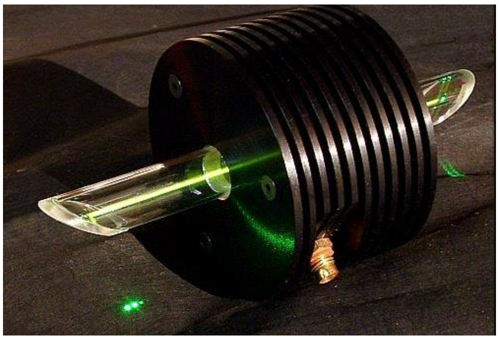
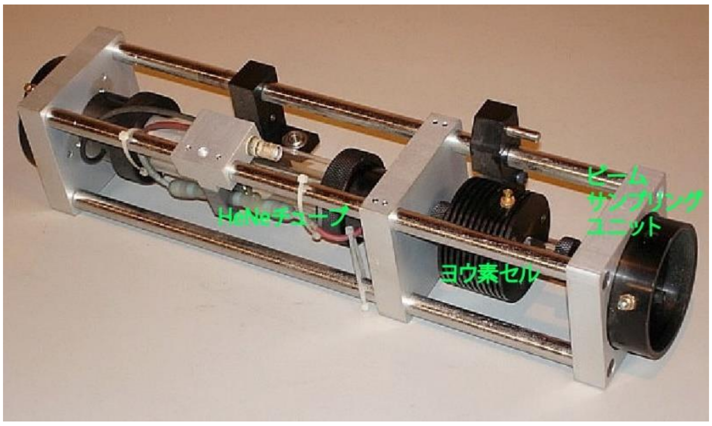
㉗ ヨウ素安定化 HeNe レーザー

ネオンゲインカーブといった発振プロセスの一部の内因特性にロックするような、より一般的な HeNe 安定化レーザーとは異なり、ヨウ素安定化 HeNe レーザー（ISHL）はヨウ素蒸気を貯めている外部のガスセルを使用しており、ヨウ素吸収スペクトル内の 1 本の発振線を参照波長として使用します。この機構は原理的に 1 桁から 2 桁の長期波長安定性の改良を提供し、（発振幅）数十 kHz に対応する百億分の1ないしそれ以上の精度を提供します。



HP/Agilent 社製 5517A ISHL 内のヨウ素セル

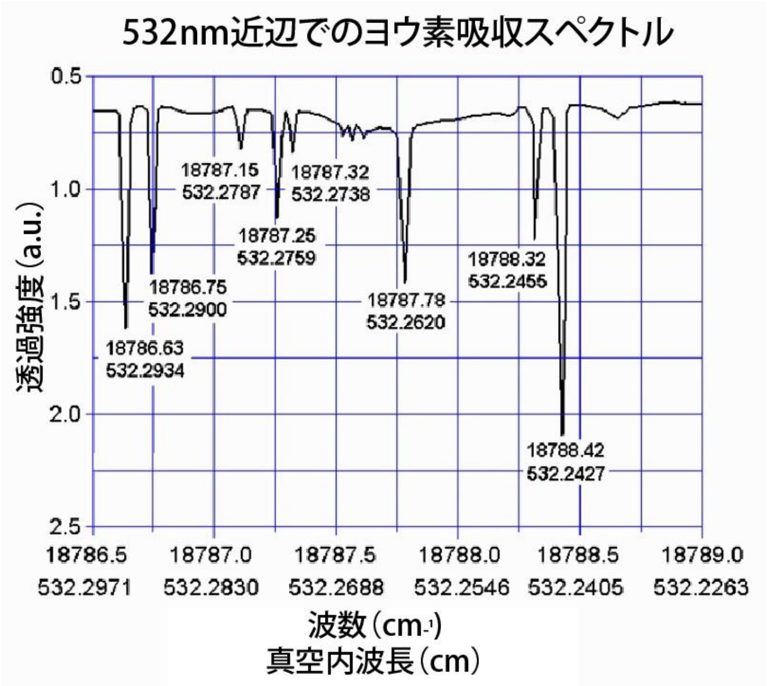
(4) 一般的な赤色（633nm）波長で稼動する ISHL（ヨウ素安定化 HeNe レーザー）は、1 個か 2 個のブリュースターウィンドウが装備された HeNe レーザーチューブ、低圧のヨウ素を内包するガスセルおよび高精度のキャビティ長制御を行うピエゾ結晶トランスデューサー（ピエゾ機構）上の少なくとも 1 つの外部ミラーで構成されます。この構成では、 ヨウ素セルがレーザーキャビティ内に設置され、高いキャビティ内循環力によるメリットを得て、633nm 近辺の吸収感度が非常に低く抑えられます。ゲインとキャビティ損失間の差の関数により、感度はさらに引き上げられます。ただし、緑色（543.5nm）波長での稼働の場合は、一般に緑色で達成可能な出力が低いにもかかわらずセルを外部に設置することも可能です、なぜなら（緑色の）感度がより高いからです。しかし、2mW あるいはさらに高い出力で単一縦モードで稼働する内部ミラー式 HeNe レーザーチューブを使って感度を引き上げる方法もありえます。



