

【学位論文審査の要旨】

1 研究の目的

Coherent Population Trapping (以下 CPT) 共鳴を利用した原子発振器は、小型かつ省電力でありながら原子の遷移周波数を基準とするため高い周波数安定度を有することが特徴である。近年では、小型情報端末、センサーネットワーク、車載向けなど体積と消費電力が制限される機器への搭載に向け、小型化、省電力化、高安定化の研究・開発が進められている。原子発振器には一般的に高い周波数安定度が要求されるため、CPT 原子発振器にも Double- Λ 法や Push-Pull 光ポンピング法など、安定度を高める種々の方法が提案されている。しかし、複雑な光学装置と大きな消費電力を要するこれまでの提案法では小型原子発振器への適用が困難であった。周波数安定度は一般的にアラン標準偏差で評価されるが、平均化時間により短期安定度と長期安定度の 2 つに分けられる。それぞれの特性を決める要因は異なっており、短期安定度の場合には共鳴の SN 比と Q 値の積（性能指数）で理論的性能が決まる。SN 比向上のためには大きな光強度で CPT 共鳴を励起すれば良いが、同時にパワーブロードニングによる Q 値低下が引き起こされるため、SN 比と Q 値を同時に向上することは難しい。一方、長期安定度は共鳴の励起条件が時間経過と共に変化することが原因であり、その結果として周波数変動を引き起こす支配的な要因はライトシフトである。したがって、CPT 原子発振器の周波数安定度改善のためには、性能指数の向上とライトシフトの低減が求められていた。

近年、パルス励起を用いた CPT 共鳴の特性改善効果が注目されている。パルス励起はラムゼイ干渉を利用する方法で、パワーブロードニング抑制とライトシフト低減が可能となり、短期、長期ともに高い周波数安定度が得られる。しかし、これまでの研究報告では、パルス励起用光源の準備に音響光学変調器が必要であり、その体積と消費電力の大きさから小型原子発振器への適用は困難であった。また、ライトシフトの低減効果は実験報告のみで理論的説明は行われていなかったため、最適な実験条件は明らかでなく、ライトシフトの理論的な説明が望まれていた。

以上の背景を踏まえ、本論文では、パルス励起による小型原子発振器の特性改善を目指し、パルス励起適用へ向けた解決策、数値解析の確立と詳細な特性評価および共鳴観測の改善策を検討することが目的である。

2 研究の方法と結果

本論文では、まず、パルス励起による CPT 共鳴の解析および実験からパワーブロードニング抑制効果とライトシフト低減効果を明らかにし、パルス励起の有効性を確認した（第 3 章）。次に、小型で低消費電力動作を可能とする透過型液晶を用いたパルス励起法を提案し、CPT 共鳴特性が改善可能である事を示した（第 4 章）。また、小型原子発振器の更なる省電力化を目指して高次高調波による励起法を検討し、RF 回路の省電力化も図った（第 5 章）。最後に、CPT 共鳴の大幅な SN 比改善法として、パルス励起にも対応可能な直交偏光子法を

提案した（第6章）。本論文の主な構成は以下の通りである。

第3章では、未解明であったパルス励起によるライトシフトの振る舞いを理論的に明らかにするために、密度行列解析に基づき、ライトシフト量に関して摂動法を組み入れた数値計算法を提案した。解析結果により得られた知見から、パワーブロードニングの抑制効果、ライトシフトの低減効果が得られることを理論的に示した。連続励起に比べパルス励起のライトシフトは大幅に低減でき、光強度に対し非線形になる領域についても示された。これらの結果は、面発光半導体レーザを用いた実験結果と20%以内で定量的な一致が見られ、提案した解析方法の有効性が明らかになった。

第4章では、パルス励起を小型原子発振器へ適用するため、透過型液晶によるパルス励起法を提案した。液晶による光強度変調の実験を行い、ラムゼイ共鳴が観測されることを確認し、観測タイミングが共鳴の振幅に与える影響についても明らかにした。次に、同条件による連続励起特性との比較から、共鳴Q値が8倍以上、ライトシフトが1/3以下に改善できることが示された。また、従来法である音響光学変調器との比較実験からも、ほぼ同様の性能が得られ、本提案法の有効性が明らかになった。

第5章では、高次高調波を用いたRF回路の省電力化について述べた。消費電力は小型原子発振器に求められる重要な指標であるため、電力消費全体の半分以上を占めるRF回路に対して高次高調波励起による省電力化策を提案した。本提案法により、RF回路の電力を1/3程度まで削減可能である。しかし、高次高調波の生成効率低下によりSN比が低下する事も分かった。そこで、パルス励起を併用することにより特性劣化を防ぎ、性能指数2.3倍、ライトシフト1/3以下と良好な特性が得られ、高安定化と省電力化を同時に達成可能な事を明らかにした。

第6章では、直交偏光子法について述べた。SN比改善のため、N（ノイズ）に相当する背景光低減を目指し、CPT共鳴の磁気光学効果に着目した直交偏光子法を提案した。CPT共鳴の二色性、旋光性の解析および実験から、本提案法によりSN比90%が達成可能であり、性能指数は従来法と比べ54倍向上し、良好な短期安定度が期待できることを明らかにした。

3 審査の結果

本論文では、小型化に適した CPT 原子発振器の特性改善を目指し、パルス励起法に関する新たな数値解析法の考案、小型に適したレーザパルス化手法、省電力動作法、共鳴 SN 比改善法について多角的側面から検討が行われた。パルス励起の数値解析法により、これまで実験的にしか得られていなかった CPT 共鳴の各種特性を詳細に計算可能となり、実用化に伴うパラメータ設定についての有用な知見を得た。レーザパルス化および省電力化手法により、これまで困難と思われてきた超小型原子発振器へのパルス励起適応が可能であることを示した。さらに、SN 改善法により短期安定度を大幅に改善できる事を明らかにした。以上の提案法は、複合的に適用することが可能であり、従来得られなかった優れた性能を小型原子発振器において実現できる可能性を示唆している。したがって、本研究で得られた成果は、高性能な超小型原子発振器の実現へ向けて多大に貢献する十分価値のあるものと認められる。本論文の内容は、すでに国内外で開催された会議で口頭発表されるとともに、厳正な査読を経て国内外の権威ある学術雑誌に掲載され、一般に公開されている。よって本論文は、博士（工学）の学位を授与するに値するものと判定した。

4 最終試験の結果

本学の学位規定、および電気電子工学専攻の申し合わせに従って論文審査会を開催し、専門分野に関する諮問を行うと共に、論文内容に関して慎重に審査を行った。さらに、公開の論文発表会を開催して、学内外から多数の出席者を得て多角的な質疑・討論を行った。また、審査委員全員による口頭の試験を実施した。以上の結果を総合的に考慮し、慎重に審査した結果、合格と判定した。