光ポンピング Cs ビーム周波数標準器の試作

正員 古賀保喜 (計量研)
 非会員 大嶋新一 (計量研)
 非会員 中段和宏 (計量研)
 非会員 池上健 (計量研)

1. まえがき

1940年代末に出現した Cs ビーム周波数標準器 (磁気偏向型, 以後従来型と呼ぶ) は, 多くの標準研究所で研究が行われ, その精度は, ほぼ 10 年に 1 桁の割で向上してきた。その間, 1967 年には ^{133}Cs 原子の遷移による秒の定義改訂, 1971 年には国際原子時 (TAI) の採択, などが国際度量衡総会で行われ, その重要性はますます増大している。しかし, 近年, その精度が 10^{-13} 台から 10^{-14} 台に入るようになって, その改善の速さが鈍ってきた。1987 年の国際度量衡総会では, 一次周波数標準器の誤差要因についての研究促進を決議している。現在, この方式の標準器の精度を制限する要因として考えられているものに, Majorana 遷移⁽¹⁾, 原子ビームの反転における軌道の不一致, 空洞共振器の不完全さ, などがある。特に, 初めの二つは, 評価が容易ではない。

これらの問題点を解決する新技術⁽²⁾がいくつか考えられていて, その一つに光ポンピング法がある。これは偏向磁石による空間的な状態選択の代わりに, 原子の共鳴光による光ポンピングを利用するもので, 原子ビームは直線状となり軌道の再現性が向上する, 軌道に沿った内部磁場の一様性がよくなるので Majorana 遷移の防止になる, などの利点があると考えられている。光ポンピング原子ビーム周波数標準器の着想は, 1950 年⁽³⁾ とかなり古いが, 1970 年代になって, 半導体レーザの実用化が進むと共にその実現性ができ

た。これまでに, フランスのパリ南大学において, J. L. Picqué⁽⁴⁾, M. Arditi⁽⁵⁾, P. Cerez など⁽⁶⁾, G. Avila など⁽⁷⁾⁽⁸⁾ の共鳴長 21.5 cm の装置による原子ビームの光ポンピングの基礎実験, および, アメリカ国立標準局 (NBS) における A. Derbyshire ら⁽⁹⁾ が商用原子時計の原子ビーム管を改造して行った予備実験があるのみで, いずれも短い共振器によるものである。しかし, Cs ビーム周波数標準器で利用されるラムゼイ共鳴方式においては, その共振器長に比例して共鳴線の鋭さが増すことから, 標準器としての性能を調べるためには光ポンピング方式による標準器においてもある程度の長さの共振器を使用することが必要である。

本論文は, 計量研究所において, 一次標準器としての問題点を実験的に洗いだし標準器として完成させるために試作した共振器長約 1 m の光ポンピング Cs ビーム周波数標準器に関するもので, その構成, 観測した共鳴信号およびその特性, 標準器として動作させたときの周波数安定度などについて述べ, これらの実験を通じて, これまでにわかった本方式の問題点について検討する。

2. 光ポンピング Cs ビーム周波数標準器の原理

標準として使用する遷移は, 光ポンピング方式においても従来型と同じで, 基底状態の超微細構造の ($F=4, m_F=0$) $\leftrightarrow$ ($F=3, m_F=0$) 遷移, すなわちクロック遷移と呼ばれるものである。図 1 は, 本方式の原理図である。Cs ビームは, Cs 炉から射出し Cs 原子ビーム管中を直線状に飛び, レーザ 1 およびレーザ 2 からの光と, また, 空洞共振器中でマイクロ波と相互作用を行う。図 2 は, Cs 原子の D_2 線に関するエネルギー準位図で, 超微細準位の量子数は基底状態につ

Construction of an Optically Pumped Cesium Beam Frequency Standard. By Yasuki Koga, Member, Shinichi Ohshima, Non-member, Yasuhiro Nakadan Non-member and Takeshi Ikegami, Non-member (National Research Laboratory of Metrology).

