

最近の技術から

実用レーザーの安定化技術

梅田 倫弘

東京農工大学工学部生産機械工学科 〒184 小金井市中町 2-24-16

1. はじめに

工業製品の高精度化、高性能化等の要求に応えるための最近の精密加工技術の発達には著しいものがあり、たとえば VTR の場合 μm 程度の加工精度で製造されている。さらに、半導体メモリーに代表される超 LSI の製造には 10 nm オーダーの位置決め技術が要求され、その精度実現のために周波数安定化レーザーによる干渉測長器が使用されている。本稿では、製造現場や光学実験において使われる実用レーザーとして、低価格、高信頼性、可視光を特徴とする内部鏡型 633 nm He-Ne レーザーの周波数および強度の安定化技術について、最近の研究を中心に紹介する。

2. 周波数安定化技術

自由動作状態での 633 nm He-Ne レーザーの発振周波数の相対安定度は、ほぼ 2×10^{-6} である。しかるに干渉測長に要求される安定度は $10^{-8} \sim 10^{-9}$ であるため、能動的に周波数制御しなければならない。安定化制御するには、光周波数変化を弁別する必要がある。He-Ne レーザーの場合、レーザー媒質自体がもつ内部基準や媒質外の外部基準によって弁別している。実用レーザーの周波数基準としては、装置の簡易さ、機械的安定性、無調整等の理由から内部基準がもっぱら使われる。今までに発表された内部基準による安定化方式を表 1 に示す¹⁾。この表においてラムディップ法は、レーザー応用研究の初期に開発され初めて商品化されたものであるが、現在は製造されていない。表中の軸ゼーマン、横ゼーマンおよび 2 モード法のそれぞれについて概説する。

2.1 軸ゼーマン法

レーザー管に軸静磁場を加える軸ゼーマン効果によって光周波数の弁別信号を得る方法である。市販品には、米国 Hewlett Packard 社製があり、干渉測長装置の光源として多用されている。この方式は、左右円偏光の強度が等しくなるように共振器長を制御するものである。

一方、Baer らは両偏光の周波数差が最小となる点に制御する新しい方式を提案した²⁾。極小点を見いだすためレーザー管に円筒 PZT を取り付け、10 Hz の方形波で共振器長を変調させている。Zumberge はこの安定化レーザーの発振周波数を 20 カ月にわたって測定し、 $2.6 \pm 0.7 \text{ MHz/年}$ のドリフトを観測している³⁾。この方式は、西独 Spindler & Hoyer 社より商品化された。一方、Pan らは左右円偏光の全強度が一定となるように共振器長を制御して周波数と光強度の同時安定化を試みている⁴⁾。

2.2 横ゼーマン法

Morris らによって最初に提案された横ゼーマン法⁵⁾はその後、実用装置が得られるまでに開発研究が進展し⁶⁾、現在では、7 mW の高出力タイプや 1.15 μm の赤外波長型⁷⁾に発展している。この方式の特徴は、3本の縦モードを横磁場によって1本に縮退させているので、得られる光出力が軸ゼーマン法に比べ大きいこと、二周波直交直線偏光が 1/4 波長板を通さずに得られることなどである。一方、縦モードが一本に縮退しない弱い横磁場による周波数安定化法が提案されている⁸⁾。2モード状態で 200 G 程度の横磁場を加えると、それぞれのモードが数百 kHz 周波数分離する。その共振器離調特性を図 1 に示す。図の P 点は 2本の縦モードが等強度の場合を示し、分離周波数が極大および極小となっていることがわかる。そこで、それぞれのモードの周波数差の差を求めると図 2 の曲線 A のように極小となるので、共振器長を PZT で変調して同期検出することにより 1 次微分信号曲線 B が得られる。この信号を用いて共振器長を制御する。この方法は、検出量が数百 kHz の交流信号であるため、制御回路のドリフトの影響を受けにくいこと、極小点に制御するため周波数再現性が良いことなどが特徴である。このレーザーを用いたモード間ビート測距法は、数百 MHz の位相測定を数十 kHz に変換できるので高精度の測定が可能である⁹⁾。