HP/Agilent 社製 5517A ISHL の共振器内部構造

ISHL（ヨウ素安定化 HeNe レーザー）の基本的な作動原理はどちらかと言うと単純です：ヨウ素（つまり実際は I2）は、何百本もの吸収線を持つ非常に複雑な吸収スペクトルを持ちます。そのほんの一部が、「532nm の近くのヨウ素吸収スペクトル」（下記）で参照できます。ピエゾ機構でレーザーキャビティ長を微振動させることにより、ロックインアンプ（位相検波器あるいは同期復調器としても知られている）が、選択されたいかなる吸収ピーク（あるいはへこみ、あなたの視点に

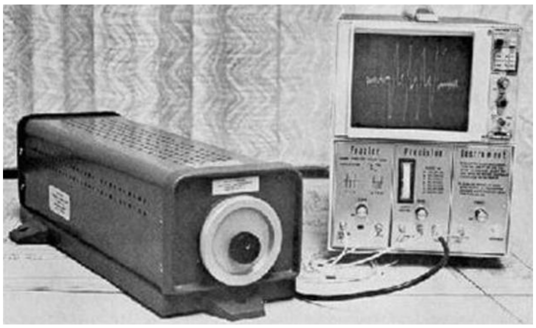
よりますが！）のセンターに於いても波長を維持できます。困難な部分は、ロックする特定の吸収線を確実に選択できるかどうかにあります。そのため、特定の発振線にロックすることはかなり単純ですが、自動吸収線選択が必要とされると全体的なエレクトロニクスは非常に複雑になってしまうこともありますが、現在は、埋め込み式マイクロコンピュータが発振線選択や他のほとんどの働きを担います。



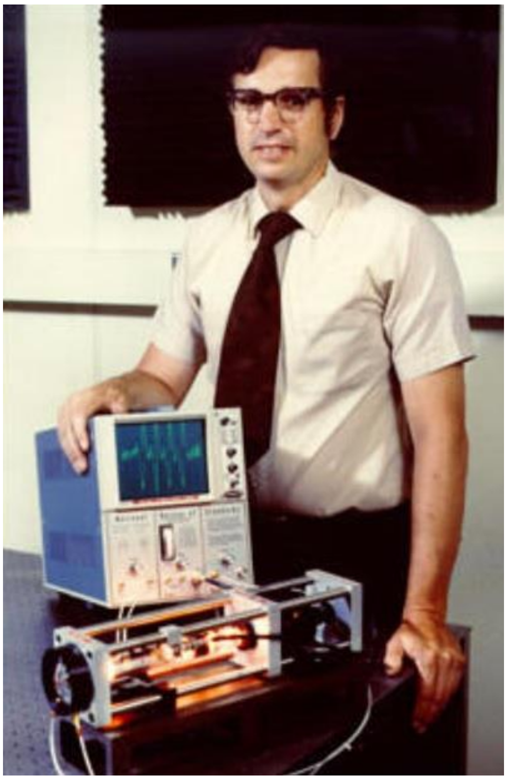
(15) ここに、定評ある国立標準技術研究所（NIST、以前は国立標準局）の論文に記載された設計に基づいて製作されたヨウ素安定化レーザーの数枚の写真があります：『Howard P. Layer 著、「携帯可能なヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザー」、IEEE Trans. on Inst. and Meas, IM-29, pp358-361, 1980』。写真は国立標準技術研究所設計の2つの異なるサンプルの実際のものです。最初の写真はレーザーヘッド全体ですが、他の写真は個別のコンポーネントをより見やすくするためだけの目的であり、物理的に同一共振器の写真ではありません。

