

安定化 HeNe レーザーとしてロックする技術

安定化 HeNe レーザーをロックする目的は、必要とされる出力(たいていの場合、1つあるいは2つの周波数)が(特定の)光周波数で制御されることです。距離測定アプリケーションでの使用において、このことが意味するのは、1つか2つの発振線が周知の光周波数(これは周知の波長に対応し、 $c(\text{光速})/f(\text{波長})$ の関係がある)で固定されていることです。そのために、ロックする制御装置は本質的もしくは外因性による参照を必要とします。本質的な参照としては、レーザー自身の特性を使います。外因性の参照には、若干の外部の装置を必要とし、それらは、(それ自身周知の光周波数にロックされた)もう1つのレーザーや、特定の光周波数スペクトル吸収を持っているガスセルや、超高精細ファブリーペローエタロンあるいは干渉計などの物理装置が挙げられます。赤色(~633nm)の HeNe レーザーの中で最も人氣が高い周波数ロック技法を下の表にまとめました:

Locking Type	最大出力	光学式周波数変化	光周波数正確度
安定化していないマルチ横モード	>200 mW	---	---
安定化していない単一横モード	>50 mW	1.5 GHz	3×10^{-6}
熱による安定化	2 mW	75 MHz	1.5×10^{-7}
1モード強度安定化	1.5 mW	10 MHz	2×10^{-8}
ゲインピーク安定化	1.0 mW	5 Mhz+	1×10^{-8}
ラムディップ安定化	0.5 mW	5 Mhz+	1×10^{-8}
2モード偏光安定化	2.0 mW	1 MHz	2×10^{-9}
3モード安定化	3.5 mW	1 MHz*	2×10^{-9}
二次ビート安定化	3.5 mW	200 kHz*	4×10^{-10}
横ゼーマンビート安定化	1.5 mW	100 kHz*	2×10^{-10}
外部(ヨウ素ガスセル)安定化	0.2 mW	<5 kHz+	$<1 \times 10^{-11}$
外部(ヨウ素ガスセル)オフセットロック	2.0 mW	<5 kHz	$<1 \times 10^{-11}$
外部参照安定化	2.0 mW	<1 Hz	$<2 \times 10^{-15}$

これらの有用な出力は、レーザーダイナミクスによって制限された絶対的に純粋なシングルモードあるいは一つの光周波数であるとは限りません。

* アスタリスクマークは、出力が光周波数で同様の強度の近接した1対のモード、あるいは主モードの隣に小さい「ゴーストモード」を持つ技術を意味し

+ プラスマークは、Pound-Drever-Hall ロッキングに基づくか、あるいは光周波数に若干のぼやけ、曖昧さが伴う類似の実装に基づく技術を意味します。

最初のグループでリストされた手法は本質的であり、参照として HeNe レーザーチューブのネオンゲインカーブ(NGC)を使用します。NGC の中心は、かなり正確に制御できるネオン同位体比率、温度および圧力にのみ依存する光周波数を持っています。NGC のゲインバンド幅は1.6ギガヘルツ程度と比較的狭く、発振している縦モードの数を制限し、プロファイルを使ったフィードバックをより正確化できます。結

果的に NGC は発振線を周知の場所に正確に位置づけるために使用できます。最もエキゾチックで(そして高価な!)安定化 HeNe レーザー以外のすべては、上にリストされた NGC に基づく本質的なテクニックの1つを使います。ほとんどの場合、1モードあるいは2モード偏光安定化を使います。

外部FP共振器や他のタイプの干渉計を使用する比較的単純な手法も可能です。例えば、低精細走査型ファブリーペロー干渉計(SFPI)を使用してNGC内の特定の場所に縦モードをデジタル制御ループで維持するという手法を3モード偏光安定化と共に利用して、1モードが真中に置く状態にしてより高い出力を得ることができます。1モードおよび2モード偏光安定化は最大出力が約2mWに限定されます;3モード安定化では最高およそ3.5mW あるいはもう少し多くの出力が得られます。けれどもこれはまだ本質的な(参照)技術です。(この参照技術は1モードあるいは2モード安定化でも使用できますが、より多くの利点にはつながらないでしょう。)

NGC がそれほど有用になるのはネオンのゲインバンド幅が、1.6ギガヘルツと比較的狭いことに留意すべきです。一方でソリッドステート(SS)レーザーは、50かそれ以上の要因で典型的により広い発振媒体ゲイン幅を持ちます。簡単な技術でSSレーザーでシングルモードを達成できる一方で、このような広いゲインバンド幅で光周波数の正確なコントロールを達成することは(HeNe レーザーよりも)困難です。これが、SSレーザーがこれまでほとんどの場合に光周波数の正確性と安定性を必要とするアプリケーションで下層の HeNe レーザーに取って代わることができなかった主要な理由の1つです。特定の光周波数でダイオードレーザーをロックすることはさらに複雑です。

外因性の技術に関しては、ヨウ素セルを利用する安定化 HeNe レーザーが商業的に(その正確さに見合う高価格で)おそらく利用可能な最も正確な光周波数参照です。その絶対の光周波数正確さは今、たいいていの商用の安定化 HeNe レーザーで使われる2モード偏光安定化のテクニックよりも2桁以上正確です。

高精度ファブリーペロー共振器などの技術に匹敵する精度レベルを越えることは、一般に先進的な研究の予告です。<1 Hz の正確さを達成するためには、振動と他の外乱を最小にするために大きな隔離チャンバーと能動的なダンピングを必要とします。このようなシステムが携帯可能である可能性は高くありません! ;-)

表に入っていないのは、強制的に単一波長動作を行うためのエタロンのようなキャビティ内の装置の使用を必要とする技術類です。これらの技術は、高出力と高い安定性両方の能力がありますが、特殊なチューブと比較的複雑なコントロールを必要とします。この技術に関して少なくとも1つの会社が40ミリワットの単一波長 HeNe レーザーを提供できると主張しますが、それらは費用がかかり、少しも普通ではありません。

いろいろと述べてきましたが、驚くほど単純でほとんど取るに足らないことは、 1×10^{-7} より良い安定性で単一波長出力を提供するために、食料雑貨店バーコードスキャナーで使用されている類の普通の HeNe レーザーチューブの振る舞いを制御することです。実際、この安定性を合計4つの部品をほんの2ドル(レーザーチューブと電源以外に)だけの費用で実現できます。ほとんどあらゆる考えうる可能な技術が過去のある時期に探究されました。訓練されたハトがこの目的のためのサービスで使われることも起こり得ましたし、その特許すらあり得たのです。;-) ここで述べてきたことは単に最も可能性の高い(電子的な)手法に過ぎません。