE Photovoltaic Specialists Conf.*, 1996, p. 163.
- [6.14] P. H. Than, Y. Takaki, K. Uchida, and S. Nozaki, “Temperature dependence of the InGaP/GaAs heterojunction phototransistor,” *IEICE Trans. Electron.* J96-C, 238 (2013) [in Japanese].
- [6.15] A. Kurokawa, Z. Jin, H. Ono, K. Uchida, S. Nozaki, and H. Morisaki, “Effects of surface

recombination on dc characteristics of InGaP/GaAs heterojunction bipolar transistors,” IEICE Tech. Rep. ED2005-198 (2006) [in Japanese].

[6.16] F. -Y. Yang, S. Nozaki, K. Uchida, and A. Koizumi, “Improvement in reliability of InGaP/GaAs HBT’s by ledge passivation,” IEICE Tech. Rep. ED2007-217 (2008) [in Japanese].

[6.17] S. - W. Tan, H. - R. Chen, W. - T. Chen, M. - K. Hsu, A. - H. Lin, and W. - S. Lour, “Characterization and modeling of three-terminal heterojunction phototransistors using an InGaP layer for passivation,” IEEE Trans. Electron Devices 52, 204 (2005).

[6.18] W. Liu, E. Beam, T. Henderson, and S. - K. Fan, “Extrinsic base surface passivation in GaInP/GaAs heterojunction bipolar transistors,” IEEE Electron Device Lett. 14, 301 (1993).

[6.19] K. - Y. Chu, S. - Y. Cheng, T. - P. Chen, L. - Y. Chen, T. - H. Tsai, J. - H. Tsai, and W. - C. Liu, “Influence of emitter ledge width on the characteristics of InGaP/GaAs heterojunction bipolar transistors,” Ext. Abstr. 8th Int. Workshop Junction Technology, 2008, p.176.

[6.20] C. - K. Song and P. - J. Choi, “Effects of InGaP heteropassivation on reliability of GaAs HBTs,” Microelectron. Rel. 39, 1817 (1999).

[6.21] C. Algora, E. Ortiz, I. Rey - Stolle, V. Diaz, R. Pena, V. M. Andreev, V. P. Khvostikov, and V. D. Rumyantsev, “A GaAs solar cell with an efficiency of 26.2% at 1000 suns and 25.0% at 2000 suns,” IEEE Trans. Electron Devices 48, 840 (2001).

[6.22] R. C. Knechtli, R. Y. Loo, and G. S. Kamath, “High-efficiency GaAs solar cells,” IEEE Trans. Electron Devices 31, 577 (1984).

[6.23] N. Alim, F. R. Himel, S. T. Nabi, M. S. H. Khan, and R. Basak, “Optimized design and performance analysis of n+p doped GaAs-based solar cell,” Proc. 2nd Int. Conf. Advances in Electrical Engineering, 2013, p.119.

[6.24] S. M. Sze and K. K. Ng, Physics of Semiconductor Devices (Wiley, New York, 2007) 3rd ed., p.253.

第7章 HPT への電子線照射

7.1 はじめに

今後需要が高まる室内照明や自動車のヘッドライトに使われる白色 LED の強度をバックグラウンドの明るさに合わせて調光する省エネルギー型 LED 調光器の開発を念頭に置いて、電池不要の光検出器の宇宙用としての利用も期待されるので、太陽電池駆動 InGaP/GaAs 2T-HPT に電子線照射とその動作の耐放射線を検証する。また、電子線照射の HPT への影響を詳細に解析する。InGaP/GaAs HBT 特性への高エネルギー電子線照射の影響はこれまで多く調べられ、報告されているが[7.1]–[7.5]、InGaP/GaAs HPT 特性への高エネルギー電子線照射の影響についてはほとんど報告例がない。そのため、本研究では電子線照射による HPT の劣化について調べる。さらに、InGaP/GaAs HPT に対してエミッタレジパシベーションの及ぼす電子線照射の影響についても検討する。

7.2 太陽電池駆動 InGaP/GaAs 2T-HPT への高エネルギー電子線照射の影響

GaAs 太陽電池駆動 InGaP/GaAs 2T-HPT を宇宙応用への検討するために、日本原子力研究開発機構で 1 MeV の高エネルギー電子線照射を行った。フルエンス $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ の 1 MeV 電子線を InGaP/GaAs HPT と GaAs 太陽電池ともに照射された。HPT については、耐放射線試験結果はこれまでに報告されていないが、太陽電池について数多くの報告がある。米国のジェット推進研究所は劣化予測に必要なデータは大きく分けて 2 つ、①電子、陽子それぞれに対する劣化量のエネルギー依存性②電子と陽子のそれぞれに対する劣化量の比であるとしている。耐放射線性を求める基本は非劣化率のフルエンス依存性で、これを一般的に劣化曲線と呼んでいる。まずこの劣化曲線を、陽子ないし電子のエネルギーをパラメータとして地上照射試験を実施して取得することが必要となる。宇宙空間には広いエネルギー範囲の電子、陽子が存在するが、実験で取得するのは実際に太陽電池の劣化に寄与する数 10 keV~10 MeV 程度の範囲とされている。これまでの電子線照射による劣化の実験では、1 MeV のエネルギーで 75 %の照射前の太陽電池としての値を示すフルエンスを測定する[7.6]。GaAs 太陽電池において、 10^{15} cm^{-2} で 25%の劣化が見られているため、今回の実験では、1 MeV で 10^{15} cm^{-2} のフルエンスにする[7.6]。また、InGaAs/InP HBT の電子線照射の実験では、1 MeV で $2.4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ で劣化が見られ始めているので、材料、構造ともに類似する InGaP/GaAs HPT の電子線照射による信頼性の実験では、 10^{15} cm^{-2} が適当と考えた[7.7]。

図 7.1 は、光照射状態で電子照射の前後での InGaP/GaAs HPT の 2 端子動作のコレクタ光電流 ΔI_C 及び受光感度 S [A/W]を示す。電子線照射の前後での 2T-HPT のコレクタ光電流 ΔI_C はそれぞれ 0.76、0.71 mA である。InGaP/GaAs 2T-HPT のコレクタ光電流の減少率が 6.6%であり、電子線照射の後の 2T-HPT 特性はあまり劣化しないと分かった。光照射状態で電子照射の前後での GaAs 太陽電池の I-V 特性を図 7.2 に示す。

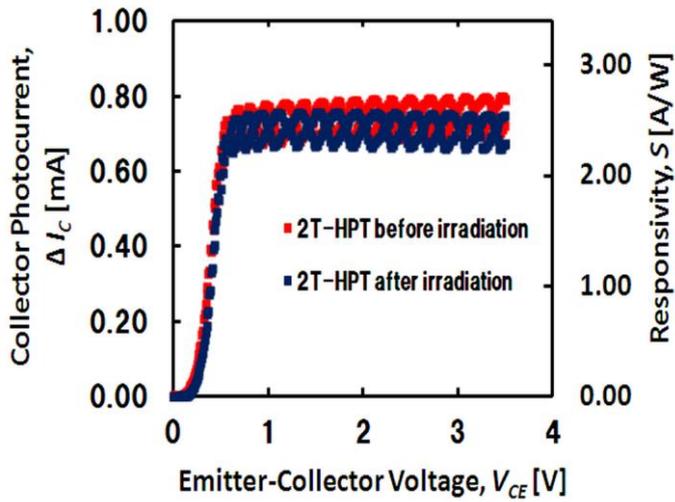


図 7.1 光照射状態で電子線照射の前後での InGaP/GaAs HPT の 2 端子動作のコレクタ光電流 ΔI_c 及び受光感度 S

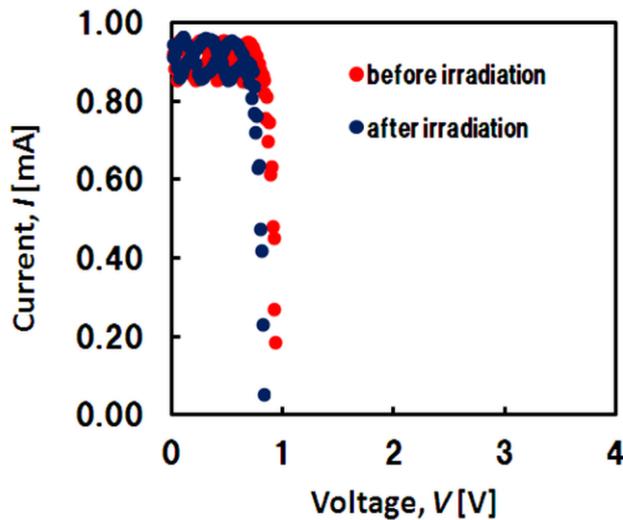


図 7.2 光照射状態で電子線照射の前後での GaAs 太陽電池の I-V 特性

電子線照射後の GaAs 太陽電池の短絡電流は変化しなく 0.89 mA であり、開放電圧は 0.9 V から 0.8 V に減少してしまった (減少率の 11.1%)。電子線照射の前後での GaAs 太陽電池の特性を表 7.1 にまとめる。最大出力 P_{max} が 0.58 から 0.45 mW に減少し (減少率 22.4%)、変換効率が 5.8% から 4.5% に減少した (減少率 22.4%)。GaAs 太陽電池の短絡電流は電子線照射の影響をあまり受けていないことに対して、開放電圧は少し減少した。このことは、光電流の減少よりは暗電流の増加による説明できる。

表 7.1 電子線照射前後での GaAs 太陽電池の特性

	Open-circuit voltage V_{oc} [V]	Short-circuit current I_{sc} [mA]	Maximum power P_{max} [mW]	Efficiency η [%]	Fill Factor F.F
Before irradiation	0.9	0.89	0.58	5.8	0.72
After irradiation	0.8	0.89	0.45	4.5	0.63

図 7.3(a)は暗状態での電子線照射の前後の GaAs 太陽電池の I-V 特性を示す。電子線照射の後、逆方向電流は大きく増加し、逆方向電圧の増加とともに増加する。このようにダイオードの逆方向電流が電圧に依存することは、空乏層における欠陥による少数キャリアの熱生成が原因である。

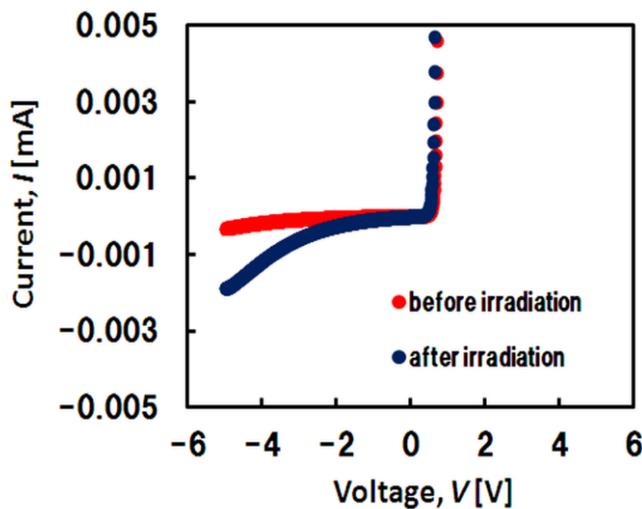


図 7.3(a) 暗状態での電子線照射の前後の GaAs 太陽電池の I-V 特性

図 7.3(a)では逆方向 I-V 特性に電子線照射の影響が顕著に見られ、順方向 I-V 特性への影響が一見ないように見られるが、図 7.3(b)に示すように順方向 I-V 特性を拡大すると、電子線照射の後、電流は大きく増加することが分かった。Danilchenko ら、Bourgoin や Zazoui らは GaAs 太陽電池の電子線照射において電子線量の増加とともに順方向電流が増加すると報告した [7.8], [7.9]。この順方向電流の増加は放射線誘導性の点欠陥によるキャリアの再結合の増加の原因であると考えた。短絡電流の大きな減少についても解析したが、InGaP/GaAs HPT エピを用いて作製された GaAs 太陽電池の短絡電流は電子線照射の影響をあまり受けない。通常の GaAs 太陽電池の n-GaAs 層と比べると、GaAs コレクタ層がより薄いため、光電流はほとんど空乏層における光生成キャリアによる。生成されたキャリアは空乏層内の電界より分離されてしまうため、放射線誘導性の点欠陥によって再結合せず、電子は n 層に正孔は p 層に移動する。

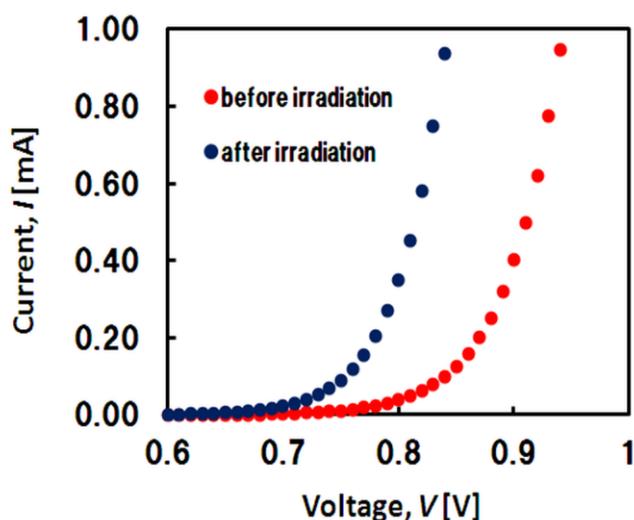


図 7.3(b) 暗状態での電子線照射の前後の GaAs 太陽電池の順方向 I-V 特性

GaAs 太陽電池の短絡電流やコレクタ光電流が電子線照射の影響をあまり受けないため、InGaP/GaAs 2T-HPT の動作点の光電流成分は減少しないが、光電圧は逆方向飽和電流の増加により減少する。2T-HPT のコレクタ光電流の電圧依存性より、GaAs 太陽電池駆動 InGaP/GaAs 2T-HPT の光電流は耐放射線の良い特性があり、宇宙における電池なしの光センサーの応用が期待される。

7.3 電子線照射の HPT への影響

前節で太陽電池駆動 2T-HPT への電子線照射の影響はあまり見られなかったが、次に電子線照射の HPT への影響を詳細に調べるため、フルエンス 1.0×10^{15} 、 $1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ の 1 MeV 電子線を日本原子力研究開発機構で N-HPT、L-HPT に照射した。図 7.4、図 7.5 は、それぞれ電子線照射の前後で暗状態での HPT のエミッタ接地電流-電圧特性 ($I_B = 5 \mu\text{A}$) を示す。照射された HPT での電气的ストレスを避けるために、HPT を測定するときに、入力としてのベース電流 I_B を 1、2、3、4、 $5 \mu\text{A}$ と小さくし、ストレス実験に使われたベース電流より小さい値を入力した。各 I_B を固定し、コレクタ・エミッタ間の電圧 V_{CE} を 0 から 1.5 V に変化させ、 V_{CE} に対するコレクタ電流 I_C を測定した。

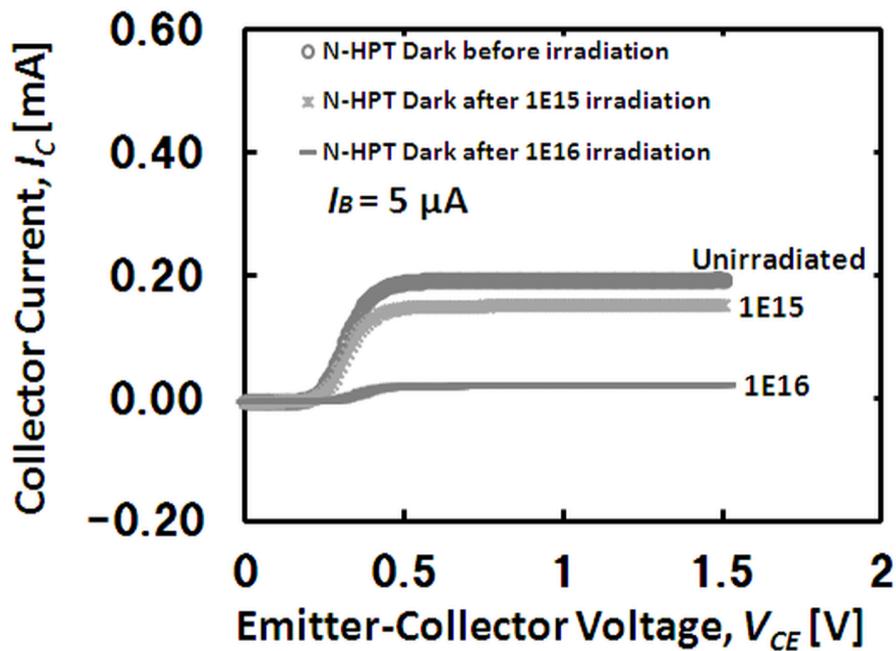


図 7.4 電子線照射の前後で暗状態での N-HPT の電気特性

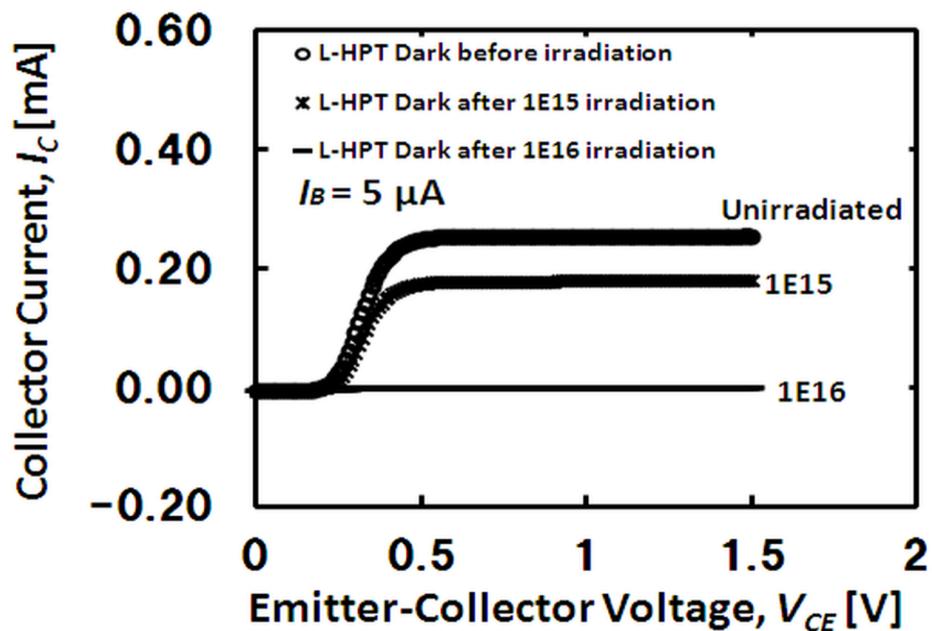


図 7.5 電子線照射の前後で暗状態での L-HPT の電気特性

図 7.6、図 7.7 は、それぞれ電子線照射の前後で光照射状態の HPT のエミッタ接地電流－電圧特性 ($I_B = 5 \mu A$) を示す。

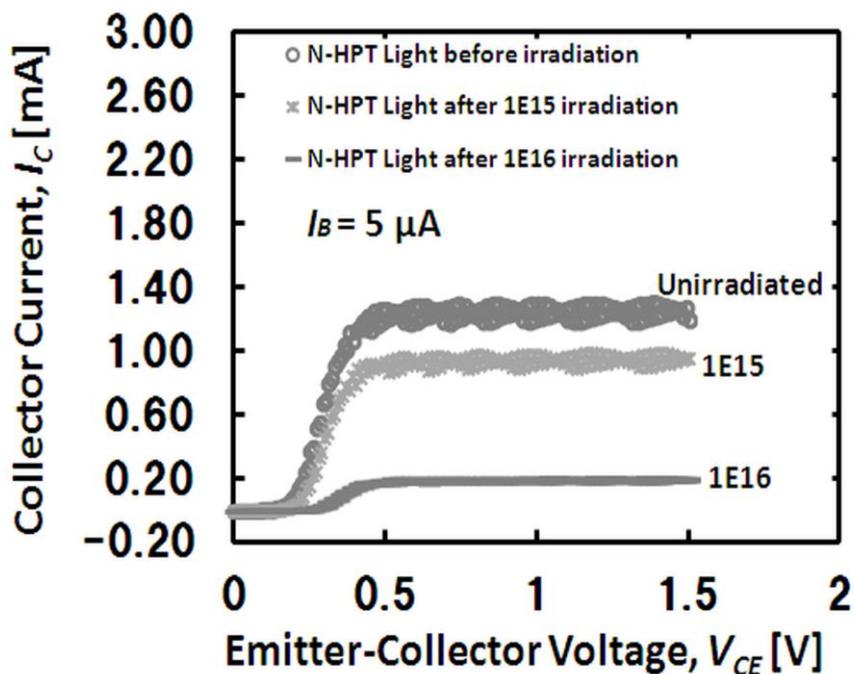


図 7.6 電子線照射の前後で光照射状態での N-HPT の電気特性

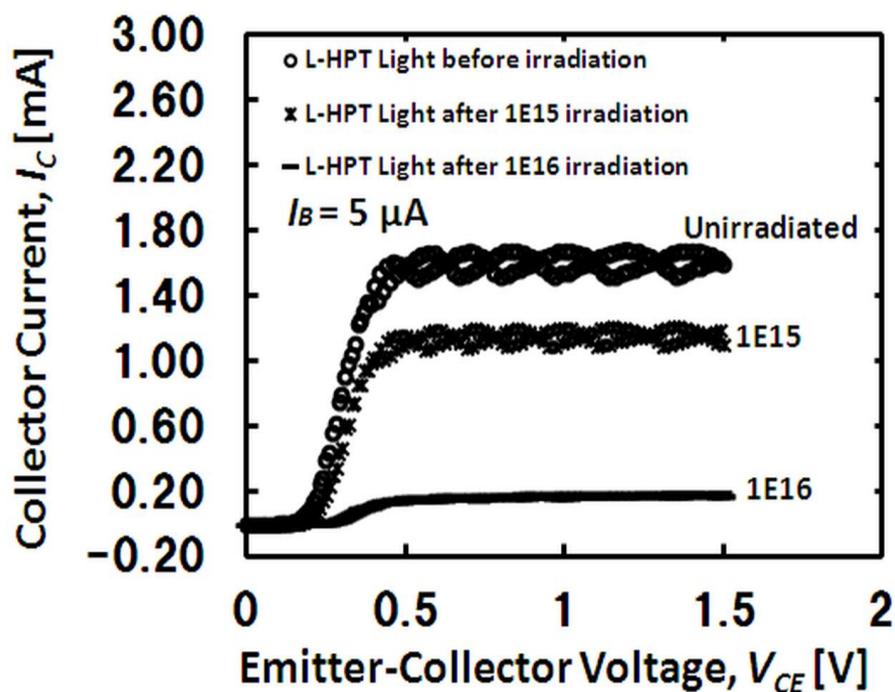


図 7.7 電子線照射の前後で光照射状態での L-HPT の電気特性

電子線照射後、暗状態も光照射状態も N-HPT、L-HPT とともに電気特性は劣化したことが分かった。 $1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ のフルエンスの電子線照射による劣化は $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ のフルエンスによる劣化より激しい。図 7.8、図 7.9、図 7.10、図 7.11 は電子線照射の前後で HPT の電流利得 β 及び ΔI_C のベース電流 I_B の依存性を示す。

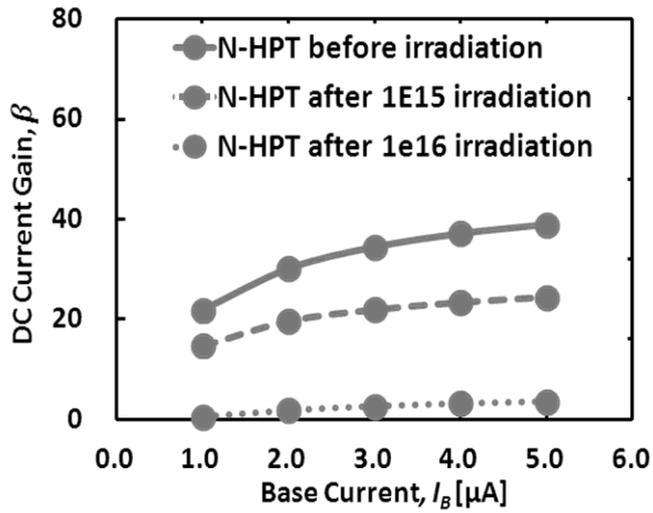


図 7.8 電子線照射の前後で N-HPT の電流利得 β のベース電流 I_B の依存性

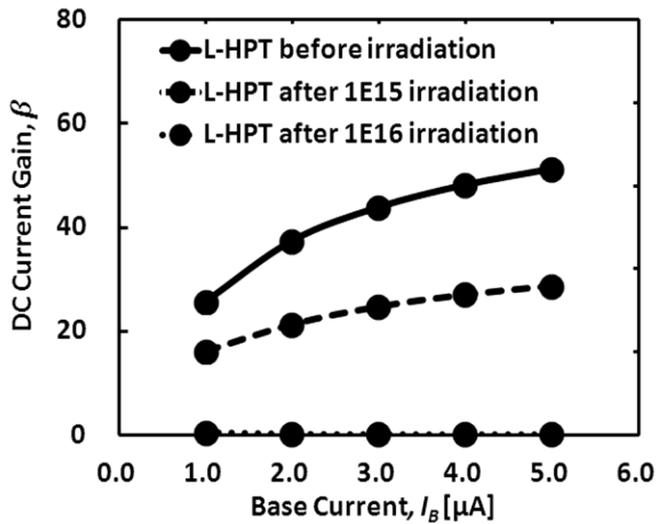


図 7.9 電子線照射の前後で L-HPT の電流利得 β のベース電流 I_B の依存性

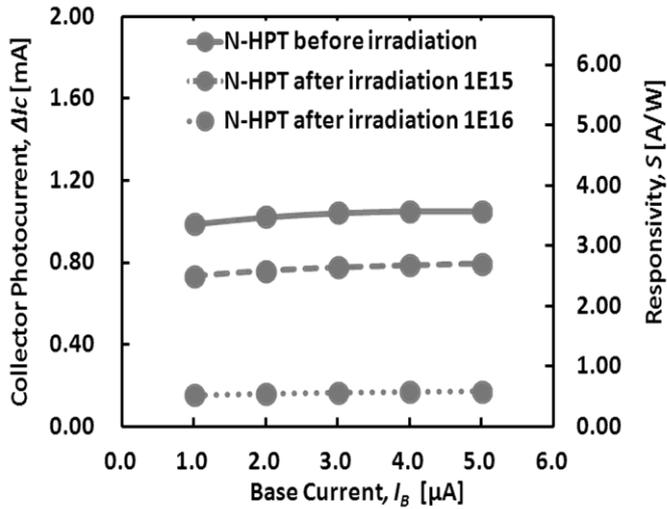


図 7.10 電子線照射の前後で N-HPT の ΔI_C のベース電流 I_B の依存性

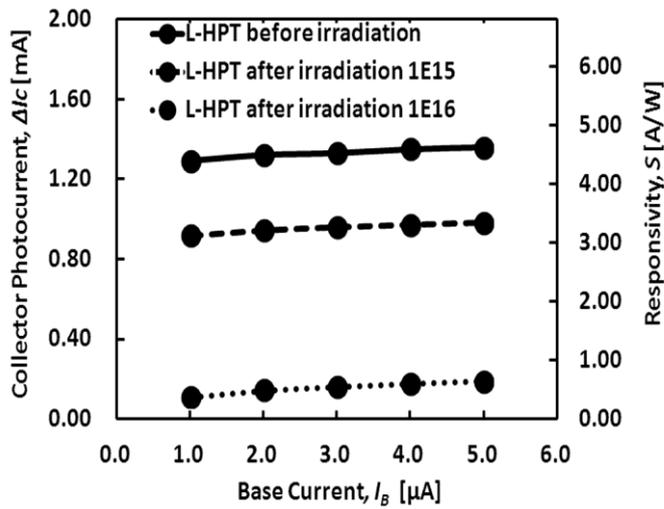
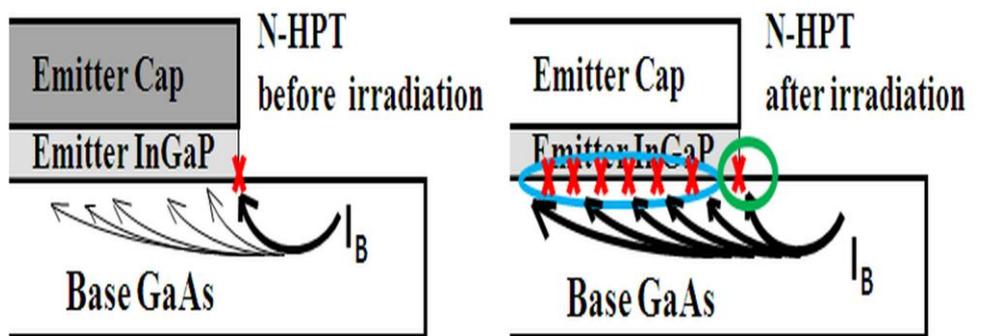


図 7.11 電子線照射の前後で L-HPT の ΔI_C 及び S のベース電流 I_B の依存性

$1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ フルエンスの電子線照射の後、N-HPT、L-HPT とともに電流利得 β はほとんど 0 に近いが、 ΔI_C はある程度見られた。しかしながら、 $1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ フルエンスの電子線照射は HPT を激しく劣化させ、また $1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ フルエンスの電子線照射に対してエミッタレッジパッシベーションの効果もなくなっているようである。 $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ フルエンスの電子線照射の後には、L-HPT の ΔI_C は N-HPT の ΔI_C より高いが、L-HPT の電流利得 β は N-HPT の電流利得 β とほとんど同じである。このことは、図 7.12 に示すように高エネルギー電子線照射によって生成された欠陥による再結合による。高エネルギー電子線照射は、エミッタ周辺での欠陥生成だけではなく、HPT のバルク欠陥生成も引き起こす。高エネルギー電子線照射によるバルク欠陥生成はエミッタ周辺での欠陥生成より支配的となる。この欠陥において、エミッタからベースに注入される電子とベース中の多数キャリアである正孔が再結合することで、ベース電流 I_B の成分になり、ベース電流 I_B を増加させ、HPT の電流利得 β 及び ΔI_C を低下する。



Bulk-related > Perimeter-related

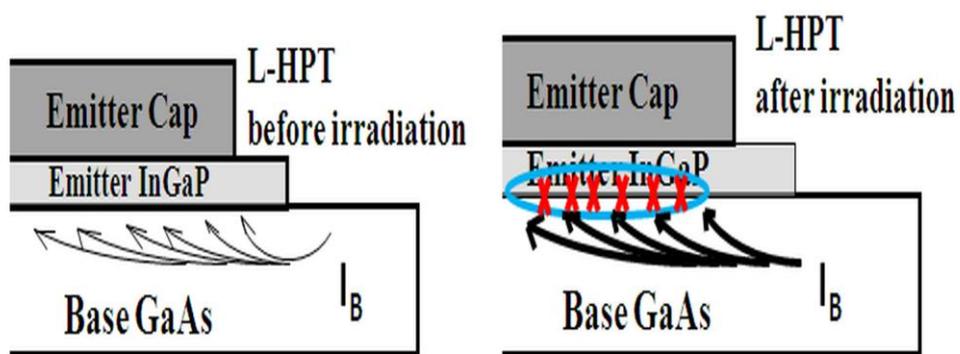


図 7.12 高エネルギー電子線照射によって欠陥生成図

これまでに、AlGaAs/GaAs HBTs、InGaP/GaAs HBTs の高エネルギー電子線照射の場合には、再結合センターはエミッタ周辺長よりバルク欠陥によると多く調べられ、報告されている[7.1]–[7.5]。電子線照射の後、L-HPT の ΔI_C は N-HPT の ΔI_C より僅かに高い。電子線照射によりバルク欠陥が生じ、図 7.8、図 7.9 に両 HPT の電流利得 β はほぼ同じ値に低下したが、生成される光電流により第 5 章式(5.2)における内部ベース電流が増加し、わずかの光電流の違いでもコレクタ光電流に差異が現れ、L-HPT の光電流が N-HPT より高くなると予想される。そのため、電子線照射に対してエミッタレッジパッシベーションの効果があることが考えられるが、周辺長を変化させ、高エネルギー電子線照射による HPT の劣化メカニズムを詳細に調べる必要がある。

7.4 電子線照射の HPT への影響の詳細な解析

7.4.1 電子線照射用 InGaP/GaAs HPT のマスク設計

電子線照射の HPT への影響を詳細に解析するために、電子線照射用 InGaP/GaAs HPT のマスク設計を行った。エミッタ面積 A を $160,800 \mu\text{m}^2$ に一定し、周辺長 P を $13,516, 22,287, 43,192, 57,534, 68,779, 85,636 \mu\text{m}$ に変化させ、 PIA が $0.08, 0.14, 0.27, 0.36, 0.43, 0.53$ に相当する。第 3 章で出たように、エミッタ・ベース電極は楕型電極とし、エミッタ集中が起きにくくする。6 種類の HPT のマスクを設計した。また、エミッタレッジパッシベーションの及ぼす電子線照射についても調べ、その効果を検討した。マスクの詳細は付録「A-1」で説明する。

7.4.2 HPT への電子線照射の影響

InGaP/GaAs HPT を宇宙応用への検討するために、1 MeV 高エネルギー電子線照射を行った。電子線のフルエンスを $1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 、 $5.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 、 $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ を変化させた。前節「7.2」で説明したように、米国のジェット推進研究所よりこれまで電子線照射による劣化の実験では、1 MeV のエネルギーで 75 % の照射前の太陽電池としての値を示すフルエンスを測定した[7.6]。今回の実験では、1 MeV で $1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 、 $5.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 、 $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ のフルエンスとした。また、InGaAs/InP HBT の電子線照射の実験では、1 MeV で $2.4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ で劣化が見られ始めているので、材料、構造ともに類似する InGaP/GaAs HPT の電子線照射による信頼性の実験では、1 MeV で $1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 、 $5.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 、 $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ が適当と考えた[7.7]。ベース電流 I_B を 1、2、3、4、5 μA と変化させ、各 I_B を固定してコレクタ・エミッタ間の電圧 V_{CE} を 0 から 3.5 V に変化させ、 V_{CE} に対するコレクタ電流 I_C を測定した。電子線照射の前後、全ての PIA において暗状態、光照射状態での HPT の 3 端子動作及び 2 端子動作のエミッタ接地電流－電圧特性を測定し、その結果を付録「B-1」に掲載した。ここでは、これらの結果を解析し、分かりやすく電子線照射の HPT への影響をまとめてみた。

まずは電子線照射の前の電流利得 β 及び ΔJ_C の PIA の依存性について解析する。エミッタ面積 A を一定にし、エミッタ周辺長 P を変化させて、電子線照射前の HPT の電流利得 β 及び ΔJ_C を測定する。図 7.13、図 7.14 は、それぞれ電流利得 β 、 ΔJ_C の PIA の依存性を示す ($I_B = 5 \mu\text{A}$)。図の中に、各 PIA に対する平均値とエラーバーも示した。このエラーバーは平均 $\pm \sigma$ (σ : 標準偏差) を示す。電子線照射の前、 PIA 0.08 において 11 個の N-HPT と 10 個の L-HPT、 PIA 0.14 において 10 個の N-HPT と 7 個の L-HPT、 PIA 0.27 において 8 個の N-HPT と 8 個の L-HPT、 PIA 0.36 において 7 個の N-HPT と 10 個の L-HPT、 PIA 0.43 において 6 個の N-HPT と 7 個の L-HPT、 PIA 0.53 において 5 個の N-HPT と 7 個の L-HPT の平均値とエラーバーを計算した。

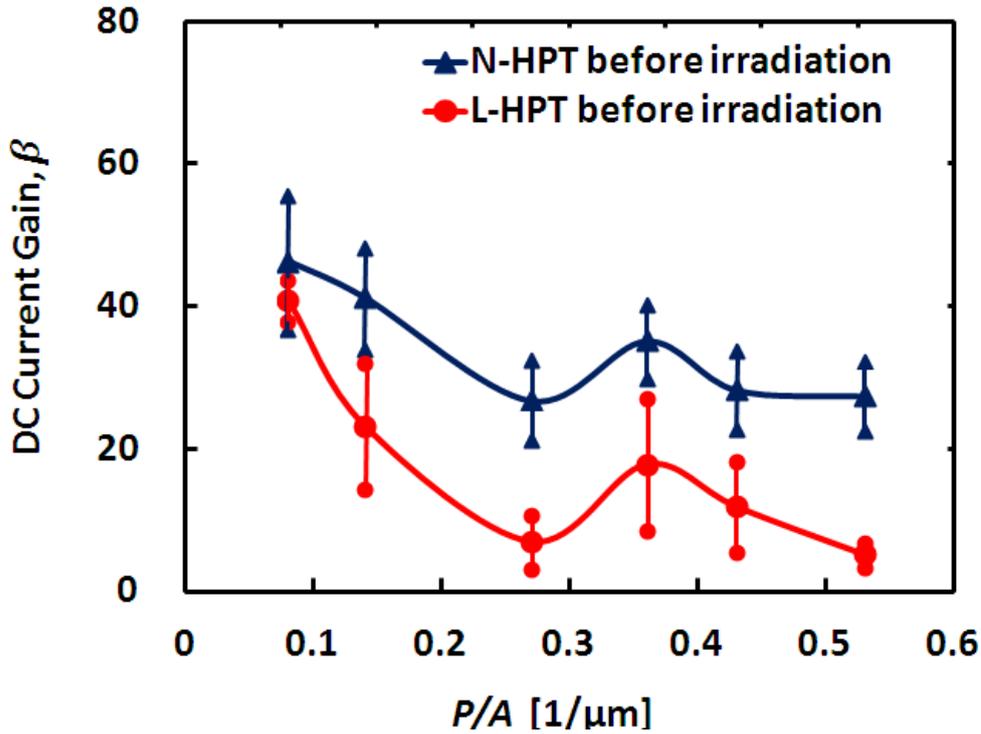


図 7.13 電子線照射の前、HPT の電流利得 β の平均値とその標準偏差の PIA の依存性 ($I_B = 5 \mu A$)

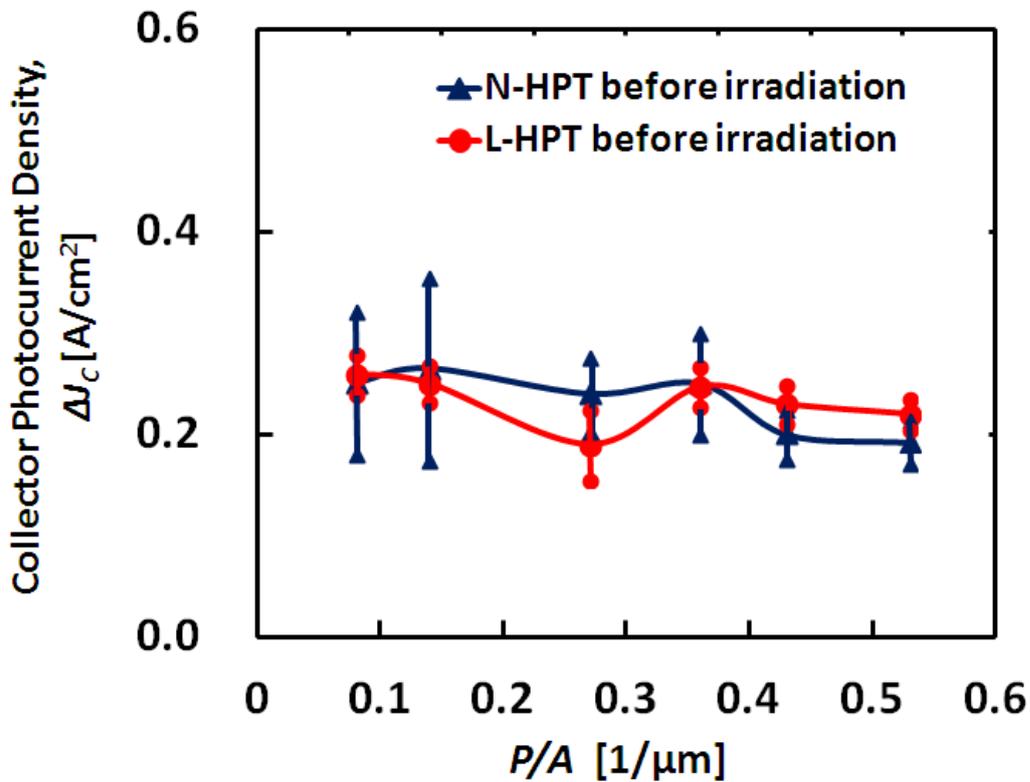


図 7.14 電子線照射の前、HPT の ΔJ_c の平均値とその標準偏差の PIA の依存性 ($I_B = 5 \mu A$)

図 7.13 の電子線照射前の N-HPT、L-HPT の電流利得 β を比較すると、L-HPT の方が低く、第 5

章図 5.3、図 5.8 の結果と矛盾するように思える。しかし、ベース電流が図 7.13 では図 5.3 に比べて小さい。図 5.8 の $I_B = 5 \mu\text{A}$ の N-HPT と L-HPT の β の平均値は L-HPT の方が高いものの試料間の測定値のばらつきを考慮すると、L-HPT の平均 $-\sigma$ の値が N-HPT の平均値とほぼ等しくなっており、エミッタレッジパッシベーションの効果が見られなくなっている。従って、 I_B が低い場合 L-HPT の β が N-HPT の β より低くなることも試料によってはあり得る。しかし、第 5 章で述べたように、エミッタレッジパッシベーションは実効エミッタ・ベース接合面積を増加させるため、実効ベース電流密度は L-HPT の方が低く、再結合電流の割合が高くなる。従って、L-HPT の β が N-HPT より低くなる傾向がある。実際に、 PA を増加させると、L-HPT の β は N-HPT よりさらに低くなるのは、 PA が増加すると実効エミッタ・ベース接合面積が増加するからである。

しかしながら、コレクタ光電流では、光電流がエミッタレッジパッシベーションにより増加するため、内部ベース電流が N-HPT のものと同等またはそれ以上になり、顕著な違いは N-HPT と L-HPT で見られなくなる。従って、同じ PA で N-HPT と L-HPT を直接比較することはできない。

PA が増加するにつれ N-HPT、L-HPT とともに電流利得が減少してしまう。全てのパターンにおいて、エミッタ面積を一定にし、エミッタ周辺長だけ変化させたため、 PA が大きくなると、エミッタ周辺長 P は長くなる。 PA 0.36 で電流利得 β は増加を示すが、全体的には PA が 0.08 から 0.27 に増加すると N-HPT、L-HPT 共に β は減少し、それ以上の PA では β にあまり変化は見られない。 PA が増加すると、エミッタ周辺での再結合電流が増加し、 β は減少するが、HPT の電流によりバーンイン効果が生じ、露出したベース表面での準位がベース層に含まれていた水素によりパッシベーションされ、 β は増加する。バーンイン効果による β への影響は PA が大きいほど大きくなる。従って、 PA が 0.27 以上では、バーンイン効果による β の増加がエミッタ周辺での再結合電流の増加を抑制し、 β は一定になると考えられる。ここで、一点注意が必要なのは、測定のベース電流が第 5 章のものより小さいことである。第 5 章では、L-HPT の電流利得、光コレクタ電流共に N-HPT より高いことを示したが、図 7.13 の PA が大きいところでは、L-HPT の β が N-HPT の β を下回り、図 7.14 では、 ΔJ_C に L-HPT、N-HPT で顕著な違いが見られない。これは、L-HPT は、先に述べたようにエミッタレッジパッシベーションにより実効エミッタ面積が大きくなり、実効ベース電流密度が低くなるため、ベース電流が低い場合、エミッタ効率が下がることによる。しかしながら、L-HPT の β が N-HPT の β より下回るものの、光照射による生成されるキャリアから有効に光電流 (ベース) を得ることができるため、L-HPT の ΔJ_C は N-HPT の ΔJ_C に匹敵するようになる。また、コレクタ光電流 ΔI_C の測定では PA が異なると、実際に光を吸収できる露出したベースの面積が変化するため ΔI_C を受光面積で割ったコレクタ光電流密度で PA の影響を表すことにした。

次に、電子線照射のフルエンスの HPT への影響を解析するために、HPT の β 及び ΔJ_C の電子線照射のフルエンスの依存性を示す図を作成した。図 7.15、図 7.16 はそれぞれ N-HPT、L-HPT の電流利得 β 及び β の変化率の電子線照射のフルエンス依存性を示す ($I_B = 5 \mu\text{A}$)。図 7.17、図 7.18 はそれぞれ N-HPT、L-HPT の ΔJ_C 及び ΔJ_C の変化率の電子線照射のフルエンス依存性を示す ($I_B = 5 \mu\text{A}$)。図 7.15、図 7.17 に示す電子線照射前の β 、 ΔJ_C が N-HPT、L-HPT で異なり、 PA にも依存するので、電子線照射のフルエンス依存性は、下記に定義される β 、 ΔJ_C の変化率 $\Delta\beta[\%]$ 、

$\Delta(\Delta J_c)[\%]$ により評価する。

$$\Delta\beta[\%] = \frac{\beta - \beta_0}{\beta_0} \times 100$$

$$\Delta(\Delta J_c)[\%] = \frac{\Delta J_c - \Delta J_{c0}}{\Delta J_{c0}} \times 100$$

ここで β_0 、 ΔJ_{c0} はそれぞれ電子線照射前の電流利得、コレクタ光電流密度値である。電子線照射のフルエンスが増加するにつれ、全ての *PIA* において N-HPT、L-HPT とともに電流利得 β は減少する。図 7.16 において、N-HPT では $5.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ のフルエンスまでは β は減少するが、それより大きい $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ のフルエンスでは増加している。一方、L-HPT で $5.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ までは β は同じく減少するが、それ以降はあまり変化が見られない。先に述べたように、N-HPT と L-HPT で電子線照射による影響が異なるように見えるのは、実効ベース電流密度の違いによると考えられる。N-HPT では実効ベース電流密度が高いので測定中にバーンイン効果が高いフルエンスの場合起こりやすく、 $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ で β の変化率は増加している。

また、図 7.18 より、両 HPT においてほとんどの *PIA* でフルエンス $1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ までは ΔJ_c の変化率は正に増加し、その後減少する。正の増加は電子線照射後のコレクタ光電流密度が電子線照射前より高いことを意味し、バーンイン効果によりエミッタ電極間の外部ベース表面の準位が水素によりパッシベーションされ、光照射により生成されるキャリアの再結合が抑制される。その効果は L-HPT の方が大きいように見える。 $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ では、N-HPT の場合全ての *PIA* で変化率が負に転じ、L-HPT では正を保っている。 β の変化率の違いは面積の違いによる実効ベース電流密度の違いにより説明されたが、光照射時のコレクタ光電流の違いは面積の違いよりは、生成される実効ベース光電流及び同電流密度での β の違いに帰因すると考えられ、エミッタレッジパッシベーションが電子線照射による劣化の抑制に効果的であると言える。

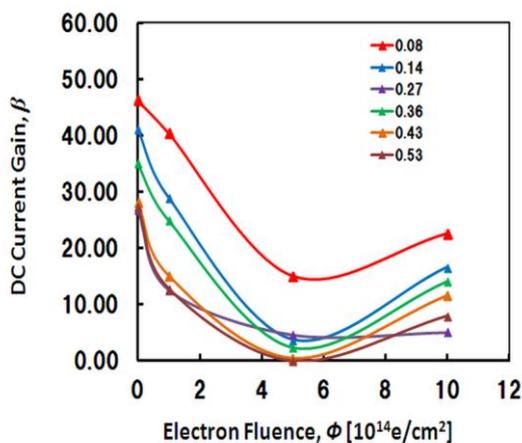


図 7.15(a) N-HPT の電流利得 β の電子線照射のフルエンスの依存性 ($I_B = 5 \mu\text{A}$)

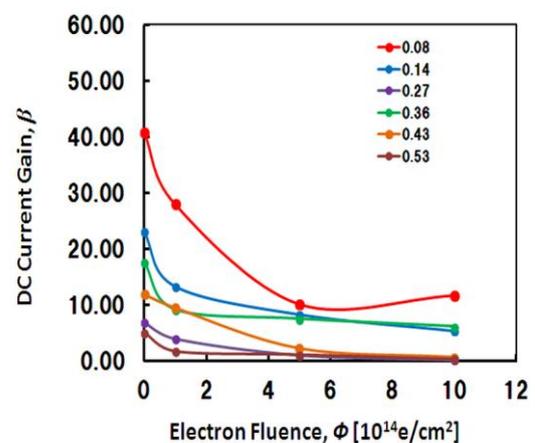


図 7.15(b) L-HPT の電流利得 β の電子線照射のフルエンスの依存性 ($I_B = 5 \mu\text{A}$)

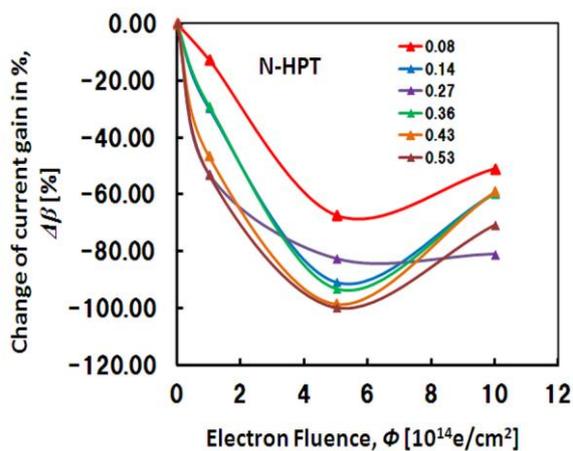


図 7.16(a) N-HPT の電流利得 β の変化率の電子線照射のフルエンスの依存性 ($I_B = 5 \mu\text{A}$)

