レーザー技術ノート 1

銅蒸気レーザーの製作

黄振国^{***}, 小林信介^{****}, 難波和身^{*},
齐官清四郎^{*****}, 清水富士夫^{*}

(1980年10月31日 受理)

Copper Vapor Laser

Zhen-Guo HUANG, ^{***} Shinsuke KOBAYASHI, ^{****} Kazumi NAMBA^{*},
Seishiro SAIKAN^{*****}, Fujio SHIMIZU^{*}

(Received October 31, 1980)

1. はじめに

銅蒸気レーザーは平均10W以上の出力が出せ効率も高く、色素レーザー励起用光源として有望視されている。すでに米国からは市販品も出ているが、本邦ではほとんど使われていない。同じく色素レーザー励起用光源として広く用いられている窒素レーザーに較べて、発振波長こそ510 nmと、ローダミン系色素より長波長の色素レーザーしか励起出来ないが、強度、発振時間とも類似でしかも約 10^2 倍早いきり返し発振が出来、微弱な信号を処理しなければならない応用では大きな威力を発揮すると考えられる。又、同じ装置を用いてバリウム (1.5 μ m), 鉛 (723 nm) 等の高平均出力レーザーを発振させることも出来、Fセンターレーザー等の可変波長赤外レーザーの励起光源としても期待出来る。

我々は手に入る文献¹⁻⁸を参考にしながら、窒素レーザーのように普通の大学実験室で製作可能で、且、信頼度高く動作する銅蒸気レーザーの開発にとりかかり、ほぼ目的を達成することが出来た。

2. レーザーの概要

銅レーザーのレベル構造は Fig. 1 の通りである。レーザーの上準位は共鳴線 (325 nm) の上準位で、レーザーの下準位は基底状態と軌道角運動量子数が2異った準安定状態である。したがって、このレーザーはいわゆる self terminating レーザーで、レーザー上準位の寿命に見合った立上りの早いパルス放電で励起を行なわなければならない。又、上準位の見かけの寿命を長くして分布を十分大きくするため、共鳴線で radiation trapping が起きた状態で

* 東京大学工学部, 物理工学科 (〒113 東京都文京区本郷7-3-1)

** 中国科学院, 電子学研究所 (北京)

*** 現在, 東京芝浦電気, 総合研究所 (〒210 神奈川県山崎市区小向, 東芝町1)

**** 現在, 大阪大学理学部, 物理学科 (〒560 大阪府豊中市待兼山)

* Department of applied physics, Faculty of Engineering, Tokyo University (Hongo 7-3-1, Bunkyo-ku, Tokyo, 113)

** Institute of Electronics, Academy of Sciences of China (Peking)

*** Research & Development Center Toshiba Corporation (Kawasaki Kanagawa, 210)

**** Department of Physics, Faculty of Sciences, Osaka University (Machikaneyama, Toyonaka, 560)

Fig. 1. Copper energy level diagram.

動作させる。

銅レーザー発振に必要な条件は十分な銅蒸気圧を作ること、早い励起を行なうことである。今まで種々の方法が開発されてきたが、高平均出力レーザーとして実用化されているのは、高速繰返し放電によって励起と同時にレーザー管を直接1300℃以上の高温に加熱する方法である。このためにサイラトロンを用いて数kHzの高速

繰返し放電励起を行ない、平均数kWの電力をレーザー管に注ぎ込む。

銅レーザーは利得が非常に高く、高温にして十分な蒸気圧さえ得られれば簡単に発振する。我々は開発の途中で種々の事故に出合ったが、それ等はレーザー管を高温にするために起る事故、及びサイラトロンを高繰返し動作させるために起る事故であった。

3. レーザー管

レーザー管の詳細図をFig. 2に示す。レーザー管は2重管になっており、外側はステンレス管、内側は内径26mmφ、外径32mmφの高純度アルミナ管（日本化学陶業KK社製のSSA-S）である。アルミナ管の内部がレーザー媒質部で外側には保温のためのradiation shieldがあり、真空である。この2つの部分は別個の回転ポンプにつないで排気している。アルミナ管の中と外は、Fig. 3に詳細に示してある様に水冷した銅製フランジの端にバイトンOリングを2個並べて、アルミナ管の外側から締めつけ、気密性を保っている。このOリングの位置は放電電極の端から数センチメートルしか離れていないが、数10時間毎にOリングを交換する必要

Fig. 2. Schematic of the copper laser head.

