

解説

光三原色レーザー (ホロー陰極型 He-Cd イオンレーザー)

川瀬 宏海

東京電機大学工学部電子工学科レーザー工学研究室 〒101 東京都千代田区神田錦町 2-2

(1988年3月29日受理)

Optical Three Primary Color Laser (Hollow Cathode Type He-Cd⁺ Laser)

Hiromi KAWASE

Department of Electronics, Faculty of Engineering, Tokyo Denki University,
2-2, Kanda-Nishiki-cho, Chiyoda-ku, Tokyo 101

1. ま え が き

この光三原色レーザーは、ホロー陰極放電内の He の準安定状態粒子とそのイオンを用いて Cd 蒸気を励起し、Cd イオンの励起準位間に反転分布を生じ、レーザー発振を行なうもので、1970年に日、米、ソで相次いで発明されて以来、世界各国の大学や企業で開発競争が行なわれた¹⁻³⁾。しかし Cd 蒸気の制御が難しく実用の段階には至らず、1980年頃には、その研究も下火になっていった。1984年の秋、Cd 蒸気を自由に制御できる構造を著者が開発し⁴⁾、そのレーザー装置を1985年と86年に東京・晴海のレーザー展に公開してからは、実用化への舞台が日本に移り、現在、長寿命化とその性能向上に向けて国内数社において製品化の段階に入っている。なお、寿命の最長時間は光三原色同時発振で7000時間を越えた⁵⁾。

このレーザー用ミラーは米国のラムダ・エアロン社によって、広帯域完全反射型は1973年に、広帯域部分透過型は1974年に開発され、それを用いて当時から日本において光三原色同時発振が行なわれていた⁶⁾。

現在、光三原色レーザーの出力は、活性長70cmで50mWほどであり、短時間には100mWを越える出力が得られる。レーザー管を構成するうえで、いくつかの新たな基本要素を必要とするが、個々の理想を追求するのではなく優先順位を決め、それらをバランスよく組み合わせることが重要である。

2. 章では、発振線の励起機構と色再現領域、3. 章では、ホロー陰極型レーザー管の必要条件、4. 章では、

レーザー・システム、5. 章では、レーザー動作特性、6. 章では、関連分野と最近の動向について述べる。

2. 発振線の励起機構と色再現領域

このレーザーは、325.0nmから887.6nmまでの12本の発振線がある。光三原色レーザーとして使う場合、441.6nmから636.0nmまでの5本の発振線が対象となり、緑と赤はそれぞれ近接した2本の発振線からなる。

これらの励起機構を、図1に示すCdのエネルギー準位図を参照しながら述べる。青の発振線(441.6nm)は、He*の準安定状態(2s³Si)によるペニング電離⁷⁾と階段的電子励起⁸⁾によって、Cdの基底状態原子を青のレーザー上準位(5s²2D_{5/2})に励起し発振させる。なお、He₂*の準安定分子による励起も提案されているが、その確認はまだなされていない⁹⁾。緑の発振線(533.7, 537.8nm)は、赤の発振線(635.5, 636.0nm)を経由するカスケード遷移によるポンピング¹⁰⁾とHeの疑似準安定状態(3p³P₁)によるペニング電離¹¹⁾によって、緑の上準位(4f²F_{3/2}, 4f²F_{7/2})にCdの基底状態原子を励起し発振させる。なおHe₂⁺のイオンの励起も提案されているが、やはりまだ確認されていない⁹⁾。赤の発振線は、まずHeイオンの基底状態粒子とCdの基底状態原子を電荷交換反応によって相互作用させ、そのCd原子をHeイオンの基底状態に近いCdイオンの9p²P_{1/2}と9p²P_{3/2}の準位へ励起する。その粒子は、さらにエネルギー準位間の遷移比に従って、各Cdイオンのレーザー上準位(6g²G_{7/2}と6g²G_{9/2})へ第2