古賀保喜: 正員, 工業技術院計量研究所
 大嶋新一: 非会員, 工業技術院計量研究所
 中段和宏: 非会員, 工業技術院計量研究所
 池上健: 非会員, 工業技術院計量研究所

図1 光ポンピングCs周波数標準器の原理図
(レーザ3は2周波励起の場合に追加する)

Fig. 1. Schematic of an optically pumped cesium beam frequency standard. (Laser 3 is employed in two frequency pumping.)

いては F , 励起状態については F' で示した。光ポンピングは、この D_2 光と同じ波長を持つレーザ光でCs原子を励起することにより、その基底状態の二つの超微細単位の原子分布に差を生じさせることである。常温では、Cs原子は基底状態、 $F=3$ と $F=4$ 準位に均等に分布している。いま、図1のレーザ1, 2の波長を $F=4 \rightarrow F'=4$ に同調させたとすれば、原子はまずレーザ1の光を受けて $F=4$ より $F'=4$ へ励起され、すぐに自然放出して $F=4, 3$ へ落ちるが、 $F=3$ が励起を受けないので、このサイクルを繰り返すと、 $F=4$ にあった原子は $F=3$ に次々と溜ることになる。このポンピングは、セシウム原子の励起状態の寿命が30 nsと極めて短いので、短時間内に100%近く達成される。 $F=3$ になった原子は、次に、空洞共振器中でマイクロ波遷移を行って $F=4$ となり、再びレーザ2からの光により、同様の励起を受ける。従って、マイクロ波遷移をレーザ2により生じる蛍光により検出することができる。この信号を使用して、マイクロ波の周波数源である水晶発振器を制御する。この光ポンピング・光検出は、レーザの波長、偏光の種類を選択とその組合せにより、種々の方法が可能であるが、本方式で最も効率が良いと思われるものは、 $F=4 \rightarrow F'=4$ (σ 偏光) と $F=3 \rightarrow F'=3$ (π 偏光) の2周波による光ポンピング⁽¹⁰⁾と、 $F=4 \rightarrow F'=5$ 光によるサイクリング遷移検出⁽⁴⁾の組合せであろう。

光ポンピング方式の有利な点として、

- (1) 原子の利用効率が高い。
- (2) 隣接遷移線を小さくできるので、そのプリング効果を少なくできる。

図2 Cs原子の D_2 線に関するエネルギー単位

Fig. 2. Energy levels of ^{133}Cs associated with D_2 transition.

(3) 原子ビームが直線状であるので、原子の速度分布がマクスウェル分布となり、2次ドップラシフト量の補正精度が高く、また、ビームを反転した場合の軌道の再現性がよい。

(4) 原子ビームの軌道に沿った静磁場の一様性を良くできるので、Majorana 遷移を防止できる。

などがある。一方、不利な点と考えられるものに、

(5) 原子ビームからの蛍光や導入したレーザ光の散乱により生じた迷光が、原子とマイクロ波の相互作用領域に入って、光シフトを生じる。があり、その大ききの試算が行われている⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。

3. 試作装置の概要

(3.1) 原子ビーム管 計量研究所では、これまでに磁気偏向型Cs周波数標準器の研究が続けてきたが⁽¹³⁾、光ポンピング型原子ビーム管の設計にあたり、両方式の性能比較を容易にするために、ラムゼイ空洞共振器の間隔を従来のものと同じく0.96 mとし、その他の構成部品についてもなるべく互換性をもたせることを考えた。図3に、その概要を示す。装置は左右対称になっていて、磁気シールドケースはパーマロイ製で、最外側直径360 mm、最内側直径300 mmの三重とし、円周方向と長さ方向の消磁ができるように消磁コイルを付けた。空洞共振器の原子ビーム用窓は3.2 mm×3.2 mmで、カットオフ導波管付きである。蛍光の検出器は磁気シールドケースの内側に設置するため非磁性である必要上、浜松ホトニクス株式会社のPINフォトダイオードS2641を使用し、球面反射鏡により全立体角の1/10の蛍光をこれに集めるように

図 3 試作装置の概要

Fig. 3. Outline of the instrument.

図 4 原子ビーム管の断面図

Fig. 4. Cross-section scale drawing of the atomic beam tube.