- (19) ヨウ素安定化 HeNe レーザーヘッド（下記）。全体としての外観は、前面にシャッター（丸い黒いもの）があり、背面（見えません）からの数本のケーブルがあって、平凡なものです。「固定用脚」の水平化は、精細なアラインメント用に鋳物タブに設置されているでしょう。これが商用製品なのか、国立標準技術研究所製なのか、国立標準技術研究所設計に基づく Hewlett Packard 社製なのかは不明です。しかし、カバー上に Agilent 社在庫ステッカーが付いていたため、まさしくこのレーザーは HP/Agilent 社製測距用レーザーの 5517A あたりであると証明するために使用されました！😊 実際、このレーザーのベースは 5517A との顕著な 相似が見られます（寸法は合致しませんが）。それは鋳物と機械組立品の組み合わせとなっており、1回限りの研究プロジェクトに製作されたものではないことは明らかです。ヘッドカバーの穴の模様に到るまで Frazier 社製レーザーと同一に見えるため、これは実際に Frazier 社製モデル 100 FISL （あるいはそれをコピーした国立標準技術研究所バージョン）である可能性があります。

HP/Agilent 社製 5517A



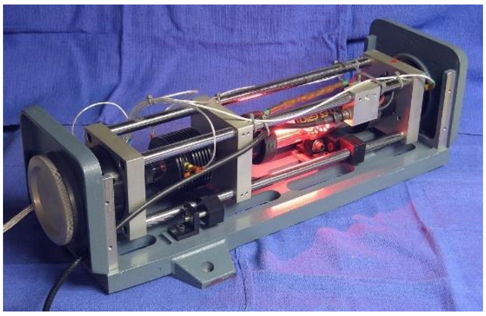
Frazier 社製モデル 100 FISL



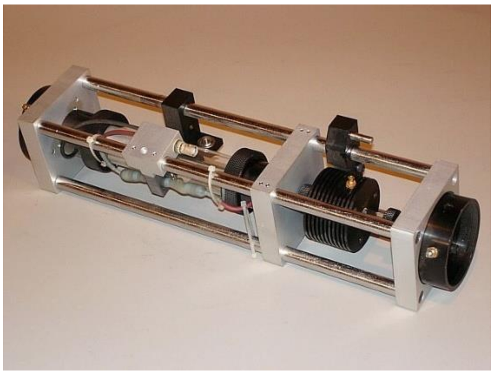
Frazier 社製モデル 100 レーザーと国立標準技術研究所のエンジニアの写真

産総研　計量標準総合センターのヨウ素安定化 HeNe レーザー

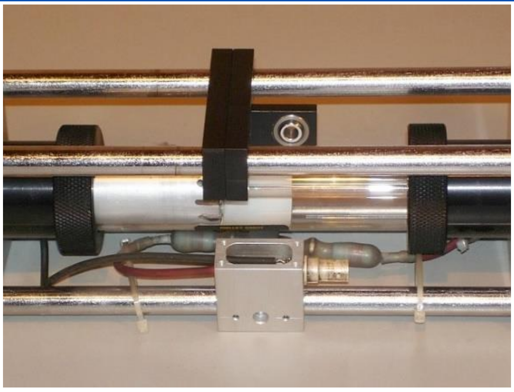
- (28) 筐体カバーを取り外したヨウ素安定化 HeNe レーザー。 Melles Griot 社製 05-LHB-290 両側ブリュースターウィンドウ仕様の HeNe レーザーチューブの点灯が共振器構造内に見られます。



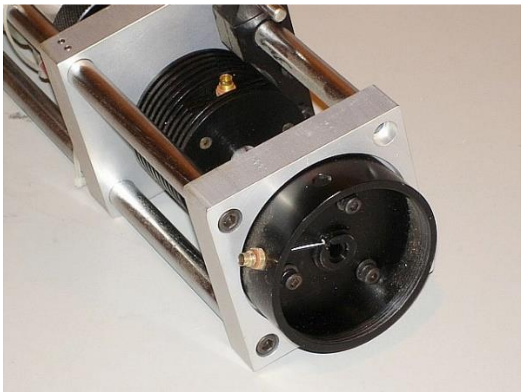
- ヨウ素安定化 HeNe レーザー共振器の全体像。共振器は約 18 インチ（約 45cm）長のどちらかと言うと大がかりな金属製構造物です。



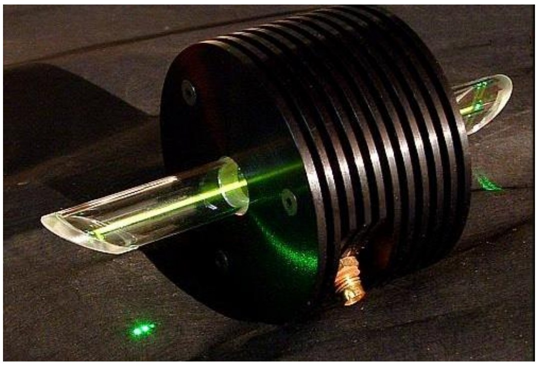
- ヨウ素安定化 HeNe レーザー共振器 ー 両側ブリュースターウィンドウ仕様 HeNe レーザーチューブの視認可能部分。Melles Griot 社製 05-LHB-290 両側ブリュースターウィンドウ仕様チューブの大部分は見えませんが、BNC コネクター経由で高電圧が供給されて圧縮Oリング部品で固定されています。灰色の塊状様のものにはバラスト抵抗器が入っています。