Fig. 3. Construction of the discharge tube-vacuum housing joint.

がある他は、今までトラブルはなかった、放電管の電極はアルミナ管の内壁にそって $50\mu\text{m}$ 厚のタンタルを3重に巻きつけて用いている。アルミナ管、電極及び管の外側の radiation shield の大きさ、構造の詳細を Fig. 4 に示す。

radiation shield は7層の金属筒から成り、内側の5層は厚さ $50\mu\text{m}$ のタンタル、外2層は同じ厚さのニッケルを用いている。タンタル箔は通常10cm幅のものしか得られないので、これをらせん状に巻いて管状にし、接合部分はスポッ

ト溶接してある。又、各層の間隔保持にもタンタル箔片を図に示すように溶接して作ってある。この工作は技術的には簡単であるがかなりの時間を要し、又タンタル箔の材料費も約30万円かかり、事故による破損を出来る限りさけたい部品の一つである。タンタル自体の融点は非常に高いが、溶けたステンレス鋼等と接触すると合金を作ってタンタル箔も溶けてしまうこともある。我々はアルミナ管の外側の真空度が悪くなった時はすでに運転を止め、レーザー管のチェックをするようにしている。radiation shield の材料としては、市販のレーザーではモリブデンが使われているが、高温にしたあと、脆くなり、加工も少し困難な様なので使用しなかった。

アルミナ管はこの会社で販売しているアルミナ管の中では一番高温に耐えるものであるが、今までにはかなりの数のアルミナ管を数時間から数十時間の使用時間のうちに破損している。初期の事故は陰極附近が平均値よりはるかに高温に加熱するためとわかった。Fig. 4 のように陰極の先端が radiation shield のある部分より外側に来る様にして、過度に加熱されるのを防いでいる。しかし、これだけでは管の事故は完全に防げないようで、特に出力をあげるため

Fig. 4. Construction of the radiation shield.

1500℃以上の高温にした時には、管が若干曲がってくる。他社の製品もテストする予定でいるが、寸法規格が異なるため。まだ行っていない。

Fig. 3 からわかる様に、窓を取りつけたフランジ部はレーザー内管と通じており、buffer gas の He を陽極側から陰極側へ流せる様パイプを取りつけてある。動作時の He の流量は特に定量的に測定はしていないが、放電の色が不純物を含んだ色に変らない程度に保っている。銅の場合はそれ程でもないが、鉛を発振させた場合、鉛がどんどん陽極側にたまって短時間で発振が止まってしまったため、それを押し戻すことを期待して、buffer gas を陽極側から陰極にむけて流している。しかし、効果の程は今の所はっきりしない。窓材は最初 BK 7 を使っているが、Fig. 3 に示した位置では熱輻射のために割れてしまうのと、又 buffer gas 圧が低い時は溶けた銅の粒子が飛んでくるようで、現在では陰極側は常に石英ガラスを使用している。又、図では角度をつけて取りつけてあるが、通常は正確に垂直にして、陽極側はレーザー光取り出し用の反射鏡として用い、反射側も共振器鏡の一部として用いている。陰極側にはこの外側に反射率 100% の鏡を置いてある。

外管はステンレス製であるが、放電電流を流し込む部分は絶縁しなければならない。この部分には金属フランジの付いたセラミック管（絶縁用得子）を購入してとりつけた。但し、これは規格製品ではなく、余剰品のストックの中から適当なものを購入した。

4. 電気回路

放電回路は Fig. 5 に示した通りである。主放電用コンデンサー C_M は高圧直流電源からインダクター L を通して resonance charging をする。レーザー管の放電はサイラトロン HY 5004 (EG&G 社製) をスイッチとして用いている。この際、放電の立上りを改善するため、レーザーに並列にコンデンサー C_P を入れてある。これ等 3 つの部品は残留インダクタンスを出来るだ

Fig. 5. Excitation circuit of the copper vapor laser.

