

最近の技術から

実用型 633 nm よう素安定化 He-Ne レーザーの現状

岩崎 茂雄

計量研究所 〒305 つくば市梅園 1-1-4

1. はじめに

ものの量を計ることはすべての基礎であり、その計量単位が確立していなくては正しい測定は望めない。長さの単位 (メートル) は国際単位系 (SI) の基本単位の一つであり、「メートルは、1 秒の 299 792 458 分の 1 の時間に光が真空中を伝わる行程の長さである」と定義されている¹⁾。

633 nm よう素安定化 He-Ne レーザー (以下、よう素安定化レーザーとよぶ) は、メートルを実現できるレーザーの一つとして国際度量衡委員会 (CIPM) から勧告され、各国の標準研究所で波長標準の確立と改善のために研究されてきた。そのため実用計測には使いにくい点もあったが、最近実用計測に適する、操作性に優れた可搬形よう素安定化レーザーシステムがいくつか発表されている。ここでは勧告に示された仕様と適切と認められる操作方法とともに、レーザーシステムの概略を紹介する。

2. 633 nm 簡易安定化 He-Ne レーザーの問題点

現在一般に干渉光源に使われている、633 nm 簡易安定化 He-Ne レーザー (以下、簡易安定化レーザーとよぶ) を用いての正確なメートルの実現は困難である。その問題点を考えてみる。

簡易安定化レーザーは、安定化方式や利得曲線の形の違いによって発振周波数に特有のかたよりをもつ。ラムディップ法、ゼーマン法によるものは、概して利得曲線の中心付近に位置し、2モード法によるものは、利得曲線のどちらかの端に位置するものが多い。利得曲線の形は、レーザー管に封入する混合ガスの圧力、混合比、同位元素の種類や励起電流によって異なるため、再現性や繰返し性の精度はよくない。同位元素シフトはとくに大きい。形式の異なる約 10 種類の簡易安定化レーザーの再現性は、われわれの測定した範囲内では約 570 MHz であった。これは発振周波数の相対値で 1.2×10^{-6} に

相当する。これらのレーザーは、発振周波数の温度依存性も大きく、使用に当たっては注意が必要である。

3. よう素安定化レーザー

よう素安定化レーザーの安定化基準は、よう素分子の飽和吸収スペクトルである。そのため、発振周波数の安定性が高いだけでなく正確さ、再現性、繰返し性も優れている。しかし各種パラメータによって周波数シフトが生じるため、 10^{-9} を超える高精度のメートルを実現するためには操作方法に注意が必要である。CIPM から勧告されている仕様および操作方法は、次のとおりである¹⁾。

1) 吸収分子¹²⁷I₂, 遷移 11-5, R (127), 成分 i

2) 共振器内部による素セルを使い、以下の条件に従う安定化 He-Ne レーザーによる。

(1) コールドフィンガー温度が $15 \pm 1^\circ\text{C}$ で、セルの壁温が $16 \sim 50^\circ\text{C}$ の間

(2) 共振器内一方向平均放射束 $15 \pm 10 \text{ mW}$

(3) 周波数変調幅 (ピーク間) $6 \pm 1 \text{ MHz}$

これらの仕様、操作方法を満足するとき

$$f = 473\,612\,214.8 \text{ MHz}$$

$$\lambda = 632\,991\,398.1 \text{ nm}$$

の値は、 $\pm 1 \times 10^{-9}$ と推定される総合的な相対不確かさ ($\sigma = 3.4 \times 10^{-10}$) である。

現在公表されている実用型よう素安定化レーザーシステムは 3 種類ある。いずれのレーザーシステムも、よう素安定化レーザーとしての基本構成は同じである。

4. 商品化を目標に設計されたレーザーシステム

1) NBS 型可搬形よう素安定化レーザー²⁾

このレーザーシステムは、米国国立標準局 (NBS) の Layer によって開発され Frazier Precision Instrument 社から市販体制がとられており、レーザーヘッドと制御装置で構成されている。レーザーヘッドは 4 本のインバロッドで構成され、共振器長 30 cm の内部には、長

さ約 20 cm, ^4He と自然 Ne が混合比 11:1, 総圧約 470 Pa で封入されているレーザー管と, 飽和蒸気圧を制御する温度制御装置を備えた, よう素吸収セルが内蔵されている。

制御装置は, 吸収線を装置内蔵のオシロスコープ画面上に描く SEARCH, 目的の吸収線を選ぶ BIAS, 安定化のためにサーボループを閉じる LOCK の三つのモードで構成されており, 安定化の操作が誰にでも簡単にできるように配慮されている。また回路はすべてアナログ系で設計され, S/N の改善に注意が払われている。