- ヨウ素安定化 HeNe レーザー共振器 ー ヨウ素セル。ヨウ素セルは両側ブリュースターHeNe レーザーチューブとミラーの片方の間にある圧縮Oリング部品で固定されています。金製コネクター（2つのうちの片方が見えています）は、ヨウ素セルの温度制御と、もしかすると蛍光発光をモニターするためのフォトダイオード用です。



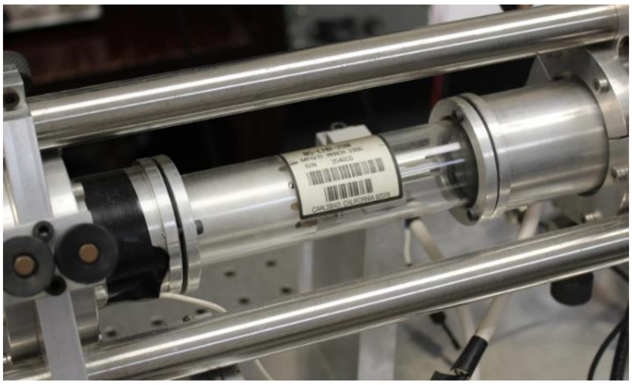
- 緑色 HeNe レーザービームによる蛍光分光を見せるヨウ素吸収セル。 これは同じヨウ素セルが ISHL（ヨウ素安定化 HeNe レーザー）共振器から取り外され、別個の緑色 HeNe レーザーで励起されている状態です。ヨウ素セル中の黄緑色（若干の赤色を含む）蛍光発光が意味するのは、若干の緑色光が吸収され、伝播されたビーム出力の減少として現れます。（633nm ビームからの蛍光分光は赤外で退屈でしょう。）



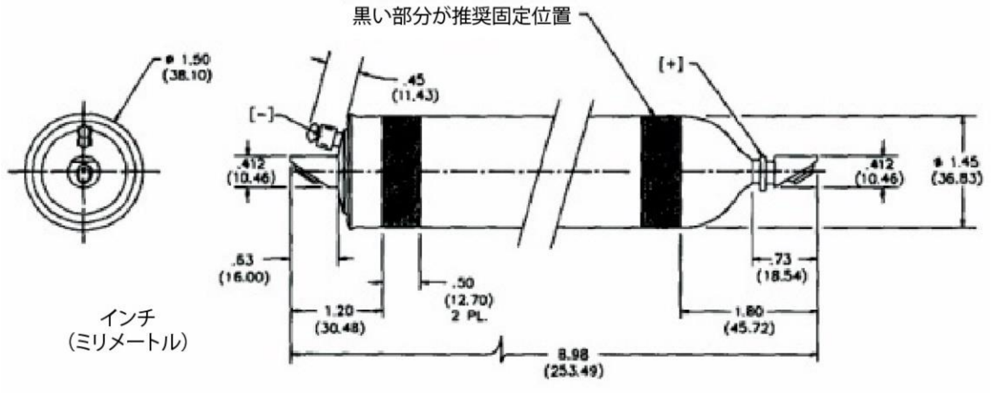
- ヨウ素安定化 HeNe レーザー共振器 ー フォトダイオードとビームサンプラー。 これには1個の傾斜板が付いていて、出射ビームの一部をシリコンフォトダイオードに供給します。キャビティ長の制御とぼやけのためにミラー

