

博士(工学) 久留賢治

学位論文題名

小型光ポンピング方式セシウム原子発振器の  
設計法に関する研究

学位論文内容の要旨

近年、広帯域デジタル伝送システムにおける時分割多重化方式は、従来の非同期クロックを用いるスタッフ多重方式から、網同期システムから供給される同期クロックを用いる同期多重方式に移行しつつある。同期多重方式においては、多重化された高速信号内における任意の低速信号を直接識別することができるので、信号の多重・分離や、多重化された信号相互のクロスコネクトといった信号処理を高度化することができる。

現行の網同期システムでは、マスタノードの Cs 原子発振器で発生させた基準クロック周波数を、ノード間に設けられたクロック分配リンクを多段にして、全国のスレーブノードに分配する従属同期方式が採用されている。従属同期方式では、リンクの段数が増加すると、末端のノードにおけるクロックの同期品質が劣化するので、リンクの段数は制限される。また、クロック分配網を構築する場合、あるいは障害によってクロック分配経路を切り替える場合、リンクの段数が制限値を超えたり、相互従属によってループを形成する部分が発生したりしないように、クロック分配網を管理する必要がある。今後、同期化された通信網の拡大に伴い、これらの問題点が顕著になることが予想される。超高安定・高精度発振器を用いた独立同期方式を採用すれば、クロック分配網の管理を要しない、柔軟な網同期システムを実現することができる。

光ポンピング方式 Cs 原子発振器は、従来の偏向磁界方式 Cs 原子発振器よりも実効的な原子ビーム強度が大きく、また周波数シフト要因が少ないので、超高安定・高精度発振器として有望である。現在のところ、大型の 1 次周波数標準器としての設計法についてはいくつかの標準機関から報告がなされているが、小型の実用周波数標準器に関するものは少ない。本論文では、実用周波数標準器としての小型光ポンピング方式 Cs 原子発振器の設計法を

明らかにすることを目的とする。

第2章では、研究を進めるために必要な、光ポンピング方式 Cs 原子発振器の動作原理について述べた。

第3章では、光ポンプ及び共鳴検出に用いられるレーザ光の発振スペクトル線幅が光ポンピング方式 Cs 原子発振器の周波数短期安定度に与える影響について解析を行った。この解析の結果、レーザ光の雑音を考慮すると、2 周波ポンプ・ポンピング遷移の組み合わせによる構成が最も優れた周波数短期安定度を与えることが明らかになった。

第4章では、光ポンピング方式 Cs 原子発振器の周波数確度を劣化させる3種類の周波数シフト要因について検討を行った。まず、位相差シフトについて、双方向原子ビーム管を用いた実時間自動補正法を提案した。また、レーザ光と原子との相互作用に伴って発生する螢光による光シフトの解析法を明らかにした。さらに、ポンプ光の偏波状態と近接遷移による周波数シフトの関係を明らかにした。

第5章では試作した光ポンピング方式 Cs 原子発振器の概要について報告した。特に、原子ビームコリメータについて詳細な検討を行い、チャネル壁面の温度上昇が原子ビーム広がりの原因であることを明らかにした。また、この試作機を用いた Ramsey 共鳴スペクトルの観測を行い、Ramsey 共鳴線幅 650 Hz、雑音帯域幅 1 Hzあたりの S/N 比として 50 dB の値を得た。D B R レーザ等の高コヒーレント光源を用いれば、S/N 比を改善して現行の実用周波数標準器より 1 衡程度高安定化できると予想される。

# 学位論文審査の要旨

主査 教授 三島瑛人  
副査 教授 伊藤精彦  
副査 教授 大場良次

## 学位論文題名

### 小型光ポンピング方式セシウム原子発振器の 設計法に関する研究

近年、広帯域デジタル伝送システムにおいては、超高安定・高精度周波数標準器を用いた独立同期方式を採用することにより、柔軟な網同期システムを構築することが求められている。そのためには、超高安定・高精度の実用周波数標準器が必要である。

従来から一次標準器として用いられている、超高安定・高精度の発振器は、磁界により原子状態準備および共鳴検出を行うCs原子発振器である。しかし、これは装置構成が非常に大規模で長時間の連続運用が困難であり、実用周波数標準器としては不適当である。

本論文は小型の実用周波数標準器として期待される、レーザ光により原子状態準備および共鳴検出を行うCs原子発振器の設計法を以下の点で明らかにしている。

- ①光ポンピング及び共鳴検出に用いられるレーザ光の発振スペクトル線幅が周波数短期安定度に与える影響を解析している。また、2周波ポンピングとポンピング遷移の組み合わせによる構成が最も優れた周波数短期安定度を与えることを理論的に明らかにしている。
- ②マイクロ波の位相差による周波数シフトについて、双方向原子ビーム管を用いた実時間自動補正法を提案している。また、Cs原子からの蛍光による周波数シフトの解析法や、ポンピング光の偏波状態と近接遷移による周波数シフトの関係を明らかにしている。これらの理論解析により周波数精度の劣化を最小限にする設計法が示された。
- ③小型光ポンピング方式Cs原子発振器を試作し、原子ビーム広がりの原因が原子ビームコリメータのチャネル壁面の温度上昇によるものであることを明らかにし、熱伝導率の悪い材料を用いることでこの問題を解決している。また、Ramsey共鳴線幅650Hz、雑音帯域幅1Hz当たりのSN比として50dBの値を得ている。これは現行の実用周波数標準器とほぼ同程度の特性に相当する。DBRレーザ等のよりスペクトル線幅の狭いポンピング光源を用いることと現行の実用周波数標準器より1桁程度高安定化が可能であるとの見通しを得ている。

これを要するに著者は、超高安定・高精度な実用周波数標準器として期待される小型光ポンピング方式Cs原子発振器について、周波数安定度や周波数精度を新たに理論解析するとともに試作・検討を行い、その設計法に新知見を得たもので、電子物理工学、情報伝送

工学，光計測工学，情報ネットワーク工学に貢献するところ大である。

よって著者は北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。