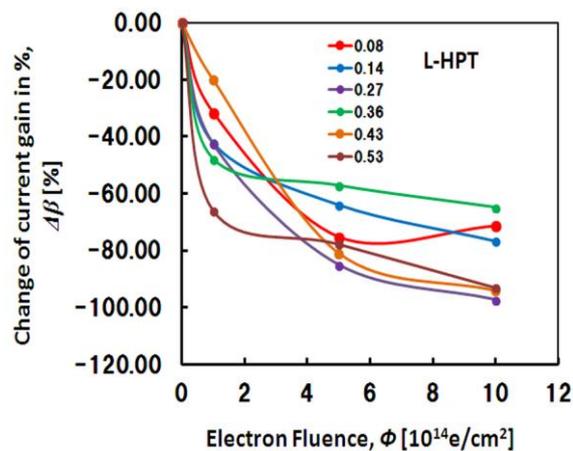


図 7.16(b) L-HPT の電流利得 β の変化率の電子線照射のフルエンスの依存性 ($I_B = 5 \mu\text{A}$)

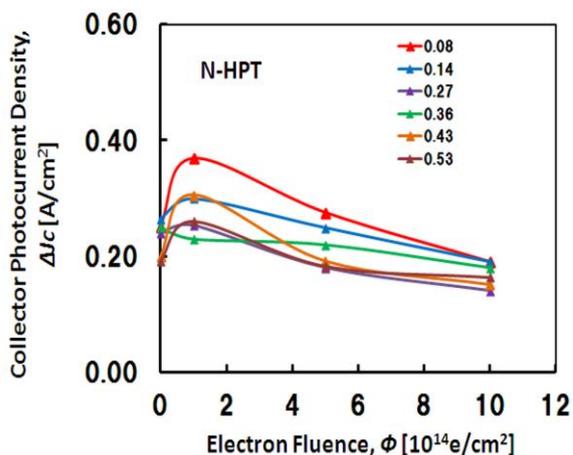


図 7.17(a) N-HPT の ΔJ_C の電子線照射のフルエンスの依存性 ($I_B = 5 \mu\text{A}$)

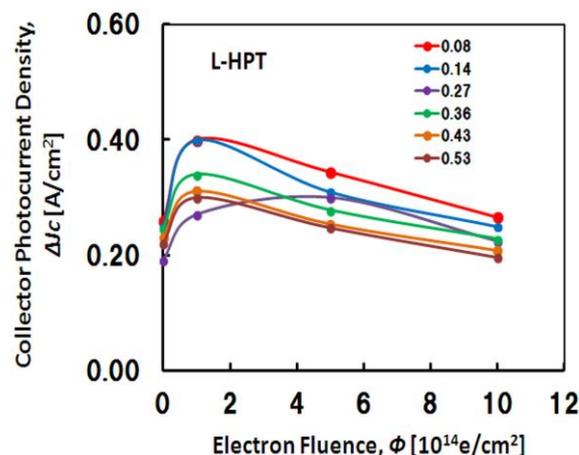


図 7.17(b) L-HPT の ΔJ_C の電子線照射のフルエンスの依存性 ($I_B = 5 \mu\text{A}$)

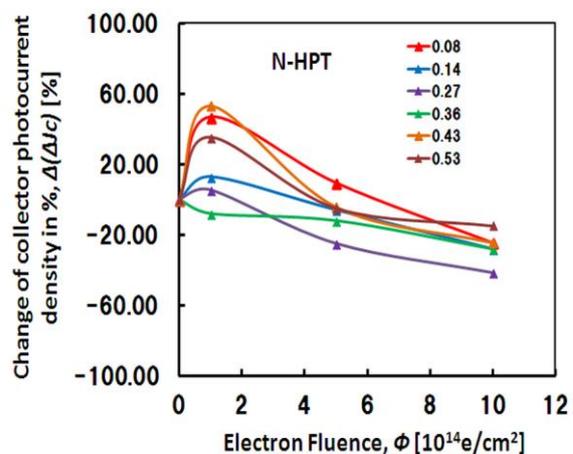


図 7.18(a) N-HPT の ΔJ_C の変化率の電子線照射のフルエンスの依存性 ($I_B = 5 \mu\text{A}$)

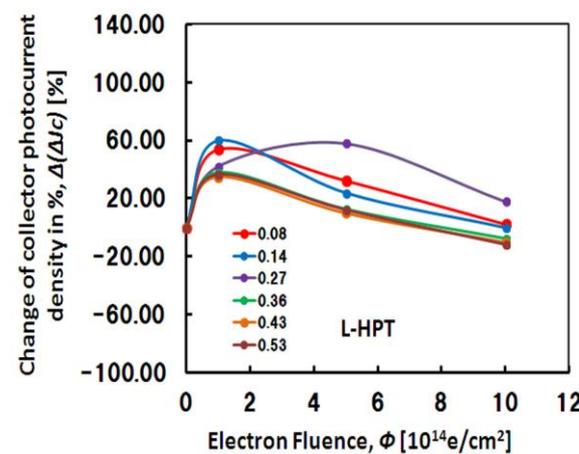


図 7.18(b) L-HPT の ΔJ_C の変化率の電子線照射のフルエンスの依存性 ($I_B = 5 \mu\text{A}$)

次は、電子線照射後の HPT の電流利得 β 及び ΔJ_C の PIA の依存性について解析する。図 7.19、図 7.20 は、全てのフルエンスにおいて電子線照射の後の N-HPT、L-HPT の電流利得 β 及び β の変化率の PIA の依存性を示す図である ($I_B = 5 \mu A$)。図 7.21、図 7.22 は、全てのフルエンスにおいて電子線照射の後の N-HPT、L-HPT の ΔJ_C 及び ΔJ_C の変化率の PIA の依存性である ($I_B = 5 \mu A$)。図 7.19 より、すべてのフルエンスにおいて、 PIA の上昇とともに両 HPT の電流利得 β は減少する。図 7.20 より、全てのフルエンスにおいて両 HPT の電流利得 β は電子線照射後減少している。電子線照射のフルエンスが低い $1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ では欠陥は原子の結合が弱いエミッタ周辺で生成されやすく、 PIA の増加につれ β が小さくなるが、高いフルエンスでは欠陥は試料全面に均一に生成され β は PIA にあまり依存しなくなる。しかし、L-HPT では原子の結合が周辺でも強いので低いフルエンスでも β は PIA にあまり依存しなくなる。

図 7.22 にはコレクタ光電流密度 ΔJ_C その変化率の PIA 依存性を示す。若干増減は見られるものの ΔJ_C は PIA に依存しないようである。

以上の見解は、N-HPT と L-HPT の β 、 ΔJ_C の変化率それぞれを同グラフにした図 7.23、図 7.24 を見れば明確である。

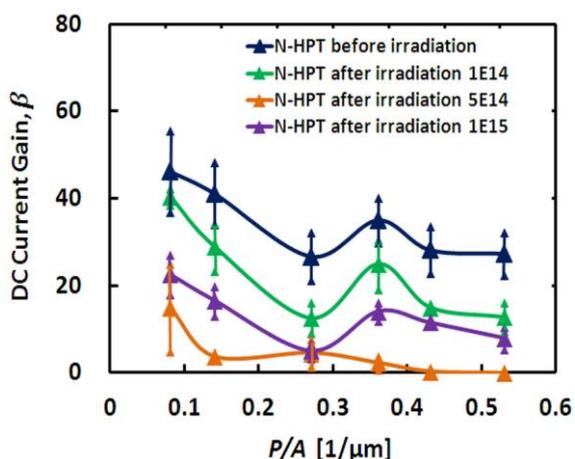


図 7.19(a) 電子線照射の後の N-HPT の電流利得 β の PIA の依存性 ($I_B = 5 \mu A$)

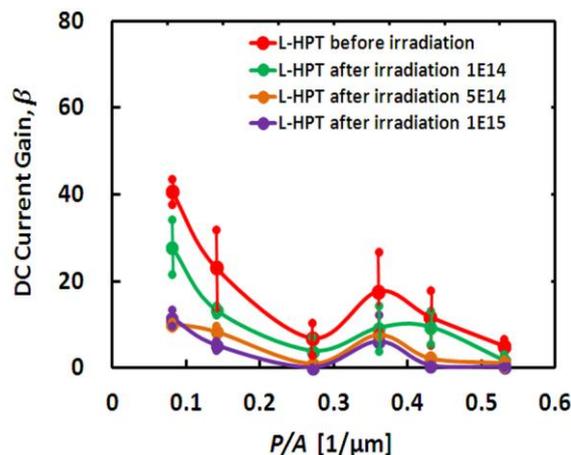


図 7.19(b) 電子線照射の後の L-HPT の電流利得 β の PIA の依存性 ($I_B = 5 \mu A$)

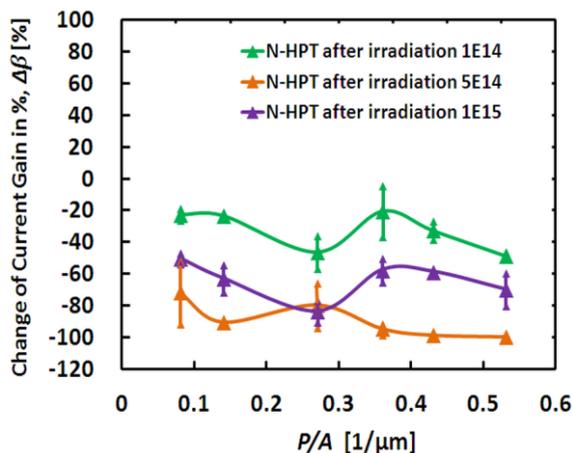


図 7.20(a) 電子線照射の後の N-HPT の電流利

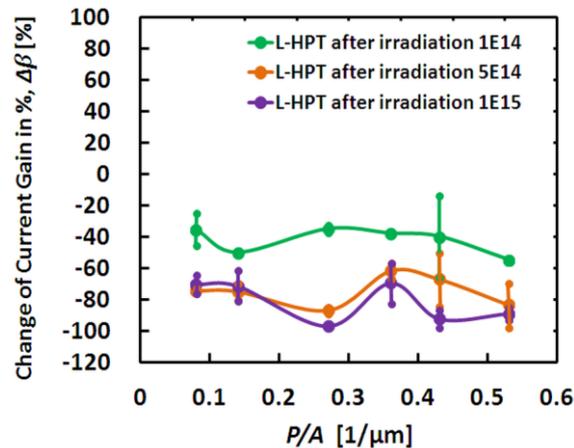


図 7.20(b) 電子線照射の後の L-HPT の電流利

得 β の変化率の PIA の依存性 ($I_B = 5 \mu A$)

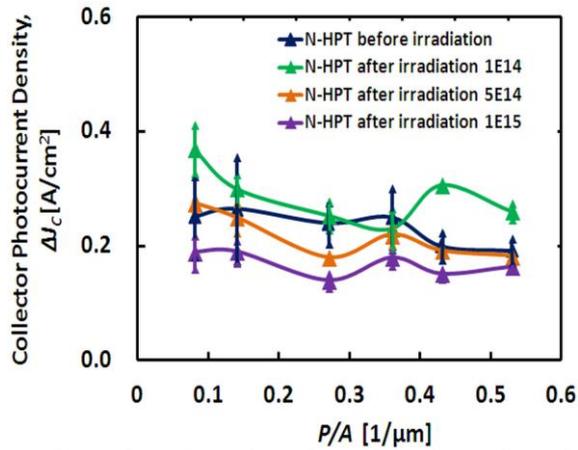


図 7.21(a) 電子線照射の後の N-HPT の ΔJ_C の PIA の依存性 ($I_B = 5 \mu A$)

得 β の変化率の PIA の依存性 ($I_B = 5 \mu A$)

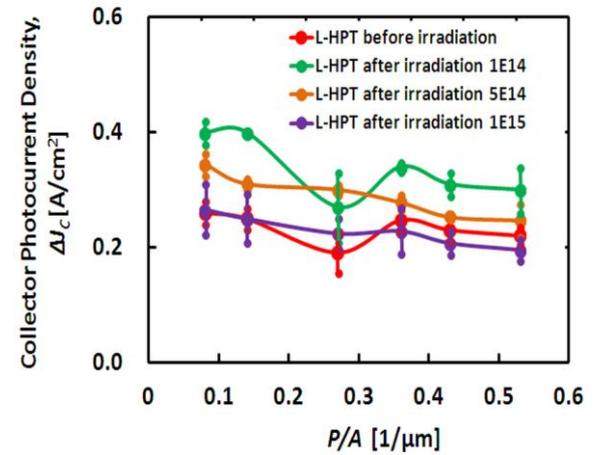


図 7.21(b) 電子線照射の後の L-HPT の ΔJ_C の PIA の依存性 ($I_B = 5 \mu A$)

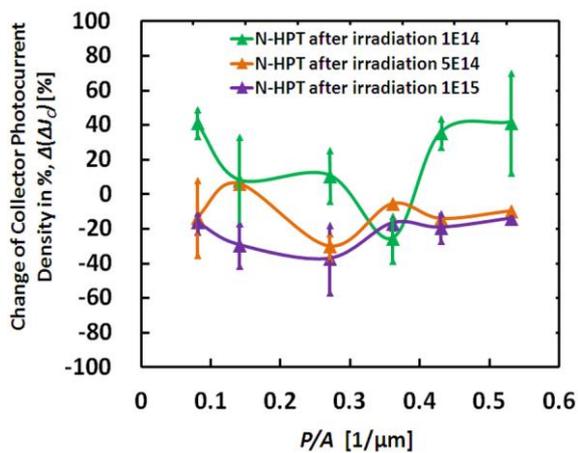


図 7.22(a) 電子線照射の後の N-HPT の ΔJ_C の変化率の PIA の依存性 ($I_B = 5 \mu A$)

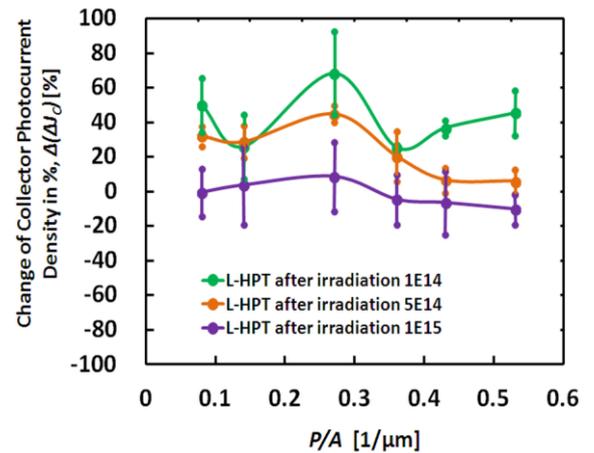


図 7.22(b) 電子線照射の後の L-HPT の ΔJ_C の変化率の PIA の依存性 ($I_B = 5 \mu A$)

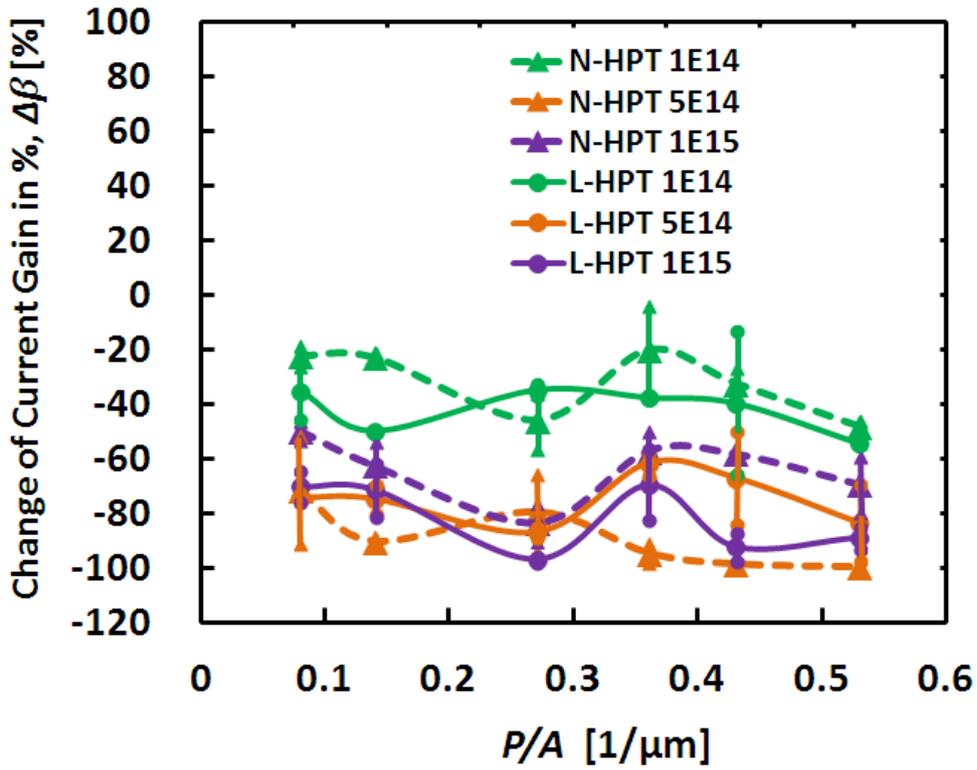


図 7.23 全てのフルエンスにおいて、N-HPT、L-HPT の電流利得 β の変化率の PIA 依存性 ($I_B = 5 \mu A$)

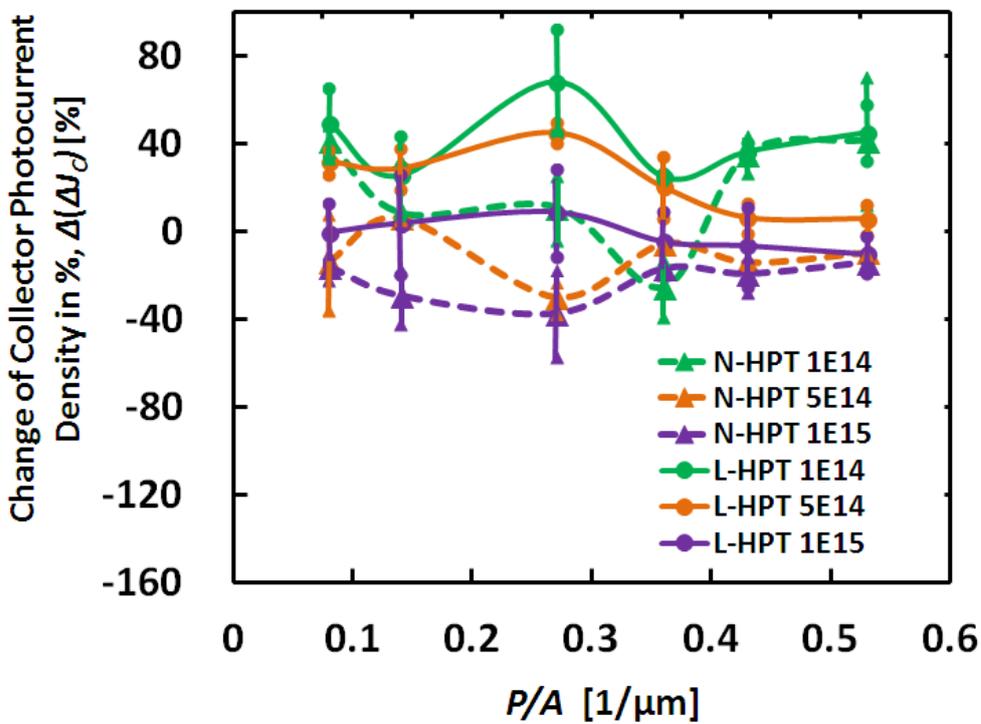


図 7.24 全てのフルエンスにおいて、N-HPT、L-HPT の ΔJ_C の変化率の PIA 依存性 ($I_B = 5 \mu A$)

7.4.3 高エネルギー電子線照射による InGaP/GaAs HPT の劣化メカニズム

次に、高エネルギー電子線照射による HPT の劣化メカニズムを検討するために、ベース電流 I_B について解析する。まず、 PIA 0.27 において室温で $1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ フルエンスの電子線照射の前後の両 HPT の Gummel Plots を測定し、図 7.25、図 7.26 に示す。通常、Gummel Plots はベース・コレクタ間を短絡し、ベース・エミッタ間の電圧を変化させ、 I_C 、 I_B を測定し、得られる。

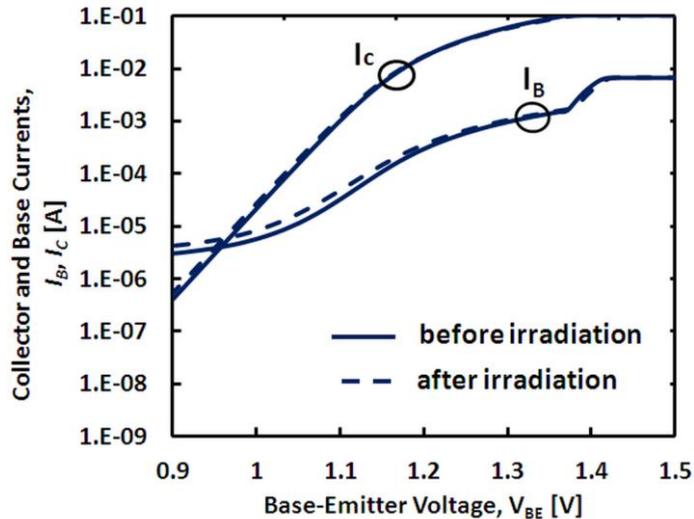


図 7.25 PIA 0.27 において室温で $1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ フルエンスの電子線照射の前後の N-HPT の Gummel Plots

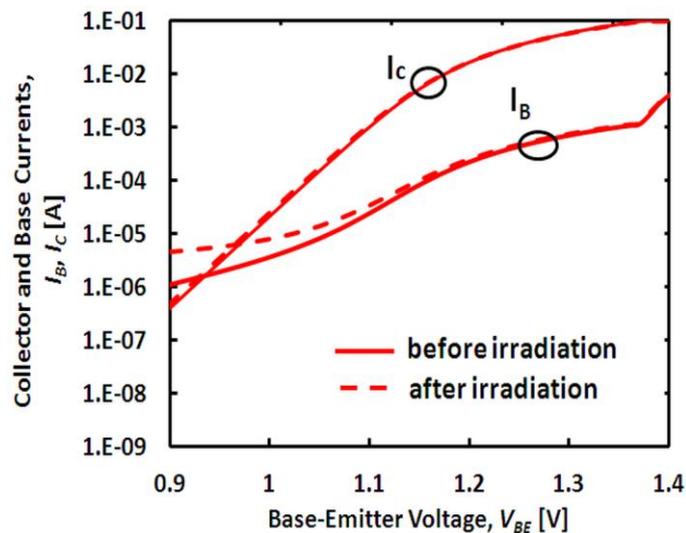


図 7.26 PIA 0.27 において室温で $1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ フルエンスの電子線照射の前後の L-HPT の Gummel Plots

電子線照射の前後、N-HPT、L-HPT 共に I_C が変化しないが、 I_B が低い電圧 V_{BE} 領域で大きく増加している。HBT のコレクタ電流 I_C はベース・コレクタに電子線照射により欠陥が形成されたとしても、ベース幅が充分狭く、コレクタが空乏している場合、ほとんど変化しない。しかし、

低フルエンスの場合電子線照射によりエミッタ周辺でのエミッタ・ベース界面に欠陥が生成されやすいため、ベース電流がエミッタ周辺での再結合電流の増加にともない増加し、 β が減少する。高フルエンスの場合は周辺のみならずエミッタ電極下のエミッタ・ベース界面全域に欠陥が形成され、 β が PIA に関係なく電子線照射により減少する。

L-HPT では、エミッタレッジパッシベーションによりエミッタ周辺が InGaP で覆われているため、低フルエンスの電子線照射でも特別に多く周辺に欠陥が生成されるわけではない。しかし、図 7.20 で L-HPT の方がフルエンス $1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ で劣化が N-HPT より激しいのは、先に述べたように実効面積が大きく実効ベース電流密度が小さいによる。

次に、電子線照射により再結合電流が増加する原因となる深い準位を有する欠陥の生成について HBT での説明を参考に述べる[7.1]–[7.5]。エミッタ・ベース接合領域において電子線照射により生成された欠陥はエミッタ・ベース間空間電荷領域における再結合電流を増加させる。具体的には、電子線照射による InGaP/GaAs HBT の劣化ははじき出しといった非イオン化による損傷(変位損傷)によって生じると考えた。はじき出し損傷効果(DDD: Displacement Damage Dose Effect)とは、多量の放射線が入射し、半導体結晶を構成する原子がその定常位置からはじき出されることによって引き起こされる。はじき出された原子及び空格子点は、欠陥準位を形成し、半導体素子の諸特性を劣化させる。D. V. Lang らは室温で 1 MeV の電子線照射により GaAs の欠陥生成について報告した[7.10]。D.V. Lang らによると、電子線照射の後、GaAs 中の欠陥は E_1, E_2, E_3, E_4, E_5 の 5 つの電子トラップと H_1 の 1 つの正孔トラップが存在する。全ての欠陥は Ga サイト変位が起源であると考えられた[7.10]。その中に、 E_3 欠陥は Ga 原子変位によると推測されている。

一方、 ΔJ_C は電子線照射により PIA に関係なく減少する。これは、露出したベース領域及びその下のコレクタ領域で生成された少数キャリアがベース・コレクタ接合の空乏層に到達するのに必要な拡散長が欠陥の形成により減少するからである。空乏層に到達したベース層の電子はコレクタへ、コレクタ層の正孔はベースへ光電流として流れる。

7.4.4 電極間距離による HPT への電子線照射の影響

コレクタ光電流に大きな影響を与えるのはベースでの電子の拡散長、コレクタでの正孔の拡散長であるが、ベースが高濃度されている場合はコレクタでの正孔の拡散長がより重要となる。従って、電極間が増えると電子線照射による ΔJ_C の減少は大きくなると予想される。このことを確かめるために電極間を 105 μm に広げた HPT を作製し、電子線照射による影響を 25 μm のものと比較した。

7.4.4(1) マスク設計

エミッタ電極の形状は幅 6 μm 、長さ 1,400 μm 10 本からなる櫛型電極、電極間距離 105 μm とし、またベース電極の形状は幅 6 μm 、長さ 1,400 μm 11 なる櫛型電極、電極間距離 105 μm とした。エミッタ面積 A 376,800 μm^2 であり、周辺長 P 30,726 μm である。マスクの詳細は付録「A-2」に説明する。電極間の距離を大きくすると、エミッタ面積 A は大きくなり、105 μm の場合のエミッタ面積 A を 376,800 μm^2 にした。その場合のエミッタ周辺長を 30,726 μm とし、 PIA を 0.08 とした。このエミッタ面積は電極間 25 μm のものの 2.34 倍程度となる。

7.4.4(2) HPT への電子線照射の影響

暗状態、光照射状態での全てのフルエンスにおいて電子線照射の前後の $PIA = 0.08$ $d = 105 \mu\text{m}$ HPT のエミッタ接地の電流・電圧特性を付録「B-2」に掲載し、N-HPT、L-HPT の電子線照射前後の β 、 ΔJ_C のベース電流依存性を図 7.27～図 7.34 にまとめた。図では、電極間距離が異なると、エミッタ面積が異なるためベース電流密度に対する β 、 ΔJ_C を示している。図 7.27 から β は電極間距離に依存しないことが分かる。L-HPT の β が N-HPT より電流密度が低いのは先に述べた実効エミッタ面積の違いにより実効ベース電流密度が小さくなるためである。

図 7.28 はベース電流密度に対するコレクタ光電流密度を示す。エミッタ面積電極間距離が異なると、光を受光できる露出したベース領域の面積が異なるため、得られたコレクタ光電流を受光面積で割っている。

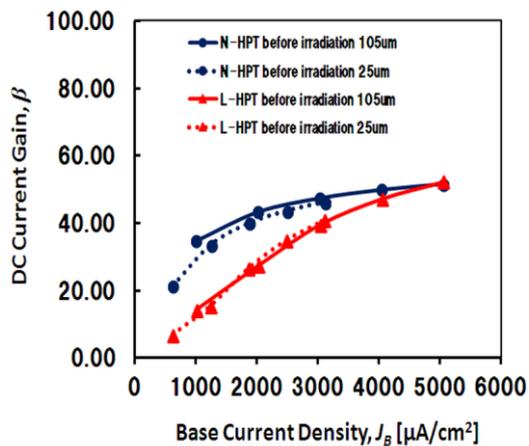


図 7.27 電子線照射の前の HPT の電流利得 β のベース電流密度 J_B の依存性

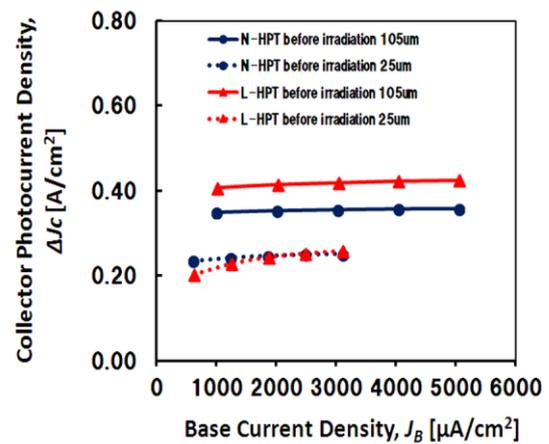


図 7.28 電子線照射の前の HPT の ΔJ_C のベース電流密度 J_B の依存性

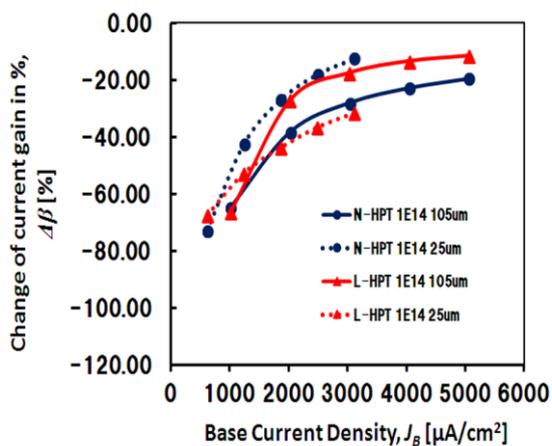


図 7.29 $1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ のフルエンスの電子線照射の後の HPT の電流利得 β の変化率のベース電流密度 J_B の依存性

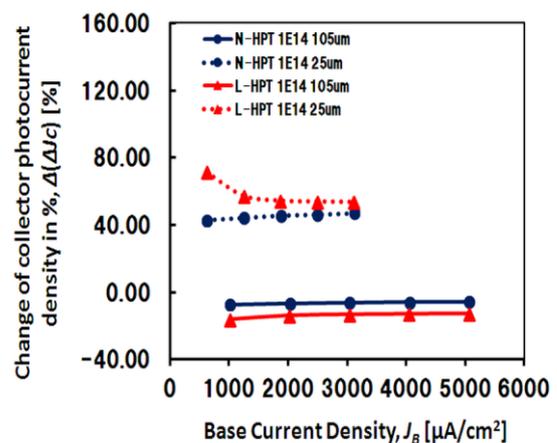


図 7.30 $1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ の電子線照射の後の HPT の ΔJ_C の変化率のベース電流密度 J_B の依存性

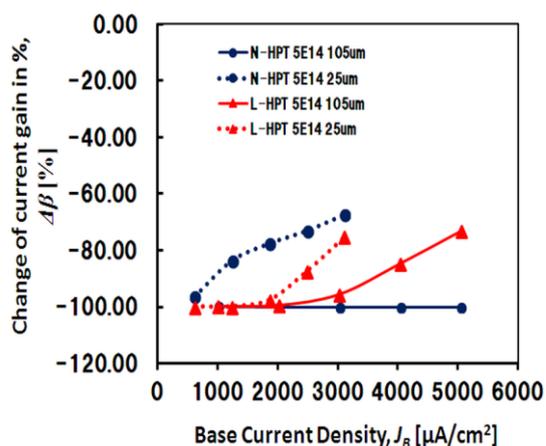


図 7.31 $5.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ のフルエンスの電子線照射の後の HPT の電流利得 β の変化率のベース電流密度 J_B の依存性

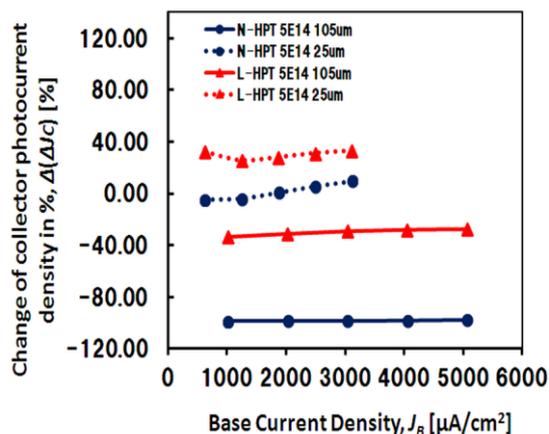


図 7.32 $5.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ の電子線照射の後の HPT の ΔJ_C の変化率のベース電流密度 J_B の依存性

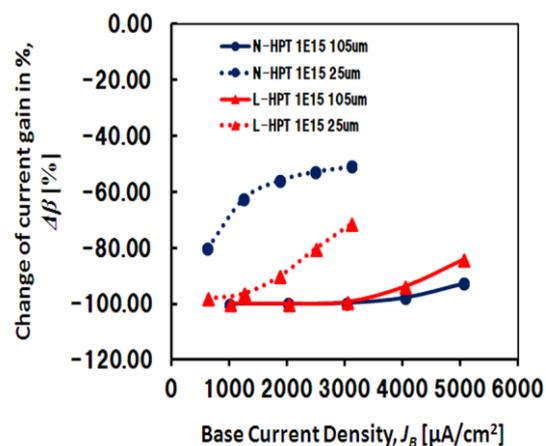


図 7.33 $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ のフルエンスの電子線照射の後の HPT の電流利得 β の変化率のベース電流密度 J_B の依存性

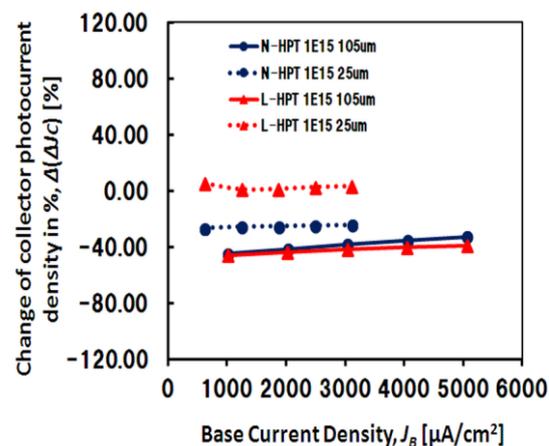


図 7.34 $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ の電子線照射の後の HPT の ΔJ_C の変化率のベース電流密度 J_B の依存性

図 7.29 に示すようにフルエンス $1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ では電子線照射後両電極間距離ともに β は減少しており、ベース電流密度が低いところで β の減少は顕著である。図 7.31、図 7.33 と比較すると高いフルエンスで β の変化率の電流密度依存性は小さくなり、電極間距離が大きいほど β の減少は大きくなる傾向がある。電極間距離が広がると、ベース・エミッタ間の電極間距離も広がり、横方向に延びた空乏層端近辺で電界が低いため、欠陥による再結合電流が増えると考えられる。従って、L-HPT の場合、105 μm の電極間では、その影響が少ないことが高いベース電流密度で N-HPT と比較して見られる。

一方、図 7.30、図 7.32、図 7.34 より、電極間が広い場合、コレクタ光電流密度は大きく減少することが分かる。このことはフルエンスが低い場合より顕著であり、フルエンス $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ では電極間 25 μm の方が両 HPT で電極間 105 μm より減少はまだ小さいが、その違いはフルエンス $1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ より顕著ではない。

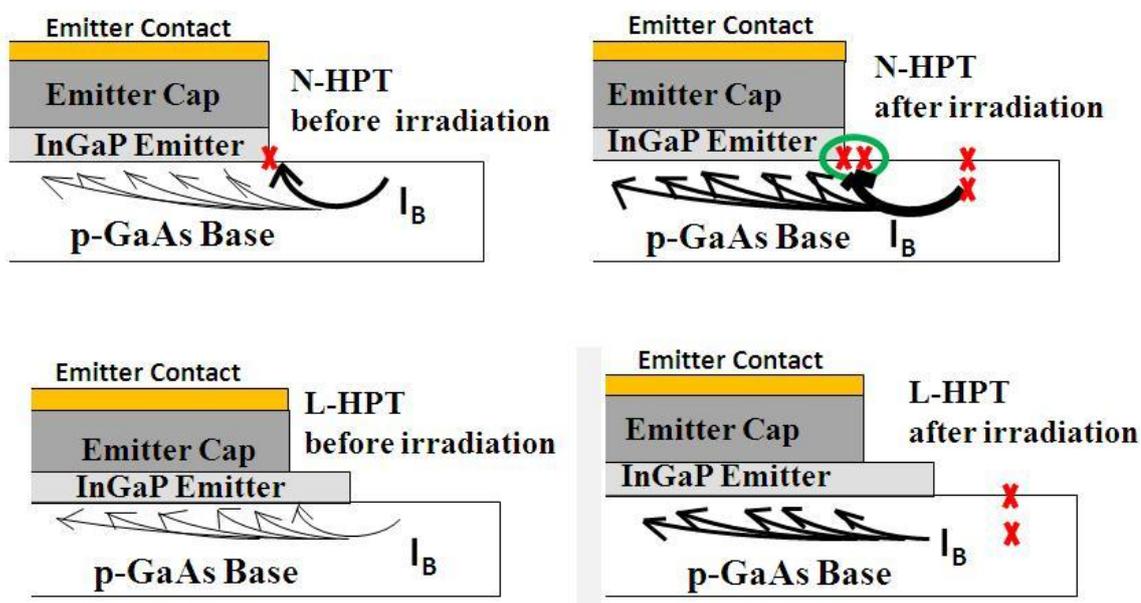
また、L-HPTの光コレクタ電流密度の減少は同じ電極間の場合、特に高いフルエンスの電子線照射ではN-HPTより少ない。

7.5 電子線照射によるHPTの β 、 ΔI_C の劣化機構

以上のHPTにおける電子線照射の β 、 ΔI_C への影響、またPIAの電子線照射後の β 、 ΔJ_C への影響より、HPTにおける電子線照射による欠陥生成、そのHPTの特性への影響を図7.35、図7.36にまとめることができる。解析では、バーンイン効果による影響を除いて考える。フルエンス量によって欠陥の生成箇所が異なり、その影響は β 、 ΔJ_C にとっても異なるようである。

低いフルエンスでは、N-HPT、L-HPT共に欠陥は生成されるが、エミッタ周辺部でのベース表面で欠陥が生成されやすい。N-HPTでは、エミッタ周辺が30 nmのInGaP Emitter層の上に305 nmのEmitter Cap層があり厚く覆われているため、電子線照射の際または測定中エミッタ周辺により発生されたストレスが強くなり、欠陥は原子の結合が弱いエミッタ周辺で生成されやすい。従って、急激な短時間電氣的ストレスの影響と同じように、N-HPTの方が電子線照射による β の低下は顕著となる。実験結果にはそれが見にくいかもしれないが、PIAへの β の依存性がN-HPTの方が大きいことに表われている。高フルエンスでは、電子線照射による影響は、N-HPT、L-HPT同等になる。これは、エミッタ周辺のみならず、エミッタ電極下のエミッタ・ベースにも欠陥が多く生成され、エミッタ・ベース空乏層内の再結合電流、ベース電流が増加することによる。L-HPTでは、エミッタレッジパッシベーションによりエミッタ周辺が30 nmのInGaP Emitter層が薄く覆われているため、電子線照射の際または測定中により発生されたストレスが弱く、原子の結合は切れにくい。そのため、 β がN-HPTより高くなるが、バルクの欠陥が支配的になると両HPTの β には違いが見えなくなる。エミッタレッジパッシベーションにより高フルエンスの電子線照射のHPTへの影響は長時間電氣的ストレスの影響と同様である。

Low fluence Dark



High Fluence Dark

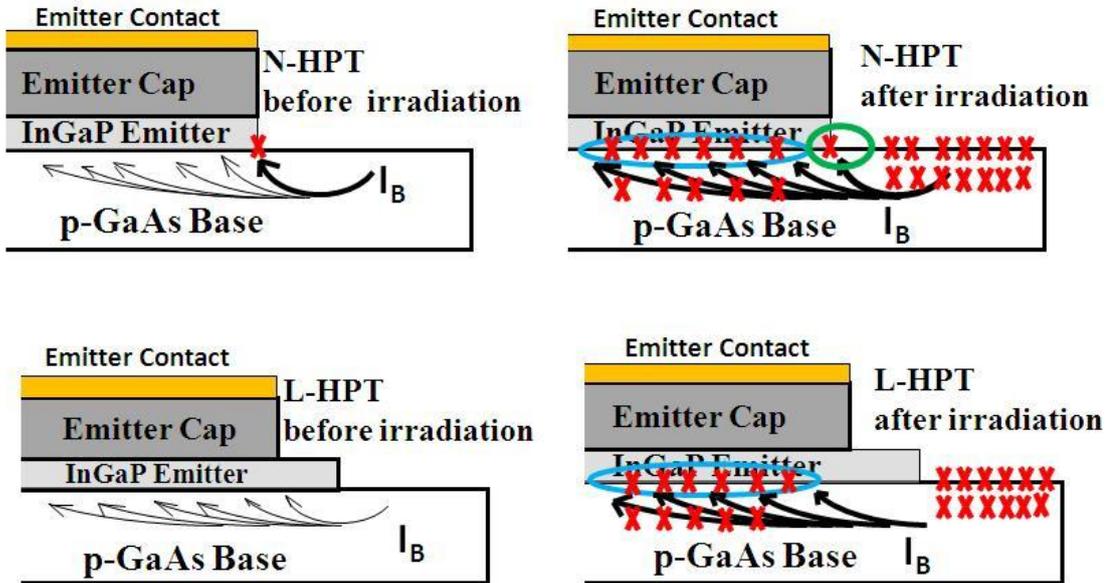
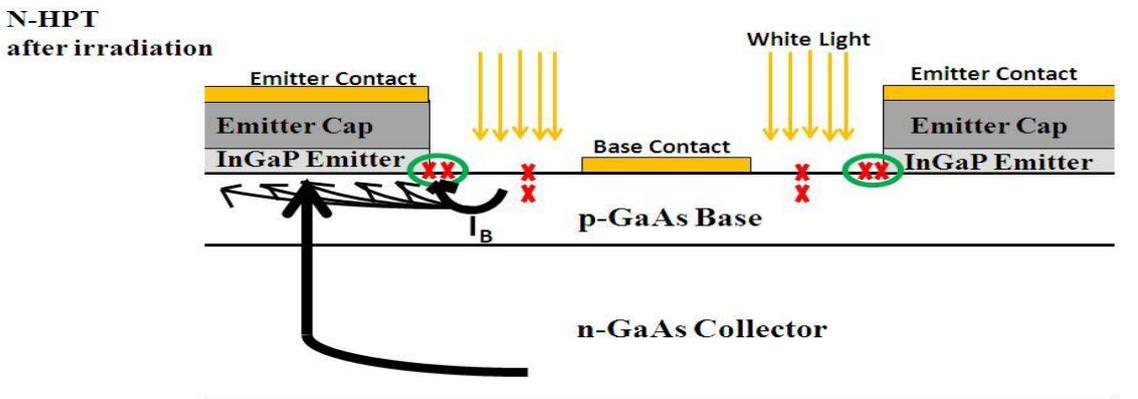
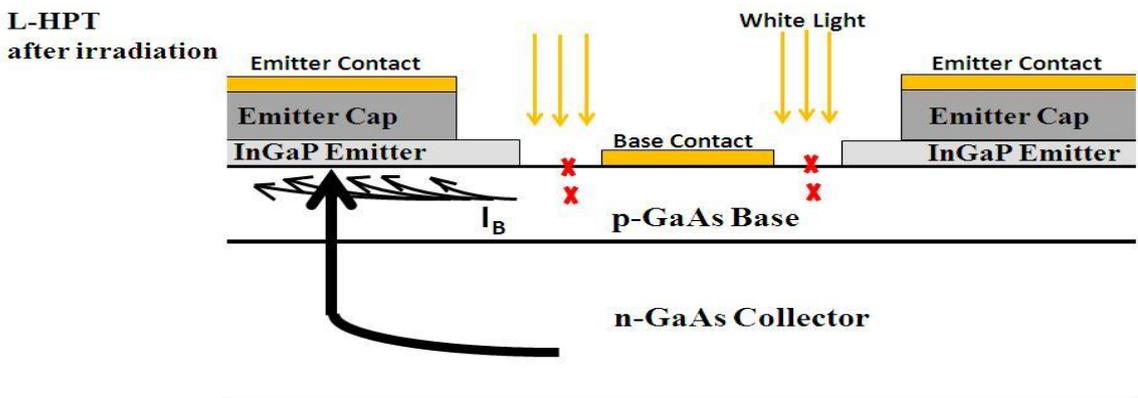


図 7.35 暗状態での低フルエンス及び高フルエンスの電子線照射による両 HPT の β の劣化機構

Low fluence Light

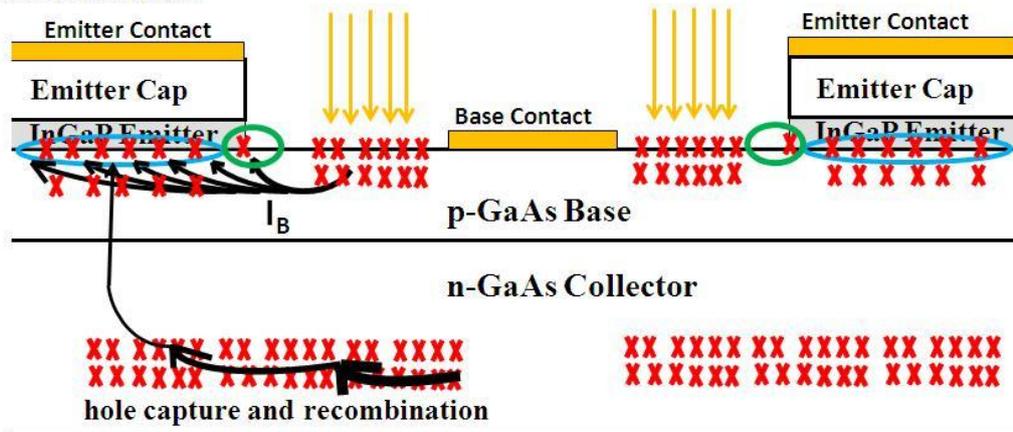


Low fluence Light



High Fluence Light

N-HPT after irradiation



High Fluence Light

L-HPT after irradiation

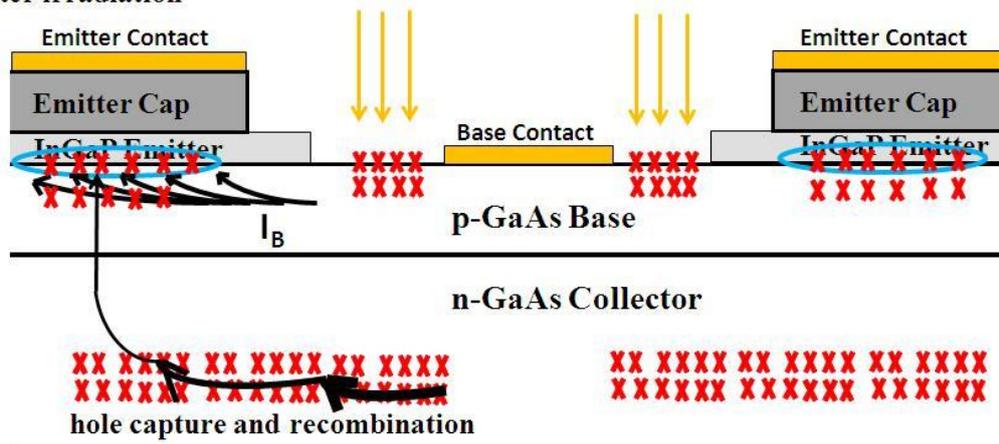


図 7.36 光照射状態での低フルエンス及び高フルエンスの電子線照射による両 HPT の ΔJ_C の劣化機構

コレクタ光電流においては、低フルエンスではエミッタ周辺に欠陥ができやすく、光電流による増幅が小さくなる。すなわち低フルエンスの電子線照射により HPT の ΔJ_C の劣化は β の劣化による引き起こされる。さらに、高いフルエンスでは、外部ベース及びその下のコレクタ層に欠陥が多く形成されるが、エミッタレッジパッシベーションによるベース横方向の空乏層の広がりにより、欠陥が形成されても少数キャリアの再結合が抑制され、L-HPT の方が N-HPT よりコレクタ光電流の電子線照射による減少は少なくなる。前節の「7.4.3」で説明したように、N-HPT では、エミッタ電極とベース電極間距離が $10 \mu\text{m}$ であるため、露出したベース領域及びコレクタで光を受光して生成される少数キャリアがベース・コレクタ接合の空乏層に到達するのに必要な拡散長が欠陥の形成により減少する。L-HPT では、レッジ幅が $5 \mu\text{m}$ であり、エミッタ電極とベ

ース電極間距離が 5 μm 短くなる。そのため、欠陥が形成されても光を受光して生成される少数キャリアは再結合せず、ベース・コレクタ接合の空乏層に到達できる。空乏層に到達し、電界によりベースに移動する正孔が多くなり、エミッタ・ベース間の光照射による自己バイアスは大きくなり、コレクタ光電流は増加する。しかし、電極間が広がるとエミッタレッジパッシベーションの効果が少なくなる。

よって、エミッタレッジパッシベーションは電子線照射の場合、特にコレクタ光電流において、有効であると分かった。従って、宇宙用光センサーとしての HPT にはエミッタレッジパッシベーションは不可欠であると考えられる。

7.6 まとめ

太陽電池駆動 InGaP/GaAs 2T-HPT を宇宙への応用のために、フルエンス $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ の 1 MeV 電子線を InGaP/GaAs HPT と GaAs 太陽電池ともに照射した。GaAs 太陽電池の変換効率が 20%以上減少したが、2T-HPT のコレクタ光電流はほとんど変化しなかった。GaAs 太陽電池、InGaP/GaAs 2T-HPT とともに、高エネルギー電子線照射の影響をあまり受けないため、太陽電池駆動 InGaP/GaAs 2T-HPT への宇宙応用において光センサーが期待される。

電子線照射のフルエンスが増加するにつれ、全ての PIA のパターンにおいて N-HPT、L-HPT とともに電流利得 β は減少する。N-HPT では $5.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ のフルエンスまでは β は減少するがそれ以上大きい $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ のフルエンスでは増加している。一方、L-HPT では $5.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ のフルエンスまでは β は同じく減少するが、それ以降はあまり変化が見られない。両 HPT においてほとんどの PIA でフルエンス $1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ のフルエンスまでは ΔJ_c の変化率は正に増加し、その後は減少する。 $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ のフルエンスでは、N-HPT の場合全ての PIA で変化率が負に転じ、L-HPT では正を保っている。エミッタレッジパッシベーションが電子線照射による劣化の抑制に効果的であると言える。

全てのフルエンスにおいて、 PIA の上昇とともに両 HPT の電流利得 β は減少する。両 HPT のコレクタ光電流密度 ΔJ_c とその変化率は PIA に依存しない。低フルエンスの場合電子線照射によりエミッタ周辺でのエミッタ・ベース界面に欠陥が生成されやすいため、ベース電流がエミッタ周辺での再結合電流の増加とともに増加し、 β が減少する。高フルエンスの場合は周辺のみならずエミッタ電極下のエミッタ・ベース界面全域に欠陥が形成され、 β が PIA に関係なく電子線照射により減少する。一方、 ΔJ_c は電子線照射により PIA に関係なく減少する。

両 HPT の β は電極間距離に依存しないことが分かる。 $1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ のフルエンスでは電子線照射後、 d 25 μm 、 d 105 μm の両電極間距離ともに β は減少しており、ベース電流密度が低いところで β の減少は顕著である。高いフルエンスで β の変化率の電流密度依存性は小さくなり、電極間距離が大きいほど β の減少は大きくなる傾向がある。一方、電極間が広い場合、コレクタ光電流密度は大きく減少することが分かる。このことはフルエンスが低い場合より顕著であり、フルエンス $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ では電極間 25 μm の方が両 HPT で電極間 105 μm より減少はまだ小さいが、その違いはフルエンス $1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ より顕著ではない。L-HPT の光コレクタ電流密度の減少は同じ電極間の場合、特に高いフルエンスの電子線照射では N-HPT より少ない。

電子線照射による HPT の劣化機構としては、フルエンス量によって欠陥の生成箇所が異なり、その影響は β 、 ΔJ_c にとっても異なることである。従って、エミッタレッジパッシベーションは電

子線照射の場合、特にコレクタ光電流において、有効であると分かった。

参考文献

- [7.1] S. Vuppala, C. Li, P. Zwicknagl, and S. Subramanian, “Neutron, proton, and electron irradiation effects in InGaP/GaAs single heterojunction bipolar transistors,” *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 50, 1846 (2003).
- [7.2] A. Sarkar, S. Subramanian, and S. M. Goodnick, “Electron irradiation effects in AlGaAs/GaAs single heterojunction bipolar transistors,” *IEEE Trans. Electron Devices* 47, 2024 (2000).
- [7.3] A. Bandyopadhyay, S. Subramanian, S. Chandrasekhar, A. G. Dentai, and S. M. Goodnick, “Degradation of DC characteristics of InGaAs/InP single heterojunction bipolar transistors under electron irradiation,” *IEEE Trans. Electron Devices* 46, 840 (1999).
- [7.4] A. Shatalov, S. Subramanian, S. Chandrasekhar, A. Dentai, and S. M. Goodnick, “Electron irradiation effects in polyimide passivated InP/InGaAs single heterojunction bipolar transistors,” *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 46, 1708 (1999).
- [7.5] A. Bandyopadhyay, S. Subramanian, S. Chandrasekhar, A. G. Dentai, and S. M. Goodnick, “Degradation of InGaAs/InP double heterojunction bipolar transistors under electron irradiation,” *IEEE Trans. Electron Devices* 46, 850 (1999).
- [7.6] S. R. Messenger, G. P. Summers, E. A. Burke, R. J. Walters, and M. A. Xapsos, “Modeling solar cell degradation in space: a comparison of the NRL displacement damage dose and the JPL equivalent fluence approaches,” *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 9, 2001, p.103.
- [7.7] A. Bandyopadhyay, S. Subramanian, S. Chandrasekhar, A. Dentai, and S. M. Goodnick, “Degradation of InGaAs/InP single heterojunction bipolar transistors under high energy electron irradiation,” *Microelectron. Rel.* 39, 333 (1999).
- [7.8] B. Danilchenko, A. Budnyk, L. Shpinar, D. Poplavskyy, S. E. Zelensky, K. W. J. Barnham, and N. J. Ekins - Daukes, “1 MeV electron irradiation influence on GaAs solar cell performance,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 92, 1336 (2008).
- [7.9] J. C. Bourgoin and M. Zazoui, “Irradiation-induced degradation in solar cell: characterization of recombination centres,” *Semicond. Sci. Technol.* 17, 453 (2002).
- [7.10] D. V. Lang, R. A. Logan, and L. C. Kimerling, “Identification of the defect state associated with a gallium vacancy in GaAs and $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$,” *Phys. Rev. B* 15, 4874 (1977).

