

論文の内容の要旨

論文題目	光周波数コムを用いた高精度レーザー分光計の開発
学 位 申 請 者	渡 邊 直 登

周波数軸上に等間隔に並んだ櫛の歯状のスペクトルを持つ光周波数コムはレーザー周波数の広帯域な光周波数基準として開発された。光周波数コムを用いた分光計は、このような光コムの特徴を活かすことで、従来の分光計の周波数精度や分解能などの性能を著しく向上する事が可能である。そのため既存の分光計では測定困難な現象の観測や高精度測定など新しい分光への応用が期待されている。本研究では広帯域なスペクトルを高精度に掃引可能な光シンセサイザーを開発し、 ^{87}Rb 原子のリドベルグ状態の遷移周波数の直接周波数測定を行い250 kHz以下の精度でその絶対周波数を決定した。開発した光シンセサイザーは100kHz以下の精度で任意の周波数を発生する事が可能なため冷却原子を用いた量子シミュレーション研究に有用な道具となる。また、光周波数コムに光位相同期された2台のレーザーを用いて二重共鳴測定を行う事で分子の微弱な吸収を検出し準位を同定できる事も示した。本手法は、広帯域なスペクトルを高速に測定可能なデュアルコム分光法と組合せる事で従来の手法より効率良く、複数の分子種の吸収線が重なる広帯域スペクトルから特定の分子の吸収を選択的に検出し準位を同定する事が可能になる。

本論文の構成は以下の通りである。

第1章では、序論として光周波数コムが開発された研究背景及びこれを用いた分光計の研究の背景を紹介し、次に本論文の研究の概要を示す。

第2章では光周波数コムを用いた分光計の説明を行う。初めに、光周波数コムの原理について説明し、次に光周波数コムを光周波数シンセサイザーとして用いた分光計の説明を行い、最後に2台の光周波数コムを用いたデュアルコム分光計の原理を説明する。

第3章では、本研究において開発した繰り返し周波数325 MHzのErファイバーモード同期 (ML) ファイバーレーザーを基にした高繰り返し周波数光周波数コムの説明をする。高繰り返し周波数のMLレーザーの出力を2段のErファイバー光増幅器を用いて増幅することによりそのスペクトル帯域を1オクターブ以上に広げることが可能となり、繰り返し周波数325MHzで安定な光周波数コムを実現したことを説明する。

第4章では、本研究で開発した2台の電気光学変調器型光周波数コムを用いたデュアルコム分光計の原理およびこの方法を用いて行ったアセチレン分子の分光実験の結果を説明する。1台の単一周波数レーザーと2台の電気光学変調器を用いた新たな方法により、2台のモード同期レーザーを用いた従来のデュアルコム分光計に比べて装置の構成が大幅に単純化することが可能になったことを示す。また開発した分光計を用いてアセチレン分子の 1.5μ 帯の振動回転線の吸収を観測してその検出感度の評価を行い、従来の方法より高感度が得られたことを示す。

第5章では、光周波数コムを基準に光位相同期された2台の外部共振器型半導体レーザーを用いてアセチレン分子の二重共鳴分光を行った実験に関して説明する。光周波数コムを用いて高精度にレーザー周波数を設定および繰り返し掃引することにより、微弱な二重共鳴信号を高感度に観測したことを示し、この方法を用いることにより微弱な吸収線の振動回転準位の同定に応用可能であることを示す。

第6章では、Rb原子のリドベルグ (Rydberg) 状態励起用の光周波数シンセサイザー光源の開発に関して説明する。光周波数コムを用いてRb原子を主量子数 n が50以上のリドベルグ状態に励起するのに必要な波長480nmにおいて100 kHz以下の周波数精度で任意の光周波数を発生するシンセサイザー光源の原理およびその性能について説明する。

第7章では、本研究で開発した光周波数シンセサイザーを用いて行った ^{87}Rb 原子のリドベルグ状態への二光子吸収遷移の絶対周波数測定の結果について述べる。 ^{87}Rb 原子の主量子数 $n=50\sim 90$ のリドベルグ状態のエネルギー準位を光周波数コムを用いた方法で初めて直接周波数測定を行い、その絶対周波数を250kHz以下で測定した実験について説明し、従来の測定結果および理論値との比較を行う。