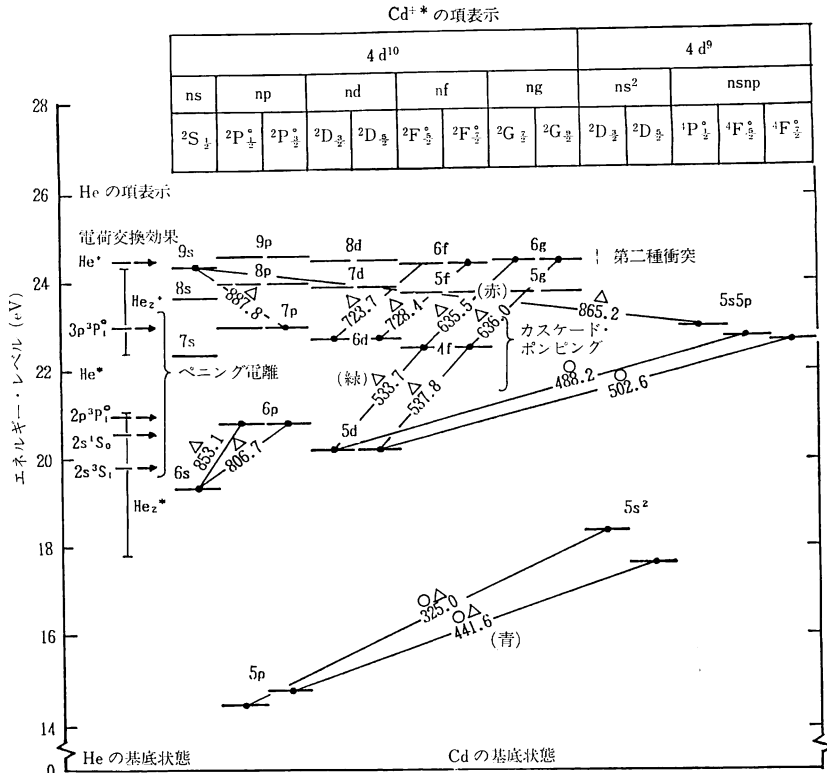


図 1 Cd イオンのエネルギー準位と He ガスの主要な起起準位斜線は発振遷移を示し、○印は陽光柱型レーザー、△はホロー陰極型レーザーの発振線を示す。Cd⁺ の基底準位は 8.993 eV.

種衝突 (非弾性衝突) で遷移し、それぞれの下準位との間に反転分布を形成する¹²⁾。

緑の上準位は、赤の遷移線によってカスケード・ポンピングされるため三原色同時発振のときには、赤のレーザー出力の増大とともに緑の出力も増大する。また青の発振が強くなると、その上準位 (5s² ²D_{5/2}) の占有密度がレーザー誘導放出によって減少し、その空いた準位へ He* の準安定粒子 (2s ³S₁) が流れ込む。したがって、本来ならばそれより高い準位へ励起されるべき He 原子数が減るため、Cd イオンの高い準位への励起も低下し、赤や緑のレーザー出力は減少する。このように単色発振時と三原色同時発振時では Cd イオン準位間のエネルギーの流れが変わる¹³⁾。なお後述するように、このレーザー管の寿命と特性が保証されてきたため、さらに詳しく励起機構が解明されるであろう。

これらの光三原色の波長位置とそれらの波長によって包含される色再現領域を図 2 の色度図に太線で示した。また現在研究されている Se⁺ 白色レーザーや実用化されている He-Ne, Ar⁺, Kr⁺ レーザーの 3 本の発振線を

組み合わせた色再現領域を示した。なお、同時にカラーテレビやフィルム、色彩印刷の色再現領域を示した。この図より、このレーザーの発振波長が色彩分野にとって非常に適した位置にあることがわかる。

3. ホロー陰極型レーザー管の必要条件

このレーザーに必要な条件には、構造上絶対に必要なものと、寿命を延ばすために必要なものの 2 通りに分けられる。次の (1)~(3) は前者に属し、(4)~(8) は後者に属する。

(1) ホロー陰極放電

図 1 に示したように、このレーザーの赤の上準位エネルギーは 24.39 eV と高いため、ホロー陰極放電内に発生する負グローを用いて、高エネルギーの電子群を発生させることが必要である。図 3(a) には He ガスにおけるホロー陰極放電内の電子エネルギー分布を示す。0 から 24.6 eV までは、いわゆる「バルク成分」と呼ばれ、24.6 eV から陰極降下電圧 (200 V くらい) までの平坦部は「プラトー成分」という。さらに陰極降下電圧