第 8 章 結論

本論文では、白色光に対する光応答の高感度検出への応用を目的に、InGaP/GaAs HPT を作製し、測定及び評価を行い、HPT の特性を高効率化した。HPT の温度特性や HPT への電氣的ストレスの影響や HPT への高エネルギー電子線照射の影響などのような HPT の信頼性についても評価を行った。さらに、GaAs 太陽電池を集積し、電池なしでフォトトランジスタを駆動させた。太陽電池駆動 InGaP/GaAs 2T-HPT の宇宙用への応用を検討するために、日本原子力研究開発機構で高エネルギー電子線を InGaP/GaAs HPT 及び GaAs 太陽電池に照射した。電子線照射による InGaP/GaAs HPT と GaAs 太陽電池の劣化を解析した。

さらに、InGaP/GaAs HBT ではエミッタレッジパッシベーション効果が明らかになっているが、HPT への効果を初めて明らかにするために、エミッタレッジパッシベーションのない N-HPT とエミッタレッジパッシベーションのあり L-HPT の 2 種類の InGaP/GaAs HPT を作製し、300~400K の温度範囲で InGaP/GaAs HPT の電流利得 β 及び受光感度 S を測定した。エミッタレッジパッシベーションの及ぼす温度特性についても調べ、その効果を検討した。暗状態時、L-HPT は全てのベース電流で N-HPT よりも電流利得 β が高く、N-HPT に比べると L-HPT では、ベース電流 I_B が増加するにつれ暗状態での電流利得 β 及び受光感度 S はより大きく増加した。L-HPT の受光感度は、ベース電流 I_B 50 μ A で N-HPT の 4 倍であった。これより、HBT 以上に、HPT では、エミッタレッジパッシベーションが大変有効であることが明らかになった。HPT の温度依存性では、L-HPT、N-HPT とともに温度が上昇するにつれ電流利得 β は減少したが、380 K 以上では両 HPT の電流利得 β は温度にあまり依存しなかった。同じベース電流では、全ての温度で、L-HPT の電流利得 β は N-HPT の電流利得 β より高くなっており、エミッタレッジパッシベーションは高温での HPT の動作においても有効であった。また、L-HPT は全ての温度で N-HPT より高い受光感度を示し、エミッタレッジパッシベーションは、HBT 以上に HPT では有効であることを示した。

信頼性評価として InGaP/GaAs HPT に与える電氣的ストレスの影響について解析した。7 個の N-HPT と 7 個の L-HPT を作製し、室温及び高温での電氣的ストレス実験のために、それぞれ 1 個 N-HPT と 1 個 L-HPT を選んだ。電氣的ストレス印加の前後、HPT の電流利得 β 及び ΔI_c を測定した。電氣的ストレスの条件としては電流ストレスであり、ストレスの電流密度の 37 A/cm² に相当するコレクタ電流を 60 mA を保ち、室温で 1 時間、高温の 420 K で 15 分間に HPT に与えられた。室温での電氣的ストレスは N-HPT、L-HPT 特性に影響を与えるのに小さすぎたが、電氣的ストレスの効果は高温で加速されることが分かった。しかしながら、電氣的ストレスによる L-HPT の劣化は N-HPT の劣化より少なかった。ストレスによる劣化を明らかにするために、420 K の高温での電氣的ストレスを両 HPT に与えた。高温でのストレスの電流密度が 37 A/cm² であり、ストレス時間を 15 分に短くさせたにも関わらず、高温でのストレスによる両 HPT の電流利得 β の劣化及び ΔI_c の劣化は 300~400 K の全ての温度範囲で見られた。高温で電氣的ストレス印加の後の N-HPT の室温での特性はストレス印加前と比べると大きく低下した。N-HPT の大きい減少に対して、L-HPT の特性は僅かに低下した。300 から 420K の全ての温度範囲で高温での電氣的ストレスは L-HPT の電流利得 β 及び ΔI_c に影響を与えない。これに対して、高温での電氣的ストレスの印加の後の N-HPT の β 及び ΔI_c は温度に依存しなくなった。このことは、N-HPT への電氣的ストレスの影響が高温の影響より支配することによる。したがって、エミッタ

レッジパッシベーションは電氣的ストレスによる劣化を抑制するのに HBT 以上に HPT では有効であることを示された。

リモートエリアでのセンサーネットワーク、宇宙での応用を考えて、InGaP/GaAs HPT と GaAs 太陽電池を HPT のエピ上で集積し、電池交換不要な HPT を駆動させることを試みた。GaAs 太陽電池と同じウェハー上で集積する場合には、HPT の 2 端子動作を使った。GaAs 太陽電池の面積は 0.283 cm^2 、HPT エピの InGaP 層を窓層とし、HPT エピのベース層とコレクタ層で作製された。得られた太陽電池の短絡電流が 0.89 mA 、開放電圧が 0.9 V 、変換効率が 5.8% であった。この値は 2 端子動作の InGaP/GaAs HPT を動作するのに十分である。宇宙応用を検討するためには、日本原子力研究開発機構で作製された太陽電池駆動 2T-HPT に 1 MeV の電子線を照射した。電子線照射によって太陽電池駆動 2T-HPT の劣化はあまり見られなかった。従って、太陽電池駆動 2T-HPT への光検出器として宇宙応用の有効性が示された。

宇宙における白色光に対する光応答の高感度検出への応用を目的に、エミッタレッジパッシベーションのない N-HPT とエミッタレッジパッシベーションのある L-HPT の 2 種類の InGaP/GaAs HPT を作製し、日本原子力研究開発機構で両 HPT にフルエンス 1.0×10^{15} 、 $1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ の 1 MeV 電子線を照射した。電子線照射による HPT の劣化について詳細な研究も解析を行った。照射された HPT に電氣的ストレスを避けるためには、HPT を測定するときに、5.1 節、5.2 節で印加されたベース電流より小さくセッティングし、入力としてのベース電流 I_B を 1、2、3、4、 $5 \mu\text{A}$ と変化させた。電子線照射の後、暗状態も光照射状態も N-HPT、L-HPT とともに電気特性は劣化したことが分かった。 $1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ のフルエンスの電子線照射による HPT の劣化は $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ フルエンスによる HPT の劣化より激しかった。 $1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ フルエンスの電子線照射の後、N-HPT、L-HPT とともに電流利得 β はほとんど 0 に近いが、 ΔI_C はある程度見られた。 $1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ フルエンスの電子線照射は HPT を完全に劣化させると考えられた。また、 $1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ フルエンスの電子線照射に対してエミッタレッジパッシベーションの効果がなくなった。 $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ フルエンスの電子線照射の後、L-HPT の ΔI_C は N-HPT の ΔI_C より高かったが、L-HPT の電流利得 β は N-HPT の電流利得 β とほとんど同じであった。そのため、電子線照射に対してエミッタレッジパッシベーションの効果がある程度効くと考えられた。

電子線照射による HPT の電気特性の劣化についてさらなる詳細な研究を行った。また、エミッタレッジパッシベーションの及ぼす電子線照射についても検討した。エミッタ周辺長での欠陥生成とバルクでの欠陥生成どちらが支配することを調べるために、エミッタ面積 A を $160,800 \mu\text{m}^2$ に一定し、周辺長 P を 13,516、22,287、43,192、57,534、68,779、85,636 μm に変化させ、 PA が 0.08、0.14、0.27、0.36、0.43、0.53 に相当した。電子線のフルエンスを $1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 、 $5.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 、 $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ を変化させた。ベース電流 I_B を 1、2、3、4、 $5 \mu\text{A}$ と変化させ、電子線照射された HPT の測定中に電氣的ストレスがかけられないようにベース電流 I_B を小さく設定した。電子線照射の前、全体的には PA が 0.08 から 0.27 に増加すると N-HPT、L-HPT 共に β は減少し、それ以上の PA では β にあまり変化は見られないことに対して、コレクタ光電流密度 ΔJ_C においては L-HPT、N-HPT で顕著な違いが見られない。

電子線照射のフルエンスが増加するにつれ、全ての PA のパターンにおいて N-HPT、L-HPT とともに電流利得 β は減少する。N-HPT では $5.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ のフルエンスまでは β は減少するがそれ以上大きい $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ のフルエンスでは増加している。一方、L-HPT では $5.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$

のフルエンスまでは β は同じく減少するが、それ以降はあまり変化が見られない。両 HPT においてほとんどの PIA でフルエンス $1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ のフルエンスまでは ΔJ_c の変化率は正に増加し、その後は減少する。 $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ のフルエンスでは、N-HPT の場合全ての PIA で変化率が負に転じ、L-HPT では正を保っている。両 HPT の β の変化率の違いは面積の違いによる実効ベース電流密度の違いにより説明されたが、光照射時のコレクタ光電流の違いは面積の違いよりは、生成される実効ベース光電流及び同電流密度での β の違いに帰因すると考えられ、エミッタレッジパッシベーションが電子線照射による劣化の抑制に効果的であると言える。

全てのフルエンスにおいて、 PIA の上昇とともに両 HPT の電流利得 β は減少するが、L-HPT では β の PIA の依存性は少ない。電子線照射のフルエンスが低い $1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ のフルエンスでは欠陥は原子の結合が弱いエミッタ周辺で生成されやすく、 PIA の増加につれ特に N-HPT の β が小さくなるが、高いフルエンスでは欠陥は試料全面に均一に生成され β は両 HPT で PIA にあまり依存しなくなる。しかし、L-HPT では原子の結合が周辺でも強いので、低いフルエンスでも β は PIA にあまり依存しなくなる。両 HPT のコレクタ光電流密度 ΔJ_c とその変化率は β の PIA への依存性と比べると PIA にあまり依存しない。低フルエンスの場合電子線照射によりエミッタ周辺でのエミッタ・ベース界面に欠陥が生成されやすいため、ベース電流がエミッタ周辺での再結合電流の増加とともに増加し、 β が減少する。しかし、光電流により実効ベース電流密度が高くなるため、再結合の影響は少なくなると考えられる。高フルエンスの場合は周辺のみならずエミッタ電極下のエミッタ・ベース界面全域に欠陥が形成され、 β が PIA に関係なく電子線照射により減少する。一方、 ΔJ_c は電子線照射により PIA に関係なく減少することが明らかになった。

両 HPT の β は電極間距離に依存しないことが分かる。 $1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ のフルエンスでは電子線照射後、 $d25 \mu\text{m}$ 、 $d105 \mu\text{m}$ の両電極間距離ともに β は減少しており、ベース電流密度が低いところで β の減少は顕著である。高いフルエンスで β の変化率の電流密度依存性は小さくなり、電極間距離が大きいくほど β の減少は大きくなる傾向がある。電極間距離が広がると、ベース・エミッタ間の電極間距離も広がり、横方向に伸びた空乏層端近辺で電界が低いいため、欠陥による再結合電流が増えると考えられる。一方、電極間が広い場合、電子線照射後コレクタ光電流密度は大きく減少することが分かった。このことはフルエンスが低い場合より顕著であり、フルエンス $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ では電極間 $25 \mu\text{m}$ の方が両 HPT で電極間 $105 \mu\text{m}$ より減少はまだ小さいが、その違いはフルエンス $1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ より顕著ではない。L-HPT の光コレクタ電流密度の減少は同じ電極間の場合、特に高いフルエンスの電子線照射では N-HPT より少ない。

電子線照射による HPT の劣化機構としては、フルエンス量によって欠陥の生成箇所が異なり、その影響は β 、 ΔJ_c にとっても異なることである。低いフルエンスでは N-HPT、L-HPT 共に欠陥は生成されるが、エミッタ周辺部でのベース表面で欠陥が生成されやすい。高いフルエンスでは、電子線照射による影響は、N-HPT、L-HPT 同様になる。電極間が狭い場合コレクタ光電流においては、低いフルエンスでは N-HPT の ΔJ_c は L-HPT より大きく減少する。高いフルエンスでも、L-HPT の方が N-HPT よりコレクタ光電流の電子線照射による減少は少なくなるが、電極間が広がるとエミッタレッジパッシベーションの効果が少なくなる。従って、エミッタレッジパッシベーションは電子線照射の場合、特にコレクタ光電流において、有効であると分かった。

以上、本論文では、InGaP/GaAs HPT を作製、評価、その特性が光検出器として有効に利用できることを示した。また、太陽電池で動作する InGaP/GaAs HPT を作製し、照射光同様の動作

が確認された。高エネルギー電子線照射後も耐放射線に対して優れていることが示され宇宙応用へも期待される。

謝辞

本論文の審査を引き受けてくださった電気通信大学野崎眞次教授、石橋孝一郎教授、水柿 義直教授、奥野剛史教授、内田和男准教授に深く御礼申し上げます。本研究を進めるにあたり、様々な助言を頂いた野崎眞次教授、内田和男准教授、小野洋助教、小泉淳助教に深く感謝致します。特に直接ご指導頂きました主任指導教員及び副指導教員である野崎眞次教授、内田和男准教授には、大変お世話になりました。本論文が完成に至ったのは、野崎眞次教授、内田和男准教授のご助言によるところが大きく、感謝の気持ちでいっぱいです。

集積回路の研究を進めるにあたり、石橋孝一郎教授に深く感謝致します。大変お世話になりました。電子線照射の研究を進めるにあたり、独立行政法人日本原子力研究開発機構高崎量子応用研究所（原子力機構高崎研究所）と共同研究していただき、誠にありがとうございました。特に、原子力機構の大島さん、牧野さんに深く感謝致します。ご多忙中にも関わらず、共同研究していただき誠にありがとうございました。

学部生から博士後期課程まで授業を通じて様々なことを教えてくださった電子工学科と先進理工学専攻の先生方に深く御礼申し上げます。

また、日々の実験などにおいては、SVBL の加藤匡也さん、ナノテコ(株)の杉山智之さん、日本電業(株)の黒川真吾さんには、学部と大学院博士課程での生活 6 年間を通じて、未熟な私にいろいろな面でご指導頂き、大変お世話になりました。様々な装置のメンテナンスにおいて的確な助言を頂き、ありがとうございます。

日々の生活面では、ナノテコ(株)の前秘書の北詰明弥さん、現秘書の山田さん、前秘書の若井美由紀さん、西山和己さん、お心遣いもあり、研究室での 6 年間で快適に過ごすことができました。大変お世話になりました。

本研究を進めるにあたり、黒川愛里さん、楊富穎さん、長岡信介さんの卒業論文及び修士論文を参考させていただき、誠にありがとうございました。深くお礼申し上げます。そして、本研究室で修士課程と博士後期課程を修了した先輩方に御礼申し上げます。様々なことを教えていただき本当にありがとうございました。実験などにおいては、直接ご指導いただきました高木保志さんには様々なことを教えて頂き、手際の悪い私をいろいろと励まし、支えてくださり、心から感謝の言葉を述べたいと思います。そして、HBT/HPT グループ・QTS グループのメンバーとして Anil Kumar さん、松浦さん、船山さん、センさん、ヤンさんは、時には手を借りることもありました。本当にありがとうございました。そして、本研究室で学部と修士課程を修了した同期生として浅野圭太さん、五十嵐慎さん、長谷川源さん、中村元彦さん、青木遼太郎さん、吉田誠さん、ハオウエンダさん、お互いを励まし合い、良い関係で実験を進めることができました。また、精神面でも支えられることばかりで大変感謝しています。ありがとうございました。皆さんと共に過ごしたこの素晴らしい貴重な時間を忘れません。

また、本研究室の博士 3 年の Roffi Teuku Mulhammad さん、David Doan さん、修士 2 年、修士 1 年と学部 4 年の方々には、快適な研究室での生活を送るための環境を作って頂き、研究や研究室での生活について様々な助言を頂戴しました。本当にありがとうございました。

これから社会に出られる方々、あるいは大学院へと進む方々、新たに M2 となられる方々の今後のご発展と多幸を祈念して、謝辞とさせていただきます。

付録

- 【付録 A】 電子線照射用 InGaP/GaAs HPT のマスク設計
- 【付録 B】 HPT への電子線照射の影響
- 【付録 C】 マスクアライナ使用法(PEM-800)
- 【付録 D】 電極形成技術
- 【付録 E】 膜厚測定方法
- 【付録 F】 フォトリソグラフィ工程
- 【付録 G】 HBT/HPT 基本特性
- 【付録 H】 HBT/HPT 信頼性確認
- 【付録 I】 オーミック接触抵抗測定方法

【付録 A】 電子線照射用 InGaP/GaAs HPT のマスク設計

A-1. 電極間距離 25 μm

$PA = 0.08$ パターンのマスク設計

エミッタ電極の形状は幅 14 μm 長さ 600 μm 10 本からなる楕型電極とし、またベース電極の形状は幅 14 μm 長さ 600 μm 11 なる楕型電極とした。エミッタ面積 A が 160,800 μm^2 であり、周辺長 P が 13,516 μm である。



図 A-1.1 $PA = 0.08$ のエミッタ電極用マスク

図 A-1.2 $PA = 0.08$ のエミッタレッジ用マスク



図 A-1.3 $PIA = 0.08$ のベース電極用マスク



図 A-1.4 $PIA = 0.08$ のベース層用マスク

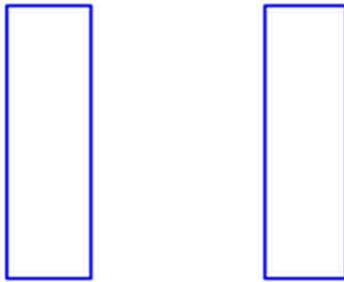


図 A-1.5 $PIA = 0.08$ のコレクタ電極用マスク



図 A-1.6 $PIA = 0.08$ の subcollector 用マスク

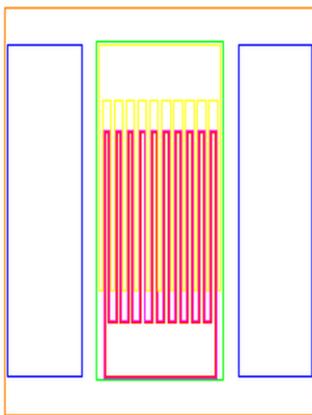


図 A-1.7 図 8.1～図 8.6 を重ね合わせ L-HPT 用マスク

次に、 $PIA = 0.14$ 、 0.27 、 0.36 、 0.43 、 0.53 パターンのマスク設計について説明する。各パタ

ーンのエミッタ電極、エミッタレッジ、ベース電極、ベース層、コレクタ電極、subcollector 層用マスクは以上に説明した $PIA=0.08$ パターンのマスクと同じであるため、マスクの詳細説明を省略する。

$PIA=0.14$ パターンのマスク設計

エミッタ電極の形状は幅 $8\ \mu\text{m}$ 長さ $1,050\ \mu\text{m}$ 10 本からなる櫛型電極とし、またベース電極の形状は幅 $8\ \mu\text{m}$ 長さ $1,050\ \mu\text{m}$ 11 なる櫛型電極とした。エミッタ面積 A が $160,800\ \mu\text{m}^2$ であり、周辺長 P が $22,287\ \mu\text{m}$ である。

$PIA=0.14$ パターンの重ね合わせマスクを図 A-1.8 に示す。

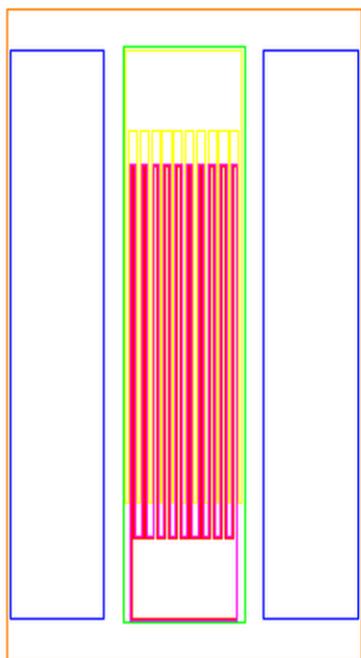


図 A-1.8 $PIA=0.14$ パターンの重ね合わせマスク

$PIA=0.27$ パターンのマスク設計

エミッタ電極の形状は幅 $8\ \mu\text{m}$ 長さ $1,050\ \mu\text{m}$ 10 本からなる櫛型電極とし、またベース電極の形状は幅 $8\ \mu\text{m}$ 長さ $1,050\ \mu\text{m}$ 11 なる櫛型電極とした。エミッタ面積 A が $160,800\ \mu\text{m}^2$ であり、周辺長 P が $22,287\ \mu\text{m}$ である。

$PIA=0.27$ パターンの重ね合わせマスクを図 A-1.9 に示す。

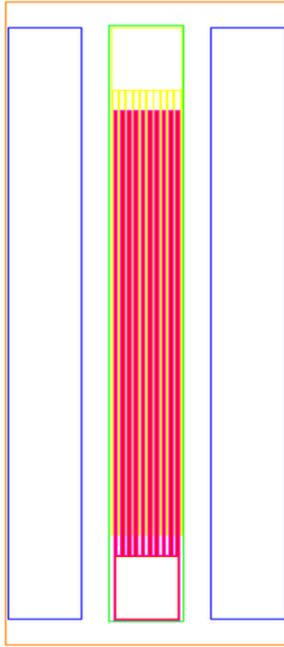


図 A-1.9 $PA = 0.27$ の重ね合わせ L-HPT 用マスク

$PA = 0.36$ のマスク設計

エミッタ電極の形状は幅 $6\ \mu\text{m}$ 長さ $2,800\ \mu\text{m}$ 5 本からなる楕型電極とし、またベース電極の形状は幅 $6\ \mu\text{m}$ 長さ $2,800\ \mu\text{m}$ 6 本なる楕型電極とした。エミッタ面積 A が $160,800\ \mu\text{m}^2$ であり、周辺長 P が $57,534\ \mu\text{m}$ である。

$PA = 0.36$ の重ね合わせマスクを図 A-1.10 に示す。

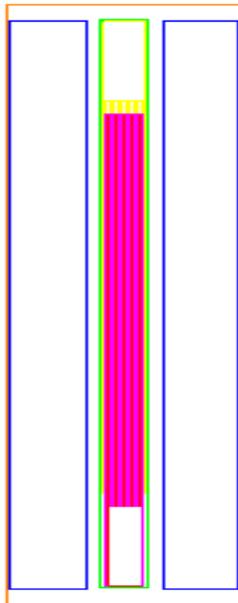


図 A-1.10 $PA = 0.36$ の重ね合わせ L-HPT 用マスク

$PA = 0.43$ のマスク設計

エミッタ電極の形状は幅 $5\ \mu\text{m}$ 長さ $3,360\ \mu\text{m}$ 5 本からなる楕型電極とし、またベース電極の形

状は幅 $5\ \mu\text{m}$ 長さ $3,360\ \mu\text{m}$ 6 本なる楯型電極とした。エミッタ面積 A が $160,800\ \mu\text{m}^2$ であり、周辺長 P が $68,779\ \mu\text{m}$ である。

$PA = 0.43$ の重ね合わせマスクを図 A-1.11 に示す。

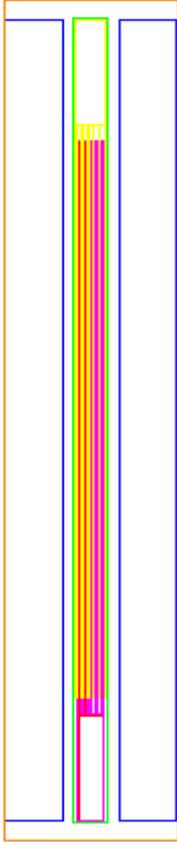


図 A-1.11 $PA = 0.43$ の重ね合わせ L-HPT 用マスク

$PA = 0.53$ のマスク設計

エミッタ電極の形状は幅 $4\ \mu\text{m}$ 長さ $4,200\ \mu\text{m}$ 5 本からなる楯型電極とし、またベース電極の形状は幅 $4\ \mu\text{m}$ 長さ $4,200\ \mu\text{m}$ 6 本なる楯型電極とした。エミッタ面積 A が $160,800\ \mu\text{m}^2$ であり、周辺長 P が $85,636\ \mu\text{m}$ である。

$PA = 0.53$ の重ね合わせマスクを図 A-1.12 に示す。

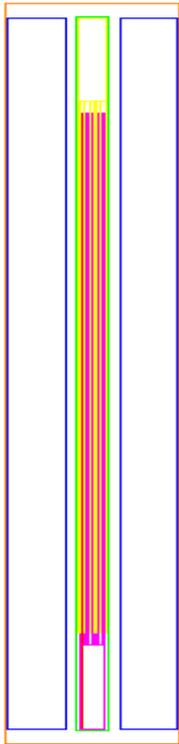


図 A-1.12 $PA = 0.53$ の重ね合わせ L-HPT 用マスク

A-2. 電極間距離 $105\ \mu\text{m}$

エミッタ電極の形状は幅 $6\ \mu\text{m}$ 長さ $1,400\ \mu\text{m}$ 10 本からなる櫛型電極 電極間距離 $105\ \mu\text{m}$ とし、またベース電極の形状は幅 $6\ \mu\text{m}$ 長さ $1,400\ \mu\text{m}$ 11 なる櫛型電極 電極間距離 $105\ \mu\text{m}$ とした。エミッタ面積 A が $376,800\ \mu\text{m}^2$ であり、周辺長 P が $30,726\ \mu\text{m}$ である。

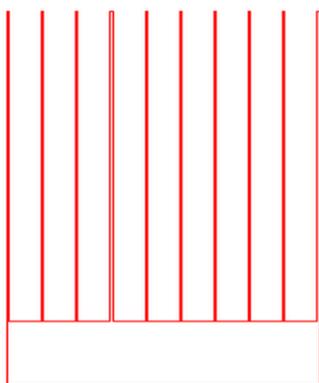


図 A-2.1 エミッタ電極用マスク

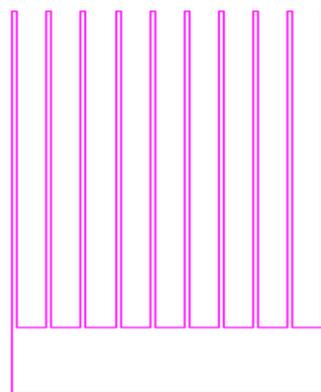


図 A-2.2 エミッタレッジ用マスク

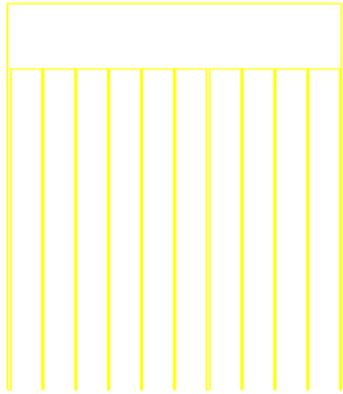


図 A-2.3 ベース電極用マスク



図 A-2.4 ベース層及びコレクタ層用マスク

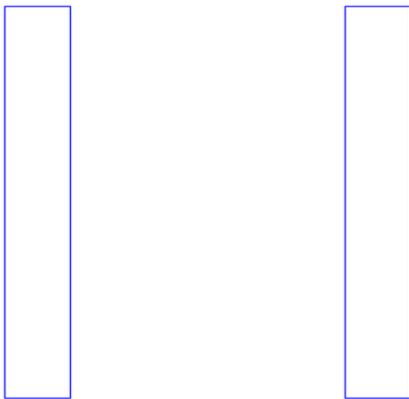


図 A-2.5 コレクタ電極用マスク



図 A-2.6 サブコレクタ用マスク

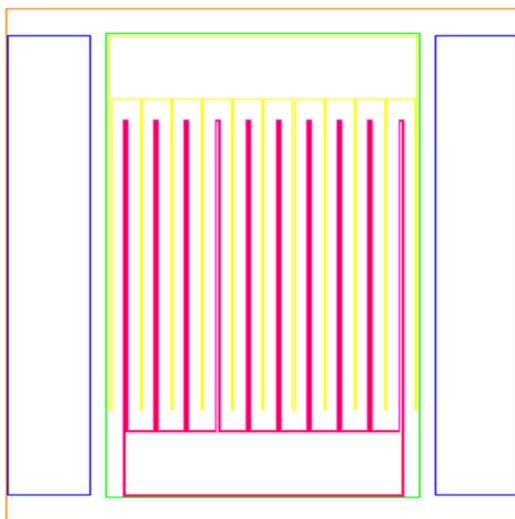


図 A-2.7 重ねあわせ L-HPT 用マスク

【付録 B】 HPT への電子線照射の影響

B-1. 電極間距離 25 μm

電子線照射の前後、全ての PIA において暗状態、光照射状態での HPT の 3 端子動作及び 2 端子動作のエミッタ接地電流－電圧特性を以下の図にまとめる。フルエンス $1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ の高エネルギー電子線照射の前後での HPT の電気特性を図 B-1.1～図 B-1.18 に示す。フルエンス $5.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ の高エネルギー電子線照射の前後での HPT の電気特性を図 B-1.19～図 B-1.36 に示す。フルエンス $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ の高エネルギー電子線照射の前後での HPT の電気特性を図 B-1.37～図 B-1.54 に示す。

フルエンス $1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ の高エネルギー電子線照射の前後での HPT の電気特性

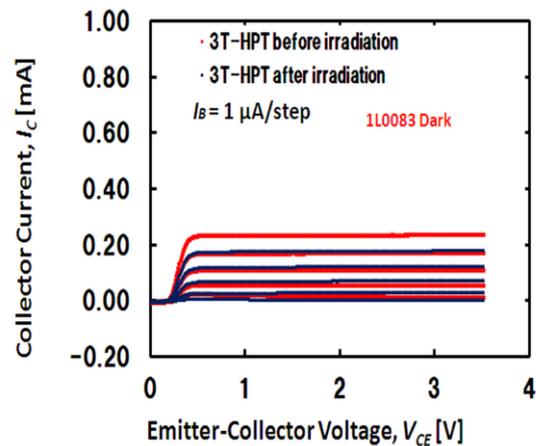
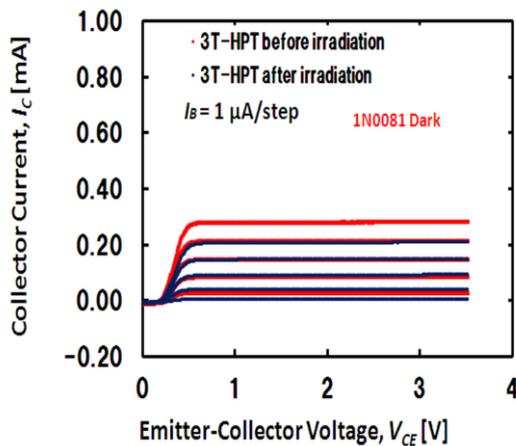


図 B-1.1(a) 暗状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.08$ N-HPT の電気特性

図 B-1.1(b) 暗状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.08$ L-HPT の電気特性

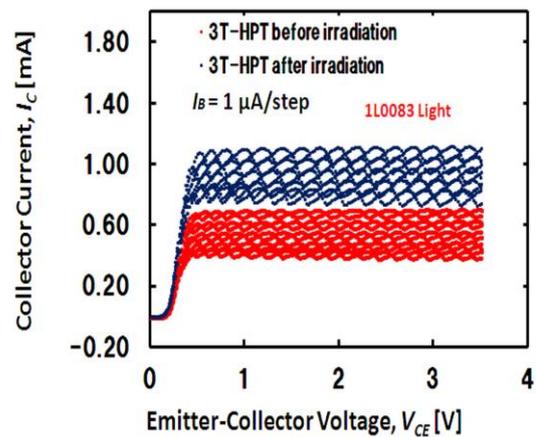
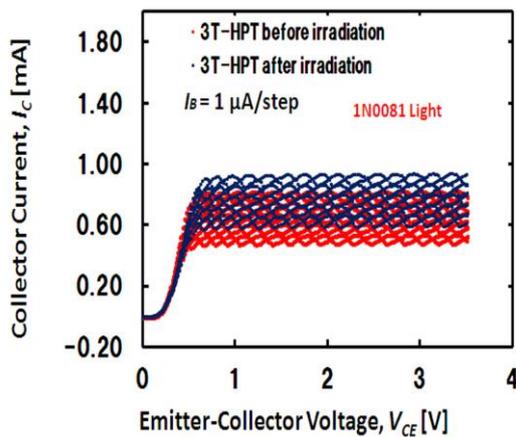


図 B-1.2(a) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.08$ N-HPT の電気特性

図 B-1.2(b) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.08$ L-HPT の電気特性

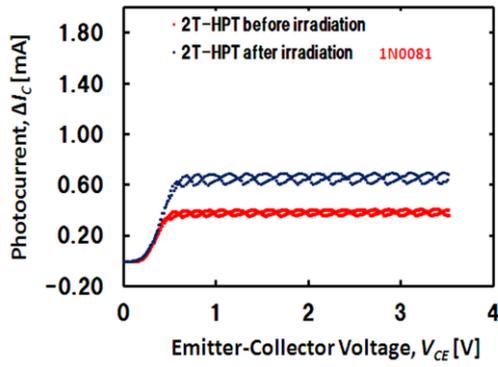


図 B-1.3(a) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.08$ N-HPT の 2 端子動作の ΔI_C

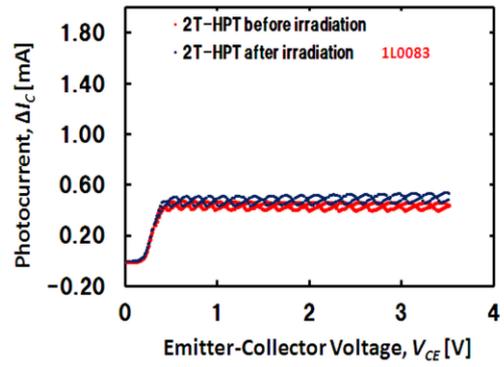


図 B-1.3(b) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.08$ L-HPT の 2 端子動作の ΔI_C

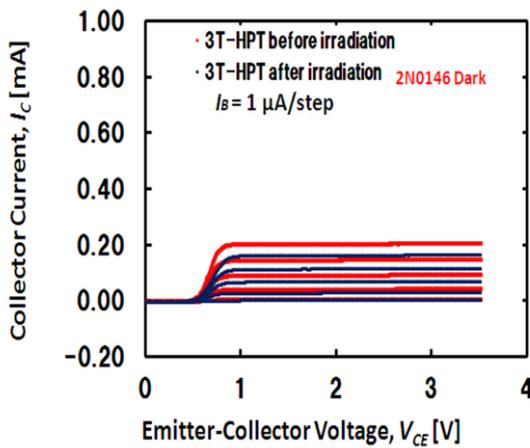


図 B-1.4(a) 暗状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.14$ N-HPT の電気特性

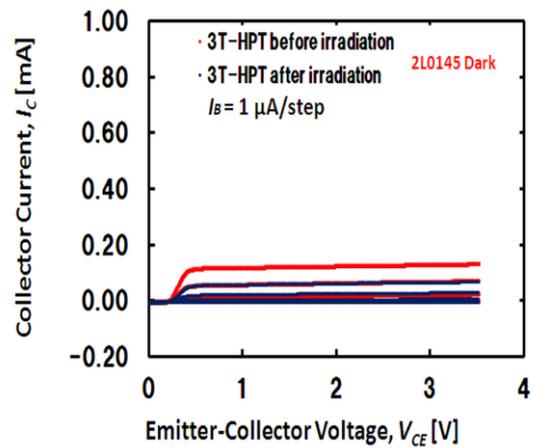


図 B-1.4(b) 暗状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.14$ L-HPT の電気特性

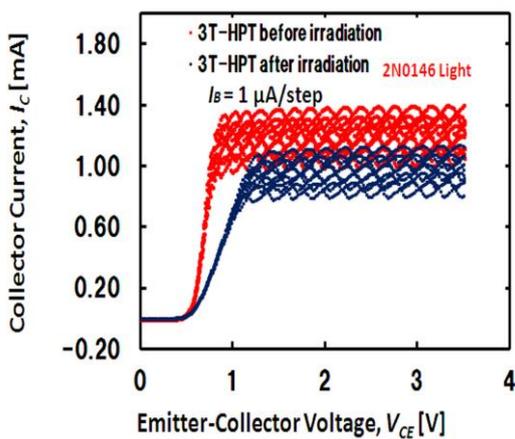


図 B-1.5(a) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.14$ N-HPT の電気特性

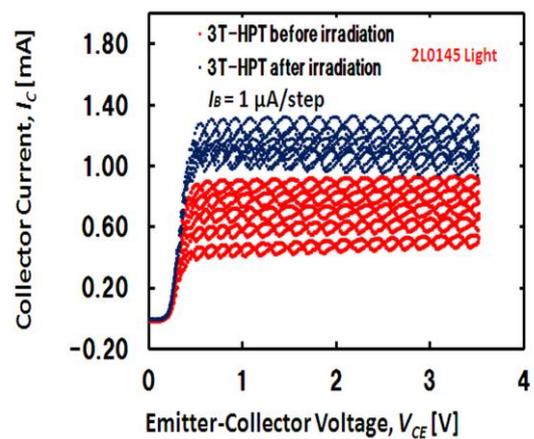


図 B-1.5(b) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.14$ L-HPT の電気特性

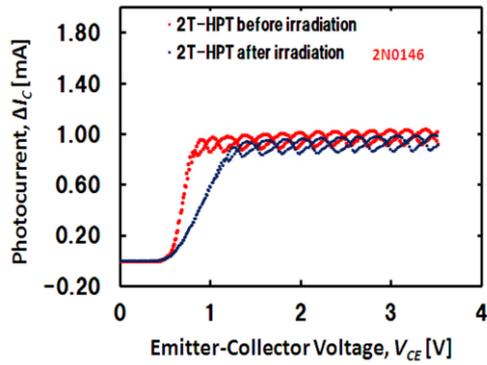


図 B-1.6(a) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.14$ N-HPT の 2 端子動作の ΔI_C

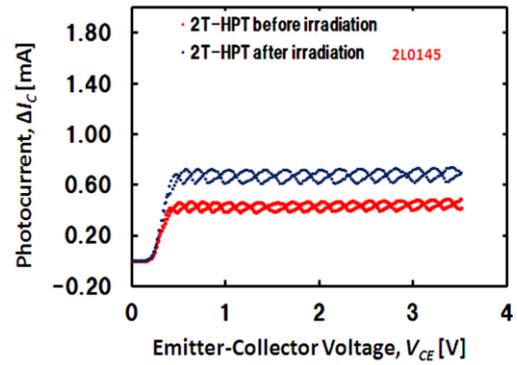


図 B-1.6(b) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.14$ L-HPT の 2 端子動作の ΔI_C

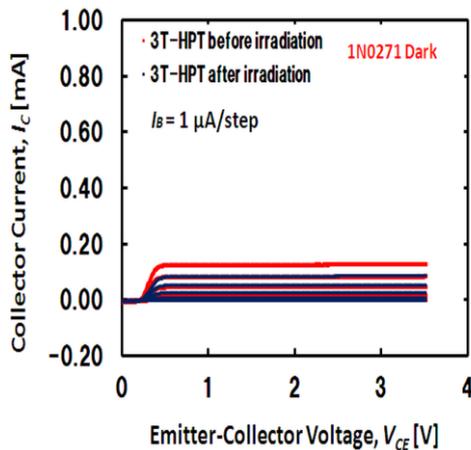


図 B-1.7(a) 暗状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.27$ N-HPT の電気特性

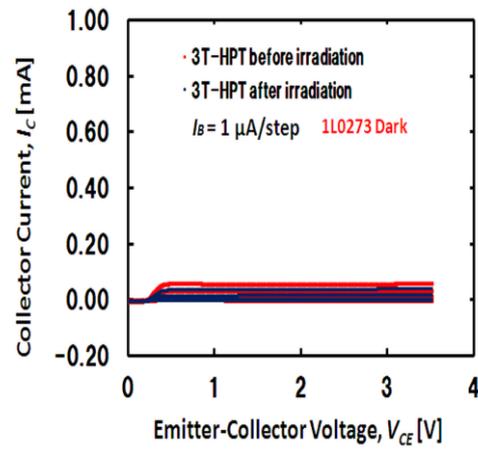


図 B-1.7(b) 暗状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.27$ L-HPT の電気特性

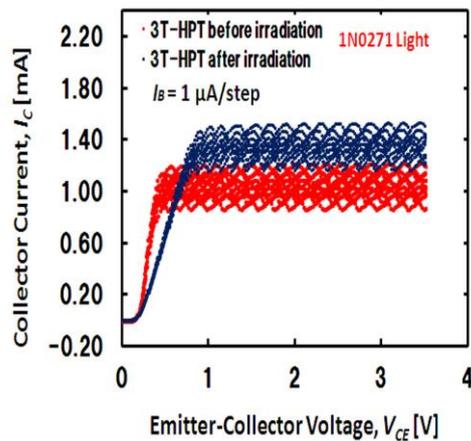


図 B-1.8(a) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.27$ N-HPT の電気特性

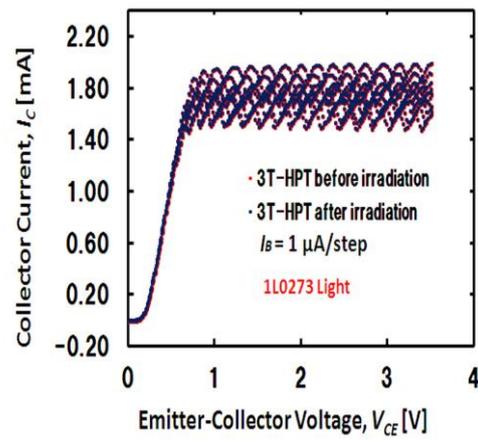


図 B-1.8(b) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.27$ L-HPT の電気特性

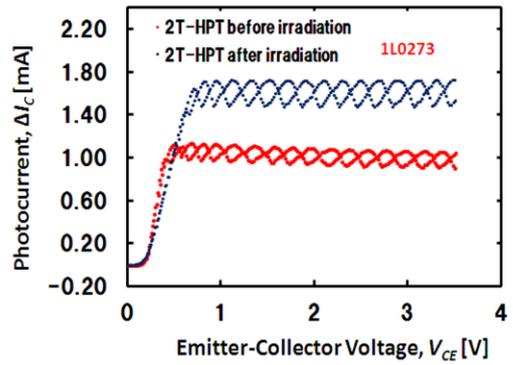
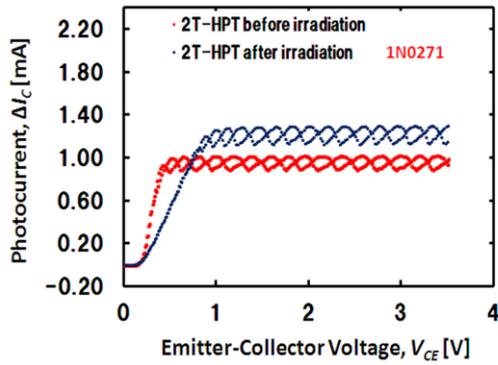


図 B-1.9(a) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.27$ N-HPT の 2 端子動作の ΔI_c

図 B-1.9(b) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.27$ L-HPT の 2 端子動作の ΔI_c