げ小さくするため、Fig. 2 に示したようにレーザー管のすぐ横にとりつけてある。これ等はファンで空冷し、また、サイラトロンの陽極はそのくぼみとリード線取付用のネジを利用してふたを作り水冷している。サイラトロンは通常 5-10kH₂ で動作させる。トリガーには 100Ω程度の低インピーダンスの 1.2 kV のパルスが必要なので、小形のサイラトロン (EG&G 社製 HY-60) を用いている。コンデンサー C_M 、 C_P には 2000pF のチタン酸バリウムコンデンサーを用いるが放電の際、break down を起し易く、注意を要する。サイラトロンについては我々の知識の不足も手つだって、色々トラブルがあった。トリガー回路をはじめ、電気回路を改良してサイラトロンの定格に合わせることで大部分は解決している。しかし、高速繰返しのためにサイラトロンが off 状態に復帰しない事が時々あり、この原因については我々は完全には理解していない。このトラブルに影響を与えるのは、グリッドバイアス及び繰返し周波数の他、resonance charging の L と C_M のマッチングの良さ、充電抵抗 R_c の値等である。放電回路のサイラトロン (HY5004) に並列のダイオードは陽極が放電直後負になるのを防ぐ目的で入れてあるが、効果についてはわからない。何分 HY5004 は高価なので大事をとっている。Fig. 2 のレーザーを動かすためのサイラトロンとしては HY 5004 より小形のものでも十分使用出来る。ここに紹介するレーザーの前に製作した試

作機⁹⁻¹¹⁾には窒素レーザー用に購入してあった ground grid 形のサイラトロン HY-3202 (EG & G) を用い、12kV 程度の充電電圧まで支障なく使用できることを確認している。又市販のサイラトロンでは、同じ会社の1802を用いているようである。これ等のサイラトロンではトリガー回路も簡単になる。

5. 動作特性

このレーザーを動作させるには約10gの銅粒をアルミナ管中に適当にばらまき、He 圧を 5 Torr 程度にする。銅粒は実際には適当に穴をあけたタンタル箔に包んで入れてある。溶けた銅粒子が直接窓まで飛んできてきずをつけたことがあるため、このようにして装填している。次に放電を開始するのであるが、まず充電電圧を 6 kV 程度にし、30分程度レーザー管を加熱する。その後、1 kV/10分程度の速度で徐々に電圧をあげてゆき、レーザーのしきい値を越える電圧までもっていく。試作機では最初から最終電圧をかけて動作させていたが、サイラトロンが約10時間で維持電圧が下って使用不能になってしまい、動作手順に問題がある可能性があったため、上記の様にしている。以後事故はないが、他にも電気回路、冷却法等で改良を行なっているので動作手順が原因である確証はない。とにかくこのレーザーで最も高価な部品の破壊試験をするわけにはいかないので、うまくいった時にはその方法を踏襲している。

サイラトロンさえ正常に動作させられれば上記の手順の後、間違いなく発振する。発振特性は今まで報告されているものと特に変りはないが、以下このレーザーについて簡単に述べる¹²⁾ 管内温度があがっていった時、まず発振するのは 510 nm の緑の線であり、高温にすると、578 nm の黄色の線が強くなってゆく。発振は通常レーザー管の断面全面で起るが、しきい値近くではリング状になることがある。これは管内温度分布と緩和の不均一性のためと思われる。共振器の鏡は全反射の側は通常 $R = 3$ m、ビーム取り出し側はコートなしの BK 7 (又は石英ガ

ラス) を用いている。全反射鏡の曲率は $R = \infty$ まで変えてみたが、発振強度はほとんど変らなかった。Fig. 6 にレーザー波形、Fig. 7 ~ 9 に放電電圧、He 圧、繰返し周波数を変えた時

Fig. 6. Laser pulse waveform, (20ns/div).