図 5 周波数安定化半導体レーザ光源の
ブロック図

LD:半導体レーザ, GC₁, GC₂:セシウムセル, PD₁, PD₂: PIN 光検出器, D. Amp.: 差動増幅器, PSD: 位相弁別器, C. Amp.: 電流増幅器, 記載のないものは緩衝増幅器

Fig. 5. Block diagram of the frequency stabilized laser diode.

LD: laser diode, GC₁, GC₂: cesium vapour cell, PD₁, PD₂: PIN photo detector, D. Amp: differential amplifier, PSD: phase sensitive detector, C. Amp: current amplifier, Others are buffer amplifiers

した。真空槽は、直径 400 mm、長さ約 2.5 m のステンレス製で、イオンポンプ (400 l/s) 2 台を付けた。ビーム反転の機能をもたせるため、Cs 炉をその両端にそれぞれ 1 個ずつ設置すると共に、原子ビームの水平方向の位置を真空槽の外から調整できるようにした。また、真空槽には、レーザ光導入用真空窓 8 個を図 3 のように配置した。図 4 は、原子ビーム管の断面を示すもので、4 本の燐青銅製支持棒と 12 枚のアルミ板で構成する支持枠を設け、これに、C 磁場コイル、空洞共振器、ゼーマンコイル 8 個、蛍光検出器などを取り付けた。内部は、レーザ光の散乱による迷光を防止するために一部分黒色アルマイト処理を行った。真空槽への導入は、この支持枠に付けた車輪 6 個により行った。

(3・2) 光ポンピング用周波数安定化光源 光源として、日立製作所製 HL 8311 E 型 GaAlAs 半導体レーザを使用した。その周波数安定化の方式は Yabuzaki らが行った方式⁽¹⁴⁾に準じたもので、図 5 に示すように、二段のベルチエ素子による温度の安定化と、Cs ガスセルの吸収線へのレーザ周波数のロックの併用である。その動作温度と注入電流の大きさは、レーザのモードホップの影響のないところで Cs の吸収線が観測できるように設定した。動作温度の安定度は、図 6 に示すように、 ± 0.1 mK 程度になっている。吸収線の利用方法は、Yabuzaki らが 1 個の Cs ガスセルを使用しているのに対して、ここでは同一寸法の 2 個の Cs ガスセル GC₁, GC₂ を使用し、それぞれ飽和吸収線および線形吸収線を独立に検出し、電子回路でその差をとることにより、飽和吸収線を有効に利用できるようにした⁽¹⁵⁾。このため、各セルに加えるレーザ光の強度は同じになるようにに調整し両者の線形吸収線の形状に差を生じないようにした。この光源のスペクトル線幅は 10~15 MHz で、有効出力は数 mW、光ビームの断面は約 2 mm×4 mm の楕円である。

〈3・3〉 励振および制御用電子装置 励振用マイクロ波の発生、およびその周波数源である水晶発振器を制御するための電子装置は、図7に示すような構成になっていて、基本的には NRLM-II に使用した装置⁽¹⁶⁾と同じである。2台の電圧制御型水晶発振器は、VCX 01 が標準周波数出力用で、VCX 02 が励振周波

図 6 動作温度の安定性

Fig. 6. Temperature stability of the laser mount.

図 7 励振・制御用電子装置のブロック図
VCXO: 電圧制御型水晶発振器, P. S. D.: 位相弁別器,
X 9, X 204: 周波数乗倍器とその次数

Fig. 7. Block diagram of the electronics for microwave excitation and servo control.

VCXO: voltage controlled crystal oscillator, P. S. D.: phase sensitive detector, X 9, X 204: frequency multiplier and its order.

図 8 共鳴信号観測の場合の配置

Fig. 8. Arrangement for the observation of resonance signal.