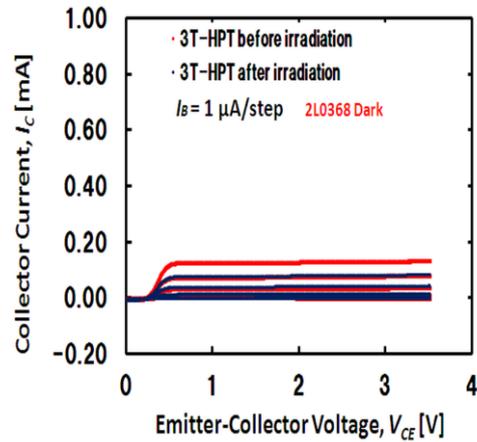
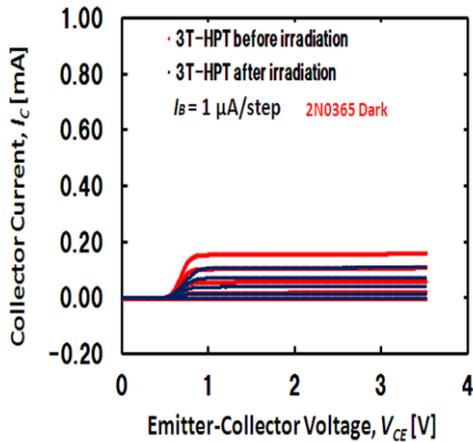


図 B-1.10(a) 暗状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.36$ N-HPT の電気特性

図 B-1.10(b) 暗状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.36$ L-HPT の電気特性

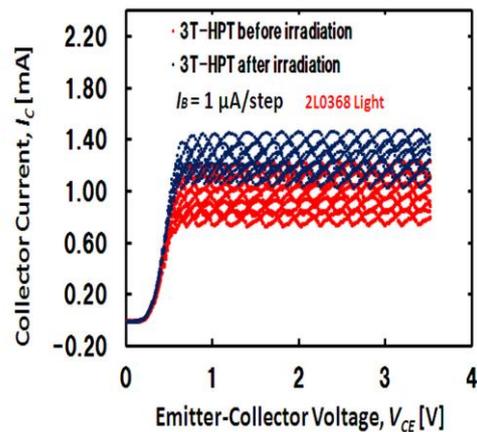
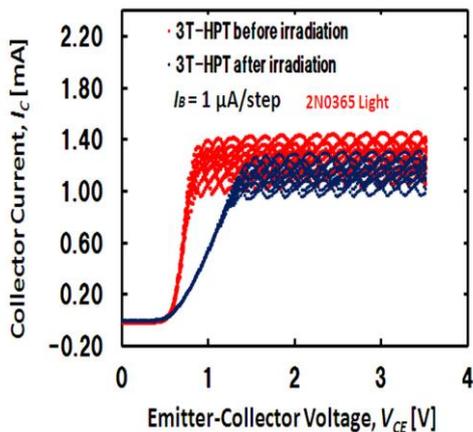


図 B-1.11(a) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.36$ N-HPT の電気特性

図 B-1.11(b) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.36$ L-HPT の電気特性

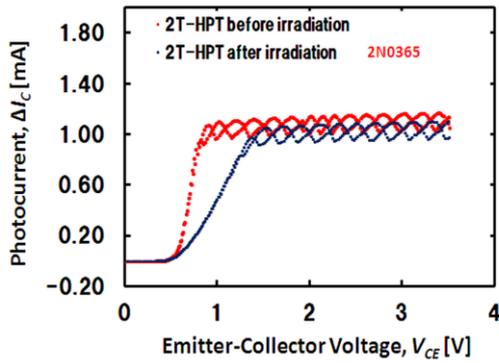


図 B-1.12(a) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.36$ N-HPT の 2 端子動作の ΔI_C

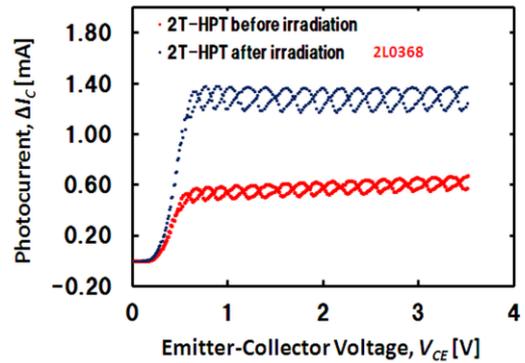


図 B-1.12(b) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.36$ L-HPT の 2 端子動作の ΔI_C

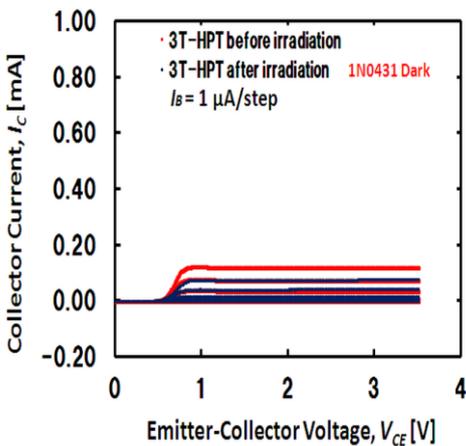


図 B-1.13(a) 暗状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.43$ N-HPT の電気特性

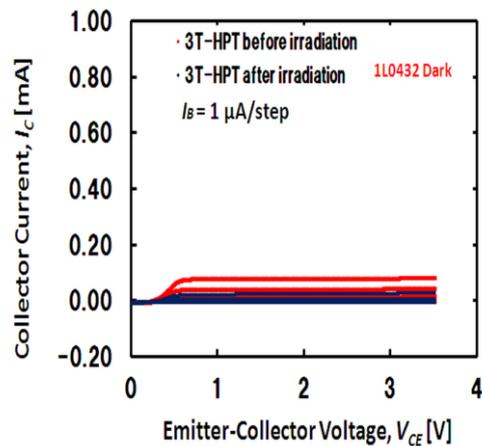


図 B-1.13(b) 暗状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.43$ L-HPT の電気特性

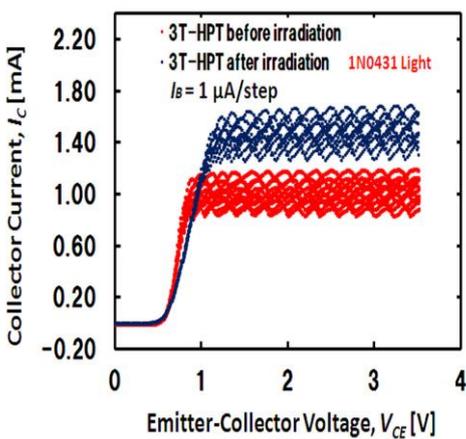


図 B-1.14(a) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.43$ N-HPT の電気特性

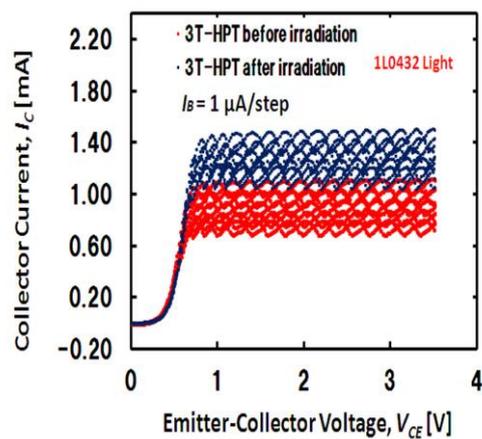


図 B-1.14(b) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.43$ L-HPT の電気特性

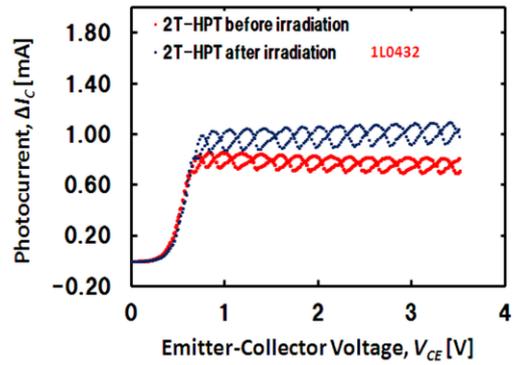
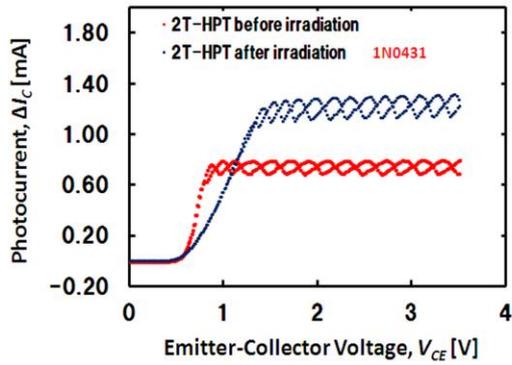


図 B-1.15(a) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.43$ N-HPT の 2 端子動作の ΔI_c

図 B-1.15(b) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.43$ L-HPT の 2 端子動作の ΔI_c

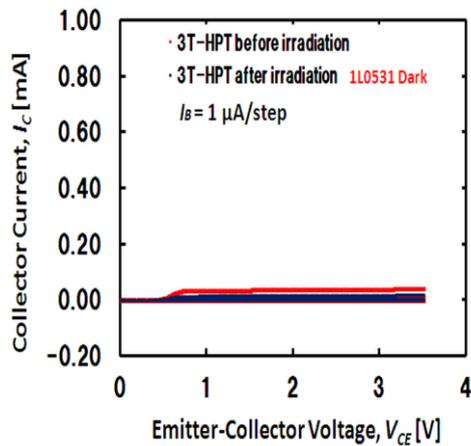
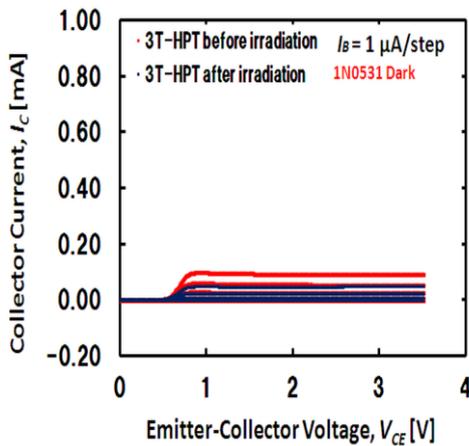


図 B-1.16(a) 暗状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.53$ N-HPT の電気特性

図 B-1.16(b) 暗状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.53$ L-HPT の電気特性

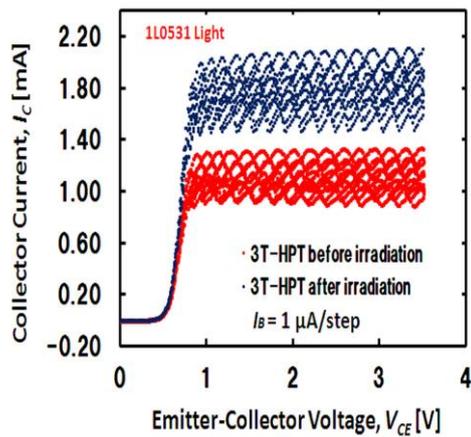
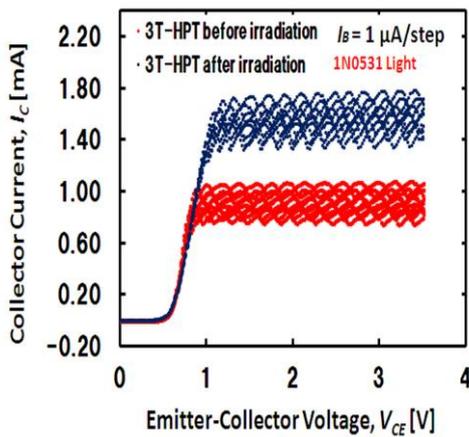


図 B-1.17(a) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.53$ N-HPT の電気特性

図 B-1.17(b) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.53$ L-HPT の電気特性

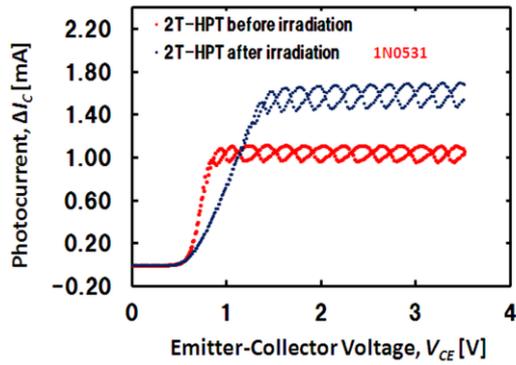


図 B-1.18(a) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.53$ N-HPT の 2 端子動作の ΔI_C

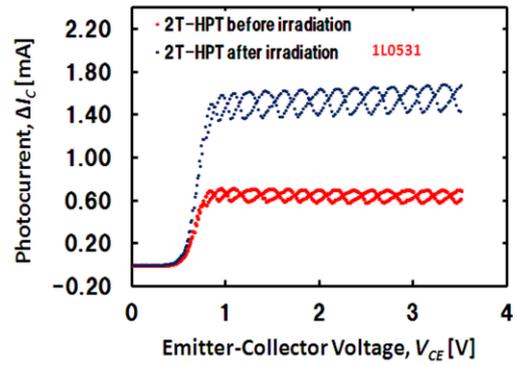


図 B-1.18(b) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.53$ L-HPT の 2 端子動作の ΔI_C

フルエンス $5.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ の高エネルギー電子線照射の前後での HPT の電気特性

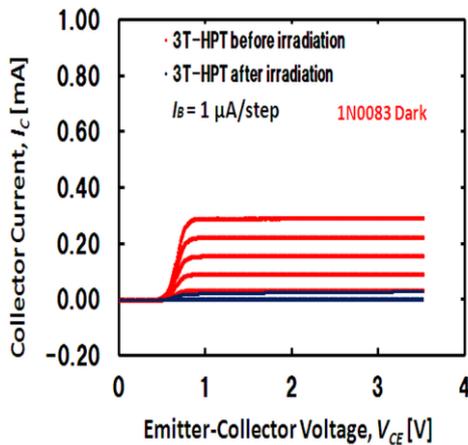


図 B-1.19(a) 暗状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.08$ N-HPT の電気特性

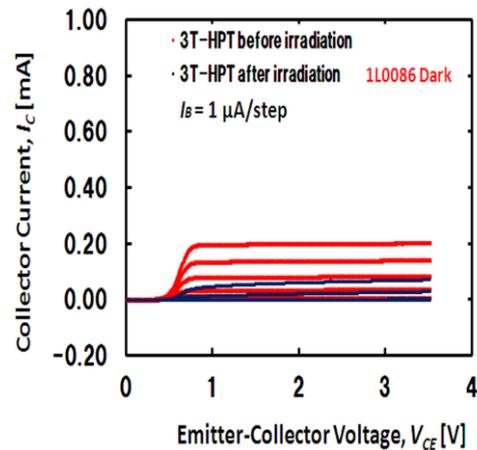


図 B-1.19(b) 暗状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.08$ L-HPT の電気特性

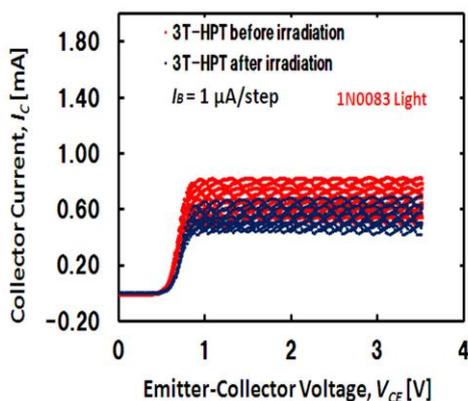


図 B-1.20(a) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.08$ N-HPT の電気特性

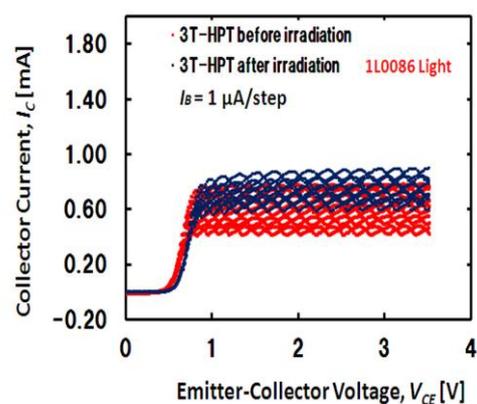


図 B-1.20(b) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.08$ L-HPT の電気特性

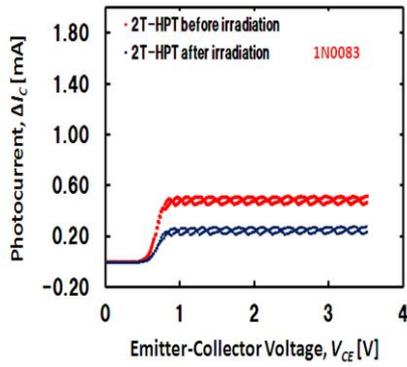


図 B-1.21(a) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.08$ N-HPT の 2 端子動作の ΔI_C

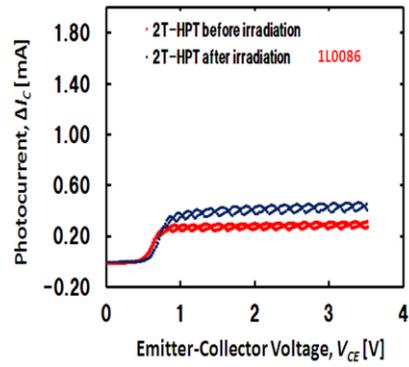


図 B-1.21(b) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.08$ L-HPT の 2 端子動作の ΔI_C

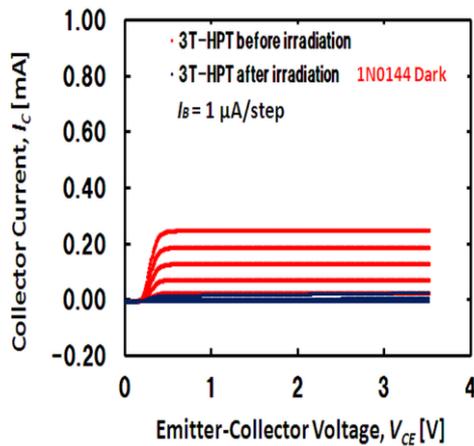


図 B-1.22(a) 暗状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.14$ N-HPT の電気特性

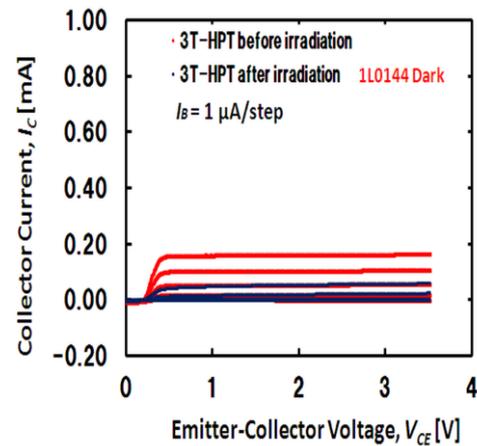


図 B-1.22(b) 暗状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.14$ L-HPT の電気特性

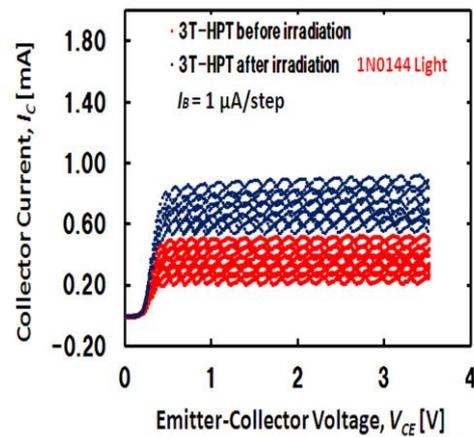


図 B-1.23(a) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.14$ N-HPT の電気特性

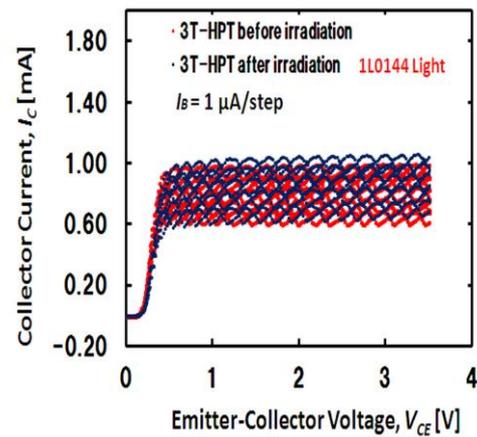


図 B-1.23(b) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.14$ L-HPT の電気特性

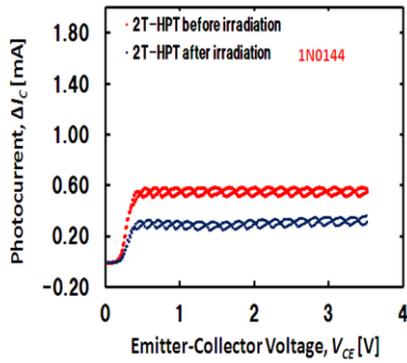


図 B-1.24(a) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.14$ N-HPT の 2 端子動作の ΔI_c

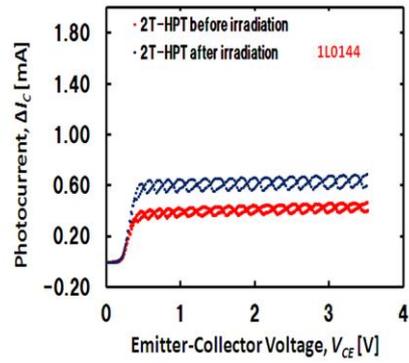


図 B-1.24(b) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.14$ L-HPT の 2 端子動作の ΔI_c

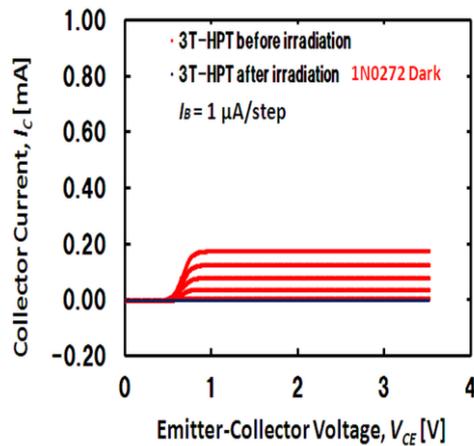


図 B-1.25(a) 暗状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.27$ N-HPT の電気特性

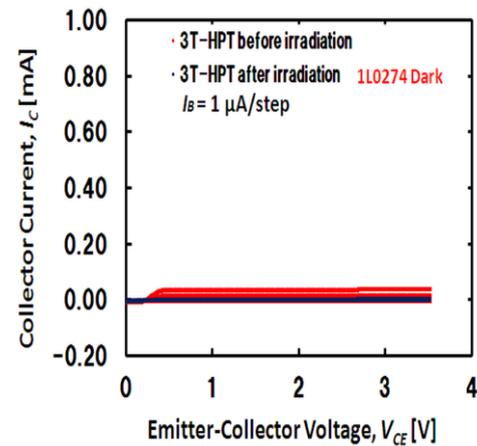


図 B-1.25(b) 暗状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.27$ L-HPT の電気特性

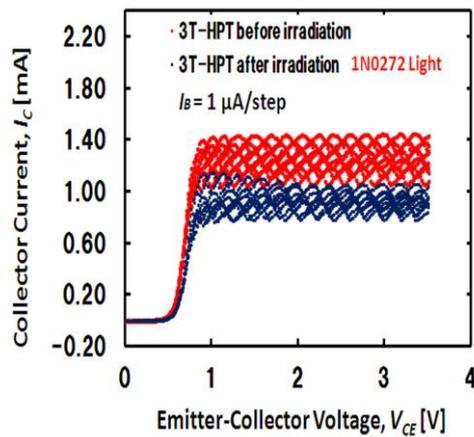


図 B-1.26(a) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.27$ N-HPT の電気特性

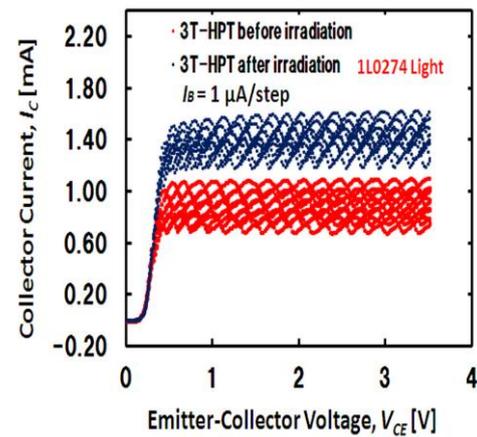


図 B-1.26(b) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.27$ L-HPT の電気特性

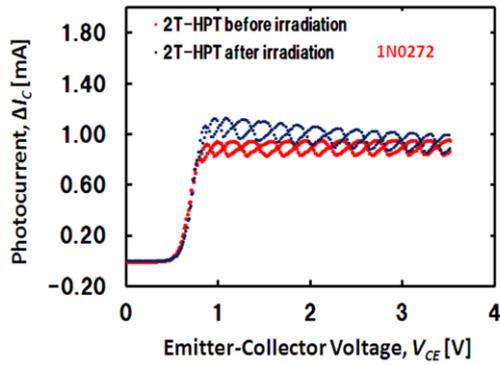


図 B-1.27(a) 光照射状態で電子線照射の前後の
PIA = 0.27 N-HPT の 2 端子動作の ΔI_C

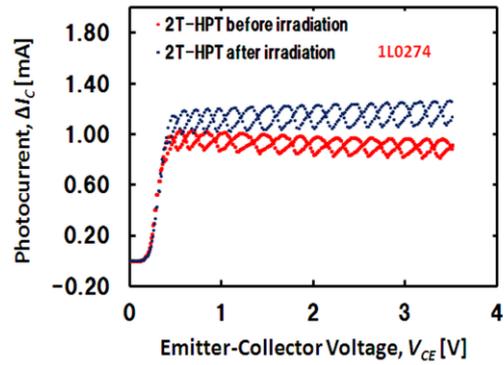


図 B-1.27(b) 光照射状態で電子線照射の前後の
PIA = 0.27 L-HPT の 2 端子動作の ΔI_C

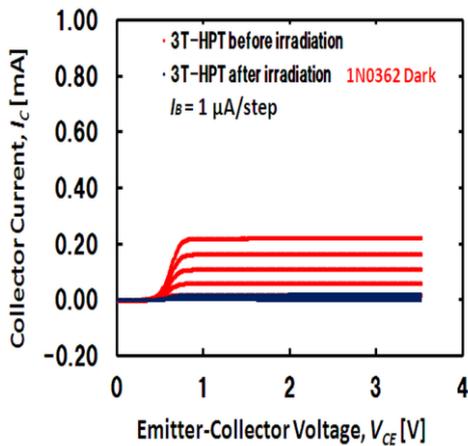


図 B-1.28(a) 光照射状態で電子線照射の前後の
PIA = 0.36 N-HPT の電気特性

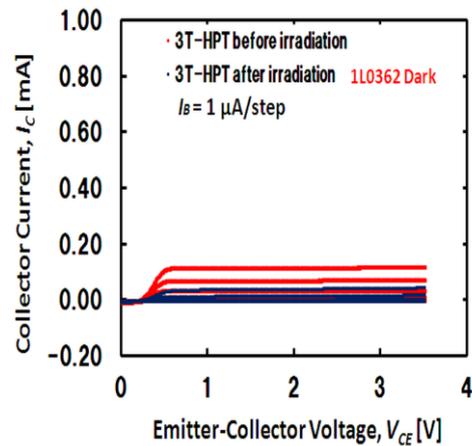


図 B-1.28(b) 光照射状態で電子線照射の前後の
PIA = 0.36 L-HPT の電気特性

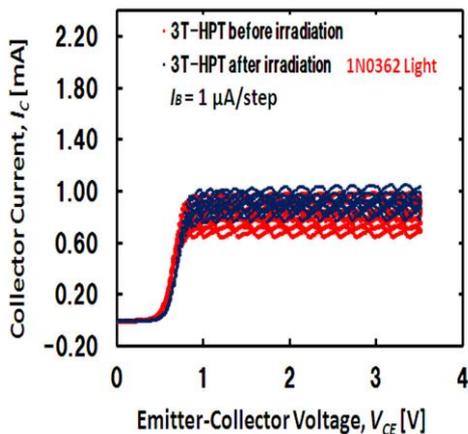


図 B-1.29(a) 光照射状態で電子線照射の前後の
PIA = 0.36 N-HPT の電気特性

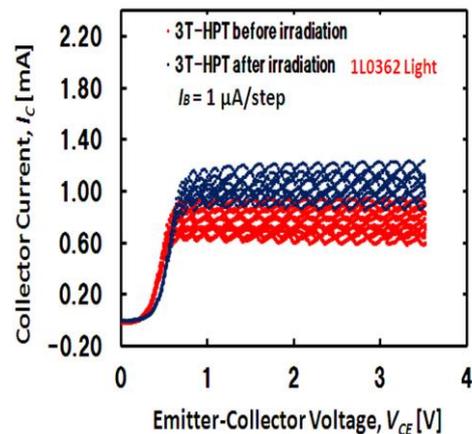


図 B-1.29(b) 光照射状態で電子線照射の前後の
PIA = 0.36 L-HPT の電気特性

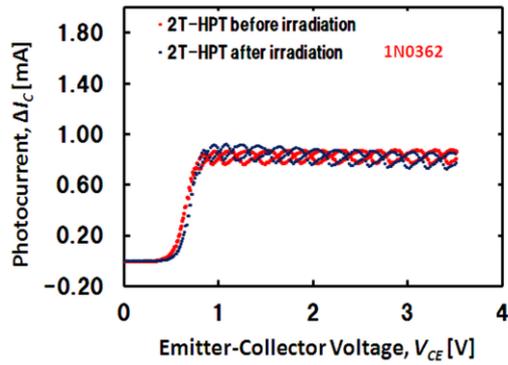


図 B-1.30(a) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.36$ N-HPT の 2 端子動作の ΔI_C

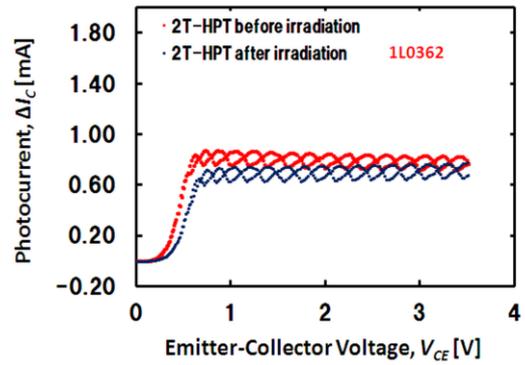


図 B-1.30(b) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.36$ L-HPT の 2 端子動作の ΔI_C

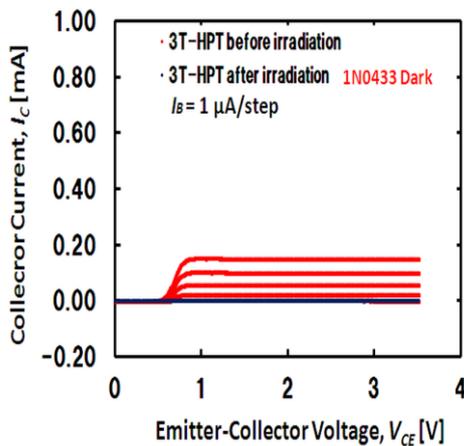


図 B-1.31(a) 暗状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.43$ N-HPT の電気特性

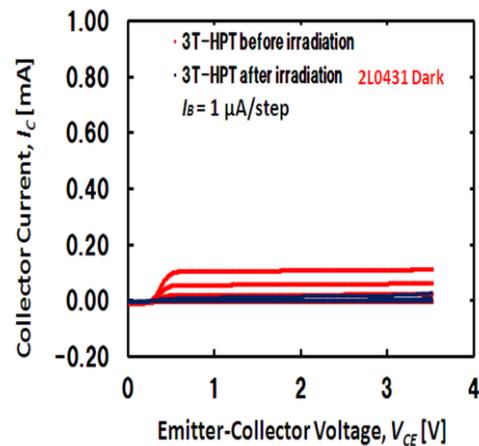


図 B-1.31(b) 暗状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.43$ L-HPT の電気特性

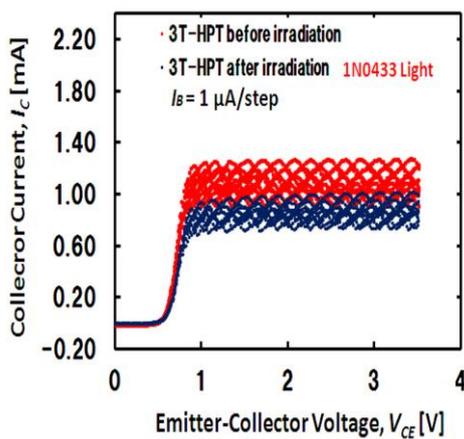


図 B-1.32(a) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.43$ N-HPT の電気特性

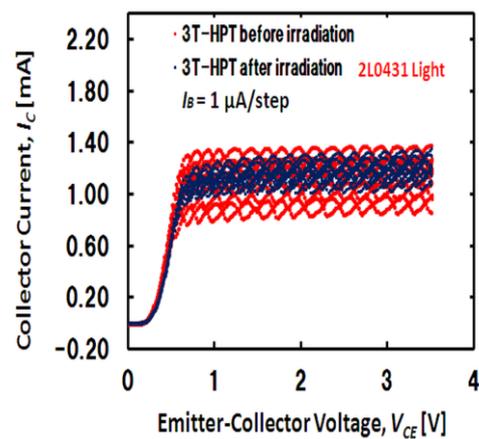


図 B-1.32(b) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.43$ L-HPT の電気特性

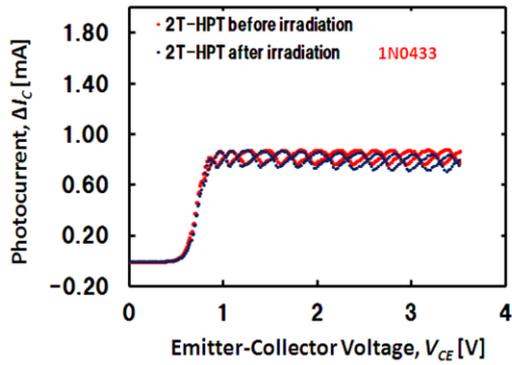


図 B-1.33(a) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.43$ N-HPT の 2 端子動作の ΔI_C

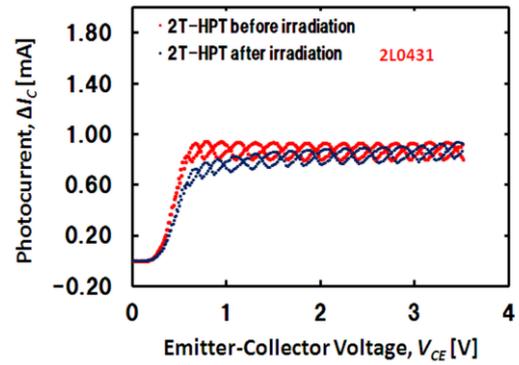


図 B-1.33 (b) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.43$ L-HPT の 2 端子動作の ΔI_C

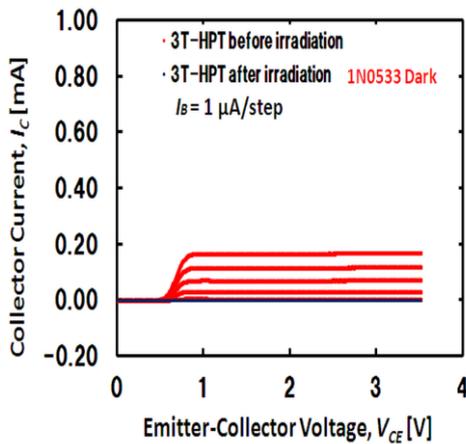


図 B-1.34(a) 暗状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.53$ N-HPT の電気特性

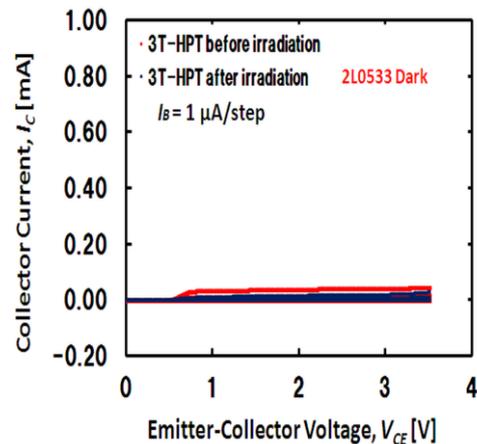


図 B-1.34(b) 暗状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.53$ L-HPT の電気特性

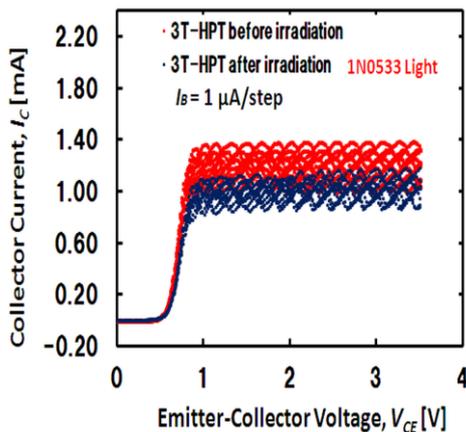


図 B-1.35(a) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.53$ N-HPT の電気特性

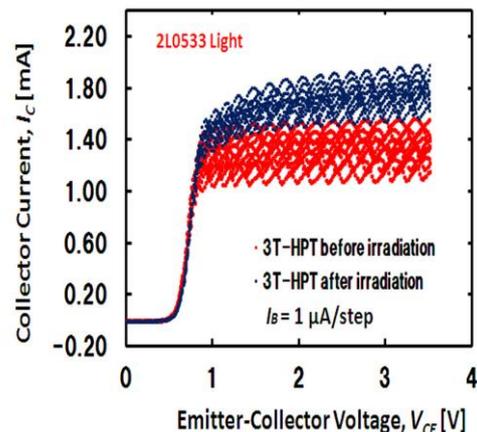


図 B-1.35(b) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.53$ L-HPT の電気特性

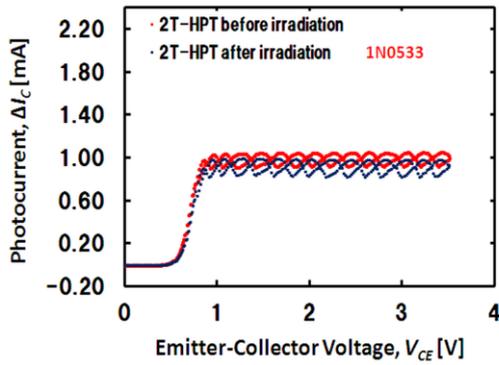


図 B-1.36(a) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.53$ N-HPT の 2 端子動作の ΔI_C

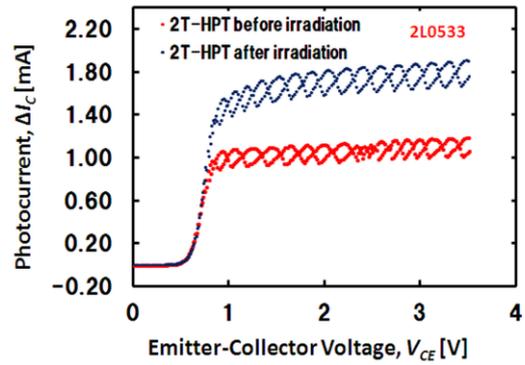


図 B-1.36(b) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.53$ L-HPT の 2 端子動作の ΔI_C

フルエンス $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ の高エネルギー電子線照射の前後での HPT の電気特性

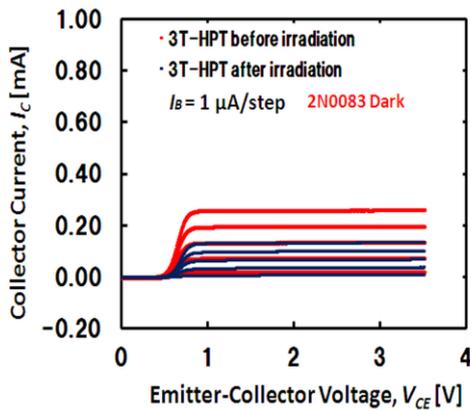


図 B-1.37(a) 暗状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.08$ N-HPT の電気特性

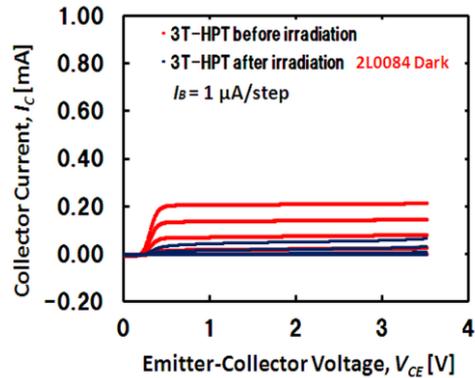


図 B-1.37(b) 暗状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.08$ L-HPT の電気特性

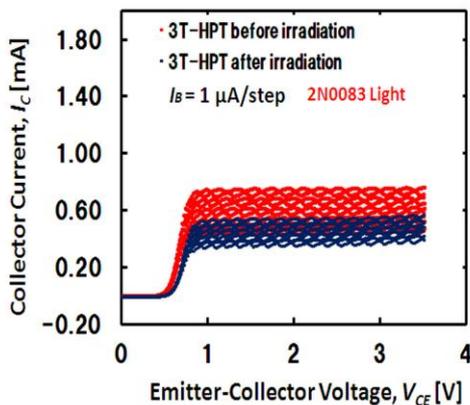


図 B-1.38(a) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.08$ N-HPT の電気特性

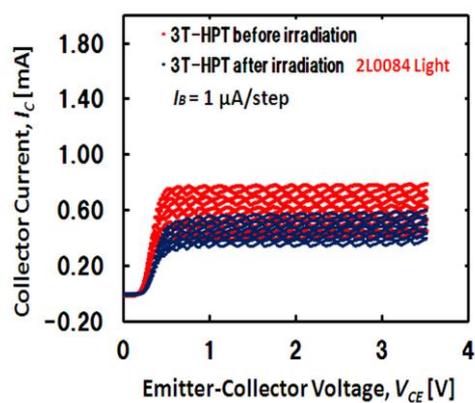


図 B-1.38(b) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.08$ L-HPT の電気特性

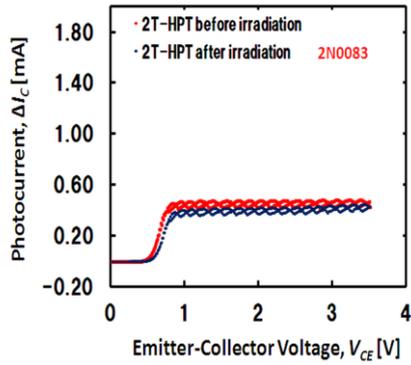


図 B-1.39(a) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.08$ N-HPT の 2 端子動作の ΔI_C

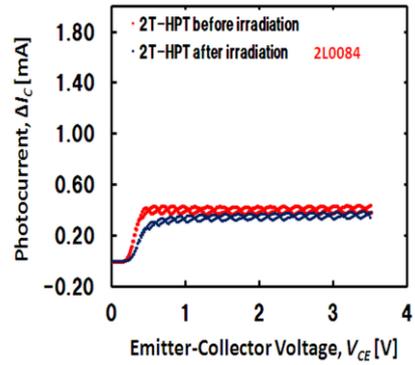


図 B-1.39(b) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.08$ L-HPT の 2 端子動作の ΔI_C

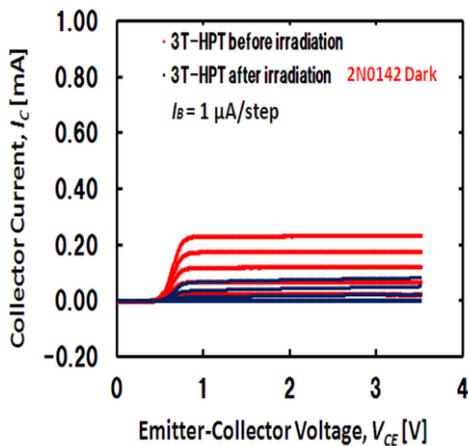


図 B-1.40(a) 暗状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.14$ N-HPT の電気特性

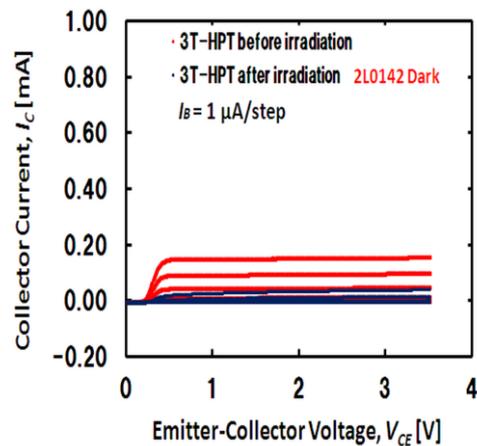


図 B-1.40(b) 暗状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.14$ L-HPT の電気特性

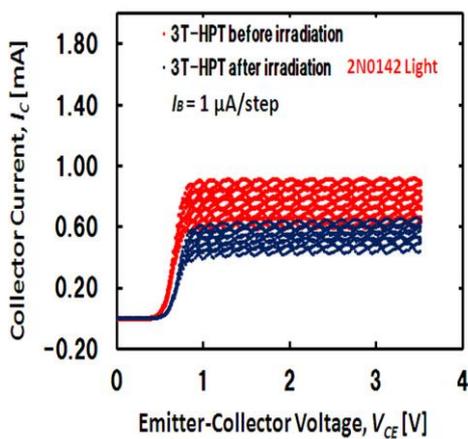


図 B-1.41(a) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.14$ N-HPT の電気特性

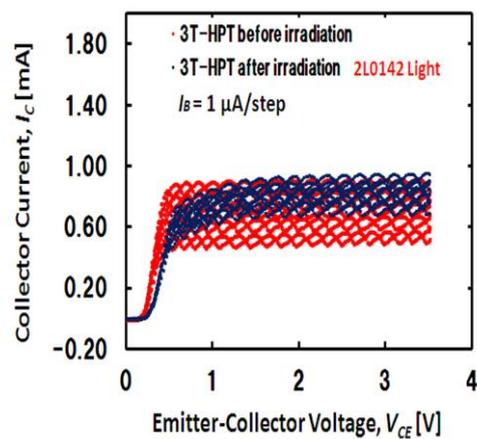


図 B-1.41(b) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.14$ L-HPT の電気特性

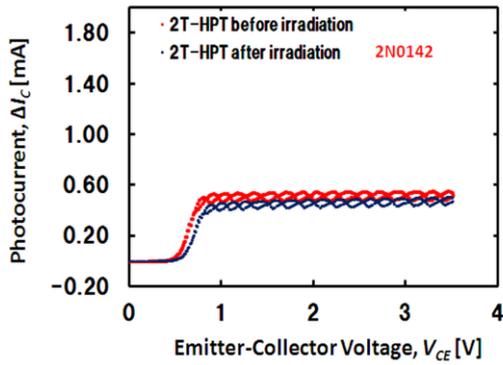


図 B-1.42(a) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.14$ N-HPT の 2 端子動作の ΔI_C

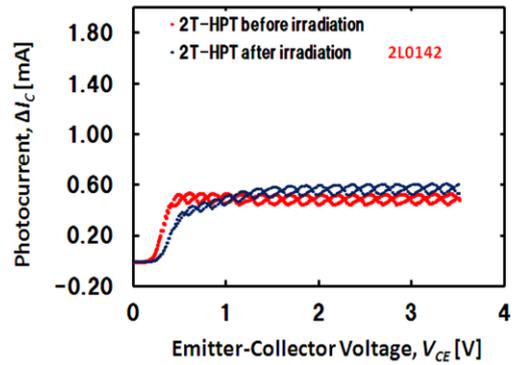


図 B-1.42(b) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.14$ L-HPT の 2 端子動作の ΔI_C

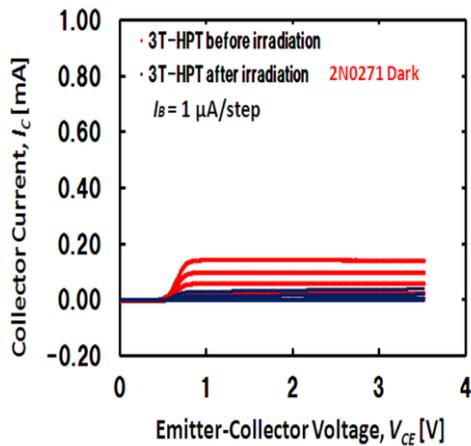


図 B-1.43(a) 暗状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.27$ N-HPT の電気特性

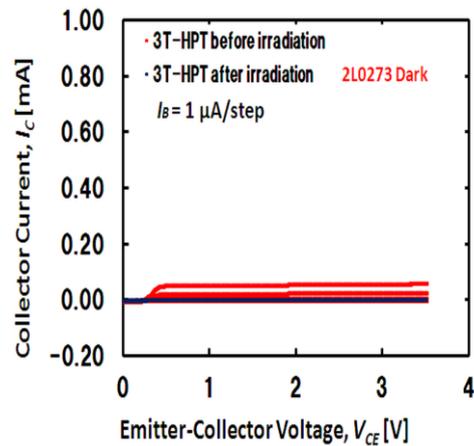


図 B-1.43(b) 暗状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.27$ L-HPT の電気特性