表 1 周波数安定化方式と代表例

安定化方式	型 式 (会社名)
出力ピーク	—
ラムディップ	SP119 (Spectra Physics)
磁気ラムディップ	—
軸ゼーマン	5517A (Hewlett Packard) ZL150 (Spindler & Hoyer)
横ゼーマン	MOC-QD-H (共図計装)
2モード	Model 200 (Tropel) SP117 (Spectra Physics), ほか

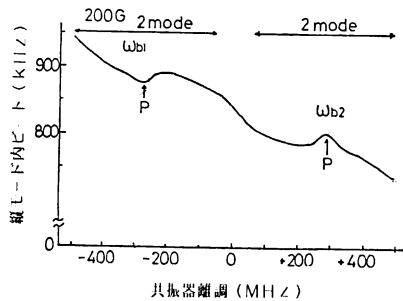


図 1 縦モード内ビート共振器離調特性

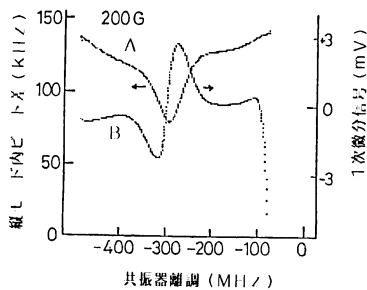


図 2 縦モード内ビート差(A)と一次微分信号(B)

2.3 2モード法

2モード内部鏡レーザーのそれぞれの縦モード強度が等しくなるように共振器長を制御する方式である。構成が簡単のため巻線ヒーターを用いた周波数安定化レーザーが数種類商品化されている。巻線ヒーターは応答が遅いので抵抗体薄膜を塗布する方法が考案されている¹⁰⁾。また、交流軸磁場を加えて縦モード偏光方位をわずかに

変調させ同期検出して、2本のモードが等強度となるように制御する方法が提案されている¹¹⁾。

3. 強度安定化技術

強度安定化は、周波数安定化と同様に共振器離調に対する強度変化を検出して電圧基準との誤差信号を共振器長にフィードバックする方法が一般的である。したがって強度だけでなく周波数も同時に安定化できる¹²⁾。これとは原理的に異なるものとして、横磁場に対し偏光強度が直線的に変化することを利用して、加える磁場を制御して強度安定化を行なった方法がある¹³⁾。

4. ま と め

以上述べた安定化レーザーは、管球が熱的にも安定化状態にあるので、出射ビームの偏向ゆらぎが抑えられ¹⁴⁾、長距離の光学アライメントにも利用可能である。本稿では触れなかったが、半導体レーザーの安定化技術も進歩している。しかし、実用という点から見た場合、まだ使いにくいというのが正直なところである。今後の発展を期待したい。最後に、計測精度が nm からサブ nm へと要求が高まるにつれ、現状の実用レーザーの周波数安定度では満足されなくなる恐れがある。より安定な基準(たとえばヨウ素)をもつレーザーの製造現場での使用に耐えるような実用化が望まれる。

文 献

- 1) 秋元義明: レーザー研究, 14 (1986) 935.
- 2) T. Baer, *et al.*: Appl. Opt., 19 (1980) 3173.
- 3) M. A. Zumberge: Appl. Opt., 24 (1985) 1902.
- 4) C. Pan: Appl. Opt., 25 (1986) 1375.
- 5) R. H. Morris, *et al.*: Appl. Opt., 14 (1975) 2808.
- 6) N. Umeda, *et al.*: Appl. Opt., 19 (1980) 442.
- 7) 梅田倫弘, ほか: 静岡大電研研究報告, 20 (1985) 69.
- 8) 緒方孝昭, ほか: 第 47 回応物学会予稿集 (1986) p. 128.
- 9) 梅田倫弘, ほか: 光学, 15 (1986) 422.
- 10) K. Seta, *et al.*: Opt. Commun., 55 (1985) 367.
- 11) 瀬田勝男, ほか: 第 34 回応物学会予稿集 (1987) p. 697.
- 12) A. Sasaki, *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys., 23 (1984) 593.
- 13) T. Yoshino, *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys., 21 (1982) 555.
- 14) 佐々木彰, ほか: レーザー研究, 14 (1986) 946.

(1987年5月1日受理)