はどちらもピエゾ機構上に固定されています（ただし1個のピエゾ機構が両方の機能を満たさないであろうという理由は不明確です）。

(45) このレーザーヘッドは現在発振しませんが、私はそれがいつか発振することを期待しています。HeNe レーザーチューブの放電色は通常であり、ボア内に目に見える茶色の沈殿物が無いことで、チューブが健全であることを示しています。緑色（532nm）DPSS レーザーポインタービームへの反応から、ヨウ素セルの内部にはまだヨウ素が残っています。このヘッドは倉庫におそらく何年もの間、数十年ではないにしろ（「失われたアーク」の隣りにでも）置かれていて、そのため無発振の状態になっているのは驚くことではありません。ただし、ある種の混入物が B ウインドウの1つの内部にあるように思われました。そのため、このヘッドでは 05-LHB-290 チューブの交換が必要となることも考えられます。元となる国立標準技術研究所の論文が述べているのは、OC（出力カプラー）ミラーの反射率がたったの 93%となっていて、おそらくゲインを減らすことによって単一縦モード稼働を強いるためと思われますが、同時に出力を劇的に減らすことにもなります。ただし、このレーザーの OC（出力カプラー）ミラーの計測で分かったのは、反射率が 99%と 99.3%の間という、いかにも通常の HeNe レーザーの数値でした。アラインメントやいくつかの他の手段を用いて SLM （空間位相変調）を強いています。SLM （空間位相変調）を強制するもっと良い方法としては、ピエゾ機構を加えてエタロンにキャビティ長調整を追跡させることでしょう。そうすれば、出力はチューブから利用可能な最大値に近づいて、設計上の出力値の5倍から10倍に達するでしょう。しかし、私はそのような数値は見たことがありません。論文（Fraizer 社製）は、レーザーチューブとキャビティの長さはそれぞれ 20cm と 30cm であるとも述べています。私のサンプル機（HP/Agilent 社製）では、それらは少なくとも 25cm と 35cm となっています。そして、そのレーザーチューブは Melles Griot 社製 05-LHB-290 ではなさそうです。そのためおそらく、最初のプロトタイプは Frazier 社（や他社）が後になって複製したバージョンとは同一ではなかったけれども、非常に明確なのは、Frazier 社は「スコープ内コントローラー」や前面パネルのレイアウトやラベルに至るまで、レーザー設計のほぼあらゆる点をコピーしたという点です。😊