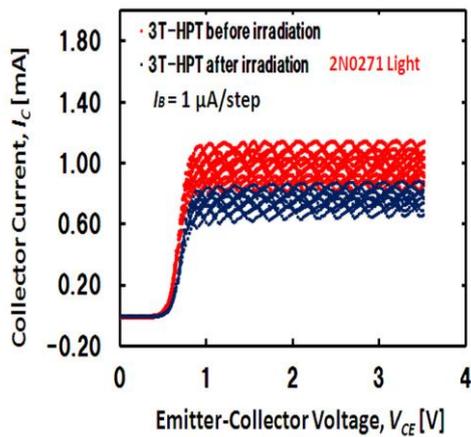


図 B-1.44(a) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.27$ N-HPT の電気特性

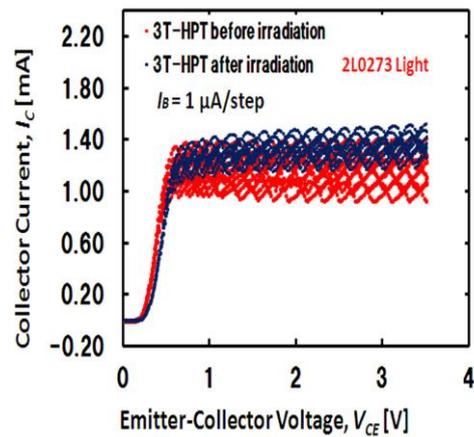


図 B-1.44(b) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.27$ L-HPT の電気特性

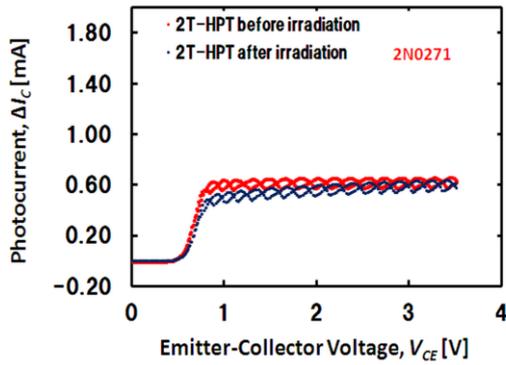


図 B-1.45(a) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.27$ N-HPT の 2 端子動作の ΔI_C

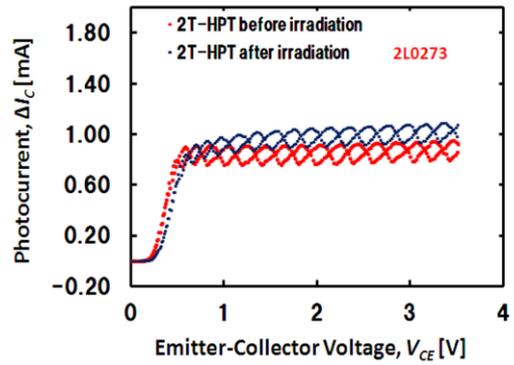


図 B-1.45(b) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.27$ L-HPT の 2 端子動作の ΔI_C

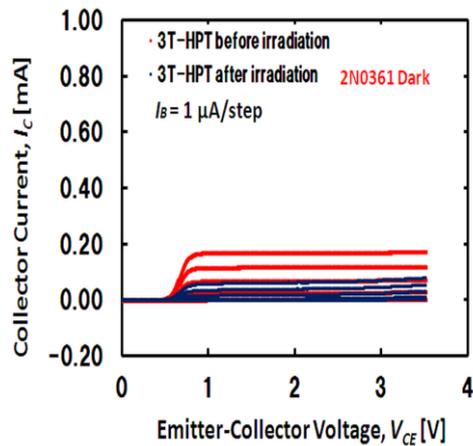


図 B-1.46(a) 暗状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.36$ N-HPT の電気特性

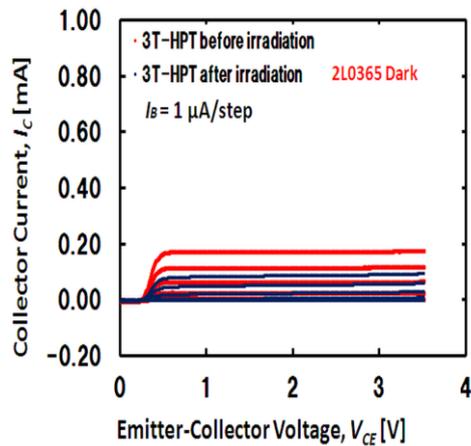


図 B-1.46(b) 暗状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.36$ L-HPT の電気特性

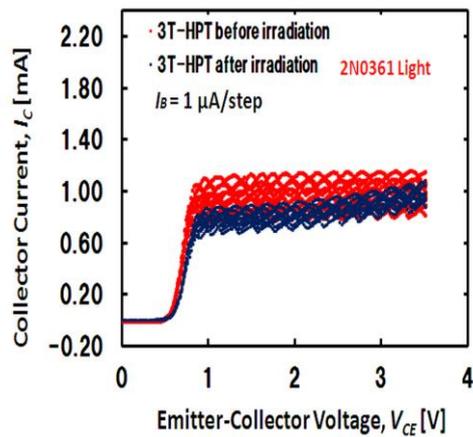


図 B-1.47(a) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.36$ N-HPT の電気特性

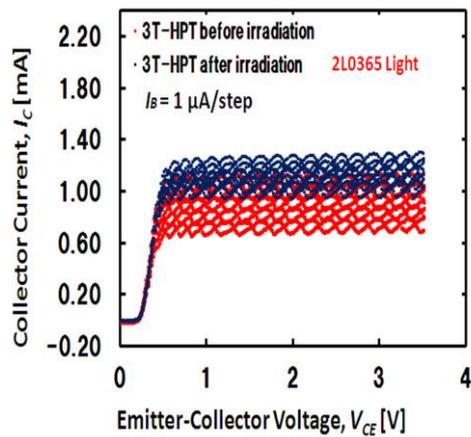


図 B-1.47(b) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.36$ L-HPT の電気特性

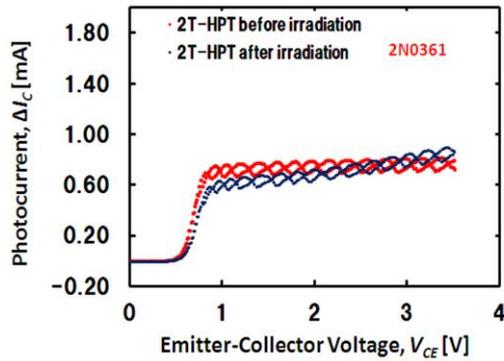


図 B-1.48(a) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.36$ N-HPT の 2 端子動作の ΔI_C

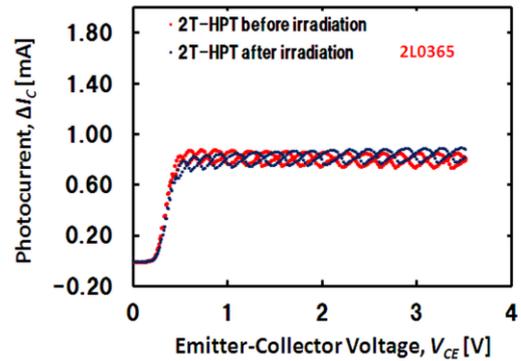


図 B-1.48(b) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.36$ L-HPT の 2 端子動作の ΔI_C

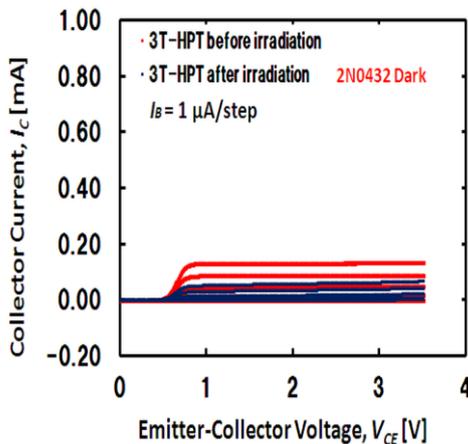


図 B-1.49(a) 暗状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.43$ N-HPT の電気特性

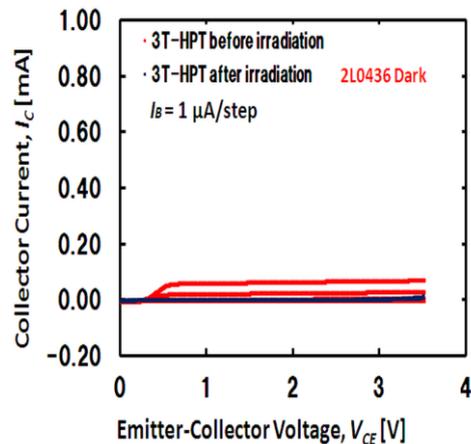


図 B-1.49(b) 暗状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.43$ L-HPT の電気特性

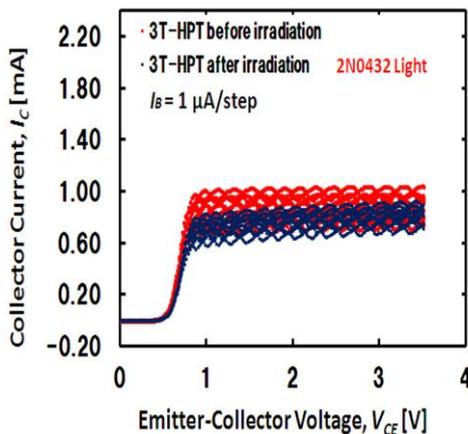


図 B-1.50(a) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.43$ N-HPT の電気特性

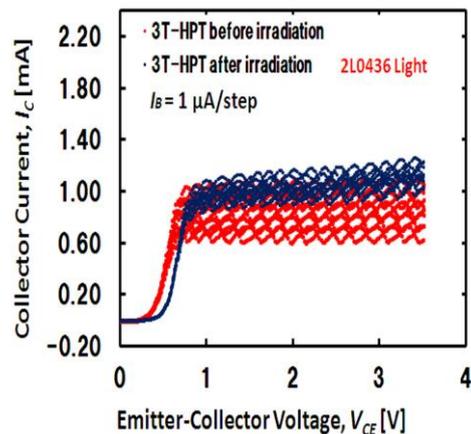


図 B-1.50(b) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.43$ L-HPT の電気特性

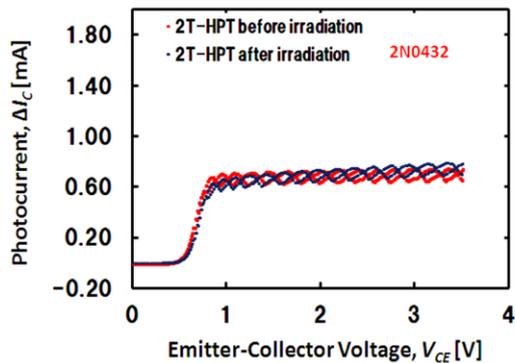


図 B-1.51(a) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.43$ N-HPT の 2 端子動作の ΔI_C

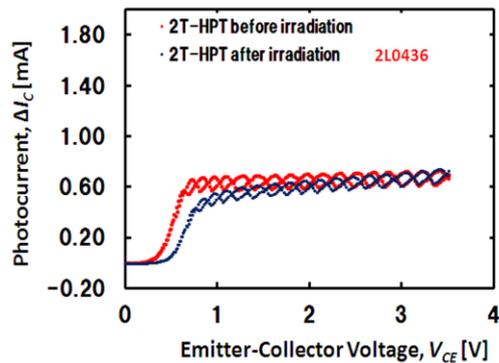


図 B-1.51(b) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.43$ L-HPT の 2 端子動作の ΔI_C

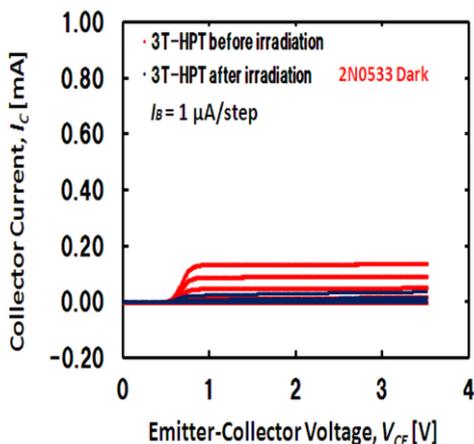


図 B-1.52(a) 暗状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.53$ N-HPT の電気特性

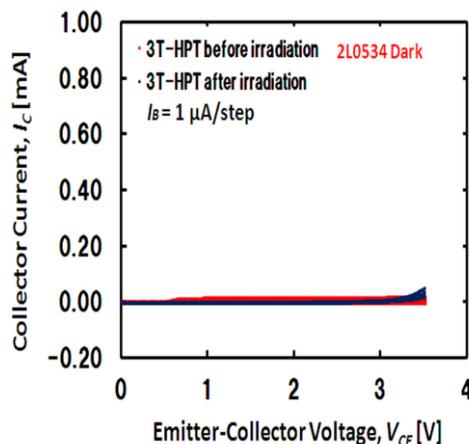


図 B-1.52(b) 暗状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.53$ L-HPT の電気特性

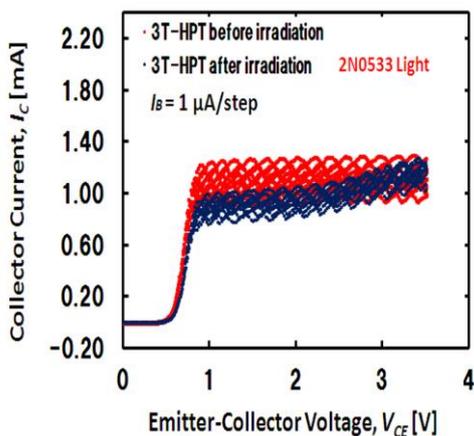


図 B-1.53(a) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.53$ N-HPT の電気特性

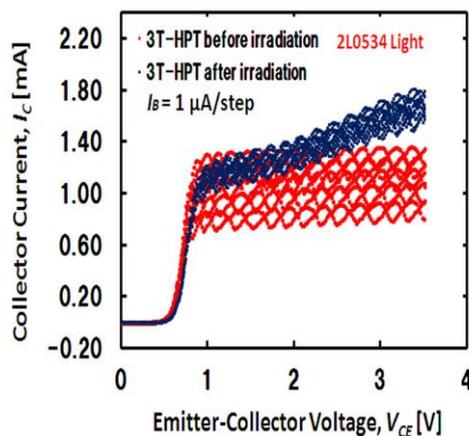


図 B-1.53(b) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.53$ L-HPT の電気特性

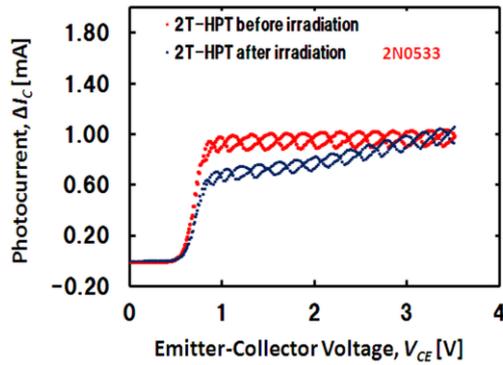


図 B-1.54(a) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.53$ N-HPT の 2 端子動作の ΔI_C

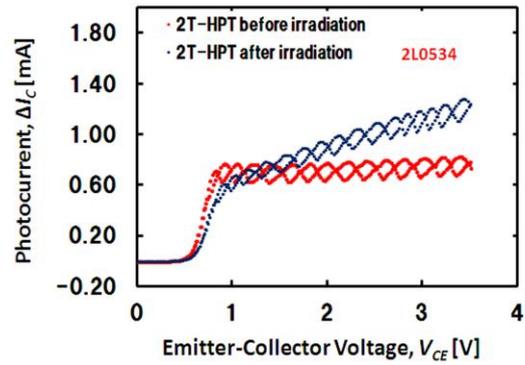


図 B-1.54(b) 光照射状態で電子線照射の前後の $PIA = 0.53$ L-HPT の 2 端子動作の ΔI_C

B-2. 電極間距離 105 μm

電子線照射の前後、 $PIA = 0.08$ $d = 105 \mu\text{m}$ において暗状態、光照射状態での HPT の 3 端子動作及び 2 端子動作のエミッタ接地電流-電圧特性を以下の図にまとめる。フルエンス $1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ の高エネルギー電子線照射の前後での HPT の電気特性を図 B-2.1~図 B-2.3 に示す。フルエンス $5.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ の高エネルギー電子線照射の前後での HPT の電気特性を図 B-2.4~図 B-2.6 に示す。フルエンス $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ の高エネルギー電子線照射の前後での HPT の電気特性を図 B-2.7~図 B-2.9 に示す。フルエンス $1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ の高エネルギー電子線照射の前後での HPT の電気特性を図 B-2.10~図 B-2.12 に示す。フルエンス $2.85 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ の高エネルギー電子線照射の前後での HPT の電気特性を図 B-2.13~図 B-2.15 に示す。

フルエンス $1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ の高エネルギー電子線照射の前後での HPT の電気特性

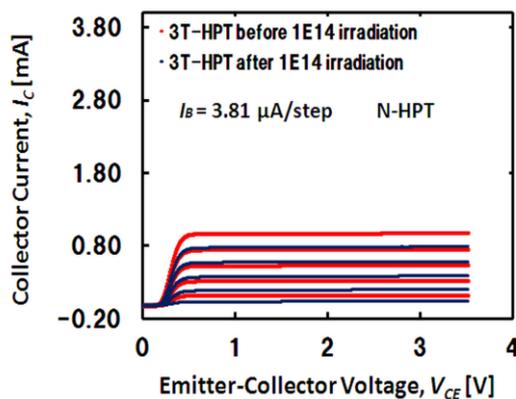


図 B-2.1(a) 暗状態での電子線照射の前後の $d = 105 \mu\text{m}$ N-HPT の電気特性

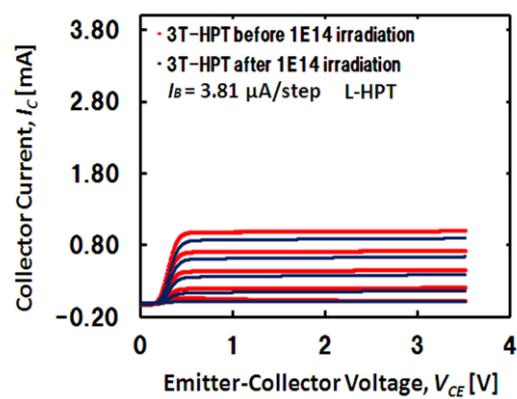


図 B-2.1(b) 暗状態での電子線照射の前後の $d = 105 \mu\text{m}$ L-HPT の電気特性

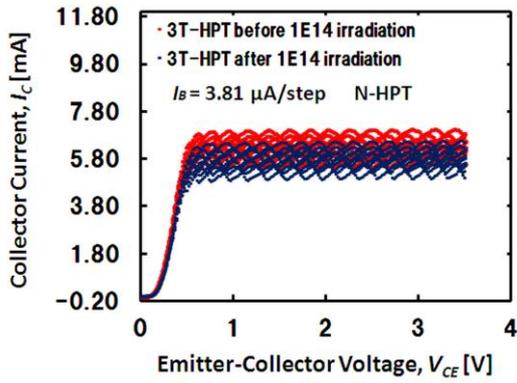


図 B-2.2(a) 光照射状態での電子線照射の前後の $d = 105 \mu\text{m}$ N-HPT の電気特性

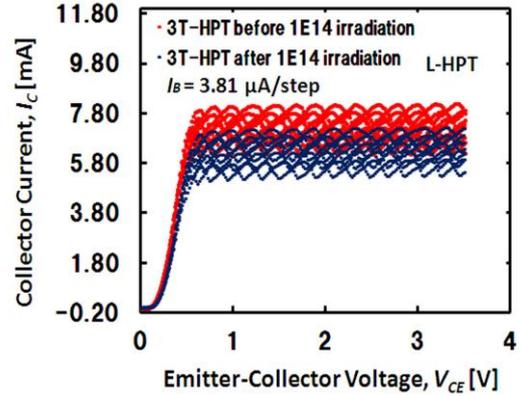


図 B-2.2(b) 光照射状態での電子線照射の前後の $d = 105 \mu\text{m}$ L-HPT の電気特性

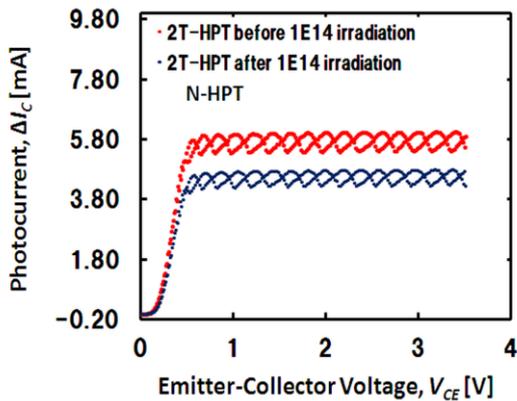


図 B-2.3(a) 光照射状態での電子線照射の前後の $d = 105 \mu\text{m}$ N-HPT の ΔI_C

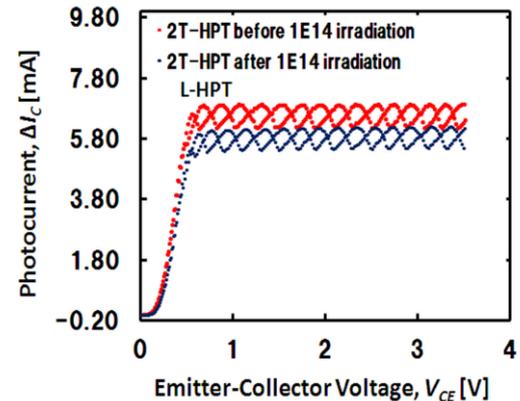


図 B-2.3(b) 光照射状態での電子線照射の前後の $d = 105 \mu\text{m}$ L-HPT の ΔI_C

フルエンス $5.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ の高エネルギー電子線照射の前後での HPT の電気特性

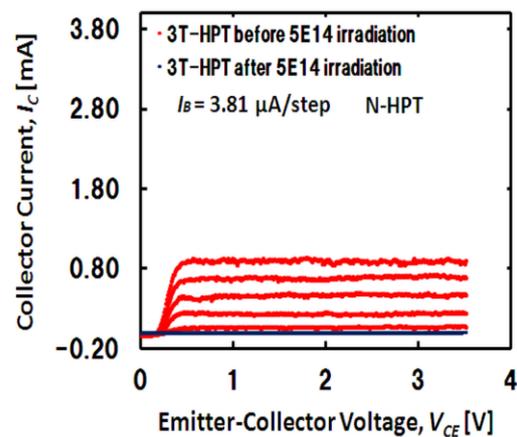


図 B-2.4(a) 暗状態での電子線照射の前後の $d = 105 \mu\text{m}$ N-HPT の電気特性

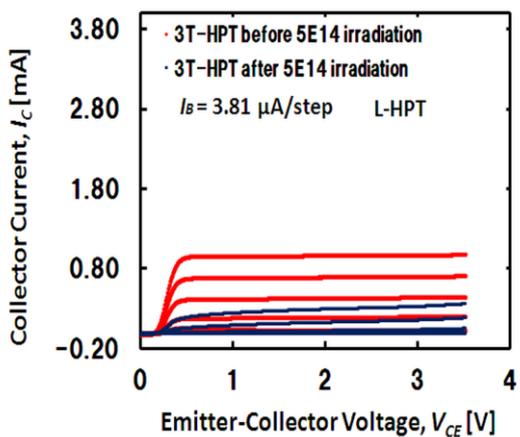


図 B-2.4(b) 暗状態での電子線照射の前後の $d = 105 \mu\text{m}$ L-HPT の電気特性

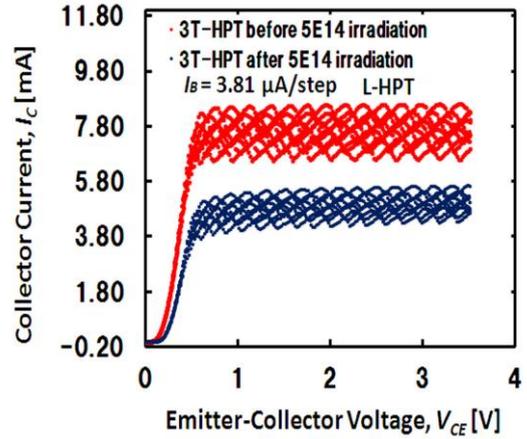
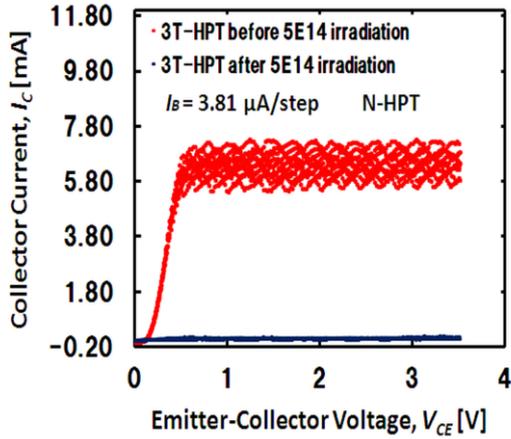


図 B-2.5(a) 光照射状態での電子線照射の前後の $d = 105 \mu\text{m}$ N-HPT の電気特性

図 B-2.5(b) 光照射状態での電子線照射の前後の $d = 105 \mu\text{m}$ L-HPT の電気特性

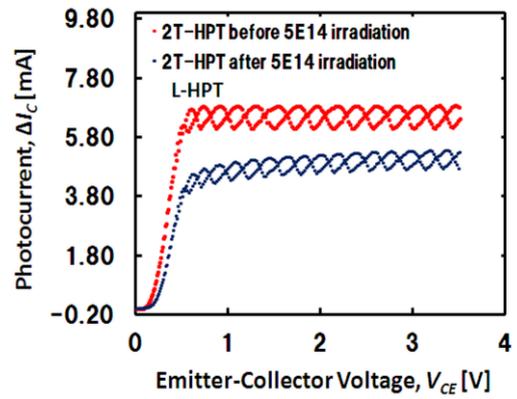
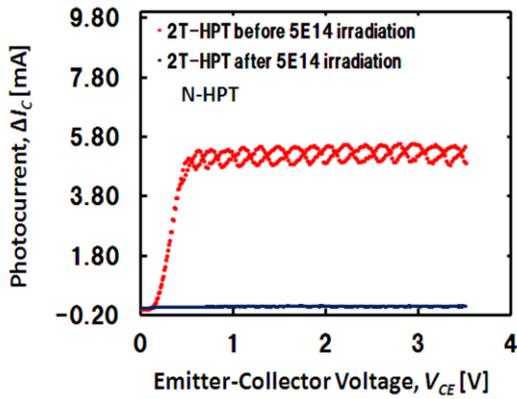


図 B-2.6(a) 光照射状態での電子線照射の前後の $d = 105 \mu\text{m}$ N-HPT の ΔI_C

図 B-2.6(b) 光照射状態での電子線照射の前後の $d = 105 \mu\text{m}$ L-HPT の ΔI_C

フルエンス $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ の高エネルギー電子線照射の前後での HPT の電気特性

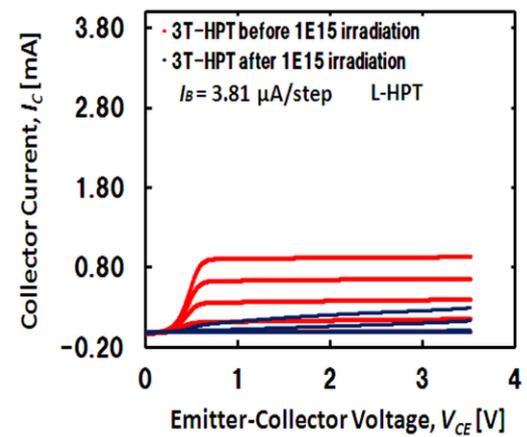
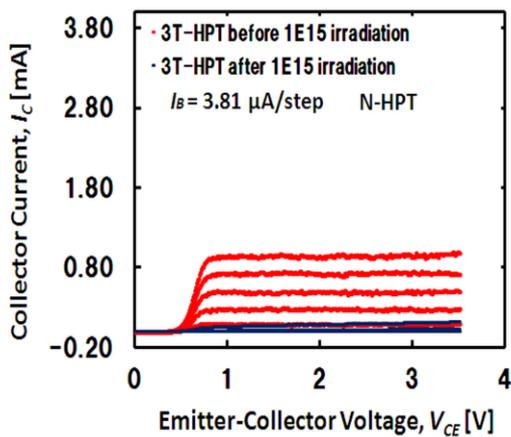


図 B-2.7(a) 暗状態での電子線照射の前後の $d = 105 \mu\text{m}$ N-HPT の電気特性

図 B-2.7(b) 暗状態での電子線照射の前後の $d = 105 \mu\text{m}$ L-HPT の電気特性

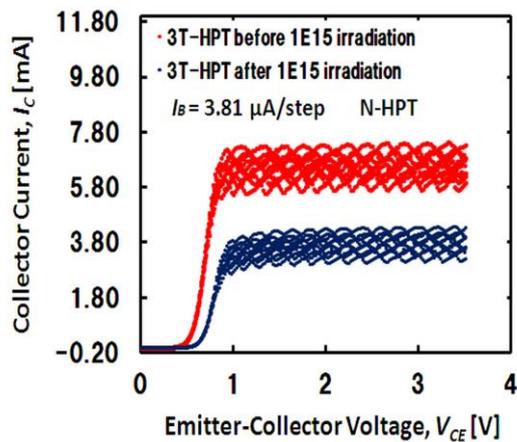


図 B-2.8(a) 光照射状態での電子線照射の前後の $d = 105 \mu\text{m}$ N-HPT の電気特性

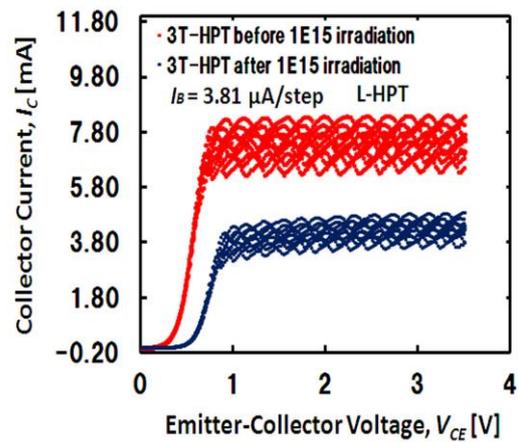


図 B-2.8(b) 光照射状態での電子線照射の前後の $d = 105 \mu\text{m}$ L-HPT の電気特性

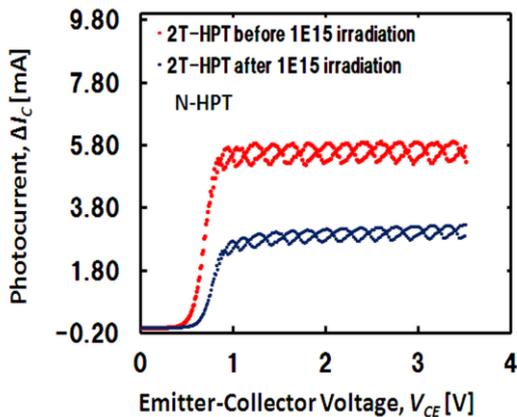


図 B-2.9(a) 光照射状態での電子線照射の前後の $d = 105 \mu\text{m}$ N-HPT の ΔI_C

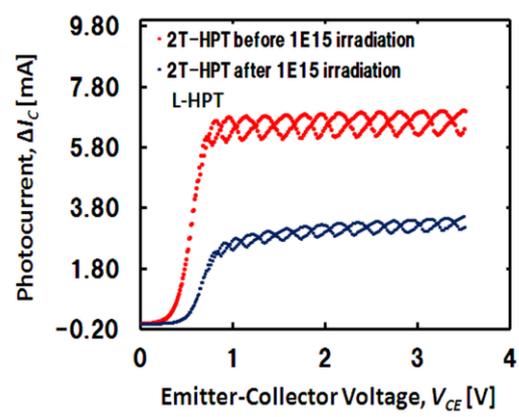


図 B-2.9(b) 光照射状態での電子線照射の前後の $d = 105 \mu\text{m}$ L-HPT の ΔI_C

フルエンス $1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ の高エネルギー電子線照射の前後での HPT の電気特性

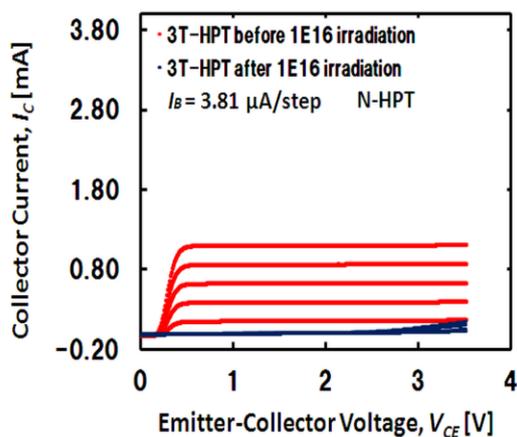


図 B-2.10(a) 暗状態での電子線照射の前後の $d = 105 \mu\text{m}$ N-HPT の電気特性

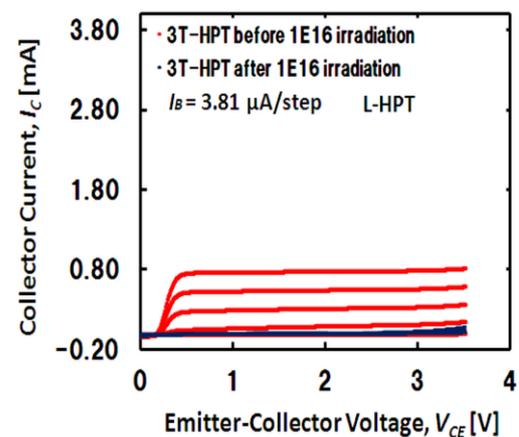


図 B-2.10(b) 暗状態での電子線照射の前後の $d = 105 \mu\text{m}$ L-HPT の電気特性

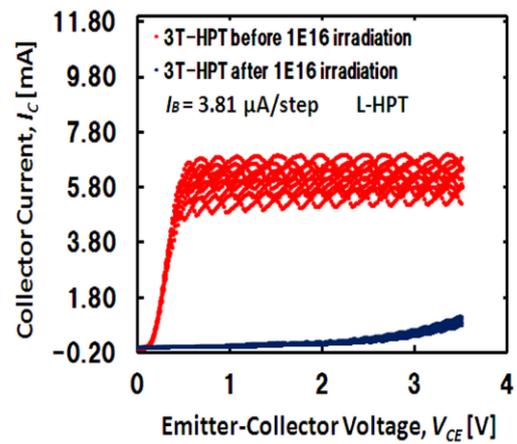
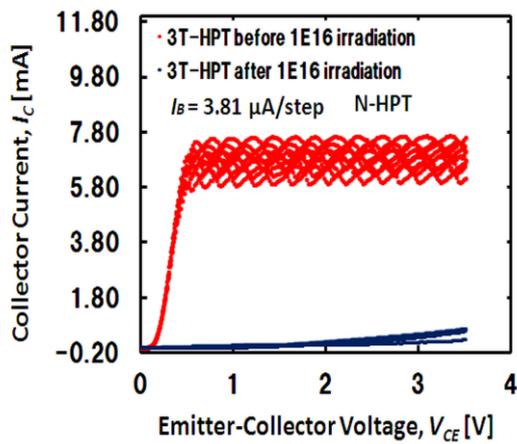


図 B-2.11(a) 光照射状態での電子線照射の前後の $d = 105 \mu\text{m}$ N-HPT の電気特性

図 B-2.11(b) 光照射状態での電子線照射の前後の $d = 105 \mu\text{m}$ L-HPT の電気特性

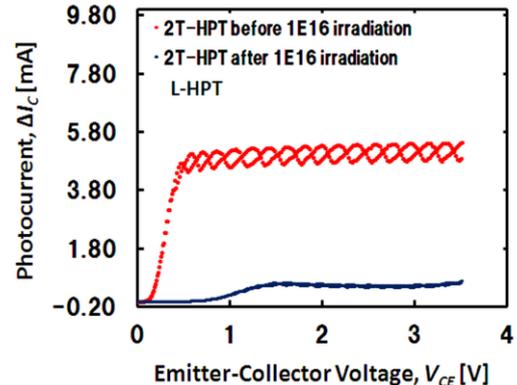
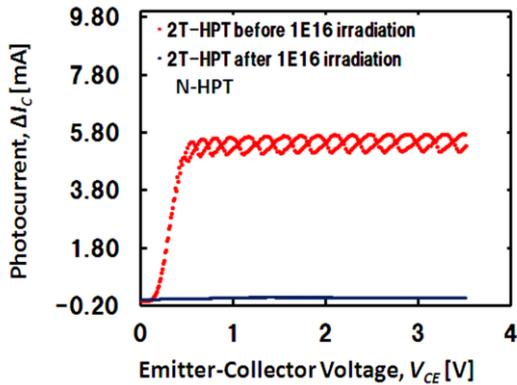


図 B-2.12(a) 光照射状態での電子線照射の前後の $d = 105 \mu\text{m}$ N-HPT の ΔI_C

図 B-2.12(b) 光照射状態での電子線照射の前後の $d = 105 \mu\text{m}$ L-HPT の ΔI_C

フルエンス $2.85 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ の高エネルギー電子線照射の前後での HPT の電気特性

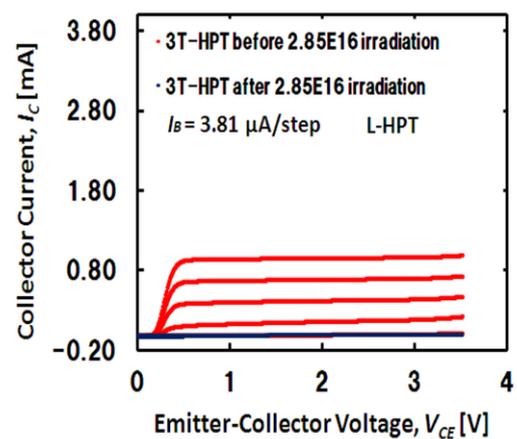
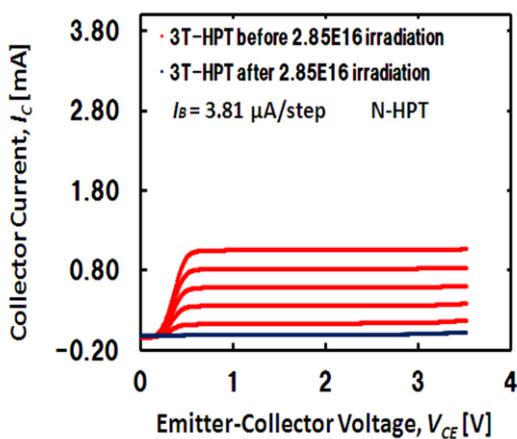
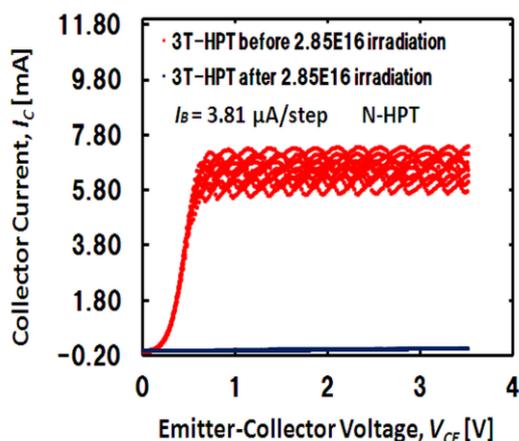


図 B-2.13(a) 暗状態での電子線照射の前後の d

図 B-2.13(b) 暗状態での電子線照射の前後の d

= 105 μm N-HPT の電気特性



= 105 μm L-HPT の電気特性

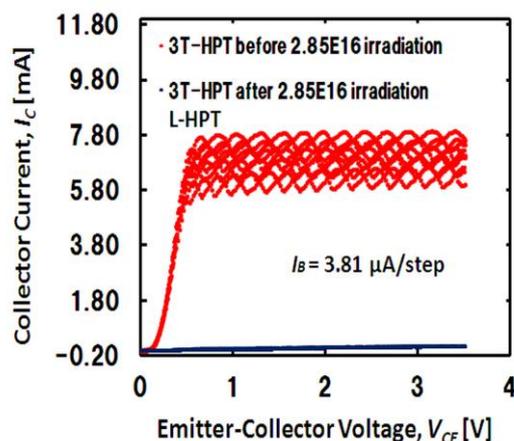


図 B-2.14(a) 光照射状態での電子線照射の前後の $d = 105 \mu\text{m}$ N-HPT の電気特性

図 B-2.14(b) 光照射状態での電子線照射の前後の $d = 105 \mu\text{m}$ L-HPT の電気特性

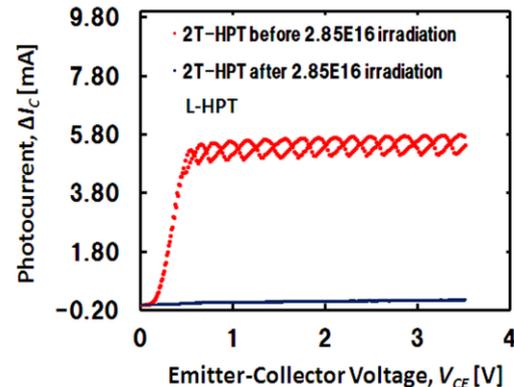
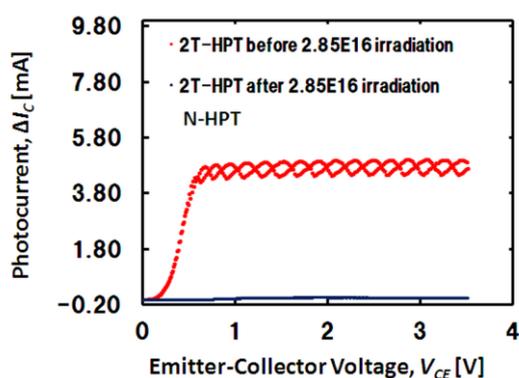


図 B-2.15(a) 光照射状態での電子線照射の前後の $d = 105 \mu\text{m}$ N-HPT の ΔI_C

図 B-2.15(b) 光照射状態での電子線照射の前後の $d = 105 \mu\text{m}$ L-HPT の ΔI_C

【付録 C】 マスクアライナ使用法

C-1. マスクアライナ使用法(PEM-800)

<装置立ち上げ編>

- (1) 水銀灯のコントロールボックスのスタートボタンが OFF（押されていない状態）であることを確認する。
- (2) 水銀灯のメインスイッチを ON にする。
- (3) スタートボタンを押し、ボタンが押されている状態にする。（水銀灯点灯）
- (4) コントローラ(マスクアライナ本体)の電源を ON にする。
- (5) 本体の初期化としてリセットボタンを押す。

-----装置のウォーミングアップ及び水銀灯の安定化として、30分待つ-----

- (6) マスク等吸着のためのポンプを ON にする。
- (7) 水銀灯の照度を測定する。(照度計の High(H)を選択)
- (8) 窒素バルブを開ける。

<操作編>

(1) 露光条件セット

- (ア) PRG ボタンを押し、露光条件変更モードに切り替える。
- (イ) アライメントギャップ、プリントギャップ、露光時間の順に条件値を入力する。値を入力後に SET を押す。
- (ウ) 全条件の入力が終了したら、再度 PRG ボタンを押し、通常モードに戻す。

(2) マスクセット

- (ア) マスクのクロム面が上になるように、マスクホルダにマスクを置く。
- (イ) MASK ボタンを押し、マスクを吸着させる。
- (ウ) マスクホルダをひっくり返し、セットしネジでしっかりと固定する。

(3) 基板セット

- (ア) 球面皿に基板を置く。(吸着口が中心にくるように)
- (イ) ADVANCE ボタンを 2 回押し、基板を吸着させる。(基板が小さく、基板が完全に吸着されない場合はテープ等を用いて吸着口を完全に塞ぐ)

(4) マスクホルダセット

- (ア) マスクホルダを吸着面まで左にスライドさせる。
- (イ) H1 ボタンを押し、マスクホルダを吸着させる。
- (5) マスクと基板の距離をアライメントギャップまで近づける
- (ア) ADVANCE ボタンを押すと、球面皿が上昇する。
- (イ) アライメントを行う場合は、この状態で、X,Y, θ を調整し、アライメントを行う。

(6) マスクと基板を密着させる(プリントギャップ)

- (ア) PRINT ボタンを押し、露光可能状態にする。

(7) 露光

- (ア) 水銀灯が基板の真上に来るように回転させる。
- (イ) ADVANCE ボタンを押し、露光する。

(8) 終了

- (ア) 露光が終了後、マスク以外の吸着は自動的に解除される。
- (イ) 基板を球面皿から取る。
- (ウ) マスクホルダをマスクが上にくるようにひっくり返し、MASK ボタンを押しマスクの吸着を解除し、マスクを取り外す。

<装置立ち下げ編>

- (1) 本体のリセットボタンを押す。(初期状態に戻すため)

- (2) コントローラ(マスクアライナ本体)の電源を OFF にする。
- (3) スタートボタンを押し、ボタンが押されていない状態にする。(水銀灯消灯)
- (4) ポンプを OFF にする。
- (5) 窒素バルブを閉じる。

-----水銀灯を消してから、冷却待ちのため 20 分間待つ-----

- (6) 水銀灯のファン近くの温度を確かめ、冷えていれば水銀灯のメインスイッチを OFF にする。

<注意点>

- ・ アライメントギャップやプリントギャップは 100 μm 以上を推奨(高解像度が必要な場合は、必要に応じて、小さくする。)

C-2. マスクアライナ使用法(ブース・マイクロテック)

<装置立ち上げ編>

- (1) トランス電源 ON。
 - (2) バキュームポンプを ON にする。
 - (3) 装置のメインを ON にする。
- 窒素バルブを開ける-----
- (4) N_2 TIMER BOX のスイッチを ON にする。
 - (5) ランプ電源用の RESTART ボタンを ON にする。
 - (6) ランプ電源を ON にする。※ランプが点灯する。

-----装置のウォーミングアップ及び水銀灯の安定化として、30 分待つ-----

- (7) 装置電源を ON にする。

<装置立ち下げ編>

立ち下げについては逆の順番で立ち下げること。

【付録 D】 電極形成技術

電極を形成する方法として、物理的气相成長法 (PVD) 法が用いられている。その中の一つに熱エネルギーを用いる真空蒸着法がある。真空蒸着とは、 10^{-4} Pa 以下の真空中において、固体を加熱蒸発させ、この蒸気を一定の温度に保った基板上に冷却凝縮 (蒸着) させて薄膜化する方法である。蒸着において真空環境を用いる第一の理由は、大気に含まれる酸素や水がヒータを損傷させ不純物として膜に混入するのを防ぐためである。第二の理由は、蒸発原子・分子が基板へ輸送する途中で気相の分子に妨げられないためである。

蒸発源の加熱方法によって(1)抵抗加熱法、(2)電子ビーム蒸着法、(3)高周波誘導加熱法に分類できる。本研究では、実験で(1)、(2)の方法しか使っていなかったため、(1)、(2)について説明する。

D-1. 抵抗加熱法

図 D-1.1 に示すように装置が安価であるために現在最も一般的に用いられている方法である。

発熱体として Ta (タンタル)、Mo (モリブデン)、W (タングステン) などの高融点金属をフィラメント状あるいはボート状に成型し、これに電流を流して蒸発材料を加熱する直接方式と、 Al_2O_3 (アルミナ)、BeO (ベリリア) などの高融点酸化物をつぼの周囲にヒータを巻き高周波誘導加熱で間接的に加熱する方式がある。この方法の蒸発源材料として要求される条件は、

- (1) 十分高温が得られること
- (2) 蒸気圧が蒸発材料より十分低いこと
- (3) 蒸発材料と化合物や合金を形成しないこと

などが挙げられる。

この蒸着に用いられる物質は、比較的融点の低いAl (アルミニウム)、Cu (銅)、Ag (銀)、Au (金)、Pd (パラジウム) などである。

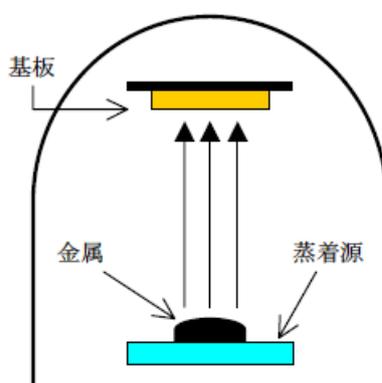


図 D-1.1 抵抗加熱蒸着法の概略図

D-2. 電子ビーム蒸着法

電子ビーム蒸着とは、図 D-2.1 に示すような回路を用いて、蒸発材料に電子線を照射し、加熱蒸着させる方法である。原理的には、加速電圧を約 2~3 kV 程度かけることによって加熱されたフィラメントから電子ビームによる電流が供給され、電界によって加速された電子が磁界で曲げられ蒸着材に衝突し、その蒸着材が加熱され蒸発する。

電子線の収束により、局所的な高温が得られる。また、銅製のつぼを充分冷却することによって高温を得ることが可能になり、Pt (プラチナ)、Ni (ニッケル)、Mo (モリブデン)、W (タングステン) などの高融点金属などの材料の薄膜形成も可能となる。また、抵抗加熱蒸着法と比較してボートなどの蒸着源との反応が少ないために不純物の混入が少なく、高純度の薄膜形成が可能である。さらに蒸発源の寿命が非常に長い、蒸発速度が大きい、熱応答性がよいので性格に蒸発速度を制御できる、合金や化合物を容易に蒸発できる、取り扱いが容易などの特長がある。しかし、コストが高いという欠点もある。