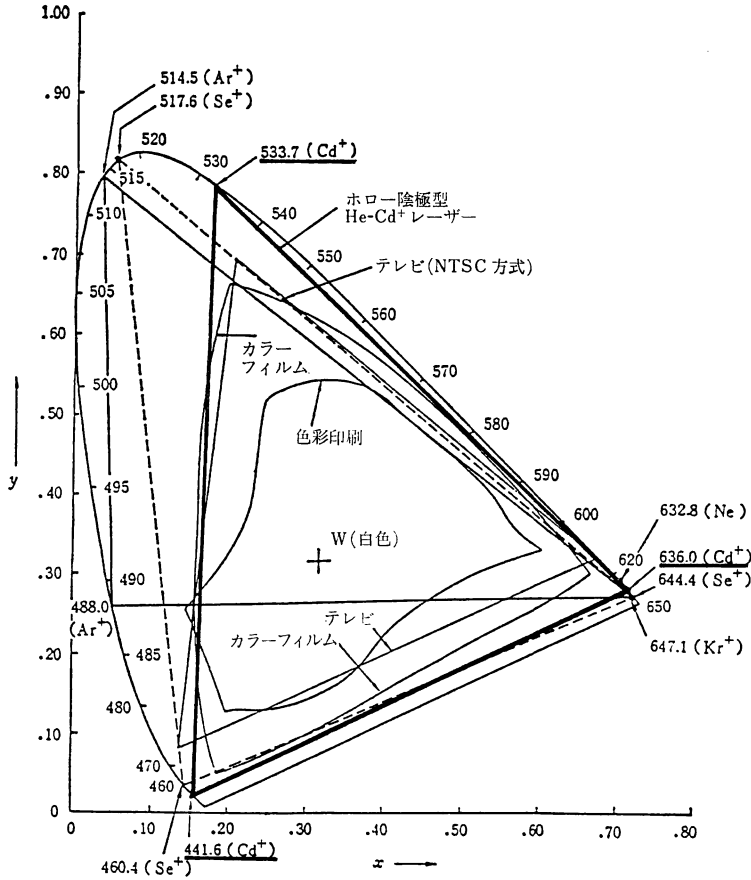


図2 色度図

太線は He-Cd イオンレーザーの色再現領域.

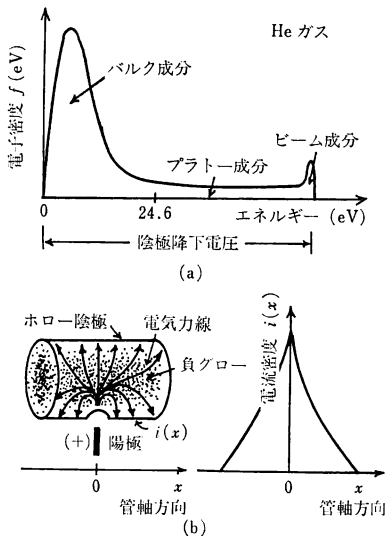


図3 (a) He ガスの負グロー放電領域内の電子エネルギー分布で、横軸はエネルギー、縦軸は電子密度 f (eV). (b) 左図はホロー陰極放電の概略図、右図はホロー陰極内面の電流密度分布.

に等しいエネルギーをもつものを「ビーム成分」という¹⁴⁾. この「プラトー成分」と「ビーム成分」は、陽光柱放電には存在しない¹⁵⁾. ホロー陰極の構造は金属パイプの内側に負グロー・プラズマを発生し、あい対向するプラズマ領域を中心軸上で重ね合わせるようにしている. そのためプラズマ内での累積励起や電離の効果が非常に有効に働き、電子密度は陽光柱放電に比べ2桁ほど高くなる¹⁶⁾.

陰極側面の穴からパイプ内に流れ込む放電電流のうち、電子流は陽極に、He および Cd イオン流は陰極内面に向かう. 陰極内面の電流密度分布は図 3(b)のように山形となり、ピーク値の電流密度が 500 mA/mm^2 を越えるあたりからアーク放電が発生するため、陽極に流し込む電流値にも制限が生じる. なお、電流密度が高い部分ほどスパッタ量も多く、発熱量も多い¹⁷⁾.

(2) 伝熱学的制約条件

ホロー陰極放電は、陰極が冷陰極状態のときのみ陰極暗部内に高電界が存在でき、高エネルギー電子群が発生する. 冷陰極温度の限界として 500°C を想定すると、陰極とその周りの構造から伝熱学的に陰極に投入できる

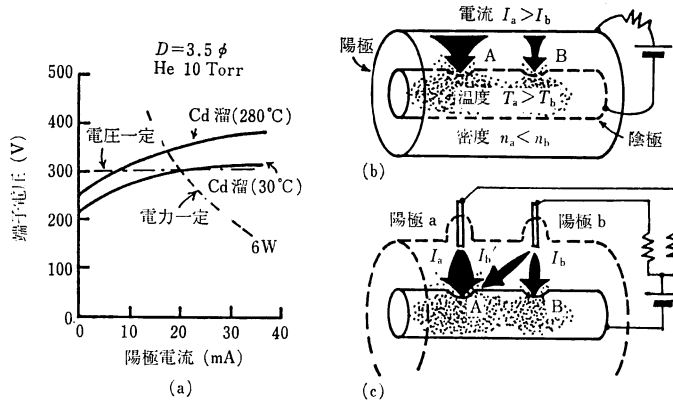


図 4 (a) He ガスのみのときと、それに Cd 蒸気が混入したときの陽極電流 - 端子電圧の変化. 陰極直径は 3.5 mm ϕ , He ガス圧は 10 Torr. (b) 同軸円筒電極間の放電偏りの様子. (c) 陽極を分割したときの放電偏りの様子.