数用である。両者は PLL で結ばれていて、9 GHz における周波数の差は約 12.63 MHz で周波数合成器により 1 mHz の分解能で設定できるようになっている。Cs 共鳴線による水晶発振器の制御は、励振マイクロ波の矩形波周波数変調と共鳴信号のデジタル処理を組合せた方式である。変調の周期は 2.7 s, 変調幅は通常共鳴線幅と同程度で約 100 Hz, パーソナルコンピュータにより周波数合成器の発生周波数を 1.35 s ごとに高・低に切り替え、PLL を介して 9 GHz に周波数変調をかけている。これにより発生される二つの励振周波数で Cs の共鳴周波数をはさみ、それぞれに対応した信号出力レベルの差について第三階の差分と積分計算を行い、D/A 変換して得た制御信号を VCXO 1 に帰還している。

また、ラムゼイ共鳴線などを観測する場合は、制御ループを切り、図 8 のように組替え、周波数合成器の

発生周波数をパーソナルコンピュータで掃引することにより励振マイクロ波の周波数掃引を行い、原子ビーム管の光検出器からの出力信号を記録させた。

4. 実験と考察

実験は、Cs 炉の温度 120°C, C 磁場の強さ約 7.9 A/m, 真空度 4×10^{-6} Pa, 室温 $23 \pm 1^\circ\text{C}$ の条件で、励振マイクロ波の強度をラビ共鳴線の頂点がほぼ平になるところで一定にして行った。

〈4.1〉 Cs ビームからの D_2 蛍光線の観測

レーザ 1 の周波数を $F=3 \rightarrow F'=4, 3, 2$ の 3 本の線が分離して観測されていて、同図 (b) のガスセルによる飽和吸収スペクトルが 3 本のクロスオーバーを含むのに比べて単純である。その線幅は約 20 MHz である。また、 $F=3 \rightarrow F'=2$ の励起は σ 偏光を用いたために光ポンピングを起こさず、飽和効果が小さくサイクリング効果も加わるので、原子ビームでは蛍光が大きいに対して、ガスセルでは飽和吸収スペクトルは小さくなっている。同様に、 $F=4 \rightarrow F'=3, 2$ の 3 本の遷移線も観測された。

〈4.2〉 ラムゼイ共鳴信号の観測 (1 周波数励起)

図 8 に示す配置により共鳴信号の観測を行った。最初の観測実験として、レーザ光源は、ポンピング側も

(a) 原子ビームからの蛍光スペクトル
(b) ガスセルの飽和吸収スペクトル

図 9 Cs D_2 線 ($F=3 \rightarrow F'=4, 3, 2$)

Fig. 9. D_2 line of ^{133}Cs ($F=3 \rightarrow F'=4, 3, 2$).

(a) ラビ・ラムゼイ共鳴線, (b) ラムゼイ共鳴線

図 10 1 周波励起によるマイクロ波共鳴線

Fig. 10. Microwave resonances (one laser pumping).

共鳴検出側も、 $F=4 \rightarrow F'=4$ に同調させた σ 偏光を使用した。光パワーは、ポンピング側約 1 mW、検出側約 0.14 mW である。本装置の場合は、C 磁場が原子ビームに対して水平方向で直角にかけてあるので、これらのレーザー光は、原子ビーム管の横側の窓から C 磁場と同じ方向に入射させた。図 10(a) は、マイクロ波周波数を広く掃引して、基底状態の超微細単位間のゼーマン副単位による 7 本の σ 遷移を観測したものである。ここで、各ラビ共鳴線の中心にあるラムゼイ共鳴線は、周波数掃引がデジタル的に行われるのでその一部だけが記録されている。また、図 10(b) は、その中心のクロック遷移 $F=3, m_F=0 \rightarrow F=4, m_F=0$ のラムゼイ共鳴信号のみを拡大して観測したものである。原子ビームの速度分布が、ほぼ、マックスウェル分布と考えられるので⁽⁷⁾、共鳴線の形状には速度平均が広い範囲で行われている特徴が見られる。その線幅は約 113 Hz である。

〈4.3〉 ラムゼイ共鳴線の観測 (2 周波数励起)

次に、ポンピング側に、 $F=3 \rightarrow F'=3$ に同調した π 偏光のレーザー (光パワー約 0.6 mW) を追加して 2 周波によるポンピングを行った。 π 偏光の条件を満たすために、追加したレーザー光は原子ビーム管の上側の窓から C 磁場に対して直交するような入射させ、その偏光面を光の電場の方向が C 磁場の方向と平行になるようにした。図 11(a), (b) は、この方法により観測された共鳴信号である。2 周波励起においては、 σ, π の 2 種類の励起の組合せであることと、この場合 $F=3, m_F=0 \rightarrow F'=3, m_F=0$ が禁制遷移であることから、

(a) ラビ・ラムゼイ共鳴線, (b) ラムゼイ共鳴線

図 11 2 周波励起によるマイクロ波共鳴線

Fig. 11. Microwave resonances (two laser pumping).