Fig. 7. Dependence of laser output power on discharge voltage.

Fig. 8. Dependence of laser output power on buffer gas pressure.

Fig. 9. Dependence of laser output power on pulse repetition rate.

の出力の変化を示す。ここに掲げたグラフはパラメーターを時間的にゆっくり変え、温度もそれに従って変化させた時の曲線である。我々が今までに得た最高平均出力は充電電圧約14kVで10.7Wである。電圧をさらにあげればまだ数10%増加すると思われるが、レーザー管が破壊される恐れがあるので試みていない。He圧はFig. 8からわかるようにかなり低い値で出力が最高になる。約4 Torr 以下にすると放電が不安定になる。

6. おわりに

上記のレーザーの全運転時間は予熱時間を含

めてまだ100時間以下であり、一回動作させる毎に点検を行なっているが、温度さえひかえ目にしておけば、一回平均5時間の運転中はほぼ問題がない事がわかった。我々は銅レーザーを代表とする金属蒸気レーザーが分光用レーザーの励起光源として非常に有用であると信じており、それを特殊な技術を使うこともなく、窒素レーザー自作に要する費用の2-3倍の費用で自作出来ることを示した。費用及び開発時間の制約のため、この原稿の記述は完全に論理的なものではなくなったが、我々の過去1年間の経験から得たものを、金属蒸気レーザーを自作しようとする人に出来る限り役立つようにまとめた積りである。

謝 辞

この研究は文部省科研費による特定研究「レーザー分光」の中の分光用レーザー開発グループの研究の一部として行なわれたものである。他の方法では賄えないきれない費用がかかる可能性のあったこのレーザーの開発に取り組めたのはこの特定研究のおかげであり感謝している。理化学研究所の粕谷敬宏氏、基面在道氏及び東京大学教養学部の桜井捷海氏にはサイラトロンでお世話になった。又、桜井氏からは種々有益なコメントをいただき感謝している。

参 考 文 献

- 1) W. T. Walter, N. Solimene, M. Piltch, and G. Gould, IEEE J. Quan. Elec. QE-2, (1966) 474.
- 2) A. A. Isaev, M. A. Kazaryan, and G. G. Petrash, JETP, Lett. 16, (1972), 27.
- 3) R. S. Anderson, L. W. Springer, B. G. Bricks, and T. W. Karras, IEEE J. Q. E. QE-11, (1975), 173.
- 4) B. G. Bricks, T. E. Buczacki, T. W. Karras, R. S. Anderson, and C. E. Anderson, Lawrence Livermore Laboratory, Final Report for P. O. 1540403, (1976).
- 5) Space Sciences Laboratory, GENERAL ELECTRIC COMPANY. Space Division, Instruction and Service manual, Discharge-Heated copper Vapor laser, (1978).
- 6) I. Smilanski, G. Erez, A. Kerman, and L. A. Levin, Opt. Commun. 30, (1979), 70.

- 7) Y. ISHIKAWA, and S. SAWADA, J. Phys. Soc. Japan, 11 (1965), 1184.
- 8) S. Goldberg, and J. Rothstein, HYDROGEN THYRATRONS Reprinted from advances in electronics and electron physics, VOL. XIV. (Academic Press Inc., New York, 1961).
- 10) 清水, 科学研究費特定研究, レーザー分光による励起状態の科学, 昭和54年度研究報告書, (1980). 14.
- 10) 小林, 東京大学工学部物理工学科, 修士論文, (1980).
- 11) 小林, 齊宮, 清水, 第40回応用物理学会学術講演会予稿集, (春季), 30a-C-7. (1980).
- 12) 黄, 小林, 難波, 清水, 第41回応用物理学会学術講演会予稿集, (秋季), 17p-P7. (1980).
- 10) 清水, 科学研究費特定研究, レーザー分光による励