電力に上限が生じる. たとえば陰極のパイプの外径を 6 mm, 内径を 4 mm とし, レーザー管のガラスとして肉厚 1.6 mm のパイレックス・ガラス管を用い, その熱伝導率を $1 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ とする. また, その外壁と大気との熱伝達率を $20 \text{ W/mm}^2\cdot\text{K}$ とし, 熱抵抗を理論計算すると, 陰極に投入可能な最大電力は 400 W/m となる. この理論によると, 陰極温度を一定とした場合, 陰極パイプの厚さを増し, その内径を細くしたほうが, そのパイプ内の負グロー・プラズマ内に投入できる電力密度は高くできる. なお光三原色レーザーの各色の成分比をそろえるために, その封入 He ガスの最適圧力 (P) と陰極内径 (D) の間には, $P\cdot D \approx 36 \text{ Torr}\cdot\text{mm}$ の関係が存在し, $D=2\sim 9 \text{ mm}$ の範囲で成り立つ¹⁸⁾. D の値が決まると P の値も決まるため, 500°C に対応した投入電力から必然的に端子電圧と電流が決まる. 実験によると, 内径が細いほど電流密度が高くなり, 濃いプラズマ密度が得られる.

(3) Cd 蒸気と V-I 特性の関係

放電特性は端子電圧の増加とともに電流が増す, いわゆる正抵抗を示す. したがって, 本来ならば電源端子とレーザー管の陽極端子間には, 保護抵抗を必要としないが, 万一の短絡時の保護と放電のばらつきを抑えるために抵抗を入れる. 図 4(a) に示すように Cd 蒸気の混入によって端子電圧は増加する. この特性があるため, このレーザー管は, 一対の陰極と陽極によって構成することができないことを次に述べる. 図 4(b) に示すように同軸の電極配置を例にする. 陰極パイプ内の Cd 蒸気の分圧 $p=nkT$ (k : ボルツマン定数) が一定に保たれ, A

点に I_a の電流, B 点に I_b の電流が流れ込んでいくとする. いま $I_a > I_b$ のとき, A 点の放電損失は大きく, 温度 T_a が高くなるため, その部分の Cd 原子密度 n_a は, 温度の低い B 点の Cd 原子密度 n_b より低くなる. すなわち I_a の電流はさらに流れやすくなる. 構造上, 端子電圧は等しいので, A 点の周りの温度は高くなる. またホロー陰極材料として仕事関数の大きなもの ($\approx 5 \text{ eV}$) を使うため, 大きな電流の流れた A 点の陰極内面が速く活性化し電子放出がよくなり, B 点は流れにくいままとなる. さらに雰囲気として Cd 蒸気があると電流の大きなほうで合金化が進み, Cd の仕事関数が 4.22 eV であるため, 表面の仕事関数が低くなり, その偏りはさらに顕著となる. この正帰還的な現象は電流の偏りを助長し, 一様なレーザー活性長を得ることが困難になる. 図 4(c) のように陽極を分割しても, 吹き出した A 点のプラズマ電位が電流 I_b を誘引するため, やはり放電の偏りが生ずる. そのため, 各陽極とその放電領域を共に分割する必要がある. 以前は陰極分割も考えられたが, 放電の偏りを起こしやすいため, 現在是用いられていない.

(4) Cd 蒸気の制御

陽極とともにその放電領域を分割したため, Cd 溜も分割配置とする. また高温の陰極内に十分な Cd 蒸気を送り込むために, Cd イオンの電気泳動効果を利用する. すなわち, 各 Cd 溜の中に陽極を設け, 陰極パイプの中へ横穴を通して He ガスの放電を行ない, その放電内で Cd 蒸気をイオン化する. またレーザー管内の Cd 原子密度を正確に制御するため, 溜の位置は, その溜温

度が陰極の放電熱によって上がり過ぎないように陰極パイプから離す。なお、溜温度の不足分は外巻ヒーターによって補助加熱する。定常動作時の蒸気圧は、この Cd 溜の温度によって決まるよう、溜の部分をレーザー管の中でいちばん温度の低い部分とする。ここでは、その最適温度として約 280°C に設定している。また、封入 Cd 金属を長時間にわたり有効に使う方法として、Cd 蒸気が溜と陰極内の間をリサイクルし、いつまでも再利用できる構造とする。

(5) 管軸方向の温度分布の一様化

① 陰極の管軸方向に温度分布のばらつきがあると、Cd 蒸気の分布に粗密ができ、ある限られた陰極長で十分なレーザー活性領域を得ることができない。そのため各 Cd 溜の蒸気密度に多少のばらつきがあっても、各陽極の放電損失が大きくばらつかないように保護抵抗の値を決め、温度分布の一様化を図る。その方法は、放電動作点における電力一定曲線の接線の勾配に近い保護抵抗の値とする。図 4(a) の特性曲線から求めると 13 kΩ となる。次に、

② 陰極パイプの単位長当りの投入電力を一定にすると、吊橋の逆のように温度分布が弓形となる。中央の温度は両端より数%高くなる。このようになると長時間動作の後、Cd 蒸気はパイプ両端に向かって拡散していく。これを防ぐため、陰極パイプの肉厚を薄くし、管軸方向の熱抵抗を上げる。すなわち、熱の逃げを半径方向の熱伝導と放射のみとし、できるだけ管軸方向への蒸気の拡散を防ぐ。さらに、