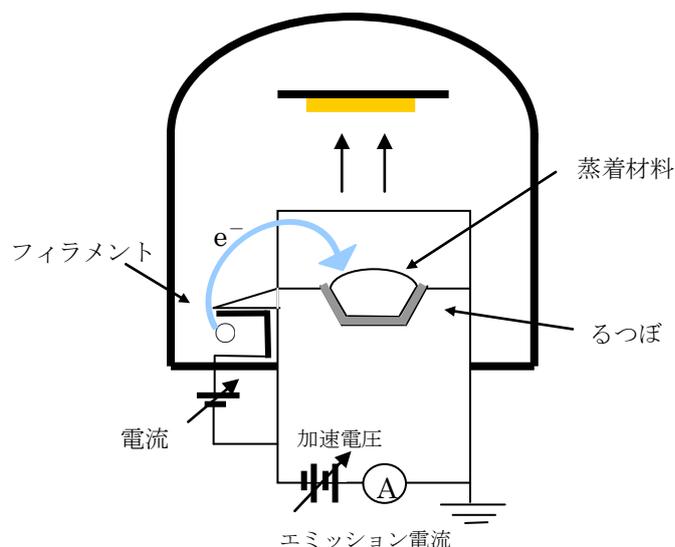


図 D-2.1 電子ビーム蒸着法の概

【付録 E】 膜厚測定方法

膜厚の測定方法には、電子顕微鏡(TEM や SEM)直接測定する方法もあるが、測定に時間がかかり、容易に測定できないことから、触針段差計等で簡単に測定するのが一般的である。

本研究で用いた触針段差計は、段差のあるサンプルの上を針でサンプルに触れて水平に表面をなぞることにより、サンプルの段差に応じて針を上下させる測定方法である。わずかな針の振幅を拡大するために、てこを用い、電氣的に増幅し、測定結果を横軸が針水平方向の移動距離、縦軸が針の高さのグラフとして出力される。この際、触針の圧力や位置を測定前に調整する必要がある。それは、針の圧力が高いと針のぶれは少なくなるが、膜を傷つけやすくなり、正確な測定ができないためである。また、試料を乗せるステージの傾きについても同様である。一般には段差をつけるために、マスクを用いた成膜や成膜後のエッチングを行う。

本研究で実際に膜厚測定に使用した装置は、日本真空技術株式会社、DEKTAK3ST である。本装置では、触針の走行距離は、2,000 μm 以上も可能であるが、装置の分解能は 100 \AA 以上であるためマイクロな段差の測定には向いていない。

【付録 F】 フォトリソグラフィ工程

フォトリソグラフィ工程は、レジストの感光しない黄色光で照明したクリーンルーム内で行われる。フォトリソグラフィは主に次に挙げる 5 つの工程から成っている。

- ・ レジスト塗布
- ・ プリベーク (Pre-bake)
- ・ 露光 (Exposure)
- ・ 現像 (Develop)
- ・ ポストベーク (Post-bake)

それぞれの工程に関する説明を以下に記す。

F-1. レジスト塗布

レジストの塗布方法には、主にスピニング法、ローラ法、スプレー法などがある。塗布方法で最も一般的に用いられているのは、図 F-1.1 に示すスピニング法である。回転軸にウェーハを減圧で吸着させ固定し、ウェーハ上にレジストを滴下してからウェーハを回転し、遠心力によってレジストを全面に広げるとともに余分のレジストを周辺に飛び散るようにするのである。プロセスにおいて重要であるレジスト膜厚とその分布の再現性は、レジストの粘度、温度のみならず、回転数とその立ち上がりの速さに依存する。また、ウェーハとレジストの密着性も良好なエッチングのために重要な要素となる。基板表面に水分、有機物などがあると密着性が悪くなる。塗布前のウェーハは湿度を低い状態に保つことが必要である。

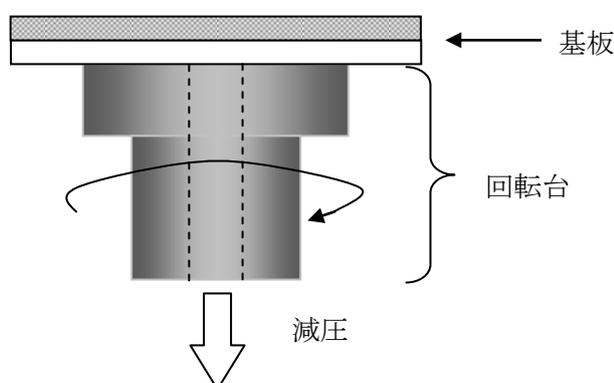


図 F-1.1 スピニング法によるフォトリソレジストの塗布の原理図

F-2. プリベーク

塗布したレジストには、溶媒が含まれているので、これを蒸発させ、基板とレジストの密着性を高める。その温度はレジストを高分子化するほど高くなく、レジストとウェーハの境界までが完全に乾燥するような温度と時間を必要とする。(典型的には 90°C-120°C/1-2 分) プリベークを行う装置には、クリーンオープン、ベーク炉、ホットプレートなどがある。

F-3. 現像

露光したウェーハを現像液につけて、露光によって化学的性質が変化した部分のレジストを除去することを現像という。現像液はレジストの種類によってレジストメーカーからおののに適した液が用意されている。これらは相当するシンナに現像調節用の薬品を少量加えたものと考えられる。現像液の濃度が強い場合、レジストパターンの膨潤やレジストが剥がれやすくなることがある。一方、現像液の濃度がうすい場合や現像時間が短すぎると、現像が不十分でウェーハ上にレジストが残ることがある。量産的には、現像液を吹きつける方法やウェーハを回転しながら現像液をスプレーする方法なども使われている。現像に引き続いて、純水やエチルアルコール等で

洗浄し、乾燥する。

F-4. ポストバーク

現像によって軟化したレジスト膜を再び乾燥固化して、耐腐食性、ウェーハとの密着性をよくする。ポストバーク不足のときは密着性が悪いためエッチング時にレジストが浮き上がることがある。過剰の場合はレジストの除去が困難になってしまう。(典型的には 100°C-180°C)ポストバークを行う装置は、プリバークに用いた装置と同様である

最後にフォトリソグラフィの一連の流れを図 F-4.1 に示す。

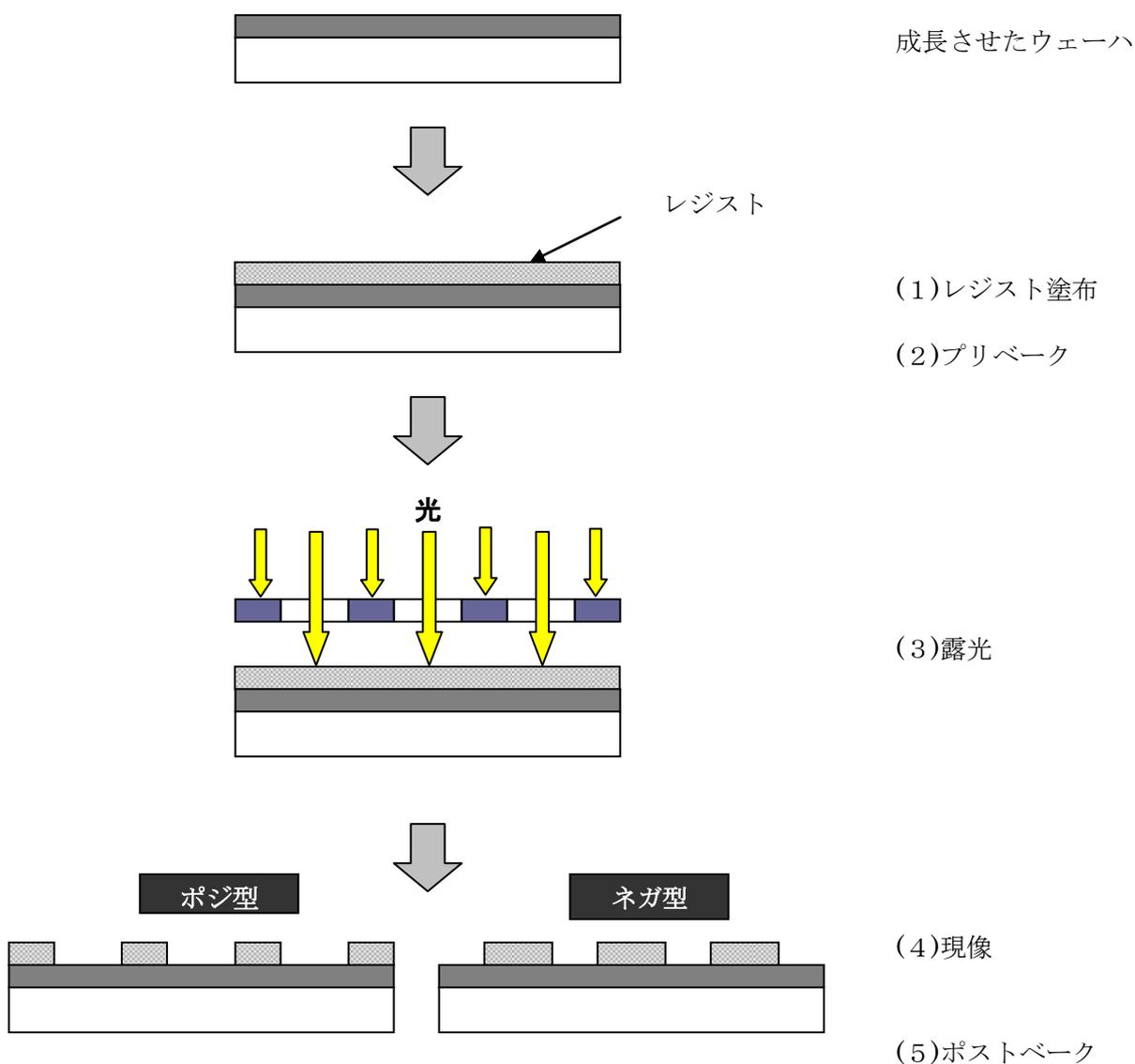


図 F-4.1 光学リソグラフィ工程

【付録 G】 HBT/HPT 基本特性

G-1. HBT/HPT の I-V 特性測定

エミッタ接地時において、入力としてベース電流を制御し、コレクタ・エミッタ間電圧 V_{CE} をバイアスとしてコレクタ電流を I_C 出力としたものである。HBT/HPT の特性測定方法を以下に示す。

- (1) Emitter 端子を COMMON に設定する。
- (2) Base 端子を電流制御に設定する。
- (3) Collector 端子を電圧制御とする。
- (4) Collector-Emitter 間電圧 V_{CE} を変化させ(0~3.5V 程度)、Collector 電流 I_C を測定する。
- (5) Base 電流 I_B を $5\mu\text{A}$ から $5\mu\text{A}$ ステップで $25\mu\text{A}$ まで変化させ、同様に Collector 電流 I_C を測定する。(この時、Collector 電流 I_C の上限(COMPLIANCE)を 100mA 程度に設定しておく。)

G-2. Gummel Plots

Gummel Plots とは、エミッタ接地時において、ベース・エミッタ間とコレクタ・エミッタ間の電位差を 0 とした(ベース・コレクタ間ショート)時のベース電流 I_B 及びコレクタ電流 I_C を測定したものである。HBT/HPT の Gummel Plots の測定方法を以下に示す。

- (1) Emitter 端子を COMMON に設定する。
- (2) ベース、コレクタは電圧制御とし、 V_{BE} と V_{CE} を同電位で変化させる。
- (3) V_{BE} 及び V_{CE} を変化させ(0~1.5V 程度)、ベース電流 I_B 及びコレクタ電流 I_C を測定する。(この時、ベース電流 I_B 及びコレクタ電流 I_C の上限を 100mA までに設定しておく。)

【付録 H】 HBT/HPT 信頼性確認

H-1. 電氣的なストレステスト

本研究では、HBT/HPT に電氣的なストレスを印加後の特性を測定した。半導体パラメータアナライザの DC ストレス印加機能を使い、ストレステストを行った。ストレス出力値とストレス時間を設定することでストレスの印加が可能である。以下にストレス印加方法を示す。

- (1) ストレス印加モードに切り替える。
- (2) エミッタをアースに設定する。
- (3) ベースを電流制御に設定する。
- (4) コレクタを電圧制御に設定する。
- (5) ベース電流 I_B とコレクタ電圧 V_C のストレス出力値、ストレス時間を設定し、ストレス印加を開始する。
- (6) ストレス印加後は、通常の測定モードに切り替え、各種測定を行う。

H-2. 温度特性

半導体パラメータアナライザと温度コンプレッサ、温度コントローラおよび真空ポンプをセット

し、真空状態にて、温度コントローラで温度を変化しながら、試料の特性を測定した。温度特性の測定方法は以下に示す。

1. 立ち上げる

- ・基板をセッティングして、測定器の電源を ON にする
- ・真空状態にするためには
 - ・オーリングをエタノールでクリーニングしてから閉める
 - ・ロータリーポンプを起動する
 - ・メインバルブをゆっくり開ける
 - ・3分後、ターボ分子ポンプを起動する
 - ・真空引くためには、しばらく待つ
- ・圧力計のスイッチを ON にして、 1×10^{-3} Torr より圧力が低くなったら、目標温度をセッティングして、安定するまで待つ
 - ・ソースメーターを起動する
 - ・測定針を動かして、試料の特性を測定する

2. 温度調整の仕方

- ・Setpoint ボタンを押して、Enter for Loop 1 の Setpoint に表示温度が調整できる
- ・目標温度が調整できてから、Enter ボタンを押す
- ・液晶画面に表示 B のところに Heater 出力が 0% のため、Heater 出力にする
 - ・Heater 出力するためには、Heater Range ボタンを押す
 - ・上がる矢印と下がる矢印で High, Med, Low を選ぶことができる
 - ・基板に温度を切りたければ、Heater off ボタンを押す。その時、出力温度は 0% に戻る

3. 立ち下げる

- ・測定が終わったら、基板の温度を 280 K にセッティングして、冷凍機のスイッチを ON にする
 - ・基板の温度が 280 K になったら、冷凍機のスイッチを OFF にする
 - ・真空バルブのメインバルブをゆっくり閉める
 - ・圧力計を OFF にする
 - ・ターボ分子ポンプを止める
 - ・ロータリーポンプを STOP する
 - ・N₂ を流す
 - ・N₂ バルブをゆっくり開ける
 - ・N₂ がいっぱいになったら、N₂ を閉める
 - ・ターボ分子ポンプが止まったら、電源を OFF する
 - ・基板を取ることができる

【付録 I】 オーミック接触抵抗測定方法

I-1. TLM 測定法 (Transmission Line Model)

TLM 測定は、図 I-1.1 に示すような長方形のコンタクトを用いて測定を行なう。二つのコンタクトパッド間で計測される全抵抗 R は「接触抵抗 R_C の 2 倍 + 半導体層の抵抗 R_S 」なので、

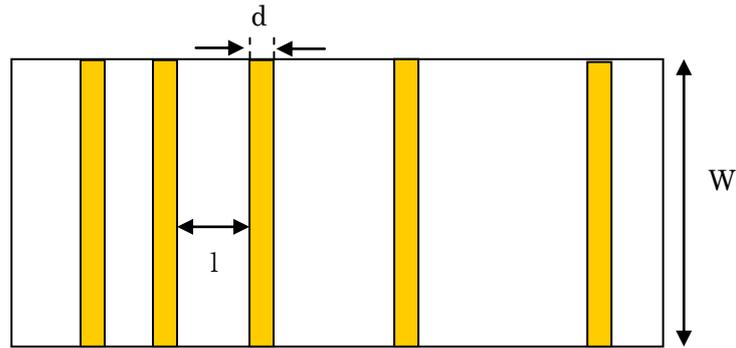


図 I-1.1 TLM 測定パターン

$$R = 2R_C + R_S \quad (\text{I-1})$$

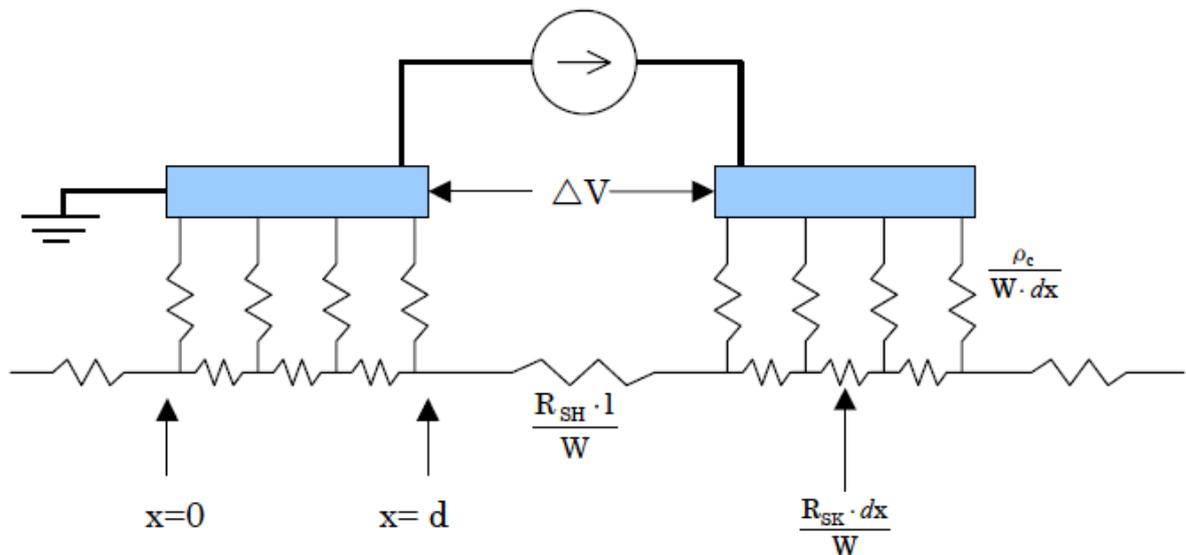
で与えられる。但し、

$$R_C = \frac{R_{SK} \cdot L_t}{W} \quad (\text{I-2})$$

$$R_S = \frac{R_{SH} \cdot l}{W} \quad (\text{I-3})$$

で表すことができる。

$$\left[\begin{array}{l} R_{SH}: \text{コンタクト直下以外のシート抵抗 (パッド間のシート抵抗)} \quad [\Omega/\square] \\ R_{SK}: \text{コンタクト直下のシート抵抗} \quad [\Omega/\square] \\ L_t: \text{伝搬長} \quad [\text{cm}] \\ W: \text{コンタクトパッド幅} \quad [\text{cm}] \\ l: \text{パッド間の間隔} \quad [\text{cm}] \end{array} \right]$$



図I-1.2 長方形電極を並べたときの伝送回路の様子

パッド間の抵抗を数点測定し、パッド間の全抵抗 R とパッド間距離 l との直線関係が求めれば、傾きから、 $R_{SH}l/W$ が、 R 軸の切片がそれぞれ $2R_C$ 、 l 軸の切片が $-L_t$ であるので、この方法を用いて接触抵抗 R_C を求めることができる。ここで、 $R_{SH}=R_{SK}$ と仮定し、 $d \gg L_t$ で電圧降下が電極の端の部分のみで起こると仮定すると、固有接触抵抗は電流の流れる部分の面積 ($L_t \cdot W$) と接触抵抗をかけたもので表すことができるので、

$$\rho_C = R_C \cdot L_t \cdot W = \frac{R_{SK} \cdot L_t}{W} \cdot L_t \cdot W = R_{SK} \cdot L_t^2 \quad (\text{I-4})$$

で与えられる。

I-2. CTLM 測定法 (Circular Transmission Line Model)

図 I-1.1 のように長方形並べて接触抵抗を測定する方法では、コンタクトエッジでの電流が接触抵抗測定の結果に影響するので、この電流を除去するためにメサ構造にする必要がある。そのため、このパターンはメサエッチングを含むプロセスによって製作しなければならず、手順が複雑である。この複雑さを避けるためにパターンをリング状にした TLM 測定法が CTLM 測定法であり、より正確な解析が可能となる。

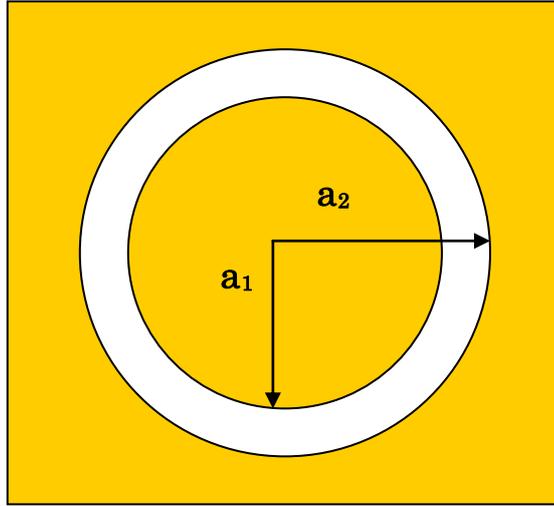


図 I-2.1 CTLM 測定パターン

CTLM 測定に用いるリング状のパターンを図 I-2.1 に示す。この CTLM 測定を用いると、電極間の全抵抗 R は次式で与えられる。

$$R = \frac{R_{SH}}{2\pi} \left[L_t \left(\frac{1}{a_2} + \frac{1}{a_1} \right) + \ln \left(\frac{a_2}{a_1} \right) \right] \quad (\text{I-5})$$

$$\left[\begin{array}{l} R_{SH}: \text{コンタクト直下以外のシート抵抗 } [\Omega/\square] \\ a_1: \text{リング内径 } [\text{cm}] \\ a_2: \text{リング外形 } [\text{cm}] \\ L_t: \text{伝搬長 } [\text{cm}] \end{array} \right]$$

また、 $d = a_2 - a_1$ とおき、 $a_2, a_1 \gg d$ であるとし、式(G-5)の第 2 項についてマクローリン展開を行なうと式(I-6)のように近似できる。

$$\begin{aligned} f\left(\frac{d}{a_2}\right) &= \ln\left(\frac{a_2}{a_1}\right) = \ln\left(\frac{a_2}{a_2-d}\right) = -\ln\left(1 - \frac{d}{a_2}\right) \\ &= f(0) + f'(0) \cdot \frac{d}{a_2} + \dots \\ &\approx \frac{d}{a_2 - d} \\ &\approx \frac{d}{a_2} \quad (\because a_2 \gg d) \quad (\text{I-6}) \end{aligned}$$

式(I-6)を式(I-5)に代入すると、

$$R \approx \frac{R_{SH}}{2\pi a_2} (d + 2L_t) \quad (\text{I-6})$$

となる。これより d と R の関係が求まれば、傾きから R_{SH} を求めることができる。また、 R 軸の切片から L_t を求めるため、電極の接触抵抗 R_C は次式により計算できる。

$$L_t = \sqrt{\frac{R_C}{R_{SH}}} \quad (\text{I-7})$$
$$R_C = L_t^2 \cdot R_{SH}$$

本研究に関する業績

(査読付原著論文)

- [1] Than Hong Phuc, 高木保志, 内田和男, 野崎眞次, "InGaP/GaAs ヘテロ接合フォトトランジスタの温度特性", 電子情報通信学会論文誌 C, Vol.J96-C, No.9, 238 – 244, September 2013.
- [2] Than Hong Phuc, Kazuo UCHIDA, Shinji NOZAKI, "Effects of Electrical Stress on the InGaP/GaAs Heterojunction Phototransistor", IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, Vol. 15, No. 4, 604-609, Dec. 2015.
- [3] Than Hong Phuc, Kazuo UCHIDA, Takahiro MAKINO, Takeshi OHSHIMA, Shinji NOZAKI, "InGaP/GaAs Heterojunction Photosensor Powered by an On-Chip GaAs Solar Cell for Energy Harvesting", Japanese Journal of Applied Physics Special Issue. (Accepted)

参考論文

(国際会議プロシーディングス)

- [1] Phuc Hong Than, Kazuo Uchida, Takahiro Makino, Takeshi Ohshima and Shinji Nozaki, "Effects of Electrical Stress and High-Energy Electron Irradiation on the InGaP/GaAs Heterojunction Phototransistor," Mat. Res. Soc. Symp. Proc. **1792**, DOI: 10.1557/opl.2015.403 (2015).

(海外学会発表)

- [1] Phuc Hong Than, Kazuo Uchida, Takahiro Makino, Takeshi Ohshima and Shinji Nozaki, "Effects of Electrical Stress and High-Energy Electron Irradiation on the InGaP/GaAs Heterojunction Phototransistor," CC11.03, 2015 Materials Research Society Spring Meeting, Apr. 6 – Apr. 10, 2015, San Francisco, CA, USA.
- [2] Than Hong Phuc, Yasushi TAKAKI, Kazuo UCHIDA, Shinji NOZAKI, "Effects of Temperature and Stress on the InGaP/GaAs Heterojunction Phototransistor", the 6th International Workshop on Advanced Materials Science and Nanotechnology, Ha Long City, Viet Nam, October 30 – November 2, 2012.

(国内学会発表)

- [1] Than Hong Phuc, Kazuo UCHIDA, and Shinji NOZAKI, "InGaP/GaAs Heterojunction Phototransistor Powered by an On-Chip GaAs Solar Cell for Energy Harvesting", 2015 International Conference on Solid State Devices and Materials, Sapporo, Hokkaido, Japan, September 27-30th, 2015.

表彰

- [1] 植之原留学生学術奨励賞 2015 年
- [2] 電子情報通信学会東北支部優秀学生表彰 2009 年

InGaP/GaAs ヘテロ接合フォトトランジスタの温度特性

タン ホング フック[†] 高木 保志[†] 内田 和男[†]
野崎 眞次^{†a)}

Temperature Dependence of the InGaP/GaAs Heterojunction Phototransistor

Phuc Hong THAN[†], Yasushi TAKAKI[†], Kazuo UCHIDA[†], and Shinji NOZAKI^{†a)}

あらまし InGaP/GaAs ヘテロ接合バイポーラトランジスタ (HBT) の温度特性はこれまで多く調べられ、報告されているが、InGaP/GaAs ヘテロ接合フォトトランジスタ (HPT) の温度特性についてはほとんど報告例がない。本研究では、白色光に対する光応答の高感度検出への応用を目的に、InGaP/GaAs HPT を作製し、300~400 K の温度範囲で InGaP/GaAs HPT の電流利得 β 及び受光感度 S を測定した。その結果、電流利得 β は温度とともに減少し、受光感度 S は 320 K まで増加するがその後は減少した。これらの実験結果は、HPT の三端子等価回路により説明された。また、HBT において露出した高濃度 GaAs ベース表面でのキャリアの再結合を抑制し、電流利得を高めるエミッタレッジパッシベーションの HPT における効果も検証した。エミッタレッジパッシベーションは、HPT においても全ての測定温度で高い電流利得 β 及び受光感度 S を維持するのに有効であった。特にエミッタレッジパッシベーションは、HBT 以上に HPT の高性能化に貢献することが明らかとなった。

キーワード ヘテロ接合フォトトランジスタ (HPT), InGaP/GaAs, エミッタレッジパッシベーション, 温度特性

1. ま え が き

ローカルエリア・ネットワークやマルチチップ・モジュールにおける光検出器としての PIN フォトダイオード、APD アバランシフォトダイオード、フォトトランジスタなどがある。しかし、PIN フォトダイオードは利得をもたないために、入射光が弱いと感度が悪くなるという欠点をもっている。また、APD はアバランシ降伏による利得をもつが、同時にノイズが発生するという問題がある。一方、フォトトランジスタ、特に高周波用として高濃度ドーパした GaAs をベースとしたヘテロ接合フォトトランジスタ (HPT) は、低電圧での高利得、低ノイズ、高信頼性といった利点をもつことから、local area network のような可視光領域での光通信、光配線において PIN フォトダイオード、

APD アバランシフォトダイオードの代わりとなる光検出器として期待されている [1]。特に、HPT は、超高周波ヘテロ接合バイポーラトランジスタ (HBT) を使ったアナログやデジタル回路と集積しやすいという利点をもつため、これまでに HPT とヘテロ接合バイポーラトランジスタ (HBT) を同じエピ基板に集積し、光検出器の HPT の出力を HBT の増幅器で増幅する超広帯域受光器なども作製された [2]。

上述の光通信分野での HPT の応用では、レーザのような単色光に対する応用が重要となるが、本研究では、InGaP/GaAs HPT の上述の光通信分野での応用のような単色光ではなく、今後需要が高まる室内照明や自動車のヘッドライトに使われる白色 LED の強度をバックグラウンドの明るさに合わせて調光する省エネルギー型 LED 調光器の開発を念頭に置いて、白色光に対する光応答を検討する。

HBT 同様、HPT も AlGaAs をエミッタにした AlGaAs/GaAs HPT が主であったが、エミッタ・ベース接合で電子注入の障壁となる伝導帯のオフセットを少なくするための Al 組成のグレーディングが必要で

[†] 電気通信大学大学院情報理工学研究所, 調布市
Graduate School of Informatics and Engineering, The
University of Electro-Communications, 1-5-1 Chofugaoka,
Chofu-shi, 182-8585 Japan

a) E-mail: nozaki@ee.uec.ac.jp

あり、また AlGaAs と GaAs のエッチングにおける選択性が少ないので作製が容易ではないなどの理由で、近年は、InGaP/GaAs HPT の研究開発がより盛んとなっている [3], [4].

HBT は、その特性が温度に大きく依存され、高周波領域での高出力アンプなどに使用されるため、温度特性の評価は重要となっている [5], [6]. しかし、HPT の温度特性についてはほとんど報告されていない。本研究では、InGaP/GaAs HPT を作製し、その白色光に対する受光感度 S の温度特性を調べ、解析した。

また、HBT においては InGaP エミッタの一部を残し、高濃度 GaAs 外部ベースの露出部を少なくすることがベース表面での再結合を抑制し、電流利得を高め、電気的ストレスによる劣化も少なくさせることがこれまでの研究 [7], [8] より知られており、そのようなエミッタレッジパッシベーションは、InGaP/GaAs HPT でもまた、有効であることが報告されている [4]. 本研究では、エミッタレッジパッシベーションの及ぼす温度特性についても調べ、その効果を検討した。

2. InGaP/GaAs HPT の作製と評価

InGaP/GaAs HPT のエピ構造は、表 1 に示すように S.I. GaAs 基板 (100) 面上に有機金属化学気相成長法 (MOCVD) により成長された一般的な高周波用 InGaP/GaAs HBT のものである。

このエピ基板を用い、ウェットエッチングによる通常のメサプロセスを用い、HPT を作製した。また、HPT 受光面積を大きくし、光電流を高めるためにエミッタの面積を大きくした。一般にエミッタの面積を大きくするとエミッタ周辺での電流集中が起きやすくなるので、エミッタ電極の形状は図 1 のように幅 $4\mu\text{m}$ 長さ $2100\mu\text{m}$ 10 本からなるくし型電極とし、またベース電極の形状は幅 $4\mu\text{m}$ 長さ $2100\mu\text{m}$ 11 本からなるくし型電極とした。本研究で作製された InGaP/GaAs HPT のエミッタサイズは $300,000\mu\text{m}^2$ であり、通常の $100\mu\text{m}^2$ のエミッタサイズをもつ HBT [7], [8] と比べると 3,000 倍程度大きい。

次に、作製の手順について簡単に述べる。まず、アセトン、エタノールで洗浄を行ったエピ基板表面にリフトオフによってエミッタ電極 (Ti/Au) を形成した。このエミッタ電極をマスクとして、InGaAs 層、GaAs 層をそれぞれ $\text{H}_3\text{PO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ 及び $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ で、InGaP 層は HCl 溶液を用いて選択的にエッチングし、ベース表面を露出させた。

表 1 HPT エピタキシャル構造
Table 1 Epitaxial structure of HPT.

		Dopant		Doping level [cm^{-3}]	Thickness [Å]
Emitter Contact	n-InGaAs	Si	0.5	2.0×10^{19}	500
	n-InGaAs	Si	0→0.5	2.0×10^{18}	500
	n-GaAs	Si		3.0×10^{18}	1000
	n-GaAs	Si		3.0×10^{17}	1000
Emitter	n-GaAs	Si		3.0×10^{18}	50
	n-InGaP	Si	0.48	3.0×10^{17}	300
Base	p-GaAs	C		3.6×10^{19}	900
Collector	n-GaAs	Si		1.0×10^{16}	6000
	n-GaAs	Si		3.0×10^{18}	200
Etch stop	n-InGaP	Si	0.48	3.0×10^{18}	100
SubCollector	n-GaAs	Si		3.0×10^{18}	4000
	i-GaAs			—	100
	i-AlGaAs		0.2	—	200
	i-AlGaAs		0.5	—	1000
	i-AlGaAs		0.2	—	300

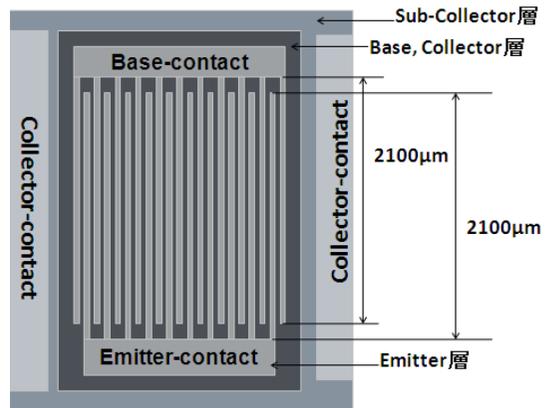


図 1 InGaP/GaAs HPT 平面図
Fig. 1 Top view of the fabricated InGaP/GaAs HPT.

ベース層は薄いので、InGaP と GaAs のエッチング速度が大きく異なる HCl を用いることにより、ベース層をオーバエッチングすることなしにエミッタメサを形成することができる。AlGaAs/GaAs HPT では、高い選択性のエッチング溶液がなく、ベース層をオーバエッチングせずにベースの面出しをするのが困難である。次に露出したベース表面にベース電極 (Ti/Pt/Au) をリフトオフにより形成した。ベース、コレクタを連続してメサエッチングし、サブコレクタを露出させた。その表面に、コレクタ電極 (Ni/AuGe/Ni/Au) を蒸着し、n 型オーミックコンタクトの形成を行った。サブコレクタの面出しがしやすいように、エピ構造には、コレクタとサブコレクタの間にエッチストップ層として薄い高濃度の n 形 InGaP 層を挿入した。InGaP 層

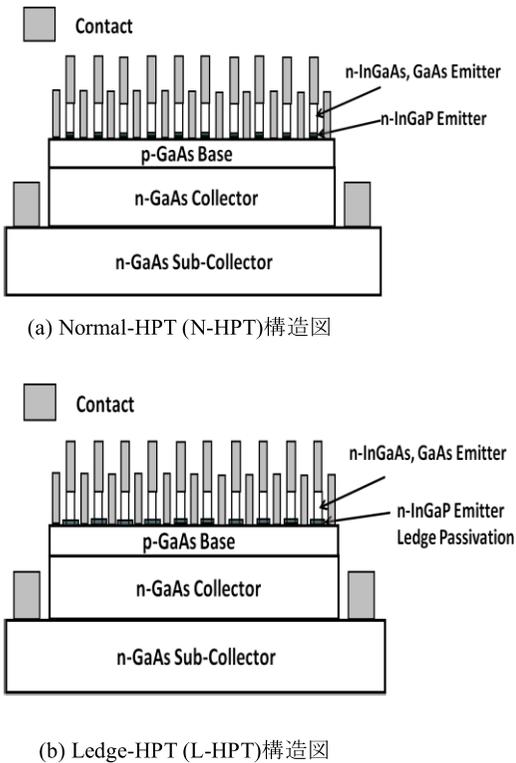


図2 InGaP/GaAs HPT 構造
Fig. 2 Schematic cross sections of (a) Normal-HPT (N-HPT) and (b) Ledge-HPT (L-HPT).

を HCl 溶液で選択的にエッチングした後、20 nm だけサブコレクタ層をエッチングし、その表面にコレクタ電極を形成した。このように作製したエミッタレッジパッシベーションのない N-HPT (Normal-HPT) の断面図を図 2 (a) に示す。

エミッタレッジパッシベーションは、InGaAs 及び GaAs エミッタ層をエミッタ電極形成用のマスクを用いて、それぞれ $3\text{H}_3\text{PO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:25\text{H}_2\text{O}$ 及び $3\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:150\text{H}_2\text{O}$ を用いて全てエッチングした。そのときの InGaAs 及び GaAs のエッチング速度は共に 200 nm/min であった。その後、エミッタ電極を覆い隠すエミッタレッジパッシベーション形成用のマスクを用いて、HCl 溶液で 30 nm の InGaP 層を全てエッチングした。作製されたエミッタレッジパッシベーションを施した L-HPT (Ledge-HPT) の断面図を図 2 (b) に示す。図のようにレッジ幅は $5\mu\text{m}$ とし、ベース露出部の約 50% を InGaP エミッタレッジパッシベーションで覆った。その後のプロセスは、N-HPT

と同様である。

1. で述べたように、本研究では、HPT の白色光検出器への応用を目的とするため、光照射には照射光強度を一定とした PHILIPS 製のハロゲンランプ (電圧 15 V, 強度 150 W) を使用した。リングライトガイドを用いてランプの照射領域直径 74 cm 内の照射強度が均一になるようにした。HPT のベース面積が 0.00846 cm^2 であることを考慮すると、HPT の受光強度 P_{in} は 0.295 mW となる。正確には、金属電極を光は透過しないので、ベース面積ではなく、光を吸収する実効面積を考えなければならないが、金属電極側面での乱反射の影響などを考慮すると光を吸収する実効面積を求めることは難しい。しかしながら、測定に同じ構造の HPT を用いることにより、式 (1) より計算される受光感度の絶対値は正確に示せないものの、HPT 受光感度を比較することは可能である。

作製された HPT の動作には、ベースを開放する 2 端子、HBT のようにベース電流による 3 端子動作があるが、高い利得が得られる 3 端子動作を行った [4]。実験では、同光源を用い、作製された HPT のエミッタ接地のコレクタ電流を各ベースバイアス電流において半導体パラメータアナライザ (HP4155 A) により測定した。光照射によるコレクタ電流の増加分 ΔI_C (暗状態 (Dark) と光照射状態 (Light) の出力電流 (コレクタ電流) の差) を求め、式 (1) に示すような ΔI_C に比例する受光感度 $S [\text{A/W}]$ により HPT の特性評価を行った。

$$S = \frac{\Delta I_C}{P_{in}} = \frac{\Delta I_C [\text{mA}]}{0.295 [\text{mW}]} \quad (1)$$

式 (1) において、 P_{in} は HPT の受光強度であり、 0.295 mW と一定である。

3. 実験結果及び考察

3.1 HPT の受光感度とエミッタレッジパッシベーションの効果

図 3, 図 4 は、それぞれ暗状態、光照射状態での HPT のエミッタ接地電流-電圧特性を示す。入力としてベースバイアス電流 I_B を 10, 20, 30, 40, $50\mu\text{A}$ と変化させ、各 I_B を固定してコレクタ・エミッタ間の電圧 V_{CE} を 0 から 1.5 V に変化させ、 V_{CE} に対するコレクタ電流 I_C を測定した結果である。

エミッタ接地の場合、HBT の性能は一般に式 (2) に

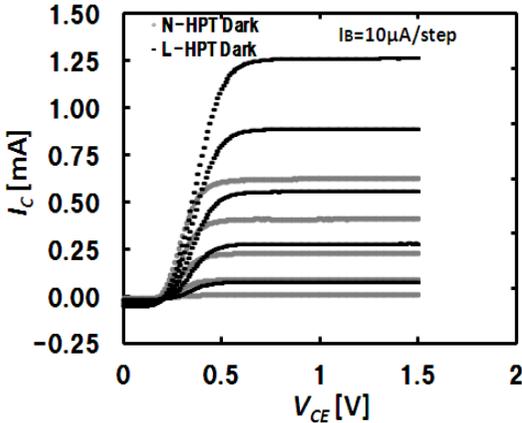


図3 暗状態での N-HPT と L-HPT の電気特性
Fig. 3 Common-emitter I-V characteristics of N-HPT and L-HPT in the dark.

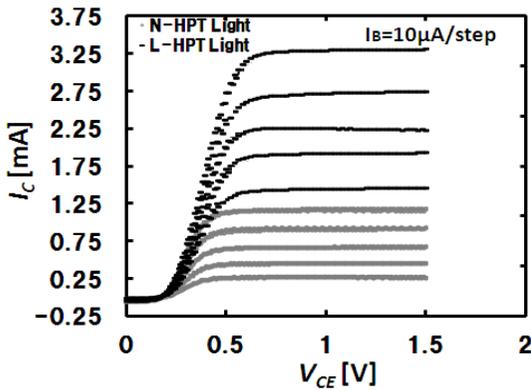


図4 照射状態での N-HPT と L-HPT の電気特性
Fig. 4 Common-emitter I-V characteristics of N-HPT and L-HPT under the optical illumination.

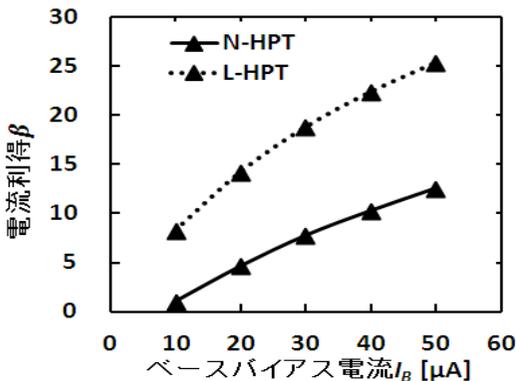


図5 暗状態での HPT の電流利得 β のベースバイアス電流 I_B 依存性
Fig. 5 Dc current gains for various base bias currents of N-HPT and L-HPT in the dark. The current gains were calculated from Fig. 3.

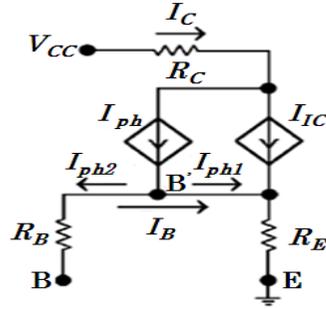


図6 ベースバイアスに電流源を用いる三端子 HBT/HPT の等価回路
Fig. 6 Equivalent-circuit model representing a 3T HBT/HPT with the base biased by a current source.

示される電流利得 β で評価される。

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \quad (2)$$

この電流利得 β は、図5に示すようにベースバイアス電流に依存する。HPTの場合、後で述べるようにベースバイアス電流は固定されても光照射によりHPT内部のベース電流が増加するため、光照射時には電流利得 β が定義されず、暗状態でのみ電流利得 β は定義される。

L-HPTは全てのベースバイアス電流でN-HPTよりも電流利得 β が高く、N-HPTに比べるとL-HPTでは、ベースバイアス電流が増加するにつれ電流利得がより大きく増加することが分かる。エミッタレッジパッシベーションのInGaP/GaAs HPTへの影響の詳細は、楊らにより述べられている[7]。作製されたHPTは前述のようにエミッタの周辺長が長く、高濃度のGaAsベース層が露出した表面が空乏層内に含まれるため再結合電流が生じ、電流利得 β が低下する。一般には、エミッタ・ベース接合での再結合電流は順バイアスが大きくなると拡散電流に比べて小さくなるため、電流利得は上昇する。

光照射時のコレクタ電流の解析に図6のTanらのHPTの三端子等価回路[4]を用いる。

ここで、 R_E はエミッタ抵抗、 R_B はベース抵抗、 R_C はコレクタ抵抗、 I_C は内部コレクタ電流、 I_{ph} はベース・コレクタ間の空乏層に生成された光電流である。暗状態と光照射状態で I_B は R_E を通し流れる。光照射状態でベース・コレクタ間の空乏層に生成された光電流 I_{ph} はB'点に流れ込み、その後 R_E と R_B に分けられるが、電流源の場合、 I_{ph2} は0となり、光

電流 I_{ph} との全てがベースバイアス電流 I_B とともにエミッタ・ベース接合に流れ込む。したがって、照射状態では、HPT 内部のベース電流はベースバイアス電流とベース・コレクタ間の空乏層に生成された光電流 I_{ph} の和となり、照射時のコレクタ電流 I_C と照射によるコレクタ電流の増加分 ΔI_C は次の式で与えられることになる。

$$I_C = I_{IC} + I_{ph}$$

$$= \beta(I_B + I_{ph}) \times [I_B + I_{ph}] + I_{ph} \quad (3)$$

$$\Delta I_C = \beta(I_B + I_{ph}) \times [I_B + I_{ph}]$$

$$- \beta(I_B) \times I_B + I_{ph}$$

$$= [\beta(I_B + I_{ph}) - \beta(I_B)] \times I_B$$

$$+ \beta(I_B + I_{ph}) \times I_{ph} + I_{ph} \quad (4)$$

式 (3), (4) の $\beta(I_B + I_{ph})$, $\beta(I_B)$ は、それぞれ HPT 内部のベース電流が $I_B + I_{ph}$, I_B の値のときの暗状態での β である。図 5 よりベースバイアス電流の増加とともに電流利得 β は増加するので式 (4) の第 1 項は正となる。したがって、式 (4) より、電流源により流すベースバイアス電流は、照射状態も暗状態も同じであるが、照射時にはベース・コレクタ pn 接合で生成される光電流に加えて、 $[\beta(I_B + I_{ph}) - \beta(I_B)] \times I_B + \beta(I_B + I_{ph}) \times I_{ph}$ の電流がコレクタ電流として暗状態より余分に得られることが分かる。フォトダイオードの場合の光電流 I_{ph} よりはるかに大きい照射による電流が HPT では得られることは明らかである。

各ベースバイアス電流 I_B でコレクタ電流 I_C がコレクタ・エミッタ間の電圧 V_{CE} に依存せず、飽和する領域で測定された ΔI_C 及び式 (1) で計算される受光感度 S のベースバイアス電流依存性を図 7 に示す。

ベースバイアス電流 I_B が増加するにつれ、受光感度は増加する。L-HPT の受光感度は、ベースバイアス電流 $50 \mu\text{A}$ で N-HPT の 4 倍近い。ベース・コレクタの空乏層で生成される光電流は、L-HPT も N-HPT も同じであるとしても、コレクタに流れる全電流は、L-HPT の方がはるかに高い。このことは、図 5 に示されるように暗状態での電流利得 β が L-HPT の方が大きく、式 (4) の第 1, 2 項が N-HPT より大きいことによる。興味深いのは、暗状態の L-HPT の電流利得 β はベースバイアス電流 $10 \mu\text{A}$ のときは、N-HPT のベースバイアス電流 $50 \mu\text{A}$ の電流利得 β より小さいが、L-HPT の受光感度 S は、ベースバイアス電流

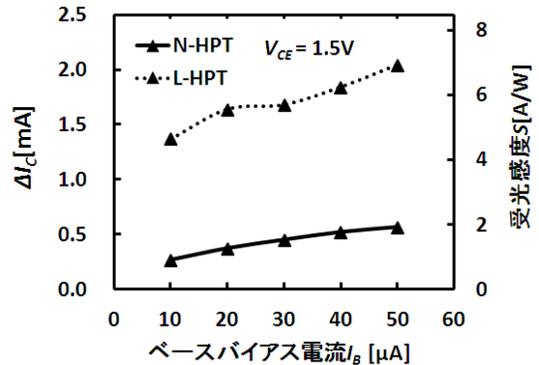


図 7 HPT の受光感度 S のベースバイアス電流 I_B 依存性
Fig. 7 ΔI_C and optical sensitivity S for various base bias currents of N-HPT and L-HPT.

$10 \mu\text{A}$ でも N-HPT のベースバイアス電流 $50 \mu\text{A}$ の受光感度より 2 倍以上になっている点である。すなわち、HBT 以上に、HPT では、エミッタレッジパッシベーションが大変有効である。

3.2 エミッタレッジパッシベーションの HPT 温度特性の影響

前節では、室温において L-HPT は N-HPT より受光感度が高いことが示された。次に、両 HPT の温度特性について解析する。まず、暗状態で 300 から 400 K の温度範囲で HPT の V_{CE} を 1.5 V に固定し、ベースバイアス電流 I_B を 10, 20, 30, 40, $50 \mu\text{A}$ と変化させ、各温度でのコレクタ電流 I_C を測定した。 V_{CE} が 1.5 V のときは、いずれの温度でも各ベースバイアス電流 I_B でコレクタ電流 I_C がコレクタ・エミッタ間の電圧 V_{CE} に依存せず、飽和する領域である。また、いずれの温度でも電流利得 β はベースバイアス電流 I_B が増加するとともに増加したので、温度変化については、最小と最大のベースバイアス電流 I_B 、すなわち 10 と $50 \mu\text{A}$ の場合の結果のみを図 8 に示す。

L-HPT, N-HPT ともに温度の上昇とともに電流利得 β は減少するが、380 K 以上では両 HPT の電流利得 β は温度にあまり依存しない。ベースバイアス電流 I_B が大きいほど温度の上昇に対する減少は大きく、N-HPT のベースバイアス電流 I_B $50 \mu\text{A}$ の電流利得 β は 300 K では、L-HPT のベースバイアス電流 $10 \mu\text{A}$ の電流利得 β より大きい、380 K では、L-HPT のベースバイアス電流 $10 \mu\text{A}$ の電流利得 β と同じになってしまう。InGaP/GaAs HBT の電流利得 β の温度上昇に対する減少は、これまでも報告

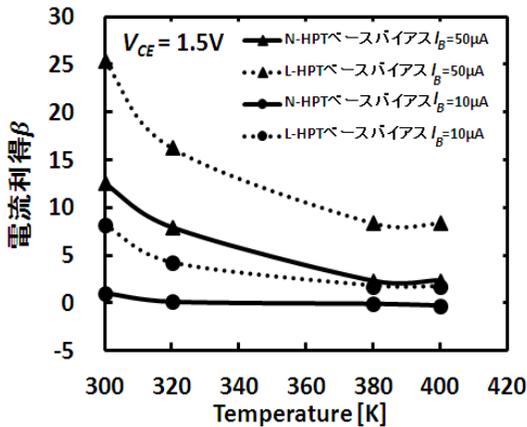


図 8 暗状態で HPT での電流利得の温度特性

Fig. 8 Temperature characteristics of the current gains of N-HPT and L-HPT in the dark for $I_B = 10$ and $50 \mu A$.