$F=4$ 準位の原子および $F=3, m_F \neq 0$ 準位の原子が、 $F=3, m_F=0$ 準位に集中するように光ポンピングが行われる。従って、図 11(a) のように、 $F=3, m_F=0 \rightarrow F=4, m_F=0$ 遷移線のみが大きくなり、他の線はほとんど消えている。また、信号の S/N は約 3 倍に向上した。また、その線幅は約 114 Hz で 1 周波励起の場合のものとはほとんど同じである。2 周波励起で得られた各線を合算した大きさは、1 周波励起の場合の各線を単純に合算したものより約 20% 小さい。その原因については、〈4.6〉で考察する。残った隣接線 ($F=3, m_F=\pm 1 \rightarrow F=4, m_F=\pm 1$) の大きさは、2 本のレーザー光が Cs ビームと交差する位置を相互に調整することにより小さくできることがわかった。

〈4.4〉 サイクリング遷移による検出 検出側のレーザー光を $F=3 \rightarrow F'=2(\sigma)$ や $F=4 \rightarrow F'=5$ に同調させると、励起された原子は、それぞれもとの準位のみに帰ってくるので、同じ励起が何回も繰り返されることになる。これはサイクリング遷移と呼ばれていて、蛍光信号の強度はレーザー光の強度に比例して大きくなると共に、原子ビーム中の低速の原子からの信号が強調されるので、ラムゼイ共鳴線幅が狭くなる特徴がある。実際に $F=4 \rightarrow F'=5$ で検出した結果、本装置ではその線幅は約 10% 程度狭くなったが、信号の S/N は少し低下した。

〈4.5〉 ゼーマン共鳴線の観測 内部静磁場の一

(a) 単一コイルによる共鳴線, (b) 2個のコイルによるラムゼイ共鳴線 (同相), (c) 同 (逆相)

図 12 ゼーマン共鳴線

Fig. 12. Zeeman resonances.

様性測定のために、ゼーマン副準位間の共鳴線の検出実験を行った。レーザ 1 は $F=4 \rightarrow F'=5$, レーザ 2 は $F=4 \rightarrow F'=4$ に同調させそれぞれ σ^+ 偏光にして使用し, $F=4$, $m_F=4$ へ原子をポンピングし, ゼーマンコイルを励振して $F=4$ の $m_F=4 \rightarrow m_F=3$ の遷移を観測できることを確かめた。図 12 はその観測結果である。同図(a)は、単一コイルによるものである。(b), (c)は、2個のコイルによりラムゼイ共鳴を観測したもので、それぞれコイルの接続が同相、逆相の場合である。コイルの間隔は約 10 cm である。これらの共鳴線の形状は、磁気偏向型のものとはほぼ同じであるが、その S/N は、本装置のマイクロ波共鳴線のものより良い。その原因は、ポンピング光が σ^+ 偏光であり、その反射光がレーザへ戻らないためと思われる。等間隔に設置した 8 個のゼーマンコイルで観測したゼーマン共鳴線の強度と形状はほとんど同じで、その中心周波数の差から求めた C 磁場の不均一性は $\pm 0.3\%$ 以内であった。

〈4・6〉 共鳴線の形状とその S/N の考察 1 周波励起の場合、7 本のマイクロ波共鳴線は従来型のものとはほぼ同じ形状であった。ラムゼイ共鳴線は、従来型のものが磁気偏向により速度選択を受け、多くのサイドローブを持つのに対して、マックスウエル分布を持つ本方式においては共鳴線の速度平均が広く行われるので、サイドローブの著しい減衰がみられる。