③ 陰極部の支えが温度分布の一様性を崩さないように、熱抵抗の高いセラミック材で支持台を作る。なお、

④ Cd 溜、陰極給電部および支持台は保温材の中に埋めて外気温度の影響をなくす。

レーザー動作中の陰極パイプは 450°C で動作しており、その中の Cd 蒸気圧は高く、左右両端にある吹き返し放電内の電気泳動効果を用いて、その蒸気の閉込めを行なう。また、その放電用細管部の内壁に Cd 金属が付着しないよう、その部分を外部ヒーターによって 350°C に加熱・保温している。

(6) 陽極ピン間隔

放電の一様性を保つため、陽極ピン間隔を $L=10\sqrt{D}$ としている¹⁹⁾。たとえば $D=4\text{ mm}$ のとき、 $L=20\text{ mm}$ となる。各陽極ピンには 30 mA ほど流すが、そのときの陰極内プラズマの管軸方向への広がりには 40 mm ほどである。ここでの設計値は発光する領域を対象とするのではなく、レーザーの媒質として十分濃いプラズマ密度

をもつ空間の長さを設計対象としている。なおピン間隔を広くしすぎると、陽極ピン当りの電流負担が増すためピン先端が赤熱したり、陰極側面の穴の入口部分の電流密度が高くなるためスパッタ生成物が増え、また陰極内の放電に偏りが起こる。結局、ピン間隔を狭くしたほうが、光三原色の各ラインに対する最適圧力が接近し、プラズマが有効に配列するためレーザー利得も増す¹⁹⁾。

(7) Cd 金属とガラスの着

一般的に、ガラスは、Pb や Na を SiO₂ にわずかに混入して、軟化点において加工しやすくしている。しかし、昔は Cd も混ぜていたとのことで、Cd が溶解するとガラスに浸透し、膨張係数の違いによって、Cd 金属が冷却するときにガラスを割ることがある。したがって、熔融 Cd 金属とガラスが直接接触する箇所には、補強用のルツボを入れる必要がある。なお Cd の蒸気によってガラスが変質し、強度が低下する問題はいまのところ起きていない。

(8) スパッタ物の排除とその蓄積場所

これが、いま一番問題となっている点で、著者は、陰極内面に Cd の合金層を人為的に作り、Cd イオンの自己スパッタリング生成率の高いことを利用して、陰極合金内の Cd 原子をリサイクルさせる一方、陰極母材を Cd イオンのスパッタリングから守っている⁵⁾。それでも発生するスパッタ生成物は、溜の上部にその付着空間を用意して堆積させている。しかし、動作してから 6000 時間ほど経つと陽極ピンと陰極の間で電氣的短絡の問題が表面化してくる。したがって、さらに長寿命化を図るためには、このレーザーに合ったスパッタの少ない陰極材料を探索する必要がある。

4. レーザー・システム

4.1 レーザー管の構造

3. 章で述べた条件を満たすレーザー構造を図 5 に、また外観図を図 6 に示す。陰極材料はインコネル 600 (Ni>72%, Cr 15%, Fe 8%, Mn<1%, C<0.15%) で外径 6 mm, 内径 4 mm である。陽極ピン間隔は 2 cm で、各 Cd 金属溜にはルツボが入っており、その上部にそれぞれ陽極が付いている。溜にはヒーターが巻いてあり、溜の温度を制御している。陰極の給電部は、Cd 蒸気がそこに逃げ込まないように金属溜と並列にレーザー管の下側に配置してあり、その表面にヒーターが巻いてある。溜も陰極給電部もセラミックの支持台も保温材に埋めてある。金属溜の両側には金属板があり、温度分布の一様化を図っている。陰極と各陽極の間には保護抵抗