第8章では本論文の総括と今後の展望について述べている。

論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名 渡邊直登

審査委員主査 中川 賢一

委員 武者 満

委員 白川 晃

委員 桂川 眞幸

委員 美濃島 薫

この博士論文は、光周波数コムを用いた高精度なレーザー分光計の開発と、これを用いた原子および分子の広帯域・高感度レーザー分光の研究について述べたものである。

論文は8章から構成されており、第1章では、研究の背景として光周波数コムが発明された経緯およびこのレーザー分光への応用に関してこれまで行われてきた研究が述べられている。次にこれらの従来の研究を基に博士論文として取り組んだ光周波数コムの分光応用の研究のテーマおよびその概要が述べられている。最初に光周波数コムの非線形分光への応用を目指して取り組んだ一連の研究について簡単に説明している。次に光周波数コムを用いた具体的な分光応用として、Rb原子のRydberg状態の高分解能分光のための光シンセサイザー光源に関して説明している。

第2章では、光周波数コムを用いた分光計について述べている。先ず光周波数コムの原理とこれを用いて実現される光シンセサイザー光源について説明し、次に光周波数コムを2台用いたデュアルコム分光の原理を説明している。

第3章では、高繰り返し周波数Erファイバー光周波数コムの開発について述べている。繰り返し周波数325MHzのモード同期Erファイバーレーザーを基にこの周波数を制御して光周波数コムを実現し、その周波数安定度および精度を評価した結果を示している。

第4章では電気光学変調器型光周波数コムを用いたデュアルコム分光計について述べている。繰り返し周波数が僅かに異なる2台の光周波数コムを用い、そのヘテロダイニート信号を測定するデュアルコム分光を、1台の単一周波数レーザーと2台の電気光学変調器型光周波数コムを用いて実現したことを述べている。この方法によって従来の2台のモード同期レーザーを用いた方法に比べて大幅に装置の簡素化および小型が可能になった。またこの方法は、繰り返し周波数を1GHz

以上にすることが可能であるため、モードあたりの光パワーが高い光周波数コムが実現され、高感度な分光検出が可能となる。このためアセチレン分子の 1.5μ 帯の吸収線を開発したデュアルコム分光計を用いて測定して検出感度の評価を行い、従来のモード同期レーザーを用いた方法より高い検出感度が達成できたことを述べている。

第5章では光周波数コムを用いたアセチレン分子の二重共鳴分光について述べてある。光周波数コムを用いて2台のレーザーの周波数を高精度に発生させて、アセチレン分子の2本の振動回転遷移の吸収線に共鳴させることにより、高精度かつ高感度に二重共鳴信号が得られたことを述べている。この結果から、先の4章で示したデュアルコム分光法と組み合わせることにより、光周波数コムを用いた分子の二次元相関分光が実現可能であることが示された。

第6章ではRb原子のRydberg状態励起用の光周波数シンセサイザー光源の開発について述べてある。Rb原子のRydberg状態を用いた量子情報処理の研究において必要となる広範囲に波長可変で高精度に光周波数を発生する光周波数シンセサイザー光源を先の第3章で述べた光周波数コムを用いて実現したことを述べている。

第7章ではRb原子のRydberg状態のエネルギー準位の絶対周波数の測定について述べている。第6章で述べた光シンセサイザー光源を用いて ^{87}Rb 原子の主量子数 $n=50\sim 90$ のRydberg状態のエネルギー準位を波長780nmと480nmの2台のレーザーを用いた二光子吸収を電磁誘導透明化(EIT)よりその遷移周波数を100kHz以下の誤差で測定している。測定精度は今までの波長計を用いた測定に比べて大幅に向上し、得られた遷移周波数のデータはこのRydberg状態を利用する量子情報処理や量子シミュレーションなどの研究に非常に有用なものである。

第8章では本論文の総括と今後の展望について述べている。

以上、本論文では光周波数コムを用いた高精度および高感度分光法を開発し、これを用いて原子の高精度周波数測定および分子分光に応用してその有用性を実証した。これらの研究成果は博士(工学)の学位論文に十分値するものと認める。