2 周波励起の場合は、共鳴線はクロック遷移への集中が顕著である。1 周波励起および従来型の場合に隣接線がクロック遷移とはほぼ同じ強度であるのに対し

て、2 周波励起の場合は約 1/8 に減少している。このことは、隣接ラビ共鳴線の裾野によるプリングを同程度に減少させることができると考えられる。

この線の大きさは、1 周波励起の場合の各線を単純に合算したものより約 20% 小さいのみであるが、この減少の原因としては、 π 偏光の偏光率が低い、C 磁場との平行度が不完全、レーザのスペクトル幅が広いことと power broadening により $F=3 \rightarrow F'=2, 4$ の励起を生じている、などが考えられる。 π 偏光の光パワーについては、共鳴線幅が 1 周波励起の場合とほぼ同じであることから、同程度の速さの原子まで十分に励起を行っているものと考えられるので、光パワーの不足が原因とは考えにくい。

信号の S/N は、まだ半導体レーザの周波数ノイズが支配的である。特にサイクリング検出の場合は、レーザのノイズを減少させなければ、S/N の向上は望めない。これは、Avila ら⁷⁾の結果と同じである。

〈4・7〉 周波数安定度の測定 図 7 に示した構成で水晶発振器をロックし、その 5 MHz の出力周波数と、参照用発振器との間の相互周波数安定度を測定した。この測定は、前述の共鳴線の観測実験の後、一度原子ビーム管を開き、空洞共振器および Cs 炉を所定のものと交換すると共に、シールドケースを補修した後に行った。原子ビーム管の動作条件は、前回のものと同一とし、信号検出にはサイクリング遷移を利用した。信号の S/N は共鳴線の観測実験のときより多少低下した。図 13 にその結果を示す。 $\tau \leq 10$ s では、参照発振器として水晶発振器 (5.0068 MHz) を使用し、コンピューティングカウンタで測定した。 $\tau \geq 10$ s

図 13 周波数安定度

- 1 周波励起で参照発振器は水晶発振器
- 1 周波励起で参照発振器は Cs 原子時計
- + 2 周波励起で参照発振器は Cs 原子時計

Fig. 13. Frequency stability.

- One laser pumping, referred to a highly stable crystal oscillator.
- One laser pumping, referred to an HP Cs clock.
- + Two laser pumping, referred to an HP Cs clock.

では, Cs 原子時計 (HP 5061 A 004 付) との間の位相比較を行い, その出力信号を A/D 変換して, パーソナルコンピュータで処理して求めた。図中の○および●は1周波励起の場合のもので, +は2周波励起の場合である。周波数安定度 σ_ν は, $\tau \leq 3$ s では $1.3 \times 10^{-11} \tau^{-1}$ で, 参照用水晶発振器の周波数安定度はこれより良いので, 試作装置のものが現れている。 $\tau \geq 10$ s では, 1周波励起の場合が $1.6 \times 10^{-11} \tau^{-1/2}$, 2周波励起の場合が $1.3 \times 10^{-11} \tau^{-1/2}$ である。参照用原子時計の周波数安定度は, $0.8 \times 10^{-11} \tau^{-1/2}$ とこれより良いので, いずれも試作装置の周波数安定度が得られていると思われる。なお, 変調の周期が 2.7 s であるので, $\tau < 3$ s では水晶発振器独自の τ^{-1} の特性が現れている。

5. あとがき

試作した光ポンピング Cs 周波数標準器の構成と予備実験について述べた。今回の実験は, 真空におけるガス出しも兼ねたものであったが, 装置としての基本動作を確認できると共に, 改善への手がかりもいくつか得られた。これらをまとめると次のようになる。

(1) レーザの光パワーは, 約 1 mW で十分ポンピングが行われる。また, 1周波励起でも2周波励起でも, ラムゼイ共鳴線の幅は, ほぼ, 113 Hz で同じであった。(NRLM-II では約 140 Hz である。)

(2) 2周波励起において残った隣接線の強度は, 2本のレーザビーム (σ, π) が Cs ビームと交差する位置を相互にずらすことにより制御できることがわかった。

(3) ゼーマン共鳴線は, よい S/N で検出できた。

(4) 周波数安定度は, $1.3 \times 10^{-11} \tau^{-1/2}$ が得られた。

(5) 現在の S/N は, 光源のレーザによるノイズできまっている。これは, 単なる戻り光によるものと, レーザ自体の周波数変動によるものであって, いずれも対策が必要である。特に, サイクリング遷移による検出の場合は重要である。