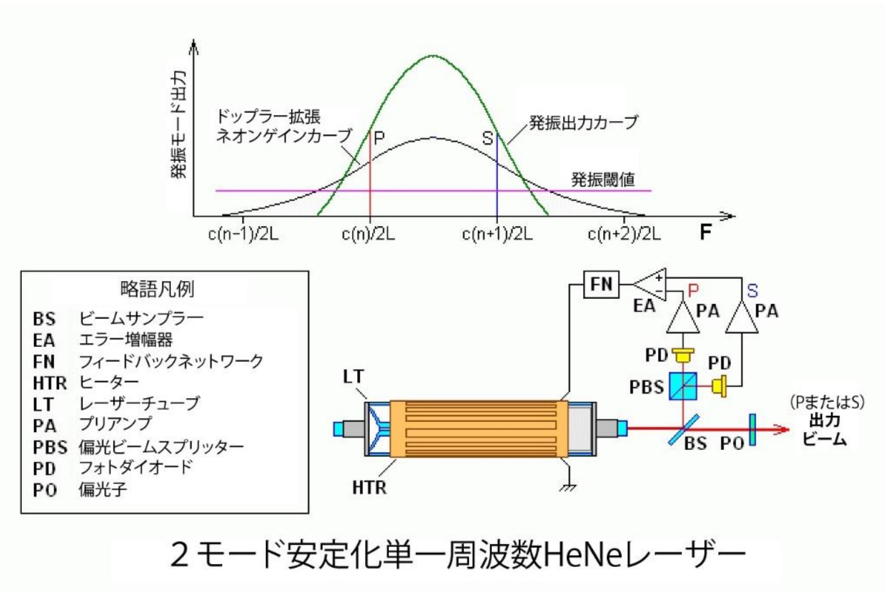


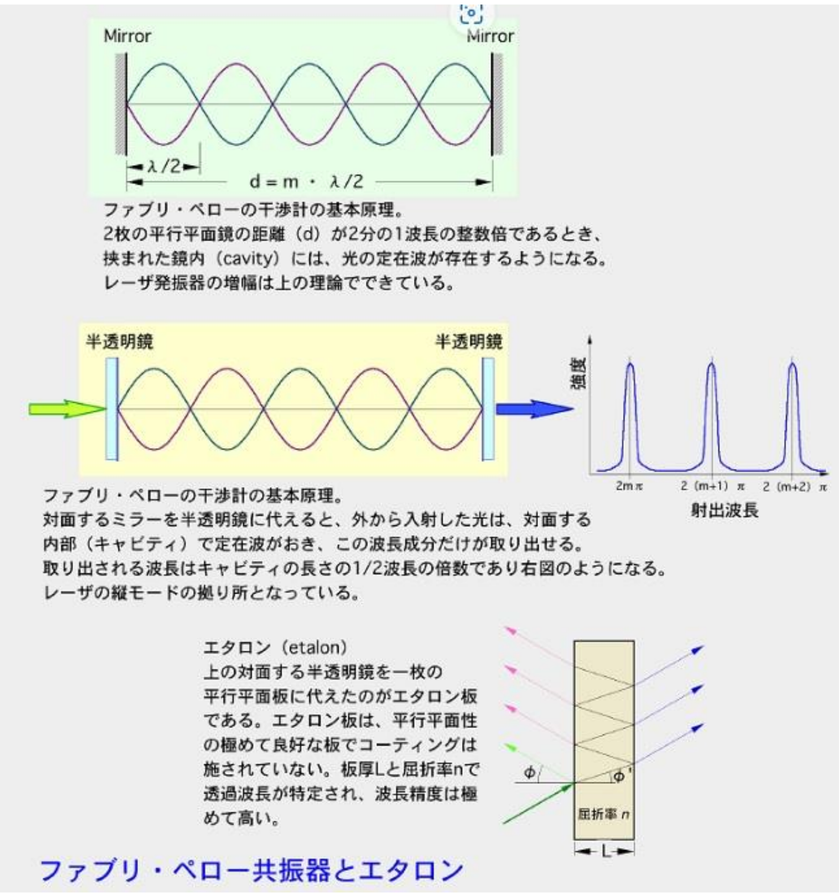
他の製品に搭載された 05LHB290 チューブ



05LHB290 チューブの寸法図

(61) ヨウ素セルをキャビティ内に置くことで、高い循環出力(99%反射率の OC(出力カプラー)ミラーによる出力のおよそ 100 倍)と、ゲインと損失に基づく発振閾値の間の相違という利点を得られます。ただし、内部ミラー式 HeNe レーザーチューブを安定化させて使用することによって単一縦モードを出力させて、感度の十分な上昇を達成する方法があるはずです。2 モード偏光安定化設定の場合、出力は 2mW ほどを得られますが、ヨウ素吸収線のチューニング範囲が限定されるでしょう。感度を引き上げる 2 つの方法としては、走査型ファブリーペロー干渉計(SFPI)のキャビティに類似する外部の高鮮明度エタロンを使う方法と、キャビティ内にヨウ素セルを設置する方法があるでしょう。ミラー透過率の逆化とヨウ素セルウインドウでの喪失によって、同様の循環出力の引き上げが可能となるでしょう。SFPI (走査型ファブリーペロー干渉計)はレーザーチューブの調整を続け、発振線近辺をスキャンし、ヨウ素の吸収位置を特定する必要があるでしょう。そのため、何らかの気の利いた制御方法が必要となるでしょう。もう一つのより簡素な手法としては、特注の長いヨウ素セルか、あるいは大口径のセルに複数のビームパスを通過させる、あるいは一組の内部ミラーを設置して同様のことを行うなどが考えられ、より良くなるでしょう。





ISHL(ヨウ素安定化 HeNe レーザー)の詳細:

- (70) 同様の共振器と完全なシステムの他のコンポーネントの数枚の追加の写真が Keto 教授のヨウ素安定化 HeNe レーザー(テキサス大学)で参照できます。写真のそれぞれはほぼ完全な説明が付いています。

- そしてもう1枚の写真ともっと多くの国立標準技術研究所（NIST）博物館の「長さー測定基準から基本定数まで」。そこには、Frazier 社製モデル 100 と同一のレーザーと一緒に国立標準技術研究所のエンジニアの写真があります。 [Length—Evolution from Measurement Standard to a Fundamental Constant (nist.gov)]

- 国立物理研究所（英国）には 633nm と 543.5nm の ISHL（ヨウ素安定化 HeNe レーザー）があります。 National Physical Laboratory - NPL - impact from science - NPL
- Frazier Instrument 社と Winters Electro-Optics 社も ISHL（ヨウ素安定化 HeNe レーザー）を提供しています。 Home - Frazier Precision Instrument Company, Inc. (frazierinstrument.com) Winters Electro-Optics, Inc. (winterseo.com)