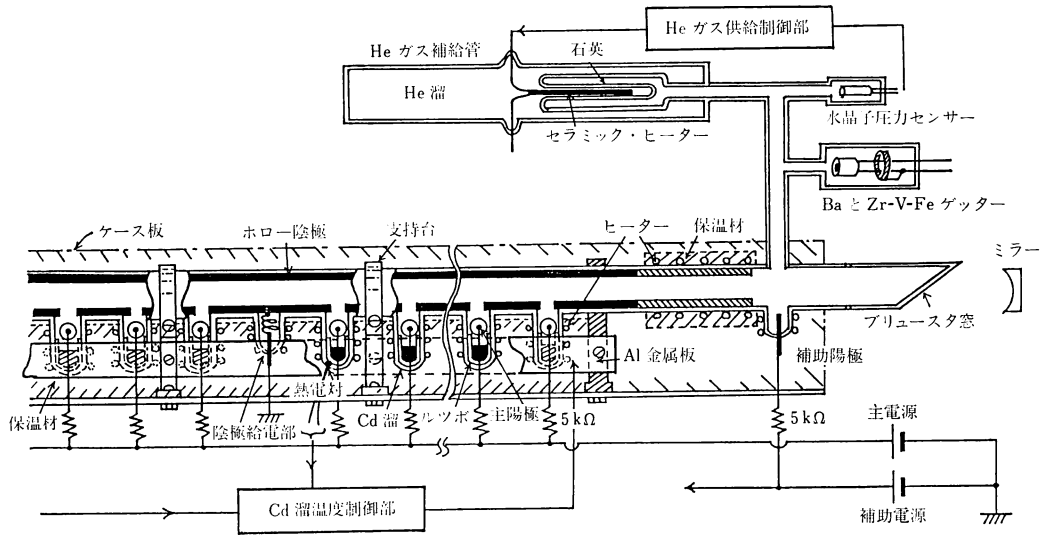


図 5 ホロー陰極型 He-Cd イオンレーザーの全体配置図

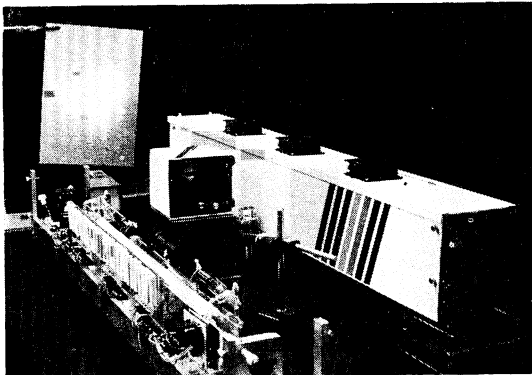


図 6 ホロー陰極型 He-Cd イオンレーザーの外観と動作中のレーザー
中央では回転散乱板を用いてスクリーン上に色合成をしている (当研究室製作).

として $5\text{ k}\Omega$ の抵抗を入れてあり、陰極と吹き返し用の補助陽極の間にも $5\text{ k}\Omega$ の抵抗が付けてある。吹き返し放電部の周りはヒーターで加熱し、その外側を保温して、細管内に Cd が付着するのを防いでいる。ブリュースタ窓は石英製で、レーザー管はパイレックス製である。

4.2 補助システム

図 5 を参照しながら、レーザーの補助システムを述べる。

(1) He ガス補給管

ホロー陰極の内表面に He イオンが打ち込まれたり、Cd 蒸気が付着するとき He ガスが捕獲される。また、He ガスはレーザー管のガラス容器の外壁を透過して大気中に拡散し封入ガスが減少する。それらの減少量を水

晶子圧力センサーで検出し、不足分を He ガス補給管の石英ガラス膜を通して補給する。He 溜の圧力は 750 Torr とし、レーザー管内は 9 Torr としている。石英ガラスの部分は二重管であり、その中にセラミック・ヒーターが入れてあり、そのヒーターの温度で石英ガラスの He ガス透過係数を変化させている。レーザー管内に流れ込んだ量は圧力センサーで監視し、その信号でヒーターを動作している。圧力制御部の構成は、圧力センサー用水晶振動子の駆動回路、設定圧力とレーザー管内圧力の比較回路およびセラミック・ヒーター駆動回路で構成される。

(2) ゲッター

陰極金属も十分な焼き出し処理を行なっているが、それでも He イオンや Cd イオンによって陰極内から残留ガスが叩きだされる恐れがある。また高純度 Cd を用いているが、Cd をすべて蒸気として扱うため、わずかな不純物でも問題となる。ここでは、それらのガスを吸着するため Ba ゲッターを用いる。一方、レーザー管を立ち上げる初期において、レーザー・C.V.D. 現象が存在し光解離の後、炭化水素ガスが管内に発生するため、Zr-V-Fe のバルク・ゲッターを用い、それをヒーターで 300°C に常に活性化しながら、それらのガスを吸着している⁵⁾。

(3) Cd 蒸気の制御方法

レーザー管の動作開始を早めるために、放電開始と同時に Cd 溜の周りに巻いたヒーターに電流を流し溜温度を上げる。しばらくして陰極の温度が溜の部分に熱拡散してくるので、溜のヒーター電流を自動的に小さくし、

溜温度を絶えず一定に設定する。この制御は P. I. D. 制御回路で行なっている。

(4) 自動点弧回路

電源投入と同時に、ホロー陰極放電はすぐに放電開始するが、吹き返し放電部は陽光柱放電であるため、放電開始時には点弧回路を用いる。この放電は Cd 蒸気を閉じ込めるために重要であり、その電流値をフォト・カプラーで絶えず監視し、万一消えた場合は、自動的に再点弧させている。

(5) ケースの温度制御回路

このレーザーは空冷型である。動作開始時はレーザー装置の立ち上がりを早めるため、ケース・ファンを回さないが、しばらくしてケース内温度が 40°C に達すると、ファンが回りだし、それ以上ケース温度が上がらないように外気を吸い込んで一定化している。