レーザー出力は約 $100 \mu\text{W}$ であり, アラン分散で推定された安定度は, $\sigma(1000 \text{ s})=3 \times 10^{-13}$ である。このレーザーシステムは, 発表時の操作仕様が CIPM 1983 年勧告値と異なるため, 使用するに当たって周波数シフト量に注意が必要になる。

2) 計量研-ニコン実用型よう素安定化レーザー³⁾

計量研究所と(株)ニコンで共同開発したこのレーザーシステムは, レーザーヘッドと制御装置で構成され, 3次微分信号のモニターには外付けのオシロスコープを使う。

レーザーヘッド, 制御装置ともに, 一般ユーザーが使いやすいように配慮されている。

レーザー出力は約 $50 \mu\text{W}$ であり, 推定された安定度は, $\sigma(1000 \text{ s})=9.6 \times 10^{-13}$ である。

以上二つのレーザーシステムは, 商品化を目的に開発されたものである。

5. 国際比較用可搬形レーザーシステム⁴⁾

このレーザーシステム (PEL "G" Laser) は, ニュージーランド国立物理工学研究所 (PEL) の Hurst らによって, よう素安定化レーザー国際相互比較測定の巡回標準⁵⁾ (travelling standard) 用に開発された。そのため設計の主眼は, トランクに積めて世界中を持ち回り, 短時間で設置, 測定, 撤収の繰返しを前提とした可搬性, 堅牢性, 光軸のずれにくさと再調整のしやすさおよび安定化の操作性のよさである。それに加えてレーザー自体の基礎研究のための, 各種パラメータ設定の自由度の多さなども優れている。

レーザーシステムは, レーザーヘッド, 励起用高圧電源, 制御装置の3点に分かれており, 3次微分信号のモニター用オシロスコープは外部接続する。

レーザーヘッドは, 4本の低熱膨張ガラスのスペーサーで構成されている。レーザー管は, 市販の内部鏡形レーザー管を利用した半内部鏡形であり, 平行パネのホル

ダー上に載せられて衝撃などから守られる構造である。この共振器構造は, 移動中のミスアライメントが起こりにくく, 修正や調整を行なうのにもよい。

制御装置は, 極小小型するように設計されている。レーザー出力は $30 \mu\text{W}$, 安定度は $\sigma(4000 \text{ s}) \approx 8.4 \times 10^{-13}$ である。

日本を含む 10 カ国を持ち回られ, 各国のよう素安定化レーザーとビート測定法による相互比較を行なった PEL "G" レーザーは, トラブルなしで初期の目的を達成した⁴⁾。

6. ま と め

1969年に提案⁶⁾され, 実験が開始⁷⁾されたよう素安定化レーザーは, 長い間周波数・波長標準の確立, 改善のために研究され用いられてきたが, 精密計測の精度向上に伴ってそのほかの分野の研究や, 最近では超精密加工, 測定を行なっている企業からも望まれるようになってきた。そこで, ここに紹介した一般ユーザーにも使いやすい, よう素安定化レーザーが開発されるようになった。これらのレーザーシステムは, 精密計測用簡易安定化レーザーの波長校正, 半導体レーザー, 色素レーザーなどの波長測定用波長計の参照レーザー, またレーザー分光における波長標準など, 高い精度で絶対波長を必要とする現場では威力を発揮することになる。またこれらのレーザーシステムを手にしたユーザーは, 使用方法を間違えない限り正確なメートルを自分の手で実現できることになる。

文 献

- 1) BIPM: "Documents concerning the new definition of the metre," *Metrologia*, **19** (1984) 163-177.
- 2) H.P. Layer: "A portable iodine stabilized helium-neon laser," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **IM-29** (1980) 358-361.
- 3) 岩崎茂雄, ほか: "実用型よう素安定化 He-Ne レーザーの開発", 第48回応物予稿集, 17 a-ZC-9 (1987) p. 654.
- 4) R.B. Hurst, *et al.*: "International inter-comparison of iodine-stabilized helium-neon lasers at 633 nm involving ten standards laboratories," *Metrologia*, **24** (1987) 39-44.
- 5) 国際計量基本用語集日本語版 (日本計量協会, 東京, 1987) p. 29.
- 6) G.R. Hanes and C.E. Dahlstrom: "Iodine hyperfine structure observed in saturated absorption at 633 nm," *Appl. Phys. Lett.*, **14** (1969) 362.
- 7) G.R. Hanes and K.M. Baird: "I₂ controlled He-Ne laser at 633 nm: Preliminary wavelength," *Metrologia*, **5** (1969) 32.

(1988年4月13日受理)