Frazier Precision Instrument 社製 100 ヨウ素安定化 HeNe レーザー

Winters Electro-Optics 社製 100 ヨウ素安定化 HeNe レーザー

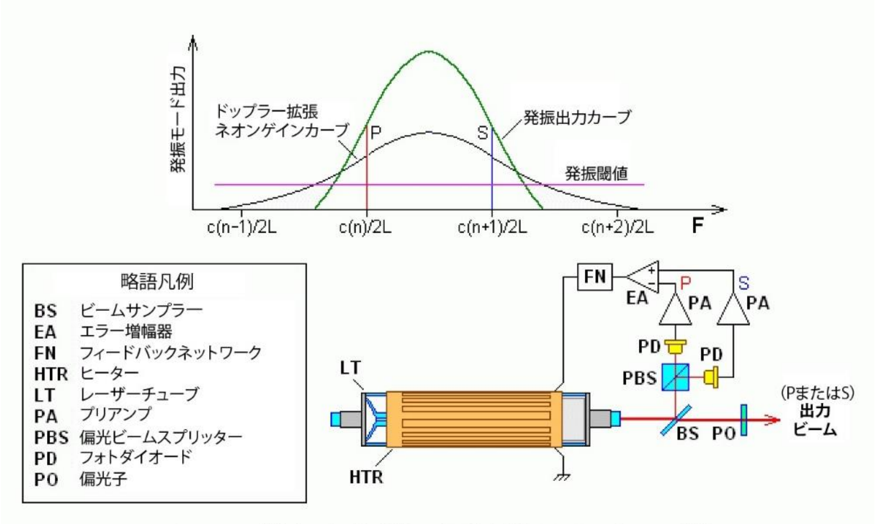
(77) そして多波長ヨウ素安定化 HeNe レーザーも製作されました。参照ください：「波長 543nm、605nm および 612nm での波長可変ヨウ素安定化 HeNe レーザー」、J. Hu, T. Ahola, K. Riski, and E. Ikonen, Digest of the 1998 Conference on Precision Electromagnetic Measurements, July 6-10, 1998, IEEE Cat.。これには、PMS/REO 社製 LSTP-1010 5 波長可変 HeNe レーザーから取り出したチューブに、後部ミラー（波長選択プリズム）の背後で 1 対のピエゾ結晶トランスデュー

サー（ピエゾ機構）と、フィードバックコントロール用のロックインアンプを備えていました。これらの波長について、ヨウ素セルはキャビティの外に設置出来ますが、赤色波長である 633nm が含まれないことにご留意ください。

PMS/REO 社製 LSTP-1010　5 波長可変安定化 HeNe レーザー

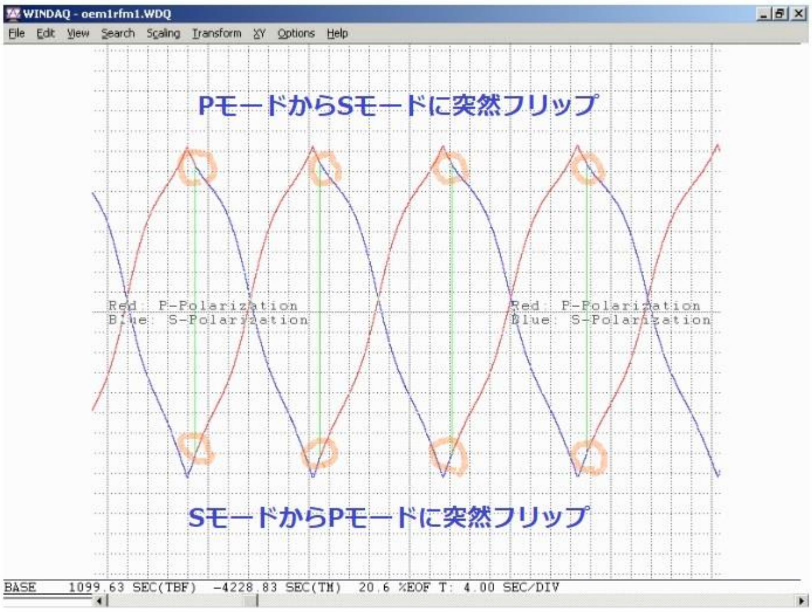
㉘ 他の波長での安定化 HeNe レーザー

(2) 赤色（633nm）HeNe レーザーを安定させるあらゆるタイプの機構がを開発されてきましたが、商用安定化 HeNe レーザーでよく使用されるものの殆どは、出力ビームまたは廃棄ビーム内の 1 本か 2 本両方の偏光モードをモニタリングして、ネオンゲインカーブにそれらの位置を固定するものです。行儀が良いいわゆる「ランダム偏光」の 633nmHeNe レーザーチューブの場合、隣接するモードは一般に直交偏光となります。そのため、シングルモード（単一周波数）出力を保証するには、チューブは 1 本あるいは 2 本の偏光モードがロック位置に存在するのに十分な短さを持つ必要があります。後者（2 本の偏光モード）の場合、出力側の偏光子が不要なモードをブロックします。