5. レーザーの動作特性

(1) 動作開始特性

電源を投入してから1分で青色が発振し、続いて1分後に緑、さらに1分後に赤が発振する。この時間は、陰極内に溜る Cd 原子密度の増え方によって決まる。動作開始時は陰極内面に作られた Cd 合金層の Cd 原子が He イオンのスパッタリングによって舞い上がり発振を開始するが、しだいに Cd 溜からの Cd イオンの補給が重なり合って、強いレーザー発振へと進む。現在、定常発振までには電源を入れてから約8分ほどかかる。

(2) 出力特性

陰極温度が 450°C となるよう投入電力を設定し、陰極ポア径 3.5 mmφ の陰極パイプを用い、多重モードで定常発振させた時の陰極長とレーザー出力の一例を図7に示す。なお、単一モードでの出力は、ほぼ半分になる。各成分比は R:G:B=3:3:4 であるが、使用する

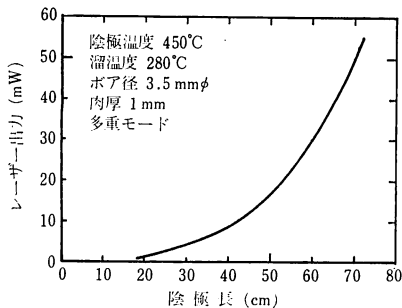


図7 ホロー陰極の長さとお光三原色のレーザー出力特性
封入 He ガス圧は 10 Torr, 陰極材料はインコネル 600.

レーザー・ミラーの反射係数の波長依存性や Cd の蒸気圧、また封入 He 圧力を変えることによって任意に設定することができる。雑音特性は 0.1% 以下であり、単一モードでは、0.05% 以下である。

(3) He ガス補給特性

レーザー管内の He ガスの減少量は、陰極面の電流密度や陰極材料で変わるが、インコネル 600 の陰極材料で、長さ 32 cm, 外径 6 mmφ, 内径 4 mmφ, 電流 300 mA の状態で 0.01 Torr·l/h である。なお、レーザー動作の延べ時間が長くなると、その値は若干減少してくる。

(4) 横モード特性

このレーザーの青、緑、赤の波長は、ほぼ 100 nm ずつ離れているため、各色を同時に TEM₀₀ モードにしようとする、波長の長いほうの赤のビーム径が大きいため赤のほうから陰極内径に制約され損失が増えてくる。すべての波長の出力を TEM₀₀ モードにするために陰極内径を 2 mmφ まで細くしているが、青は TEM₀₁ モードになりやすい。

(5) ビームの連続性

最近、このレーザー・ビームをナノ秒のオーダーで高速撮影したところ、量子光学的な不連続な発振をしているとの報告がある²⁰⁾。これが基本的な現象だと画像分野において超高速スキャンニングを行ない、画像信号の読み取りや書き込みを行なった場合、画像信号の読落しや書落しの起きる恐れがある。しかし、現在のスキャンニング速度では、いまのところ表面化しないであろう。

(6) 寿命

最長で 7000 時間以上を得た。管構造が若干複雑で製作に時間がかかり、さらに高真空を要求されるため、各素材の純度とその品質管理ならびにガラス加工時の防塵環境に気をつける必要がある。

6. 関連分野と最近の動向

このレーザーでは、ホロー陰極パイプ内の金属格子間に残留する微量な原子状水素や炭素、窒素、酸素と Cd 原子の間で、有機 Cd 化合物が合成され²¹⁾、そのガスはレーザー自体の発振光によって光解離し、ブリュースタ窓の内面に僅かな Cd 薄膜を蓄積させるが、この過程は一日ほどのエージングを行なった後、ブリュースタ窓を焼くことによって解決する²²⁾。また、このレーザーに最適な陰極素材の研究も現在行なわれている^{22,23)}。

このレーザーの特徴は、同一光軸に光三原色のレーザー光が存在するため、その光を微小スポットに絞り込

み、スライドフィルムや印刷物の表面をスキャンして色信号を読み取ったり、感光紙の上に色信号に基づいてカラー画像を書き込むことができる。また多波長を用いた同時計測や測定精度の向上が期待できる。波長間隔が広いこと色収差の少ない光学系のシステムを必要とするが、光三原色のレーザー活性領域が同じであるため、各発振光のコヒーレント性がそろっており、それを利用した計測が考えられている。また雑音成分が0.1%と小さいため、色合成において色階調度が多い。

国内では、3社ほどが積極的にこのレーザーの製品化を進め、この秋ごろからサンプル出荷を計画しているところがある。このレーザーに関する特許出願状況は、文献(24)に記載されており、ここ数年、急に出願が増えかけている。なお、外国での動きはあまりない。