終わりに, 本研究の推進にあたっては前計量研究所量子部長森村正直氏に, 半導体レーザの安定化については京都大学藪崎努助教授および東京工業大学大津元一助教授に, 原子ビーム管の製作については, 大成産

業株式会社堀田貢社長にお世話になりました。厚くお礼を申し上げます。(昭和 63 年 2 月 25 日受付)

文 献

- (1) A. Bauch and T. Heindorff: "Experimental Studies on Majorana Transitions in a Cs Atomic Beam Frequency Standard", *Proc. 39th ASFC*, 8 (1985)
- (2) 大嶋新一: 「Cs 原子周波数標準への新技術の応用」, 計量研究所報告, **34**, No. 2, 18 (1985)
- (3) A. Kastler: "Quelques Suggestions Concernant la Production Optique et la Détection Optique d'une Inégalité de Population des Niveaux de Quantification Spatiale des Atomes, Application à l'Expérience de Stern et Gerlach et à la Résonance Magnétique". *J. Phys. Radium*, **11**, 255 (1950).
- (4) J. L. Picqué: "Hyperfine Optical Pumping of a Cesium Atomic Beam, and Applications", *Metrologia* **13**, 115 (1977)
- (5) M. Arditi: "Microwave Ramsey Pattern in a Laser Pumped Cesium Beam, Application to Velocity Distribution and 2nd Order Doppler Shift in Frequency Standard", *J. de Physique*, **42**, 12, C-8, 261 (1981)
- (6) P. Cérez, G. Avila, E. de Clercq, M. de Labachellerie and M. Tetu: "Results on a Laser Diode Optical Pumped Cesium Beam", *Proc. 38th ASFC*, 452 (1984)
- (7) G. Avila, E. de Clercq, M. de Labachellerie and P. Cérez: "Microwave Ramsey Resonances from a Laser Diode Optically Pumped Cesium Beam Resonator", *IEEE Trans. Instr. Meas.*, **IM-34**, 2, 139 (1985)
- (8) G. Avila, V. Giordano, V. Candelier, E. de Clercq, G. Theobald and P. Cérez: "State Selection in a Cesium Beam by Laser-Diode Optical Pumping", *Phys. Rev. A*, **36**-8, 3719 (1987)
- (9) A. Derbyshire, R. E. Drullinger, M. Feldman, D. J. Glaze, D. Hilliard, D. A. Howe, L. L. Lewis and J. H. Shirley: "Optical Pumped Small Cesium Beam Standards; A Status Report", *Proc. 39th ASFC*, 18 (1985)
- (10) W. Xinxin, X. Yueting, T. Kunyu, Y. Shutong, X. Linzhen and W. Yiqiu: "Some Aspects in the Design of the Optically Pumped Cesium Beam Tube", *Int. Symp. Time and Frequency, China* (1983)
- (11) A. Brille: "Evaluation of the Light Shifts in an Optically Pumped Cesium Beam Frequency Standard", *Metrologia* **17**, 147 (1981)
- (12) J. Shirley: "Fluorescent Light Shift in Optically Pumped Cesium Standards", *Proc. ASFC*, 22 (1985)
- (13) Y. Nakadan and Y. Koga: "Recent Progress in Cs Beam Frequency Standards at the NRLM", *IEEE Trans. Instr. Meas.*, **IM-34**, 133 (1985)
- (14) T. Yabuzaki, A. Ibaragi, H. Hori, M. Kitano and T. Ogawa: "Frequency-Locking of a GaAlAs Laser to a Doppler-Free Spectrum of the Cs-D₂ line", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **20**, L 451 (1981)
- (15) S. Ohshima, Y. Nakadan and Y. Koga: "Spectral Width of Saturated Absorption Spectra of Cs with a Laser Diode", *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-23**, 5, 473 (1987)
- (16) Y. Nakadan and Y. Koga: "A Squarewave F.M. Servo System with a Digital Signal Processing for Cesium Frequency Standards", *Proc. 36th ASFC*, 223 (1982)