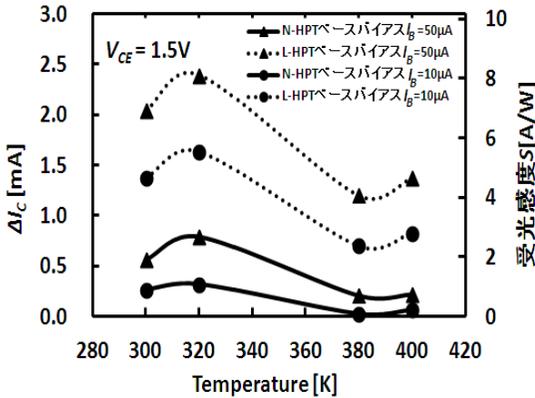


図 9 HPT での受光感度 S の温度特性

Fig. 9 Temperature characteristics of the optical sensitivity of N-HPT and L-HPT for $I_B = 10$ and $50 \mu A$.

されており [7], [8], 高温になるとエミッタ・ベース接合での価電子帯オフセットを超えてエミッタに注入される正孔が増え, エミッタ注入効率が低くなるからである [5]. しかし, 同じベースバイアス電流では, 全ての温度で, L-HPT の電流利得 β は N-HPT の電流利得 β より高くなっており, エミッタレッジパッシベーションは高温での HPT の動作においても電流-電圧特性を改善するのにも有効であることが分かった.

ベースバイアス電流 10 と 50 μA の両 HPT の ΔI_C 及び受光感度 S の温度依存性を図 9 に示す.

図の全ての曲線において ΔI_C は 320 K まで増加し, その後減少し, また 380 K になると再び増加する傾

向がある. 温度が上昇すると, 少数キャリアの寿命が長くなるのでコレクタ空乏領域外で生成されたキャリアも光電流となる. したがって, 式 (3) の I_{ph} が増加する. しかし, 温度の上昇とともに暗状態での電流利得 β が減少するが, I_{ph} の増加は ΔI_C を増加させる. 320 K までは, I_{ph} の増加が, 電流利得 β の減少を上回り, ΔI_C が増加するが, それ以上の温度では, I_{ph} の増加が少なく電流利得 β による減少が I_{ph} の増加を上回ると考えられる. また, 380 K では, 図 8 に見られるように電流利得 β はあまり変化しないため, I_{ph} の増加が ΔI_C を若干増加させる.

しかしながら, 温度上昇により受光感度が減少しても全ての温度でエミッタレッジパッシベーションは高い受光感度を保つのに有効であることは, 図 9 から明らかである.

4. む す び

InGaP/GaAs HPT を作製し, その受光感度の温度特性を調べ, エミッタレッジパッシベーション効果を検証した. 暗状態時, L-HPT は全てのベースバイアス電流で N-HPT よりも電流利得 β が高く, N-HPT に比べると L-HPT では, ベースバイアス電流 I_B が増加するにつれ暗状態での電流利得 β 及び受光感度はより大きく増加した. L-HPT の受光感度は, ベースバイアス電流 I_B 50 μA で N-HPT の 4 倍であった. これより, HBT 以上に, HPT では, エミッタレッジパッシベーションが大変有効であることが分かった.

また, L-HPT, N-HPT 共に温度が上昇するにつれ電流利得 β は減少したが, 380 K 以上では両 HPT の電流利得 β は温度にあまり依存しなかった. 同じベースバイアス電流では, 全ての温度で, L-HPT の電流利得 β は N-HPT の電流利得 β より高くなっており, エミッタレッジパッシベーションは高温での HPT の動作においても有効であった. また, L-HPT は全ての温度で N-HPT より高い受光感度を示し, エミッタレッジパッシベーションは, HBT 以上に HPT では有効であることが示された.

文 献

- [1] R. Sridhara, S.M. Frimel, K.P. Roenker, N. Pan, and J. Elliott, "Performance enhancement of GaInP/GaAs heterojunction phototransistors using DC base bias," J. Lightwave Technol., vol.16, no.6, pp.1101-1106, June 1998.
- [2] H. Kamitsuna, "Ultra-wideband monolithic photoreceivers using HBT-compatible HPT's with novel base

circuits, and simultaneously integrated with an HBT amplifier,” J. Lightwave Technol., vol.13, no.12, pp.2301–2307, Dec. 1995.

- [3] C.-K. Song, S.-H. Lee, K.-D. King, J.-H. Park, B.-W. Koo, D.-H. Kim, C.-H. Hong, Y.-K. Kim, and S.-B. Hwang, “Optical characteristics of InGaP/GaAs HPTs,” IEEE Electron Device Lett., vol.22, no.7, pp.315–317, July 2001.
- [4] S.-W. Tan, H.-R. Chen, W.-T. Chen, M.-K. Hsu, A.-H. Lin, and W.-S. Lour, “Characterization and modeling of three-terminal heterojunction phototransistors using an InGaP layer for passivation,” IEEE Trans. Electron Device, vol.52, no.2, pp.204–210, Feb. 2005.
- [5] Y.-S. Lin and J.-J. Jiang, “Temperature dependence of current gain, ideality factor and offset voltage of AlGaAs/GaAs and InGaP/GaAs HBTs,” IEEE Trans. Electron Device, vol.56, no.12, pp.2945–2951, Dec. 2009.
- [6] S.-Y. Cheng, S.-I. Fu, P.-H. Lai, R.-C. Liu, K.-Y. Chu, L.-Y. Chen, and W.-C. Liu, “The effect of sulfur treatment on the temperature-dependent performance of InGaP/GaAs HBTs,” IEE Trans. Device and Materials Reliability, vol.6, no.4, pp.500–508, Dec. 2006.
- [7] 楊 富穎, 野崎眞次, 内田和男, 小泉 淳, “Ledge パッシベーションによる InGaP/GaAs HBT の信頼性の向上,” 信学技報, ED2007-217, MW2007-148, Jan. 2008.
- [8] 黒川愛里, 金 智, 小野 洋, 内田和男, 野崎眞次, 森崎弘, “InGaP/GaAs ヘテロ接合バイポーラトランジスタ特性への表面再結合の影響,” 信学技報, ED2005-198, MW2005-152, Jan. 2006.

(平成 24 年 12 月 6 日受付, 25 年 2 月 22 日再受付,
8 月 9 日公開)



内田 和男

1985 早稲田大学大学院修士課程了。1994 米国カリフォルニア大学バークレー校 (UC Berkeley) 材料科学科博士課程了。現在、電気通信大学准教授。APS, JSAP 等各会員。有機金属気相成長 (MOCVD) 法による III-V 族及び酸化物半導体材料結晶成長、白色 LED の研究に従事。



野崎 眞次

1980 米国カンサス州ウィチタ州立大学大学院修士課程了, 1984 米国カーネギーメロン大学 (CMU) 博士課程了。現在、電気通信大学教授。APS, MRS, ECS 等各会員。主として半導体ナノ構造, 化合物半導体デバイス, 酸化物半導体の研究に従事。



タン ホング フック (学生員)

2011 電気通信大・電気通信・電子卒。同年同大学院博士前期課程進学, 現在に至る。化合物半導体デバイスの研究に従事。



高木 保志

2012 電気通信大学大学院博士前期課程情報理工学研究科先進工学専攻了。現在、三菱電機 (株) に勤務。

Effects of Electrical Stress and High-Energy Electron Irradiation on the InGaP/GaAs Heterojunction Phototransistor

Phuc Hong Than¹, Kazuo Uchida¹, Takahiro Makino², Takeshi Ohshima² and Shinji Nozaki^{1,*}

¹Graduate School of Informatics and Engineering, The University of Electro-Communications, Chofu-shi, Tokyo 182-8585, Japan

²Japan Atomic Energy Agency, 1233 Watanuki, Takasaki, Gunma 370-1292, Japan

*Phone/Fax: +81-42-489-4486, Email: nozaki@ee.uec.ac.jp

ABSTRACT

In this paper, we discuss the characteristics of the InGaP/GaAs heterojunction phototransistors (HPTs) before and after the electrical stress at room temperature and assess the effectiveness of the emitter-ledge passivation. Although an electrical stress given to the phototransistors by keeping a collector current density of 37 A/cm^2 for 1 hour at room temperature was too small to affect the room-temperature common-emitter current gain and photocurrent of both HPTs with and without the emitter-ledge passivation, they showed a significant decrease at 420 K due to the room-temperature electrical stress. Nevertheless, the room-temperature common-emitter current gain and photocurrent of the HPT with the emitter-ledge passivation were still higher than those of the HPT without the emitter-ledge passivation. The effectiveness of the emitter-ledge passivation against the electrical stress was more significant than that on the current gain in the dark. In addition to the electrical stress experiment, for a potential application of the InGaP/GaAs HPTs in space, we will irradiate the HPTs with 1-MeV electrons at the Japan Atomic Energy Agency. Both current gain and photocurrent decreased significantly after the electron irradiation. In contrast to the electrical stress, the damage due to the high-energy electron irradiation is a bulk-related phenomenon, and the emitter-ledge passivation does not seem to suppress the degradation.

INTRODUCTION

A heterojunction phototransistor (HPT) is very attractive compared with photodiodes because of its good compatibility with a heterojunction bipolar transistor (HBT), high photoresponse even at low bias voltage and immunity from avalanche noise [1] - [3]. Since InGaP has an advantage over AlGaAs in the material properties and fabrication process, the InGaP emitter has been actively employed to replace the AlGaAs in the AlGaAs/GaAs HPT [4]. The emitter-ledge passivation of the external base surface has found to increase the current gain of the GaAs-based HBT and suppress the electrical stress-caused degradation [5] - [13]. However, there is little or no study on the electrically-stressed InGaP/GaAs HPTs. In this paper, we compare the performances of the InGaP/GaAs HPTs with and without the emitter-ledge passivation and assess the effect of the emitter-ledge passivation on the stressed HPTs. Furthermore, InGaP/GaAs HPTs are expected to be potential applications in the space-based communication systems. Therefore, reliability of HPTs when exposed to high-energy radiation is of major concern. Although the radiation effects on HBTs have been studied extensively [14], [15], to our knowledge there is no study on HPTs exposed to high-energy radiation. In this paper, we also report the effects of high-energy electron irradiation on the characteristics of InGaP/GaAs HPTs.

EXPERIMENT

The HPT epilayers were grown on S.I. GaAs (100) substrate using metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD). The HPT epitaxial layer structure consisted of the following layers: an n-GaAs : Si (400 nm, $3.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) subcollector, an n-InGaP : Si (10 nm, $3.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) etch stop, an n-GaAs : Si (20 nm, $3.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) subcollector, an n-GaAs : Si (600 nm, $1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) collector, a p⁺-GaAs : C (90 nm, $3.6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) base, an n-InGaP : Si (30 nm, $3.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) emitter, an n-GaAs : Si (5 nm, $3.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) emitter, an n-GaAs : Si (100 nm, $3.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) emitter, an n-GaAs : Si (100 nm, $3.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) emitter contact, an n-InGaAs : Si (50 nm, $2.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) emitter contact and finally an n⁺-InGaAs : Si (50 nm, $2.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) emitter cap layers.

Although the structure and design were similar to the HBTs, the emitter area was $160,800 \mu\text{m}^2$, which was larger by more than four orders than those of typical HBTs [11], [12] in order to increase the collector photocurrent. The emitter and base structures consisted of 10 and 11 finger-shaped electrodes, respectively, each with a size of $4\mu\text{m} \times 2100\mu\text{m}$ so that the effective emitter and base area exposed to light could be large without causing emitter crowding.

The fabrication process of the InGaP/GaAs HPT was the same as that of the InGaP/GaAs HBT, and included photolithography, vacuum evaporation, and wet chemical etching. First, the patterned emitter electrode was formed by liftoff of the deposited Ti/Au layers without sintering. Using the emitter electrode, the base surface was exposed by mesa etching of the emitter contact and emitter layers. The solutions of $\text{H}_3\text{PO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ and $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ were used to etch the InGaAs and GaAs layers, respectively. Undiluted HCl was used to etch the InGaP layer until the base layer was exposed. Due to the high selectivity of HCl for InGaP etching, the base surface was easily exposed without over etching the GaAs base. The base electrode was then made by liftoff of the deposited Ti/Pt/Au layers without sintering. The mesa etching of the GaAs base and collector layers was carried out to expose the subcollector surface. Following the base-contact formation, a multilayer of Ni/AuGe/Ni/Au was deposited on the patterned resist on the subcollector surface to form an ohmic contact to the collector without sintering. Finally, the subcollector layer was etched down to the S.I. GaAs substrate for isolation. An emitter ledge was formed by leaving a portion of the InGaP emitter in etching of InGaP, as shown in Fig. 1. The emitter ledge covers the surface of the external base at the emitter edge and suppresses surface recombination near the emitter edge shown in red. Without the emitter-ledge passivation, the surface at the emitter edge is strained and subject to defect formation [5] – [13]. In this paper, the HPT with and without an emitter ledge are referred to as the L-HPT and N-HPT, respectively. The width and thickness of the InGaP emitter-ledge were $5 \mu\text{m}$ and 30 nm , respectively.

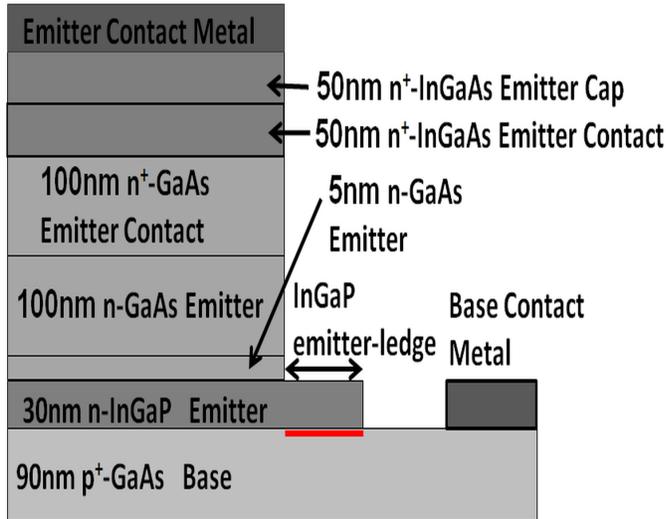


Fig. 1. Schematic cross section of the InGaP emitter-ledge passivation.

The common-emitter characteristics of the fabricated HPTs were measured in the dark and under illumination by an HP4155A semiconductor parameter analyzer. The photoresponse was characterized under illumination by measuring ΔI_C , which was the collector photocurrent resulting from illumination with a halogen lamp. The power density of the lamp was 35 mW/cm^2 . It should be noted that although the phototransistor is often characterized by the optical gain using monochromatic light, we are interested in comparison of the N-HPT and L-HPT, not in the optical gain value. In addition, we assumed that if ΔI_C was higher using a white light source, it should be higher for a monochromatic light with any wavelength.

In the electrical-stress experiment, the collector current was kept at 60 mA, corresponding to a current density of 37 A/cm^2 , for 1 hour at room temperature. In the high-electron irradiation experiment, which was carried out at the Japan Atomic Energy Agency in Takasaki, the electrons accelerated at 1 MeV were bombarded on the HPTs. The fluences were 1.0×10^{15} and $1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ by keeping current at 1 mA, corresponding to a rate of irradiation of $1.65 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, and adjusting the bombardment time. This irradiation rate is low enough not to increase the sample temperature during the electron irradiation. The DC characteristics of HPTs were measured in the dark and under illumination before and after the electrical stress and electron irradiation by an HP4155A semiconductor parameter analyzer.

DISCUSSION

Effects of the electrical stress

Figures 2 and 3 show the room-temperature common-emitter characteristics of the N-HPT and L-HPT, respectively, under illumination before and after the stress. The base current I_B was varied from 5 to 25 μA with 5 μA per step. The base current was low enough not to electrically stress the HPTs during the measurements. For each I_B , V_{CE} was increased from 0 to 1.5 V with a step of 0.1 V.

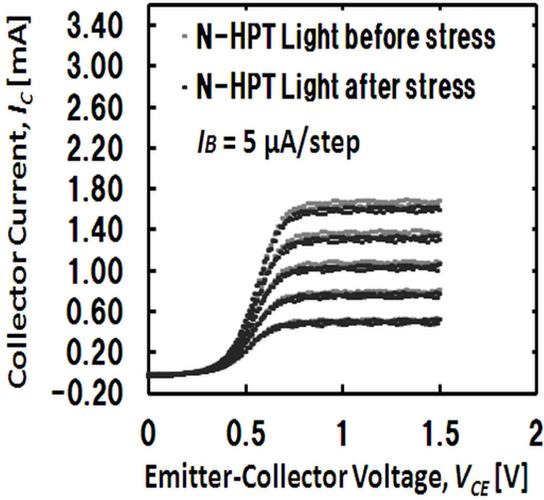


Fig. 2. Room-temperature common-emitter I-V characteristics of the N-HPT under illumination before and after the electrical stress.

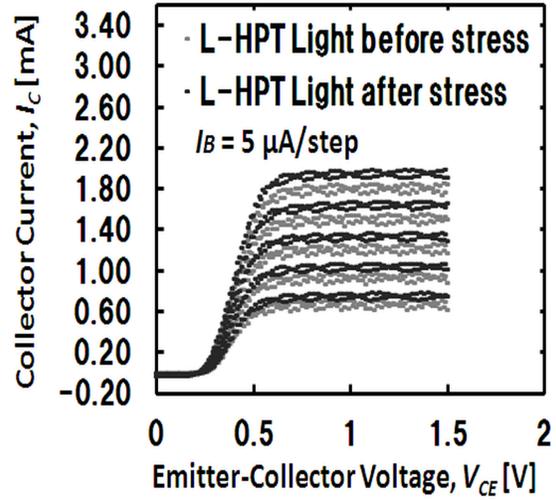


Fig. 3. Room-temperature common-emitter I-V characteristics of the L-HPT under illumination before and after the electrical stress.

There seems to be no significant effect of the electrical stress, as seen in Figs. 2 and 3. The electrical stress was found to be too small to affect the room-temperature photocurrent of both HPTs. However, the photocurrents of the L-HPT before and after the stress are higher than those of the N-HPT. Higher photocurrent of the L-HPT owes to the emitter-ledge passivation. Since the photocurrent generated in the base-collector junction increases the internal base current, the increased base current increases the current gain [5]. Therefore, the overall photocurrent in the collector is increased by the emitter-ledge passivation, which decreases the surface defect density and suppresses defect formation at the emitter perimeter by the current stress.

Figure 4 and 5 are the collector photocurrents of the N-HPT and L-HPT, respectively, before and after the room-temperature stress measured at room temperature and measured at 420 K. At an elevated temperature, the photocurrents of both HPTs decrease even without the electrical stress, and no significant difference is observed in the photocurrents of the N-HPT and L-HPT at 420 K. The effect of elevated temperature seems to override suppression of the surface recombination at the emitter perimeter by the emitter-ledge passivation. The room-temperature stress was too low to affect the room-temperature characteristics of the L-HPT and N-HPT, but it decreased the collector photocurrent of both HPTs at 420 K, as seen in Figs. 4 and 5. The effect of the electrical stress is enhanced at elevated temperature.

The degradation of the HPTs' performance at high temperature due to electrical stress is thought to be associated with defect formation. There may be two types of defect formations; one is defect formation at the InGaP/GaAs heterointerface, and the other is defect formation at the emitter perimeter [9], [10]. The emitter-ledge passivation is effective in suppressing the defect formation at the emitter perimeter, but not at the InGaP/GaAs heterointerface. As the substrate temperature increases, the injection of holes from the base to the emitter increases, resulting in the increased space-charge recombination via defects at the InGaP/GaAs heterointerface. Hence, the performances of both HPTs before and after stress degraded more at 420 K. Although both the N-HPT and L-HPT degrade after the prolonged room-temperature stress, the photocurrent of the L-HPT is still higher than that of the N-HPT.

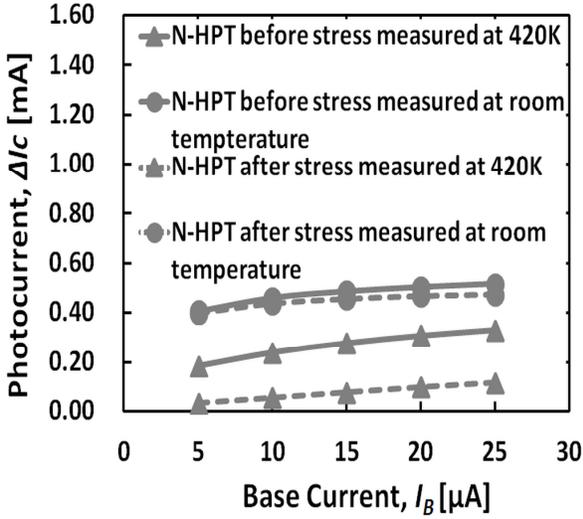


Fig. 4. Collector photocurrents of the N-HPT for various base currents before and after the room-temperature stress measured at room temperature and at 420 K.

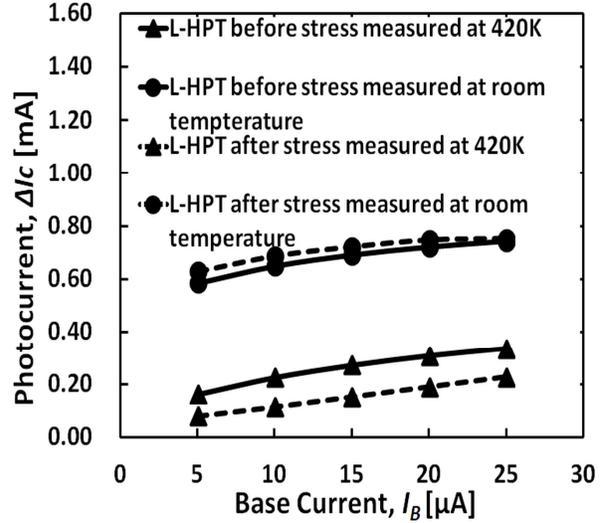


Fig. 5. Collector photocurrents of the L-HPT for various base currents before and after the room-temperature stress measured at room temperature and at 420 K.

Effects of the high-energy electron irradiation

1-MeV electrons with fluences of 1.0×10^{15} and $1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ were irradiated on both the N-HPT and L-HPT. The base current I_B was set smaller than that used in the electrical stress experiment to avoid unintentional electrical stress on the electron-irradiated HPTs. The DC current gain β_s of the N-HPT and L-HPT measured at room temperature were plotted as a function of I_B in Figs. 6 and 7, respectively. The collector photocurrents of the N-HPT and L-HPT are shown in Figs. 8 and 9, respectively. In the electron irradiation with a fluence of $1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$, the β_s of the N-HPT and L-HPT are almost 0, but the photocurrent is barely observed in both N-HPT and L-HPT. The irradiation with a fluence of $1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ causes fatal damage in the HPTs, and the effectiveness of the emitter-ledge passivation cannot be discussed further. In contrast to the irradiation with a fluence of $1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$, the photocurrent of the L-HPT is still higher than that of the N-HPT after the irradiation with a fluence of $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$. Unlike the photocurrent, the β_s of the N-HPT and L-HPT, which assess the transistor performance in the dark, are almost identical after the irradiation. The high-energy electron irradiation forms a great number of recombination centers not only at the emitter perimeter but also in the area of the HPTs and increases the base current. In the case of AlGaAs/GaAs HBTs and InGaP/GaAs HBTs, recombination centers are formed in the area by the irradiation than at the perimeter [14], [15]. A slightly higher photocurrent of the L-HPT after the irradiation may be still attributed to the emitter-ledge passivation's effectiveness. In contrast to the electrical stress experiment, there seems to be no significant effect of the emitter-ledge passivation. However, a systematic study with various perimeter-area ratios is needed for detailed analysis.

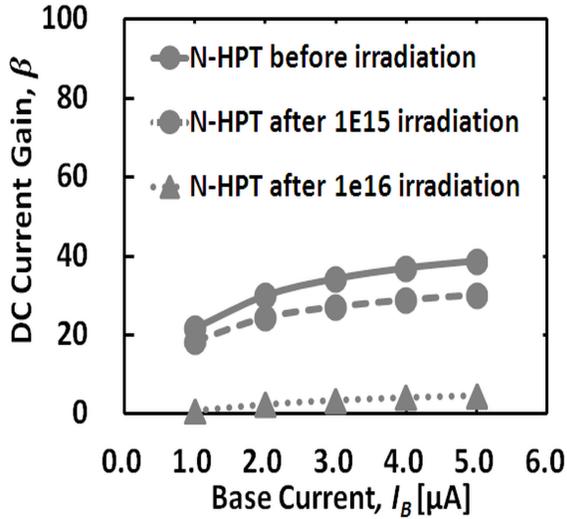


Fig. 6. DC current gains of the N-HPT for various base currents before and after the high-energy-electron irradiation.

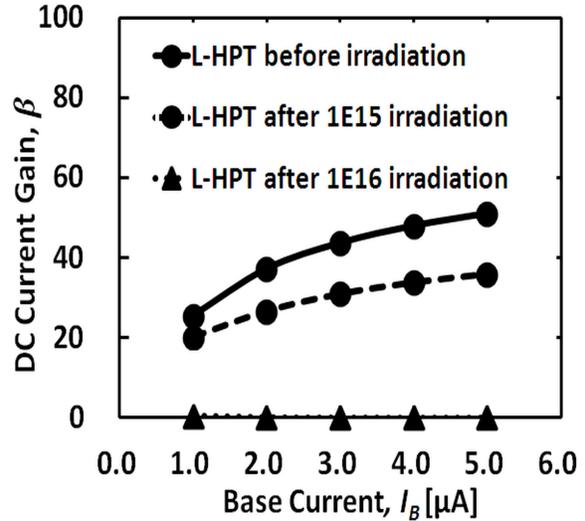


Fig. 7. DC current gains of the L-HPT for various base currents before and after the high-energy electron irradiation.

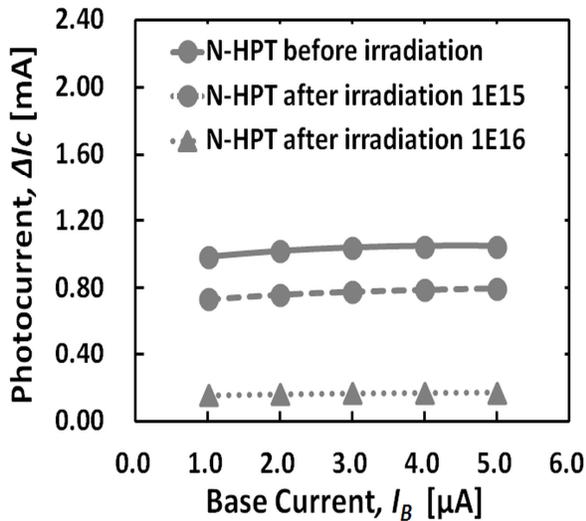


Fig. 8. Collector photocurrent of the N-HPT for various base currents before and after the high-energy electron irradiation.

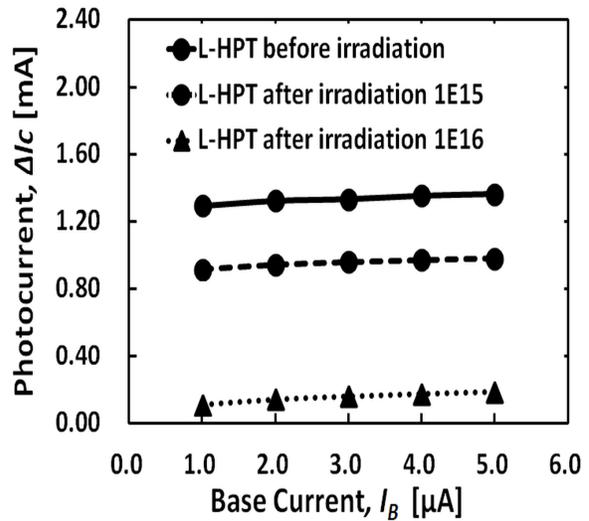


Fig. 9. Collector photocurrent of the L-HPT for various base currents before and after the high-energy electron irradiation.

CONCLUSIONS

The effects of electrical stress and high-energy electron irradiation on the performance of the InGaP/GaAs HPTs were studied. The room-temperature electrical stress was too small to affect the room-temperature characteristics of the N-HPT and L-HPT, but both the current gain and collector photocurrent decreased significantly at 420 K. The effect of the electrical stress was enhanced at elevated temperature. Nevertheless, the degradation of the L-HPT due to the electrical stress was lower than that of the N-HPT. The emitter-ledge passivation suppresses the

formation of recombination centers and is found to be more effective than that reported for the HBTs. In contrast to the electrical stress, there seems to be no significant effect of the emitter-ledge passivation. The performances of both the N-HPT and L-HPT degraded significantly after the high-energy electron irradiation. The degradation seems to be a bulk-related phenomenon rather than the perimeter-related, and the latter applies to the degradation due to the electrical stress.

REFERENCES

1. S. Chandrasekhar, *IEEE Photon. Technol. Lett* 5, 1316–1318 (1993).
2. H. Kamitsuna, Y. Matsuoka, S. Yamahata, and N. Shigekawa, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 49, 1921–1925 (2001).
3. K. H. Ha, Y. H. Lee, J. I. Song, C. Caneau, C. Y. Park, and K. H. Park, *Electronics Letters* 31, 1386–1387 (1995).
4. C-K. Song, S-H. Lee, K-D. Kim, J-H. Park, B-W. Koo, D-H. Kim, C-H. Hong, Y-K. Kim, and S-B. Hwang, *IEEE Electron Device Lett.* 22, 315–317 (2001).
5. S-W. Tan, H-R. Chen, W-T. Chen, M-K. Hsu, A-H. Lin, and W-S. Lour, *IEEE Trans. Electron Device* 52, 204–210 (2005).
6. W. Liu, E. Beam, T. Henderson, and S-K. Fan, *IEEE Electron Device Lett.* 14, 301–303 (1993).
7. O. Ueda, A. Kawano, T. Takahashi, T. Tomioka, T. Fujii, and S. Sasa, *Solid-State Electronics* 41, 1605–1610 (1997).
8. A. A. Rezazadeh, S. A. Bashar, H. Sheng, F. A. Amin, L. Cattani, and J. J. Liou, in *Proc. IEEE 38th Annual International Reliability Physics Symposium*, 250–257 (2000).
9. M. G. Adlerstein, and J. M. Gering, *IEEE Trans. Electron Device* 47, 434–439 (2000).
10. N. Pan, J. Elliott, M. Knowles, D. P. Vu, K. Kishimoto, J. K. Twynam, H. Sato, M. T. Fresina, and G. E. Stillman, *IEEE Electron Device Lett.* 19, 115–117 (1998).
11. A. Kurokawa, Z. Jin, H. Ono, K. Uchida, S. Nozaki, and H. Morisaki, *IEICE Technical Report*, ED2005–198, MW 2005–152 (2006).
12. F-Y. Yang, S. Nozaki, K. Uchida, and A. Koizumi, *IEICE Technical Report*, ED2007–217, MW 2007–148 (2008).
13. C-K. Song, P-J. Choi, *Microelectronics Reliability* 39, 1817–1822 (1999).
14. A. Sarkar, S. Subramanian, and S. M. Goodnick, *IEEE Trans. Electron Device* 47, 2024–2030 (2000).
15. S. Vuppala, C. Li, P. Zwicknagl, and S. Subramanian, *IEEE Trans. Nuclear Science* 50, 1846–1851 (2003).

Effects of Electrical Stress on the InGaP/GaAs Heterojunction Phototransistor

Phuc Hong Than, Kazuo Uchida, and Shinji Nozaki, *Member, IEEE*

Abstract—Although the effects of electrical stress on the performance of InGaP/GaAs heterojunction bipolar transistors (HBTs) have been widely studied and reported, few or no reports on the InGaP/GaAs heterojunction phototransistors (HPTs) have been published. In this paper, we discuss the phototransistor characteristics before and after the electrical stress applied at room temperature and at high temperature, and assess the effectiveness of the emitter-ledge passivation, which was found to keep the InGaP/GaAs HBTs from degrading at higher temperature or due to electrical stress. A room-temperature electrical stress was applied to the HPTs by maintaining a current density of 37 A/cm^2 for 1 h at room temperature. The electrical stress was lower by two to three orders than the stress usually applied to the HBTs for the stress study and did not cause significant decreases in the room-temperature current gain and photoresponse, but it significantly degraded the characteristics of the InGaP/GaAs HPTs at 420 K. In order to accelerate the degradation, the high-temperature stress was applied to both HPTs with and without the emitter-ledge passivation at 420 K. Although the current density was the same and the stress time was reduced to 15 min, the high-temperature stress significantly decreased the current gain and collector photocurrent of the HPT without the emitter-ledge passivation over the entire measurement temperature range of 300–420 K. The emitter-ledge passivation suppresses the recombination via defects at the emitter perimeter and is found to be more effective than that in the HBTs.

Index Terms—Heterojunction phototransistor (HPT), InGaP/GaAs, emitter-ledge passivation, electrical stress, temperature dependence.

I. INTRODUCTION

HETEROJUNCTION phototransistors (HPTs) are more attractive than photodiodes since they can be easily integrated with heterojunction bipolar transistors (HBTs), provide a high photoresponse even at a low bias voltage and are immune from an avalanche noise [1]–[3]. In particular, the GaAs-based HBTs and HPTs with an AlGaAs emitter demonstrated a high performance. Recently, the InGaP emitter has replaced the AlGaAs emitter in AlGaAs/GaAs HBTs and HPTs due to its superior material properties [4].

The emitter-ledge passivation of the external base surface has found to increase the current gain of the GaAs-based HBT and suppress the electrical stress-caused degradation [5]–[13].

Manuscript received October 31, 2014; revised September 24, 2015; accepted October 6, 2015. Date of publication October 15, 2015; date of current version December 2, 2015.

The authors are with the Department of Engineering Science, Graduate School of Informatics and Engineering, The University of Electro-Communications, Tokyo 182-8585, Japan (e-mail: nozaki@ee.uec.ac.jp).

Digital Object Identifier 10.1109/TDMR.2015.2491338

TABLE I
EPITAXIAL STRUCTURE OF THE HPT

		Dopant		Doping level [cm^{-3}]	Thickness [Å]
Emitter Contact	n-InGaAs	Si	0.5	2.0×10^{19}	500
	n-InGaAs	Si	$0 \rightarrow 0.5$	2.0×10^{18}	500
	n-GaAs	Si		3.0×10^{18}	1000
	n-GaAs	Si		3.0×10^{17}	1000
	n-GaAs	Si		3.0×10^{18}	50
Emitter	n-InGaP	Si	0.48	3.0×10^{17}	300
Base	p-GaAs	C		3.6×10^{19}	900
Collector	n-GaAs	Si		1.0×10^{16}	6000
	n-GaAs	Si		3.0×10^{18}	200
Etch stop	n-InGaP	Si	0.48	3.0×10^{18}	100
Subcollector	n-GaAs	Si		3.0×10^{18}	4000
	i-GaAs			—	100
	i-AlGaAs		0.2	—	200
	i-AlGaAs		0.5	—	1000
	i-AlGaAs		0.2	—	300

However, there are few or no studies on the effects of the emitter-ledge passivation on the electrically-stressed HPT. In this paper, we compare the performances of the InGaP/GaAs HPTs with and without the emitter-ledge and assess the effect of the emitter-ledge passivation on the stressed HPTs.

II. HPT STRUCTURE AND EXPERIMENT

The HPT epilayers were grown on S.I. GaAs (100) substrates by metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD), as shown in Table I.

Although the structure and design are similar to the HBTs, the emitter and base structures are different and consist of 10 and 11 finger-shaped electrodes, respectively, each with a size of $4 \mu\text{m} \times 2100 \mu\text{m}$, as seen in Fig. 1 so that the effective emitter and base area exposed to light can be large without causing emitter crowding. All the fabricated HPTs have an emitter area of $160,800 \mu\text{m}^2$, which is larger by more than four orders than that of the HBTs [11], [12].

The fabrication process of the InGaP/GaAs HPT was the same as that of the InGaP/GaAs HBT. First, the patterned emitter electrode was formed by liftoff of the deposited Ti/Au layers without sintering. Using the emitter electrode, the base surface was exposed by mesa etching of the emitter contact and emitter layers with solutions of $\text{H}_3\text{PO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ and $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$, which were used to etch the InGaAs and GaAs layers, respectively. Undiluted HCl was used to etch the InGaP layer until the base layer was exposed. Due

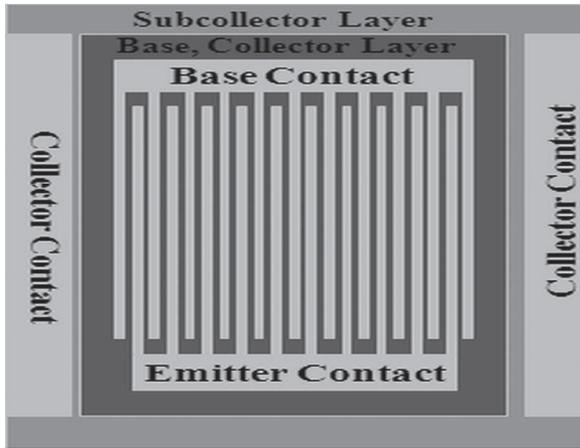


Fig. 1. Top view of the fabricated InGaP/GaAs HPT.

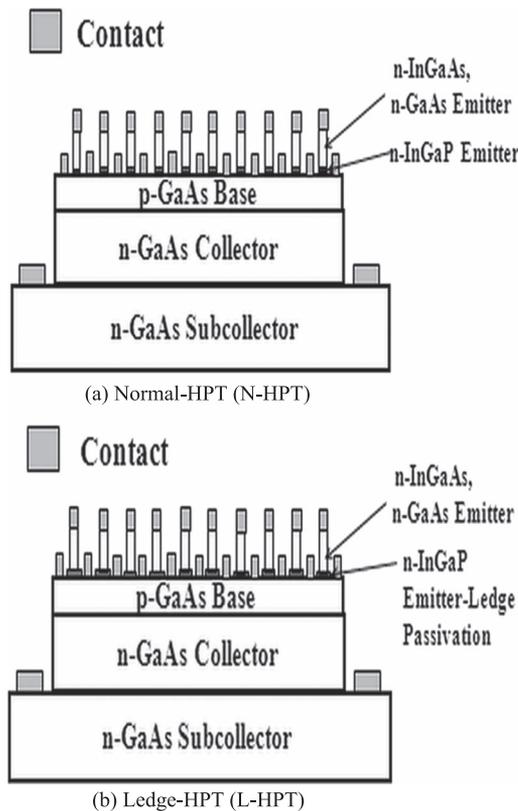


Fig. 2. Schematic cross sections of (a) N-HPT and (b) L-HPT.

to the high selectivity of HCl for InGaP etching, the base surface was easily exposed without over etching the GaAs base. The base electrode was then made by liftoff of the deposited Ti/Pt/Au layers without sintering. The mesa etching of the patterned GaAs was carried out to expose the subcollector surface. Following the base-contact formation, a multilayer of Ni/AuGe/Ni/Au was deposited on the patterned resist on the subcollector surface to form an ohmic contact to the collector without sintering. Finally, the subcollector layer was etched down to the S.I. GaAs substrate for isolation. An emitter ledge was formed by leaving a portion of the InGaP emitter, as seen in Fig. 2(b). In this report, the HPT with and without an emitter

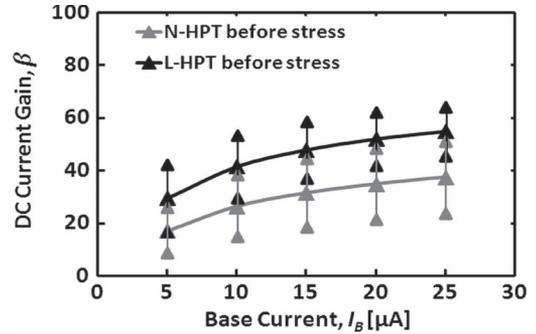


Fig. 3. The average of the DC current gain and standard deviation of seven N-HPTs and seven L-HPTs for various base currents at room temperature.

ledge are referred to as the L-HPT and N-HPT, respectively. The width and thickness of the InGaP emitter-ledge are $5 \mu\text{m}$ and 30 nm , respectively.

The common-emitter characteristics of the fabricated HPTs were measured in the dark and under illumination by an HP4155A semiconductor parameter analyzer. The photoreponse was characterized under illumination by measuring ΔI_C , which is the collector photocurrent resulting from illumination with a halogen lamp. The incident power of light received by the area of the base-collector junction was 0.295 mW . It should be noted that although the phototransistor is often characterized by the optical gain using monochromatic light, we are not interested in the optical gain value but in the responsivity S in A/W , which is the collector photocurrent ΔI_C divided by the incident light power, for comparison of the N-HPT and L-HPT. The responsivity is also shown in all of the graphs showing ΔI_C to compare the characteristics of the N-HPT and L-HPT as a photosensor.

The electrical stress was given to the phototransistors by keeping a collector current at 60 mA , corresponding to a current density of 37 A/cm^2 , for 1 hour at room temperature and 15 minutes at 420 K . We fabricated and characterized a total of 7 N-HPTs and 7 L-HPTs. A phototransistor with an average current gain in the dark was then selected for measurements of the collector photocurrent and characterization of the stressed phototransistors.

III. RESULTS AND DISCUSSION

A. Effects of the Electrical Stress at Room Temperature

Fig. 3 shows the DC current gain β in the dark. The average and error bars are indicated for each base current in the figure. The error bars show the average $\pm\sigma$, where σ is the standard deviation. One sample each was selected for the N-HPT and L-HPT to apply an electrical stress at room temperature. Figs. 4 and 5 show the room-temperature common-emitter characteristics of the selected N-HPT and L-HPT, respectively, in the dark before and after the stress. The input base current I_B was varied from 5 to $25 \mu\text{A}$ with a step of $5 \mu\text{A}$. For each I_B , V_{CE} increased from 0 to 3.5 V , but the result only for the bias of 0 – 1.5 V is shown, because the collector current does not significantly change by further increasing V_{CE} . The DC current gain β , which is defined as I_C/I_B , was calculated for each I_B from Figs. 4 and 5 and plotted as a function of I_B in Fig. 6.

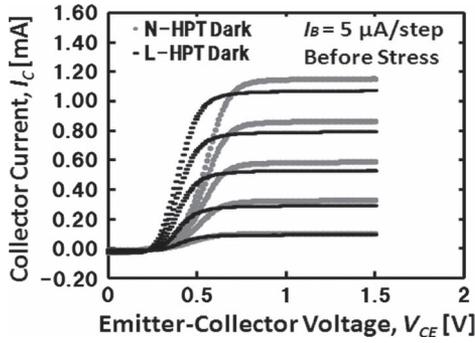


Fig. 4. Room-temperature common-emitter I-V characteristics in the dark before the electrical stress.

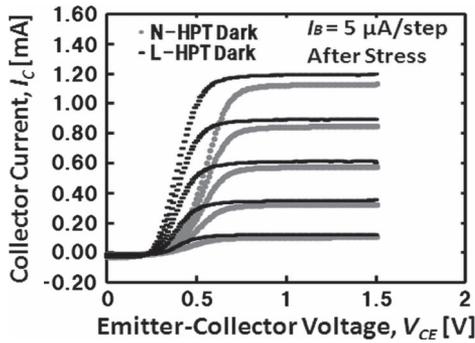


Fig. 5. Room-temperature common-emitter I-V characteristics in the dark after the electrical stress.

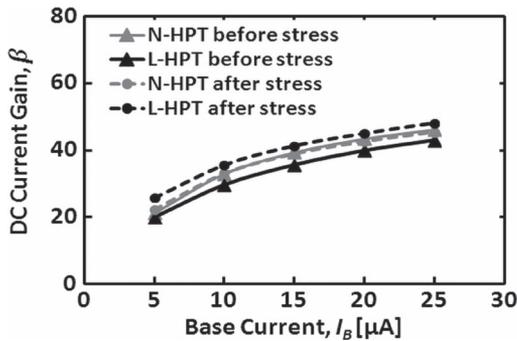


Fig. 6. Room-temperature DC current gains of the N-HPT and L-HPT for various base currents before and after the electrical stress.

There seems to be no significant effect of the emitter-ledge passivation or stress, and the current gain increases with the increased base current. The stress current density employed for our measurement is lower by two to three orders than the stress used in the characterization of the stressed HBTs [13]. As seen in Figs. 4 and 5, the offset voltage of V_{CE} in the L-HPT is lower than that in the N-HPT. Note that the emitter-ledge increases the emitter area A_E of the L-HPT, as seen in Fig. 2. McAlister *et al.* [14] and Lee *et al.* [15] reported that the offset voltage of V_{CE} was proportional to $\ln(A_C/A_E)$, where A_C was the collector area. Since the emitter ledge increases only A_E , the decreased A_C/A_E decreases the offset voltage.

In contrast to the current gain, the collector photocurrent of the L-HPT is higher than that of N-HPT. The effect of the emitter-ledge passivation seems enhanced in the photoresponse, as shown in Fig. 7. This can be explained using the analy-

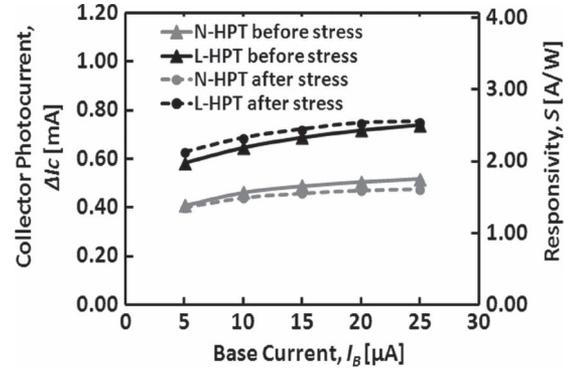


Fig. 7. Room-temperature collector photocurrent and responsivity of the N-HPT and L-HPT for various base currents before and after the electrical stress.

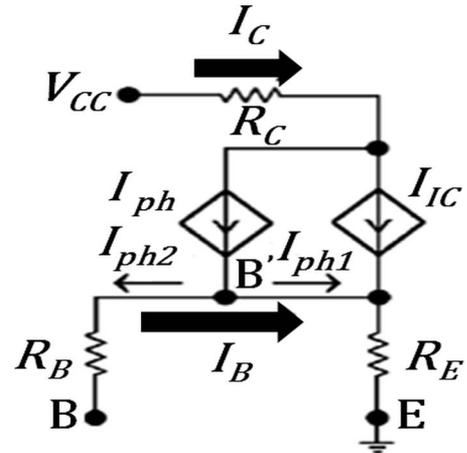


Fig. 8. Equivalent-circuit diagram representing a base-driven HPT with a current source.

sis of the collector photocurrent by Tan *et al.* [5]. Fig. 8 shows the equivalent-circuit diagram of the base current-driven phototransistor.

Since the photocurrent generated in the base-collector junction increases the internal base current, the increased base current increases the current gain. As discussed later, the emitter ledge passivates the surface defects near the emitter perimeter and reduces recombination in the emitter-base junction. As a result, the current gain increases. In the figure, R_E is the emitter resistance, R_B is the base resistance, I_C is the internal collector current, and I_{ph} is the photocurrent generated within the base-collector (B-C) depletion region and near the depletion edge. I_B will flow through R_E in the phototransistor operated in the dark and under illumination. The I_{ph} generated within the B-C region in the phototransistor will flow into node B and then be shared by R_E and R_B . In the case of the phototransistor with a constant base current, I_{ph2} is zero, and both I_B and I_{ph} flow through the base-emitter (B-E) junction. Thus, the collector current I_C and collector photocurrent ΔI_C are given by the following equations:

$$I_C = I_{IC} + I_{ph} = \beta(I_B + I_{ph}) \times [I_B + I_{ph}] + I_{ph} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Delta I_C &= \beta(I_B + I_{ph}) \times [I_B + I_{ph}] - \beta(I_B) \times I_B + I_{ph} \\ &= [\beta(I_B + I_{ph}) - \beta(I_B)] \times I_B + \beta(I_B + I_{ph}) \times I_{ph} + I_{ph} \end{aligned} \quad (2)$$

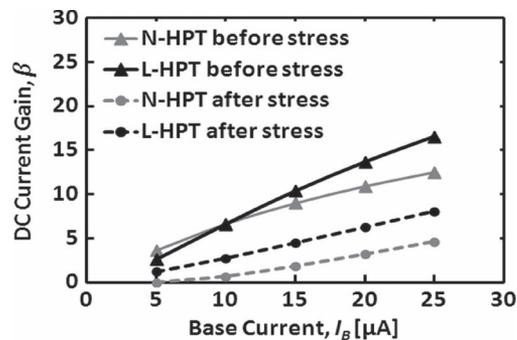


Fig. 9. DC current gains of the N-HPT and L-HPT for various base currents before and after the room-temperature stress measured at 420 K.