このレーザーのニーズ動向を、発振器の長さ、レーザーの出力、雑音、寿命について調べたが、現段階の性能においても、ほぼ5割以上のニーズを満たしていることがわかった。

なお、このレーザーの入手を希望する業界は、フィルム、印刷、コピー、光学機器、計測機器を始め科学分析、医療電子機器、ディスプレイ分野にわたっている。

光三原色レーザーの一つであるホロー陰極型 He-Cd イオンレーザーの研究に対し、惜しみない研究援助をいただいたカシオ科学振興財団と放送文化基金ならびに東京電機大学総合研究所に対して心から感謝の意を表します。

文 献

- 1) E. K. Karabut, V. S. Mikhalevskii, V. F. Parakin and M. F. Sem: "Continuous generation of coherent radiation in a discharge in Zn and Cd vapors obtained by sputtering," J. Tech. Phys. (Sov.), **39** (1969) 1923.
- 2) W. K. Schuebel: "New cw Cd-vapor laser transitions in a hollow-cathode structure," Appl. Phys. Lett., **16** (1970) 470.
- 3) Y. Sugawara and Y. Tokiwa: "CW laser oscillations in Zn II and Cd II in hollow cathode discharge," Jpn. J. Appl. Phys., **9** (1970) 588.
- 4) 川瀬宏海: "He-Cd⁺ 白色レーザー", 応用物理, **54** (1985) 1320.
- 5) 川瀬宏海: "Laser C. V. D. phenomena in the hollow cathode type He-Cd ion laser and the change in property of cathode surface by the implantation of Cd ion", 応用物理学会プラズマエレクトロニクス研究会・第5回プラズマプロセッシング研究会資料 (1988) p. 179.
- 6) K. Fujii, T. Takahashi and Y. Asami: "Hollow-cathode-type CW white light laser," IEEE J. Quantum Electron, **QE-11** (1975) 111.
- 7) C. E. Webb, A. R. Turner-Smith and J. M. Green: "Optical excitation in charge transfer and Penning ionization," J. Phys. B, **3** (1970) L 134.
- 8) T. Goto: "A note on the excitation mechanisms and radial profiles of the Cd (II) 441.6 nm line in the positive column He-Cd⁺ discharge," J. Phys. D, **14** (1981) 575.
- 9) V. S. Kurov and I. Murav'ev: Excitation of the ions of heavy inert gases in the negative glow of a glow discharge in mixtures of helium with argon, krypton and xenon," Sov. Phys. J., **19** (1976) 571.
- 10) G. J. Collins: "Excitation mechanisms in He-Cd and He-Zn ion laser," J. Appl. Phys., **44** (1973) 4633.
- 11) H. Kawase: "Quasi-metastable state excitation mechanism in hollow cathode type He-Cd II laser," Jpn. J. Appl. Phys., **17** (1978) 441.
- 12) J. M. Green and C. E. Webb: "Second-kind collisions of electrons with excited Cd⁺, Ca⁺, Ga⁺, Tl⁺ and Pb⁺ ions," J. Phys. B, **8** (1975) 1484.
- 13) H. Kawase: "Power interaction of laser lines in He-Cd II white color oscillation," Jpn. J. Appl. Phys., **18** (1979) 2111.
- 14) P. Gill and C. E. Webb: "Electron energy distributions in the negative glow and their relevance to hollow cathode lasers," J. Phys. D, **10** (1977) 299.
- 15) M. Ohuchi and T. Kubota: "Monte carlo simulation of electrons in the cathode region of the glow discharge in helium," J. Phys. D, **16** (1983) 1705.
- 16) 川瀬宏海: "ホロー陰極型 He-Cd 白色レーザー", 光学技術コンタクト, **5** (1982) 10.
- 17) 杉村正史, 川瀬宏海, 岡村総吾: "ホロー陰極型金属イオンレーザーの放電特性", 電気学会プラズマ研究会, EP-87-12 (1987).
- 18) 川瀬宏海: "9 mmφ 口径のホロー陰極型光三原色レーザー", 第48回応用物理学会学術講演予稿集, 17 p-ZA-14 (1987) p. 650.
- 19) 川瀬宏海: 特公昭 60-128686 (東京電機大学)
- 20) 福満憲志, 青島紳一郎, 佐々部順, 平野 達, 本間 厚: "He-Cd⁺ ホローカソードレーザーの3色同時発振時における強度変動の観測", 第48回応用物理学会学術講演予稿集, 17 p-ZA-13 (1987) p. 650.
- 21) D. J. Ehrlich and J. Y. Tsao: "A review of laser-microchemical processing," J. Vac. Sci. Technol., **B1** (1983) 969.
- 22) 川瀬宏海: "He-Cd⁺ 白色レーザーのシステム化", 東京電機大学総合研究所終了報告書, **6** (1986) 115.
- 23) 福家 皎, 増田克彦, 時田康弘: "ホロー陰極型 He-Cd⁺ 白色レーザーの諸特性と高出力化", 信学技報, OQD-86-47 (1986).
- 24) ダイヤモンド社: "金属蒸気レーザー", 経営開発情報誌, R&D トピックス No. 870511 (1987).