2モード安定化単一周波数HeNeレーザー

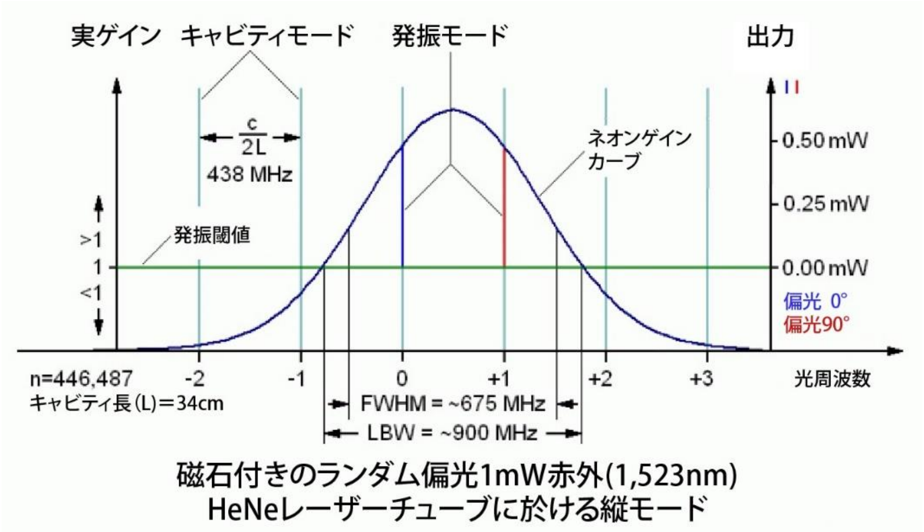
(6) 「他の色」にレーザーに同じ手法を用いることができるかと想定する一方で、通常はそうではないことがわかります。主要な理由は、レーザーの行儀を良くするために期待されてきた適切な動作が存在しない可能性があるということです。そのため、チューブが 1 対の偏光直交軸を持っていても、隣接する縦モードが必ずしも直交ではなかったり、一貫した相対的な偏光を持たなかったりしますーそれらはバンシー（家族の死を知らせる妖精）のようにフリップ（S 偏光から P 偏光への突然の変化）する場合もあります。



それぞれのモードが途中でフリップする状態

そのため他の波長（可視あるいは赤外）で安定化 HeNe レーザーの実現が望まれる場合に、偏光が主要な問題となる場合もありますが、ネオンゲイン幅の相違や、一般的なかなり低い出力を含む多くの他の複雑な問題が存在します：

1. **直交偏光：（10）** 633nm HeNe レーザーの場合、物理学は隣接するモードが直交偏光するように協力（あるいはマーフィーが 1ms を取り去りました）します。こうしたことが他の波長において必ずしもあてはまる訳ではありませんので、シングルモードがロック位置で稼働できるように短いチューブの使用が必要とされることもあるでしょう。例えば、シングルモードだけが 543.5nm で発振することを保証するには、約 12.5cm 未満のチューブを必要とし、本当に稼働できても極めて低い出力ーおそらく 0.1mW 未満の出力となるでしょう。
2. **ネオンゲイン幅：（13）** 不均一に広げられたネオンゲインカーブの幅は光周波数に依存し、付加に平方和を用いておおよそ[633nm/（発振波長）*1.6GHz＋100MHz]となります。ほとんどの場合にドップラー拡がりが支配的であり、その寄与が小さいため追加の 100MHz 幅は無視できます。そのため、チューブの長さは波長に基づいて必要とされる数の縦モードだけが発振するように選定する必要があります。もちろん、これは出力への必要と矛盾することがあります！例えば、633nm では、225mm のキャビティ長のチューブ（667MHz のモード間隔）はせいぜい3本の縦モードが発振します。1,523nm では、ゲイン幅は 633nm の場合の半分しか無く、十分なゲインを得るための 2 本のモードさえ不十分（エンベロープ内に常駐できない）な状況となり、モードスイープの一部で出力がゼロとなることもあります。



(19) ただし、 FWHM （半値幅）や他のゲイン幅の定義は、チューブの実際のゲインと損失に応じて調整される必要があります。例えば、中赤外の 3,391nm の発振線は 633nm での赤色発振線のそれの 40 倍のゲインを持ち、そのため発振閾値はずっと低くなり、ゲインカーブを効果的に広げます。そして 544nm のゲイン（緑色）は 633nm のゲインの約 1/20 となります。

3. **出力**：(21) 赤色ではない波長の大部分（3,391nm は例外）のゲインそして／あるいは効率は、633nm よりもずっと低くなります。通常、これ（の課題）には、より長いチューブを使って対処します。しかし、その対処法は緑色（543.5nm）、黄色（594.1nm）およびオレンジ色（604.6nm あるいは 611.9nm）の波長では、（1）の直交偏光の傾向と直接的に矛盾し、これらの（波長での）チューブが赤色の場合よりもさらに短くする必要があります。

種々のトリックが他の波長で稼働する HeNe レーザーを安定させるために使われることがありますが、一般に、それほど容易ではありません！☹ 「1,523nm での安定化 HeNe レーザー」の節も参照ください。 Sam's Laser FAQ - Home-Built Helium-Neon (HeNe) Laser (repairfaq.org)