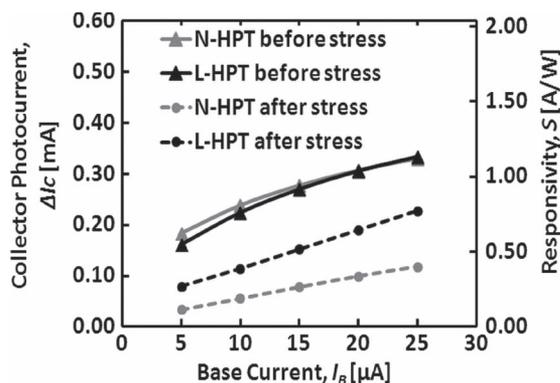


Fig. 10. Collector photocurrent and responsivity of the N-HPT and L-HPT for various base currents before and after the room-temperature stress measured at 420 K.

where $\beta(I_B + I_{ph})$ and $\beta(I_B)$ are β s for base current of $I_B + I_{ph}$ and I_B , respectively. As seen in Fig. 6, since the current gain increases with the increased base current, the first term in eq. (2) is positive. Although I_B is provided by the external base current source and the same even under illumination, contribution of the first term to the collector photocurrent is as significant as the second term. This makes the photoresponse of a three-terminal operation higher than that of the base-floating operation in a phototransistor [5]. Because of the enhanced performance of the base-current driven phototransistor, a small difference in the dark is enhanced under illumination, as seen in Figs. 6 and 7.

Figs. 9 and 10 are the current gain and collector photocurrent measured at 420 K, respectively, as a function of the base current.

At an elevated temperature, the current gain and collector photocurrent decrease even without the electrical stress. Unlike the photocurrent at room temperature, there is not much difference between the collector photocurrents of the N-HPT and L-HPT at 420 K. The effect of elevated temperature seems to override suppression of the surface recombination at the emitter perimeter by the emitter-ledge passivation. Although the electrical stress is too low to affect the room-temperature characteristics of both the N-HPT and L-HPT, as seen in Figs. 6 and 7, the degradation due to the electrical stress becomes more significant at 420 K, as seen in Figs. 9 and 10. The degradation of the HPTs' performance at high temperature

due to electrical stress is thought to be associated with defect formation. There may be two types of defect formations; one is defect formation at the InGaP/GaAs heterointerface in general, and the other is defect formation at the emitter perimeter [9], [10]. The former is a slow process, and is mainly caused by the prolonged stress like a 1 hour long stress. The latter is caused by the severe stress even if the stress time is short. In our earlier study on the degradation of the InGaP/GaAs HBTs [11], [12], defects were generated at the perimeter of the emitter, where there is a strain caused by the lattice mismatch between InGaP and heavily carbon-doped GaAs. In the L-HPT, the perimeter of the InGaP emitter extends by the ledge width, which is $5 \mu\text{m}$, and the defects generated at the perimeter are no longer located within the laterally extended depletion region. The recombination in the depletion region of the emitter-base junction causes the decreased current gain and photoresponse. Moreover, the performances of both the N-HPT and L-HPT before and after the stress degraded more at elevated temperature. As the substrate temperature increased, the injection of holes from the base to the emitter increased, resulting in the increased space-charge recombination [16]–[18]. The defect formation at the emitter perimeter can be suppressed by the emitter-ledge passivation, but not at the InGaP/GaAs heterointerface. Although the degradation of both the N-HPT and L-HPT becomes more significant at 420 K after the prolonged room-temperature stress, the current gain and collector photocurrent of the L-HPT are still higher than those of the N-HPT, and the emitter-ledge passivation becomes more effective in the HPT performance than in the HBT performance, because a difference in the photocurrent I_{ph} generated within the B-C region is enhanced in the collector photocurrent, as seen in eq. (2).

B. Effects of the Electrical Stress at 420 K

As already mentioned, since the collector current density used as an electrical stress is 37 A/cm^2 and much lower than the stress usually applied to smaller HBTs as a stress test, the decreases in the current gain and collector photocurrent were not observed when stressed at room temperature. The electrical stress with the same collector current density was applied to the HPTs at 420 K to accelerate the degradation. The electrical stress time was reduced to 15 min to avoid any serious damage to the HPTs. An unstressed sample was each selected for the N-HPT and L-HPT in this study.

Figs. 11 and 12 show the current gain and collector photocurrent at room temperature of the N-HPT and L-HPT before and after the stress and should be compared to Figs. 6 and 7, respectively, for the electrical stress applied at room temperature. The difference in the effects is quite evident. The electrical stress applied at 420 K significantly degrades the characteristics of the N-HPT, but not those of the L-HPT. The stress time may typically be too short for the defect formation at the InGaP/GaAs heterointerface. The emitter-ledge passivation is effective in suppressing the degradation when a severe electrical stress is applied for a short time.

The current gain and collector photocurrent of the stressed HPTs were measured in the elevated temperature range of 300–420 K. These results are shown in Figs. 13 and 14.

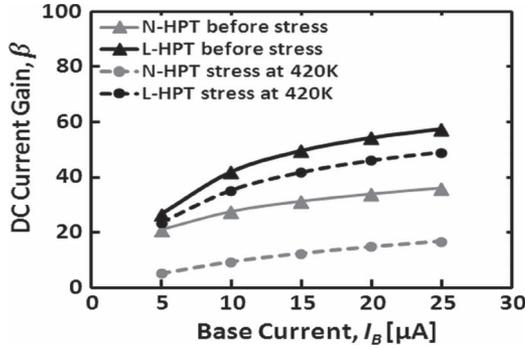


Fig. 11. Room-temperature DC current gains of the N-HPT and L-HPT for various base currents before and after the high-temperature stress. The stress was applied at 420 K.

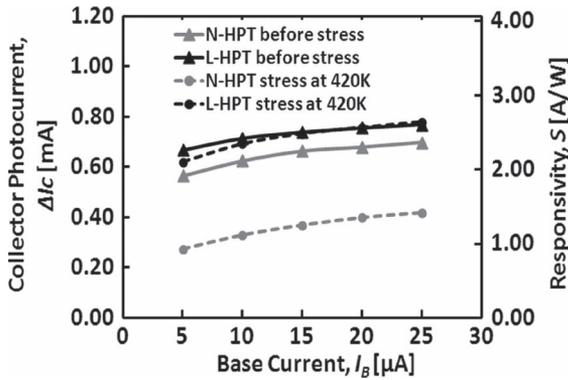


Fig. 12. Room-temperature collector photocurrent and responsivity of the N-HPT and L-HPT for various base currents before and after the high-temperature stress. The stress was applied at 420 K.

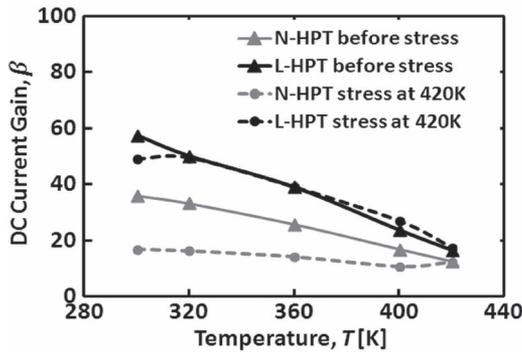


Fig. 13. Temperature-dependent DC current gains of the N-HPT and L-HPT before and after the high-temperature stress ($I_B = 25 \mu\text{A}$). The stress was applied at 420 K.

There is no significant degradation due to the high-temperature stress in the high-temperature characteristics of the L-HPT. For the N-HPT, the degradation due to the increased temperature is overridden by that due to the electrical stress, as seen in the lower-temperature dependent current gain and collector photocurrent. By comparison of the characteristics of the L-HPT and N-HPT, it is clear that the stressed L-HPT has a current gain and collector photocurrent higher than the stressed N-HPT over the entire temperature range, and a difference is more enhanced in the collector photocurrent, as discussed earlier.

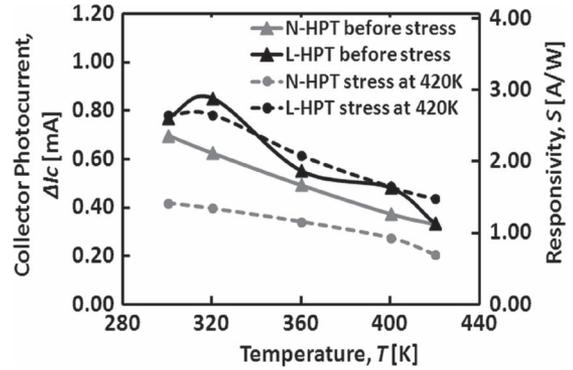


Fig. 14. Temperature-dependent collector photocurrent and responsivity of the N-HPT and L-HPT before and after the high-temperature stress ($I_B = 25 \mu\text{A}$). The stress was applied at 420 K.

IV. CONCLUSION

The effects of electrical stress on the InGaP/GaAs HPTs were studied in detail. An electrical stress was applied to the L-HPT and N-HPT by maintaining a collector current density of 60 mA for 1 hour at room temperature and for 15 minutes at 420 K. The room-temperature stress was too low to affect the room-temperature characteristics of the L-HPT and N-HPT, but it decreased the current gain and collector photocurrent of both HPTs at 420 K. The effect of the electrical stress was enhanced at elevated temperature. Nevertheless, the degradation due to the electrical stress was lower in the L-HPT. In contrast to the room-temperature stress, the high-temperature stress seemed to be more severe even if the stress-current density was the same. The room-temperature characteristics of the N-HPT were significantly decreased by the high temperature stress, while the L-HPT was less sensitive even to the severe high-temperature stress. The current gain and photoresponse of the L-HPT are not affected by the high-temperature stress in the entire temperature range of 300–420 K. In contrast to the L-HPT, the current gain and photoresponse of the high-temperature stressed N-HPT become less temperature dependent. The effects of the higher temperature were overridden by those of the severe electrical stress. Based on the study of the stressed HPTs, it is concluded that the emitter-ledge passivation is more effective in suppressing the degradation due to the electrical stress in the HPTs than that in the HBTs.

REFERENCES

- [1] S. Chandrasekhar, "High-speed monolithic p—i—n/HBT and HPT/HBT photoreceivers implemented with simple phototransistor structure," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 5, no. 11, pp. 1316–1318, Nov. 1993.
- [2] H. Kamitsuna, Y. Matsuoka, S. Yamahata, and N. Shigekawa, "Ultrahigh-speed InP/InGaAs DHPTs for OEMMICs," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 49, no. 10, pp. 1921–1925, Oct. 2001.
- [3] K. H. Ha *et al.*, "High-speed Ga_{0.51}In_{0.49}P/GaAs heterojunction phototransistors," *Electron. Lett.*, vol. 31, no. 16, pp. 1386–1387, Aug. 1995.
- [4] C-K. Song *et al.*, "Optical characteristics of InGaP/GaAs HPTs," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 22, no. 7, pp. 315–317, Jul. 2001.
- [5] S-W. Tan *et al.*, "Characterization and modeling of three-terminal heterojunction phototransistors using an InGaP layer for passivation," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 52, no. 2, pp. 204–210, Feb. 2005.
- [6] W. Liu, E. Beam, T. Henderson, and S-K. Fan, "Extrinsic base surface passivation in GaInP/GaAs heterojunction bipolar transistors," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 14, no. 6, pp. 301–303, Jun. 1993.
- [7] O. Ueda *et al.*, "Current status of reliability of InGaP/GaAs HBTs," *Solid-State Electron.*, vol. 41, no. 10, pp. 1605–1610, Oct. 1997.

- [8] A. A. Rezaadeh *et al.*, "Bias and temperature stress reliability of InGaP/GaAs HBTs," in *Proc. IEEE 38th Annu. Int. Rel. Phys. Symp.*, 2000, pp. 250–257.
- [9] M. G. Adlerstein and J. M. Gering, "Current induced degradation in GaAs HBT's," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 47, no. 2, pp. 434–439, Feb. 2000.
- [10] N. Pan *et al.*, "High reliability InGaP/GaAs HBT," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 19, no. 4, pp. 115–117, Apr. 1998.
- [11] A. Kurokawa *et al.*, "Effects of surface recombination on dc characteristics of InGaP/GaAs heterojunction bipolar transistors," *Inst. Electron., Inf. Commun. Eng. (IEICE)*, Tokyo, Japan, Tech. Rep. ED2005-198, MW2005-152, Jan. 2006.
- [12] F.-Y. Yang, S. Nozaki, K. Uchida, and A. Koizumi, "Improvement in reliability of InGaP/GaAs HBT's by ledge passivation," *Inst. Electron., Inf. Commun. Eng. (IEICE)*, Tokyo, Japan, Tech. Rep. ED2007-217, MW2007-148, Jan. 2008.
- [13] C.-K. Song and P.-J. Choi, "Effects of InGaP heteropassivation on reliability of GaAs HBTs," *Microelectron. Rel.*, vol. 39, no. 12, pp. 1817–1822, Dec. 1999.
- [14] S. P. McAlister, W. R. McKinnon, and R. Driad, "Interpretation of the common-emitter offset voltage in heterojunction bipolar transistors," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 48, no. 8, pp. 1745–1747, Aug. 2001.
- [15] T.-W. Lee and P. A. Houston, "Generalized analytical transport modeling of the DC characteristics of heterojunction bipolar transistors," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 40, no. 8, pp. 1390–1397, Aug. 1993.
- [16] Y.-S. Lin and J.-J. Jiang, "Temperature dependence of current gain, ideality factor, and offset voltage of AlGaAs/GaAs and InGaP/GaAs HBTs," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 56, no. 12, pp. 2945–2951, Dec. 2009.
- [17] W. Liu, S.-K. Fan, T. Henderson, and D. Davito, "Temperature dependences of current gains in GaInP/GaAs and AlGaAs/GaAs heterojunction bipolar transistors," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 40, no. 7, pp. 1351–1353, Jul. 1993.
- [18] S. Tiwari, S. L. Wright, and A. W. Kleinsasser, "Transport and related properties of (Ga, Al)As/GaAs double heterostructure bipolar junction transistors," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-34, no. 2, pp. 185–198, Feb. 1987.

Authors' photographs and biographies not available at the time of publication.



InGaP/GaAs heterojunction photosensor powered by an on-chip GaAs solar cell for energy harvesting

Phuc Hong Than¹, Kazuo Uchida¹, Takahiro Makino², Takeshi Ohshima², and Shinji Nozaki^{1*}

¹Graduate School of Informatics and Engineering, The University of Electro-Communications, Chofu, Tokyo 182-8585, Japan

²Japan Atomic Energy Agency, Takasaki, Gunma 370-1292, Japan

*E-mail: nozaki@ee.uec.ac.jp

Received September 29, 2015; accepted December 15, 2015; published online xxxx yy, zzzz

In this study, an InGaP/GaAs heterojunction phototransistor (HPT) and a GaAs solar cell were monolithically integrated into an HPT epitaxial wafer, and the battery-free operation of the HPT was demonstrated for energy harvesting. Although the thickness and doping condition of the layers were optimized for the HPT performance, but not for the solar cell performance, the obtained short-circuit current was high enough to operate the InGaP/GaAs HPT in a two-terminal (2T) configuration. A collector photocurrent of 0.63 mA was obtained when the energy-harvesting InGaP/GaAs 2T-HPT was exposed to white light with a power density of 35 mW/cm², and it linearly increased with the power density. For a potential application of the energy-harvesting InGaP/GaAs HPT as a photosensor in space, the device was irradiated with electrons of 1 MeV energy and 10¹⁵ cm⁻² fluence. No significant degradation of the fabricated energy-harvesting 2T-HPT after the high-energy electron irradiation guarantees its battery-free operation in space. © 2016 The Japan Society of Applied Physics

1. Introduction

A heterojunction phototransistor (HPT) is more attractive as a photosensor than a photodiode because of its high photoresponse even at low bias voltage and immunity from avalanche noise.¹⁻³ In particular, the GaAs-based HPT with an AlGaAs emitter demonstrated a high performance. Recently, the InGaP emitter has replaced the AlGaAs emitter in the AlGaAs/GaAs HPT owing to its superior material properties.⁴ The photosensor may be widely used in space, where it needs to be operated without a battery. An HPT has a process compatibility with a heterojunction bipolar transistor (HBT) for the fabrication of monolithically integrated photoreceivers.⁵ The InGaP/GaAs HPT also has good compatibility with the GaAs heteroface solar cell for a battery-free operation. Solar cells made of III-V compound semiconductors have been developed and used in space owing to their high conversion efficiency, lower temperature coefficient, and superior radiation resistance.⁶⁻⁹ The significant potential of high-efficiency GaAs heteroface solar cells for space applications has been extensively investigated by many researchers.¹⁰⁻¹⁷ Compared with Si, which has been widely used as a material of terrestrial solar cells, III-V compound semiconductors have a superior radiation resistance for the same electron energy and fluence. In particular, the InGaP solar cells demonstrated a radiation resistance superior to that of GaAs solar cells. Since the migration energy of radiation-induced defects and the activation energy of defect annealing in InGaP are lower than those in GaAs, InGaP has a higher radiation resistance than GaAs.¹⁸ In this study, radiation resistant InGaP was used as a window layer in a GaAs heteroface solar cell.

In space, high-energy electron or particle irradiation often induces a significant degradation of the performance of semiconductor devices. Since the battery-free operation of an InGaP/GaAs HPT monolithically integrated with a GaAs solar cell is also proposed for use in space in this paper, the effects of high-energy electron irradiation on the fabricated energy-harvesting HPTs were studied by 1 MeV electron irradiation.

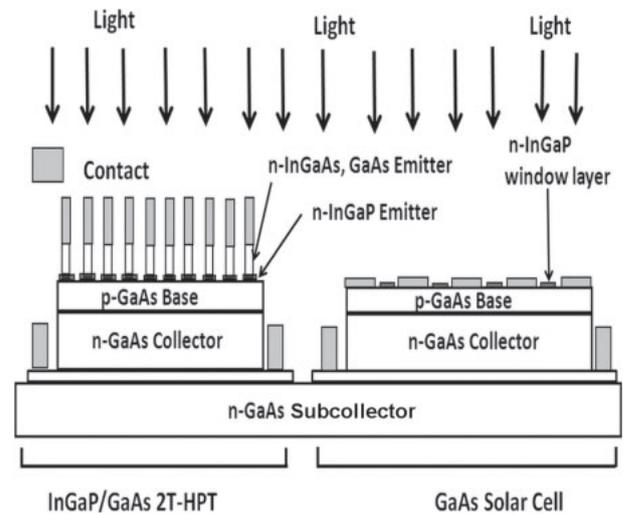


Fig. 1. Schematic cross section of the monolithically integrated InGaP/GaAs 2T-HPT and GaAs solar cell.

2. Experimental methods

An InGaP/GaAs HPT epitaxial wafer was grown on a semi-insulating (SI) GaAs(100) substrate using a metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD) system. The HPT epitaxial layer structure was described elsewhere.¹⁹ The schematic cross section of the fabricated energy-harvesting HPT is shown in Fig. 1. The emitter area of the HPT was 160,800 μm^2 , which was larger by four orders than those of typical HBTs; this increased the collector photocurrent ΔI_C , which is the collector photocurrent resulting from illumination by a halogen lamp.^{20,21} The emitter structure consisted of 10 finger-shaped electrodes, each with a size of $4 \times 2100 \mu\text{m}^2$, such that the effective emitter area could be large without causing emitter crowding. Note that the HPT exhibits emitter-ledge passivation. The emitter-ledge passivation is effective for suppressing surface recombination near the emitter edge.¹⁹⁻²⁵ The width and thickness of the InGaP emitter ledge were 5 μm and 30 nm, respectively.

A GaAs pn junction solar cell consisted of p⁺ base and n collector layers next to the InGaP/GaAs HPT. The InGaP

1 emitter layer was used as a window layer to suppress the
 2 surface recombination in the GaAs pn junction solar cell. The
 3 fabrication process for the energy-harvesting InGaP/GaAs
 4 HPT is as follows. First, the patterned emitter electrode of the
 5 InGaP/GaAs HPT was formed by the liftoff of the deposited
 6 Ti/Au layers without sintering. Using the emitter electrode,
 7 the base surface of the HPT was exposed by the mesa etching
 8 of the emitter contact and emitter layers. The solutions of
 9 $H_3PO_4:H_2O_2:H_2O$ and $NH_4OH:H_2O_2:H_2O$ were used to etch
 10 the InGaAs and GaAs layers, respectively. Simultaneously,
 11 the emitter contact and emitter layers of the InGaAs and
 12 GaAs layers of the GaAs heteroface solar cell were entirely
 13 removed by using these solutions. Undiluted HCl was used to
 14 etch the InGaP layer until the base layer was exposed. Owing
 15 to the high selectivity of HCl for the InGaP etching, the base
 16 surface was easily exposed without overetching the GaAs
 17 base. Simultaneously, the InGaP window layer of the solar
 18 cell was formed by using undiluted HCl to etch the InGaP
 19 layer until the base layer was exposed. The base electrodes of
 20 the InGaP/GaAs HPT and GaAs heteroface solar cell were
 21 then formed by the liftoff of the deposited Ti/Pt/Au layers
 22 without sintering. The mesa etching of the GaAs base and
 23 collector layers of both devices was carried out to expose the
 24 subcollector surface. Following the base-contact formation,
 25 a multilayer of Ni/AuGe/Ni/Au was deposited on the
 26 patterned resist on the subcollector surface to form an ohmic
 27 contact to the collector without sintering. Finally, the
 28 subcollector layer of the energy-harvesting InGaP/GaAs
 29 was etched down to the SI GaAs substrate for isolation.

30 The common-emitter characteristics of the InGaP/GaAs
 31 HPT and the current–voltage (I – V) characteristics of the
 32 GaAs heteroface solar cell were measured under illumination
 33 by an HP4155A semiconductor parameter analyzer with a
 34 halogen lamp. The power density of the lamp was set to
 35 35 mW/cm^2 unless otherwise specified. The electrical
 36 characteristics of the InGaP/GaAs HPT and GaAs heteroface
 37 solar cell were measured in the dark and under illumination
 38 by an HP4155A semiconductor parameter analyzer. The HPT
 39 performance is often characterized by the optical gain, which
 40 is defined as the number of electrons collected as the collector
 41 photocurrent ΔI_C , divided by the number of incident photons
 42 for monochromatic light. However, since we intend to use
 43 the HPT as a photosensor of white light, it is more
 44 appropriate to characterize the HPT using the responsivity
 45 S , which is defined as the collector photocurrent ΔI_C , divided
 46 by the incident light power P_{in} , received by the base-collector
 47 junction area of the HPT. The HPTs are operated in both a
 48 two-terminal (2T) configuration with a floating base and a
 49 three-terminal (3T) configuration with a forced base current.

50 High-energy electron irradiation was carried out at the
 51 Japan Atomic Energy Agency in Takasaki. The electrons
 52 accelerated at 1 MeV were uniformly bombarded on the
 53 InGaP/GaAs HPT and GaAs heteroface solar cell. The
 54 electron fluence was set to $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ while maintaining
 55 the current at 1 mA. The sample temperature was kept from
 56 increasing by water flow during the irradiation. The electron
 57 energy and fluence were selected on the basis of Jet
 58 Propulsion Laboratory criterion for the radiation hardness
 59 of solar cells in the space application.²⁶⁾ The electrical
 60 characteristics of the InGaP/GaAs HPT and GaAs heteroface
 61 solar cell were measured under illumination before and after

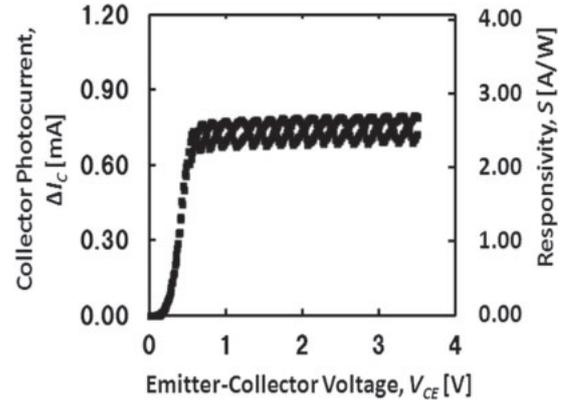


Fig. 2. Collector photocurrent ΔI_C and responsivity S of the InGaP/GaAs 2T-HPT under illumination with a power density of 35 mW/cm^2 .

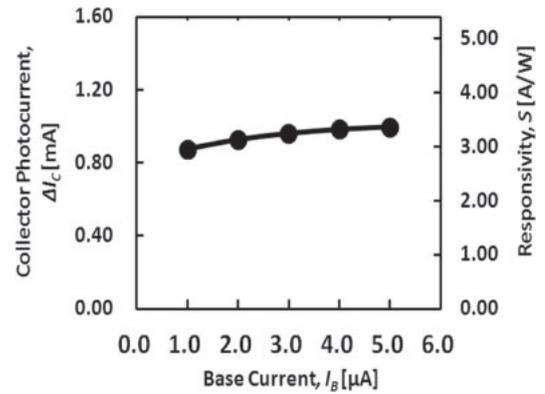


Fig. 3. Collector photocurrent ΔI_C and responsivity S of the InGaP/GaAs 3T-HPT for various base currents. The collector photocurrent was measured at the saturation.

the electron irradiation by HP4155A to confirm the battery-free operation of the InGaP/GaAs HPTs.

3. Results and discussion

3.1 InGaP/GaAs HPTs in the 2T and 3T configurations

Figure 2 shows the collector photocurrent ΔI_C of the InGaP/GaAs 2T-HPT under illumination with a light power density of 35 mW/cm^2 . Note the oscillating collector photocurrent in Fig. 2. This is due to the intensity oscillation of the lamp used to irradiate the HPT and solar cell. The photocurrent of the solar cell also oscillates, as seen later. Nevertheless, the oscillation amplitude is at most 10% of the average, and the analysis of the measurement results should not be affected. In the 3T configuration, the base current I_B was varied from 1 to $5 \mu\text{A}$ with $1 \mu\text{A}$ per step. For each I_B , the emitter–collector voltage V_{CE} increased from 0 to 3.5 V with a step of 0.1 V . Figure 3 shows the collector photocurrent ΔI_C as a function of the base current. The collector photocurrent ΔI_C at saturation was shown for various base currents I_B , and increased with the increase in base current. The results of the detailed analysis of the 3T- and 2T-HPTs were presented with the equivalent circuit by Tan et al.²²⁾ and showed that the collector photocurrent ΔI_C was given by the following equation:

$$\begin{aligned} \Delta I_C &= \beta(I_B + I_{ph}) \times (I_B + I_{ph}) - \beta(I_B) \times I_B + I_{ph} \\ &= [\beta(I_B + I_{ph}) - \beta(I_B)] \times I_B + \beta(I_B + I_{ph}) \times I_{ph} + I_{ph}, \end{aligned} \quad (1)$$

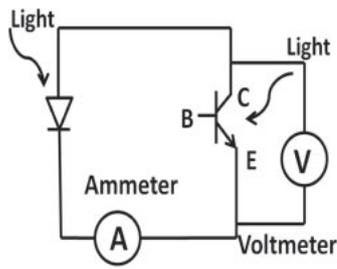


Fig. 4. Equivalent circuit diagram of battery-free operation of the InGaP/GaAs 2T-HPT by the on-chip GaAs solar cell under illumination. The 2T-HPT was the HPT operated in the 2T configuration.

where $\beta(I_B + I_{ph})$ and $\beta(I_B)$ are β s for base currents of $I_B + I_{ph}$ and I_B , respectively. Here, I_B and I_{ph} are the external base current and the photocurrent resulting from the generation of electron-hole pairs in the collector. If I_B is low so that the recombination current at the emitter-base junction cannot be ignored, β increases with the increase in I_B . As a result, $\beta(I_B + I_{ph})$ is much higher than $\beta(I_B)$, and the first and second terms in Eq. (1) contribute to the optical gain of the 3T-HPT. In the 2T-HPT, I_B is zero, and the only second term, $\beta(I_{ph})$, contributes to the optical gain. Therefore, the optical gain of the 2T-HPT is lower than that of the 3T-HPT. Nevertheless, the collector photocurrent is much higher than the photocurrent of the pn diode. The highest collector photocurrents of the 2T- and 3T-HPTs obtained in the measurement are 0.76 and 1 mA ($I_B = 5 \mu\text{A}$), and the corresponding responsivities of the 2T- and 3T-HPTs are 2.6 and 3.4 A/W, respectively, as seen in Figs. 2 and 3. Although a higher responsivity is expected for the 3T-HPT,²²⁾ a similar responsivity is obtained for the 2T-HPT. For the simplicity of fabrication, we have employed the 2T-HPT as a photo-sensor to be integrated with the GaAs solar cell.

3.2 Battery-free operation of the InGaP/GaAs HPT in the 2T configuration

Figure 4 shows the equivalent circuit diagram of the energy-harvesting InGaP/GaAs 2T-HPT. In the diagram, the collector electrode of the 2T-HPT was wire-connected to the p^+ electrode of the solar cell so that the solar cell could supply the emitter-collector voltage to the 2T-HPT. The photovoltage and photocurrent were measured at the operating point by a voltmeter and an ammeter, respectively, as shown in Fig. 4. A halogen lamp was used as the white light source, and the power density was varied up to 35 mW/cm^2 by varying the lamp current.

I - V characteristics of the GaAs solar cell and InGaP/GaAs 2T-HPT are plotted for the light power density of 35 mW/cm^2 in Fig. 5. Although the label of the vertical axis is collector photocurrent, it is for the 2T-HPT, and to be precise, the label should be current for the solar cell. Similarly, the horizontal axis labels should be emitter-collector voltage for the 2T-HPT and voltage for the solar cell. Since the short-circuit current of the solar cell was higher than the photocurrent of the 2T-HPT, the operating point shown as the crossing point of two curves could be found. The solar cell exhibited a short-circuit current of 0.89 mA, an open-circuit voltage of 0.9 V, and a conversion efficiency of 5.8% at the maximum power point, in which the current and voltage were 0.86 mA and 0.67 V, respectively, producing the maximum

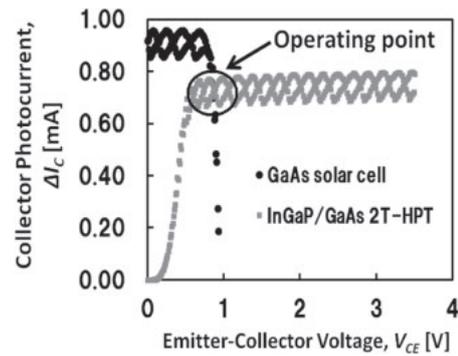


Fig. 5. I - V characteristics of the GaAs solar cell and the InGaP/GaAs 2T-HPT under illumination with a power density of 35 mW/cm^2 .

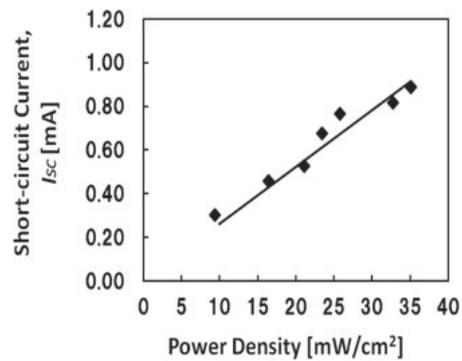


Fig. 6. Short-circuit current of the GaAs solar cell for various light intensities.

power of 0.58 mW. The fill factor FF of the solar cell was 0.72. The minimum area of the solar cell was 0.283 cm^2 in order for the short-circuit current of the solar cell to be higher than the collector photocurrent of the 2T-HPT under illumination. Note that the doping concentrations and thicknesses of the base and collector layers were optimized for the HPT performance, but not for the solar cell performance. The collector doping and thickness were $1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ and 600 nm, respectively. In contrast to the conventional GaAs solar cell, the n layer is very thin for a high short-circuit current.²⁷⁻²⁹⁾ Nevertheless, the obtained efficiency is high enough to determine the operating point of the InGaP/GaAs 2T-HPT. The operating point was determined from the crossing point at about 0.87 V and 0.732 mA under illumination for the power density of 35 mW/cm^2 .

Figures 6 and 7 show the short-circuit current of the GaAs solar cell and the collector photocurrent of the InGaP/GaAs 2T-HPT, respectively, under illumination with various light intensities. The short-circuit current of the solar cell increases proportionally to the power density of light. In contrast to the short-circuit current, the open-circuit voltage of the solar cell increases slightly with the increase in the power density of illumination. The open-circuit voltage of the solar cell increases by 50 mV when the power density increases from 9.3 to 26 mW/cm^2 . The collector photocurrent also increases linearly with the power density, as seen in Fig. 7.

Figures 8 and 9 show the photocurrent and photovoltage of the energy-harvesting 2T-HPT, respectively, for various power densities of light. The photocurrent and photovoltage at 35 mW/cm^2 are 0.63 mA and 0.81 V, respectively. These

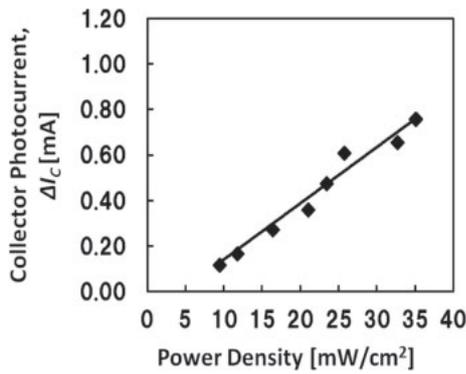


Fig. 7. Collector photocurrent ΔI_C of the InGaP/GaAs 2T-HPT for various light intensities. The collector photocurrent was measured at the saturation.

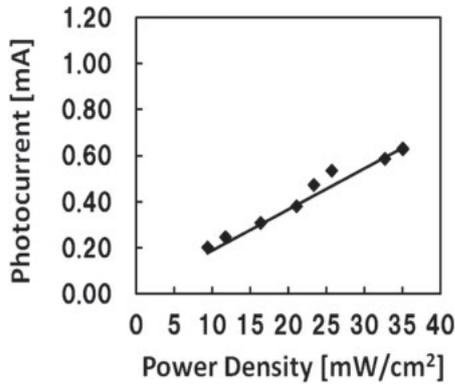


Fig. 8. Photocurrent of the energy-harvesting InGaP/GaAs 2T-HPT under illumination with various light intensities.

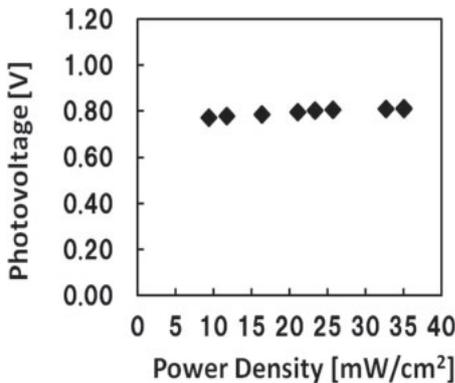


Fig. 9. Photovoltage of the energy-harvesting InGaP/GaAs 2T-HPT under illumination with various light intensities.

values are slightly different from those expected from the crossing point in Fig. 5. By comparing the collector photocurrent of the discrete 2T-HPT in Fig. 7 and that of the energy-harvesting 2T-HPT in Fig. 8, one observes that the photocurrent of the discrete 2T-HPT is higher than that of the energy-harvesting 2T-HPT for lower power densities, while vice versa for higher power densities. This suggests the interaction of the solar cell and 2T-HPT in the energy-harvesting 2T-HPT. The 2T-HPT is usually operated only by applying the emitter–collector voltage. The emitter–collector junction is biased by the photogenerated voltage of the solar cell in the energy-harvesting HPT. In addition to the voltage

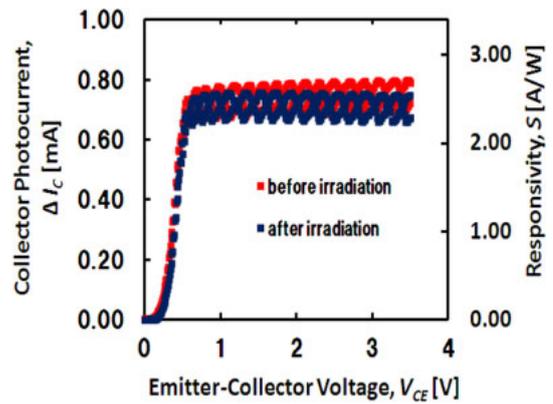


Fig. 10. (Color online) Collector photocurrent and responsivity of the InGaP/GaAs 2T-HPT under illumination before and after the high-energy electron irradiation. The power density of light was 35 mW/cm².

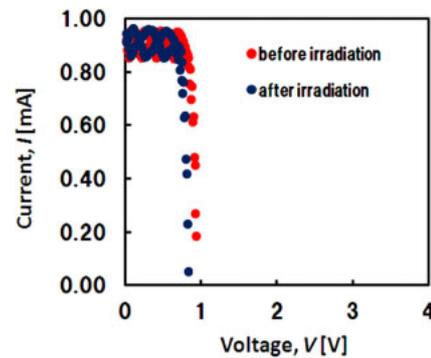


Fig. 11. (Color online) I - V characteristics of the GaAs heteroface solar cell under illumination with a power density of 35 mW/cm² before and after the high-energy electron irradiation.

source for operating the HPT, there is an additional current source from the solar cell. The current injection from the solar cell to the collector increases both the emitter–base forward-bias voltage and the collector photocurrent. If the collector photocurrent becomes very high, the effective base doping is increased by the increased electron injection from the emitter. As a result, the current gain decreases. The decrease in current gain with the increase in collector current is referred to as the Webster effect.³⁰⁾ In spite of the interaction between the solar cell and the 2T-HPT, an almost linear characteristic of the photocurrent as a function of the power density is clearly seen in Fig. 8. Such a linearity is suitable for practical application in a photosensor.

3.3 Effects of the high-energy electron irradiation

Figure 10 shows the collector photocurrent ΔI_C of the InGaP/GaAs 2T-HPT under illumination before and after the irradiation. The power density of the lamp was 35 mW/cm². As seen in Fig. 10, the collector photocurrents of the 2T-HPT before and after the irradiation were 0.76 and 0.71 mA, respectively. The decrease in the collector photocurrent of the InGaP/GaAs 2T-HPT is 6.6% and it can be said that no significant degradation of the 2T-HPT was observed after irradiation.

The I - V characteristics of the GaAs heteroface solar cell under illumination before and after the irradiation are shown in Fig. 11. The short-circuit current after the irradiation was

Table I. Obtained characteristics of the GaAs heteroface solar cell before and after the electron irradiation. The power density of illumination was 35 mW/cm².

	Open-circuit voltage V_{OC} (V)	Short-circuit current I_{SC} (mA)	Maximum power P_{max} (mW)	Efficiency η (%)	Fill factor FF
Before irradiation	0.9	0.89	0.58	5.8	0.72
After irradiation	0.8	0.89	0.45	4.5	0.63

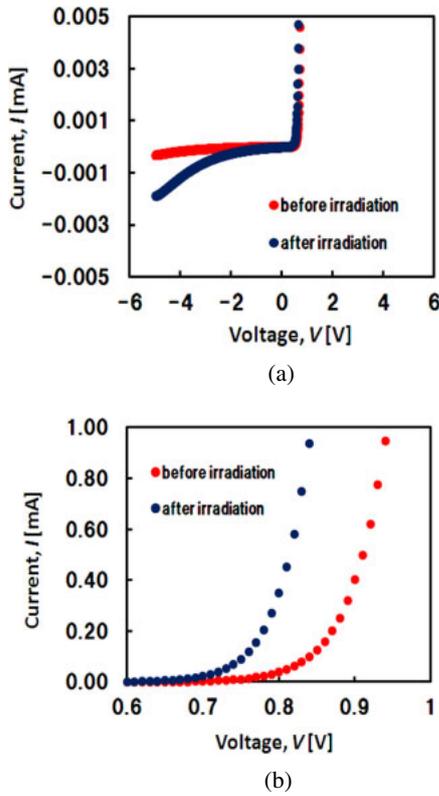


Fig. 12. (Color online) (a) I - V characteristics of the GaAs heteroface solar cell in the dark before and after the high-energy electron irradiation. (b) Forward I - V characteristics of GaAs heteroface solar cell in the dark before and after the high-energy electron irradiation.

still 0.89 mA, and the open-circuit voltage decreased from 0.9 to 0.8 V, corresponding to an 11.1% decrease. The characteristics of the GaAs heteroface solar cell before and after the electron irradiation are summarized in Table I. The maximum power and conversion efficiency of the solar cell decreased from 0.58 to 0.45 mW (corresponding to a 22.4% decrease) and from 5.8 to 4.5% (corresponding to a 22.4% decrease), respectively. The short-circuit current was not affected by the irradiation, but its open-circuit voltage slightly decreased. This may be explained by the increased dark current rather than the decreased photocurrent.

Figure 12(a) shows the I - V characteristics of the GaAs heteroface solar cell in the dark before and after the high-energy electron irradiation. A significant increase in reverse current was observed after the electron irradiation, and it increased with the increase in reverse bias voltage. Such a voltage-dependent large reverse leakage current of the diode is often attributed to the thermal generation of carriers in the depletion region. Since the I - V characteristic of the solar cell is the forward I - V characteristic in the dark subtracted from the voltage-independent photocurrent and strongly affected by the forward I - V characteristic in the dark, the forward

I - V characteristics are magnified in Fig. 12(b). The current increases significantly after the electron irradiation. The forward current increase with the increase in electron fluence during the irradiation on the GaAs solar cells was observed by Danilchenko et al. and Bourgoin and Zazoui, who attributed it to the carrier recombination increase caused by radiation-induced point defects.^{31,32} Although they also observed a significant decrease in the short-circuit current, the short-circuit current of the GaAs solar cell fabricated from the InGaP/GaAs HPT epitaxial wafer was not significantly affected by the electron irradiation. As already mentioned, the GaAs collector layer is much thinner than the n-GaAs layer in a conventional GaAs solar cell, and the photocurrent is mainly due to the photogenerated carriers in the depletion region, where the electric field separates quickly the electron-hole pairs before recombining via radiation-induced defects.

Since the short-circuit current and the collector photocurrent are less affected by the electron irradiation, the photocurrent does not decrease, while the photovoltage decreases at the operating point of the energy-harvesting InGaP/GaAs 2T-HPT. Although the measurement of the photocurrent and photovoltage is carried out under illumination with a power density of 35 mW/cm², it is expected that they will not be affected by the high-energy electron irradiation for the other power densities. Owing to the voltage-independent collector photocurrent of the 2T-HPT, the photocurrent of the energy-harvesting InGaP/GaAs HPT with a GaAs solar cell is resistant to radiation and can be operated without a battery in space.

4. Conclusions

An InGaP/GaAs HPT and a GaAs solar cell were monolithically integrated into an HPT epitaxial wafer for a battery-free operation. The area of the solar cell was adjusted to make the short-circuit current of the solar cell higher than the collector photocurrent of the 2T-HPT. When the power density of light was 35 mW/cm², the solar cell was characterized on the basis of solar cell parameters, i.e., a short-circuit current of 0.89 mA, an open-circuit voltage of 0.9 V, fill factor of 0.72, and a conversion efficiency of 5.8%. A photocurrent of 0.63 mA was obtained when the energy-harvesting InGaP/GaAs 2T-HPT was exposed to white light with a power density of 35 mW/cm², and it increased linearly with the power density. For a possible space application of the energy-harvesting InGaP/GaAs 2T-HPT, the device was irradiated with electrons of 1 MeV energy and 10¹⁵ cm⁻² fluence. Although the conversion efficiency of the solar cell decreased by more than 20%, the collector photocurrent of the 2T-HPT did not show a significant change. The absence of significant degradation suggests that the fabricated energy-harvesting InGaP/GaAs 2T-HPT is suitable for a photo-sensor that can be used in space.

- 1) S. Chandrasekhar, *IEEE Photonics Technol. Lett.* **5**, 1316 (1993).
- 2) H. Kamitsuna, Y. Matsuoka, S. Yamahata, and N. Shigekawa, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **49**, 1921 (2001).
- 3) K. H. Ha, Y. H. Lee, J. I. Song, C. Caneau, C. Y. Park, and K. H. Park, *Electron. Lett.* **31**, 1386 (1995).
- 4) C.-K. Song, S.-H. Lee, K.-D. Kim, J.-H. Park, B.-W. Koo, D.-H. Kim, C.-H. Hong, Y.-K. Kim, and S.-B. Hwang, *IEEE Electron Device Lett.* **22**, 315 (2001).
- 5) H. Kamitsuna, *J. Lightwave Technol.* **13**, 2301 (1995).
- 6) K. A. Bertness, S. R. Kurtz, D. J. Friedman, A. E. Kibbler, and J. M. Olson, *Appl. Phys. Lett.* **65**, 989 (1994).
- 7) M. Yamaguchi and A. Luque, *IEEE Trans. Electron Devices* **46**, 2139 (1999).
- 8) S. M. Vernon, S. P. Tobin, V. E. Haven, L. M. Geoffroy, and M. M. Sanfacon, *Proc. 22nd IEEE Photovoltaic Specialists Conf.*, 1991, p. 353.
- 9) H. F. McMillan, H. C. Hamaker, N. R. Kaminar, M. S. Kuryla, M. L. Ristow, D. D. Liu, and G. F. Virshup, *Proc. 22nd IEEE Photovoltaic Specialists Conf.*, 1998, p. 462.
- 10) D. Flood and H. Brandhorst, in *Current Topics in Photovoltaics*, ed. T. J. Coutts and J. Meakinvol (Academic Press, New York, 1987) Vol. 2, p. 143.
- 11) H. Y. Tada, J. R. Carter, Jr., B. E. Anspaugh, and R. G. Dowing, *Solar Cell Radiation Handbook* (JPL Publication, Pasadena, CA, 1982) 3rd ed., Chap. 1, p. 30.
- 12) B. E. Anspaugh, *Proc. 22nd IEEE Photovoltaic Specialists Conf.*, 1992, p. 1593.
- 13) A. M. Sekela, D. L. Feucht, and A. G. Milnes, *IEEE Trans. Electron Devices* **24**, 373 (1977).
- 14) S. A. Ringel, A. Rohatgi, and S. P. Tobin, *IEEE Trans. Electron Devices* **36**, 1230 (1989).
- 15) P. D. DeMoulin, S. P. Tobin, M. S. Lundstrom, M. S. Carpenter, and M. R. Melloch, *IEEE Electron Device Lett.* **9**, 368 (1988).
- 16) J. W. Wilson and L. V. Stock, *IEEE Trans. Electron Devices* **31**, 622 (1984).
- 17) L. Prat, E. G. Moreno, and L. Castafier, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **33**, 1058 (1986).
- 18) M. Yamaguchi, C. Vargas-Aburto, S. J. Taylor, M.-J. Yang, T. Takamoto, E. Ikeda, H. Kurita, M. Ohmori, R. M. Uribe, D. Brinker, and D. A. Scheiman, *Proc. 25th IEEE Photovoltaic Specialists Conf.*, 1996, p. 163.
- 19) P. H. Than, Y. Takaki, K. Uchida, and S. Nozaki, *Denshi Joho Tsushin Gakkaishi C* **J96-C**, 238 (2013) [in Japanese].
- 20) A. Kurokawa, Z. Jin, H. Ono, K. Uchida, S. Nozaki, and H. Morisaki, *IEICE Tech. Rep.* ED2005-198 (2006) [in Japanese].
- 21) F.-Y. Yang, S. Nozaki, K. Uchida, and A. Koizumi, *IEICE Technical Report*, ED2007-217, MW 2007-148 (2008) [in Japanese].
- 22) S. W. Tan, H.-R. Chen, W.-T. Chen, M.-K. Hsu, A.-H. Lin, and W.-S. Lour, *IEEE Trans. Electron Devices* **52**, 204 (2005).
- 23) W. Liu, E. Beam, T. Henderson, and S.-K. Fan, *IEEE Electron Device Lett.* **14**, 301 (1993).
- 24) K.-Y. Chu, S.-Y. Cheng, T.-P. Chen, L.-Y. Chen, T.-H. Tsai, J.-H. Tsai, and W.-C. Liu, *Ext. Abstr. 8th Int. Workshop Junction Technology, 2008*, p. 176.
- 25) C.-K. Song and P.-J. Choi, *Microelectron. Reliab.* **39**, 1817 (1999).
- 26) S. R. Messenger, G. P. Summers, E. A. Burke, R. J. Walters, and M. A. Xapsos, *Prog. Photovoltaics* **9**, 103 (2001).
- 27) C. Algora, E. Ortiz, I. Rey-Stolle, V. Diaz, R. Pena, V. M. Andreev, V. P. Khvostikov, and V. D. Romyantsev, *IEEE Trans. Electron Devices* **48**, 840 (2001).
- 28) R. C. Knechtli, R. Y. Loo, and G. S. Kamath, *IEEE Trans. Electron Devices* **31**, 577 (1984).
- 29) N. Alim, F. R. Himel, S. T. Nabi, M. S. H. Khan, and R. Basak, *Proc. 2nd Int. Conf. Advances in Electrical Engineering, 2013*, p. 119.
- 30) S. M. Sze and K. K. Ng, *Physics of Semiconductor Devices* (Wiley, New York, 2007) 3rd ed., p. 253.
- 31) B. Danilchenko, A. Budnyk, L. Shpinar, D. Poplavskyy, S. E. Zelensky, K. W. J. Barnham, and N. J. Ekins-Daukes, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **92**, 1336 (2008).
- 32) J. C. Bourgoin and M. Zazoui, *Semicond. Sci. Technol.* **17**, 453 (2002).