

放電加熱型銅蒸気レーザーの製作 I

—レーザー管の構造と電気回路—

平岡延章*・城田雅敏**・上田芳文*

(*物理学・**実験実習機器センター)

Development of a Discharge Heated Copper Vapor Laser I

— Laser Tube and Electrical Circuit —

Nobuaki HIRAOKA*, Masatoshi SHIROTA** and Yoshifumi UEDA*

**Department of Physics; **Medical Research Laboratory*

Abstract. A discharge heated copper vapor laser has been developed and its physical structure and electrical circuits for pulsed excitation of the discharge are described. The discharge is confined in an alumina ceramic tube 33 mm inner diameter 900 mm long and is thermally insulated with a layer of closely packed alumina wool and a vacuum chamber. A carrier gas of 5-10 kPa neon is made to flow through the tube with a rate of 30-60 cc/min and is excited by 20 kV pulses at a rate of 5000-6000 pps; the maximum input power to the discharge is 6 kW, and the nominal maximum lasing power is 20 W.

Several countermeasures are taken against the overheating and the loss of controllability of the hydrogen thyratron under the high repetition rate operation; diagrams of these protection circuits are also given.

1. はじめに

レーザーを動作媒質によって分類すると、気体レーザー・固体レーザー・液体レーザー・半導体レーザーに分けられる。金属蒸気レーザーは気体レーザーの一種である。気体レーザーの多くは長時間、連続的に発振でき、発振光の性質は単色性・指向性などコヒーレンスに優れる。

気体レーザーとして発振する物質は非常に多くあり、原則的にはすべての元素または化合物について発振が期待できる。しかし、高沸点の元素や純粋気体として極く少量しかない元素による発振は報告されていない。金属も加熱・蒸発させると原子やイオンの蒸気になり、レーザー発振を行い得る。たとえば、銅蒸気レーザーは平均10W以上の出力と平均1%程度の効率で1~10kHzの準連続的なパルス発振をする。発振波長は510.6nmの緑の光と578.2nmの黄の光であり、可視域での利用や色素レーザーの励起用光源として有望視されている。そこで我々

は、構造的に比較的容易に高温が達成できる縦型パルス放電励起の自己加熱型銅蒸気レーザーを製作した。

2. 銅蒸気レーザーの動作

銅蒸気レーザーのエネルギー準位構造は、三準位系である（図 I）。各準位間の分布密度の時間変化はレート方程式を用いて説明される。レーザー発振に必要な反転分布を達成するには、三準位以上が必要となり、励起と緩和によってエネルギー準位系のどこかに、負温度状態が現われる。

図 I に示すように、レーザーの上準位 2P は最もエネルギーが低い第一共鳴準位で、基底準位 2S と双極子許容遷移で光学的に強く結ばれている。レーザーの下準位 2D は基底状態と軌道

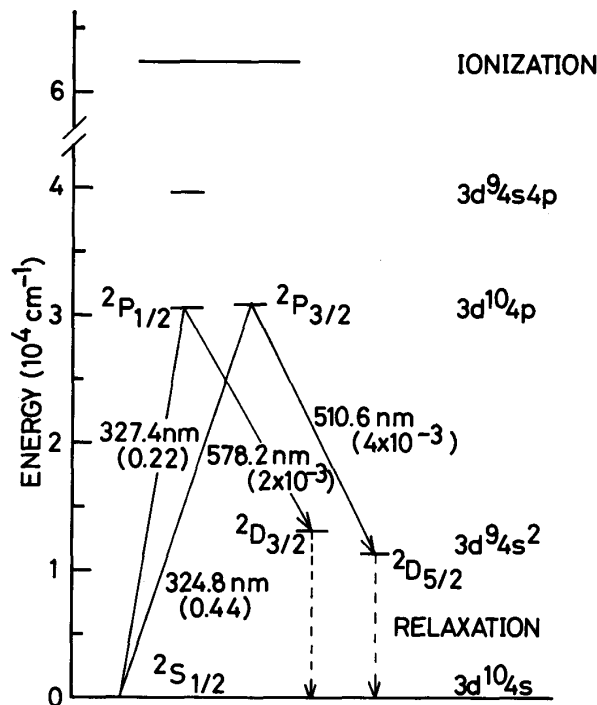


図 I 銅原子のエネルギー準位。括弧内の数値は振動子強度

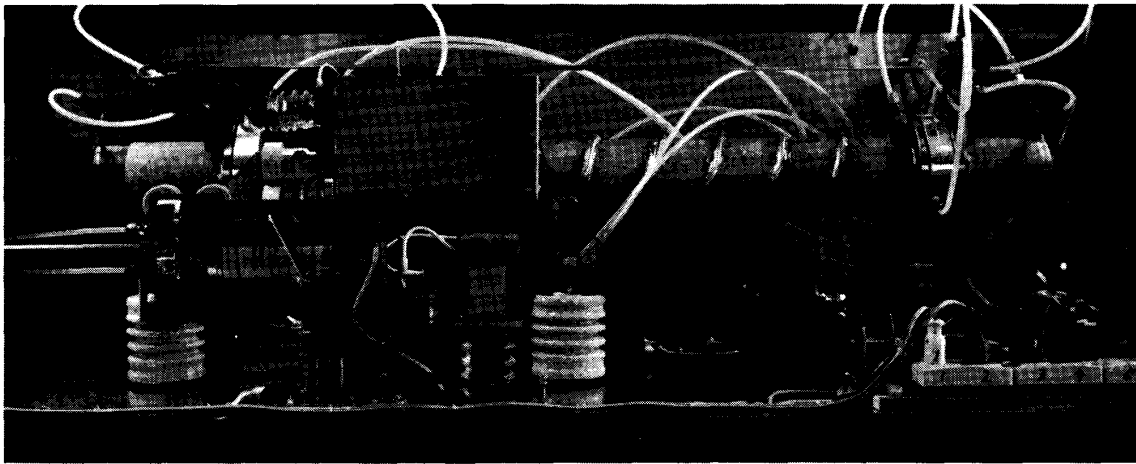
角運動量量子数が 2 異なった禁止遷移で、準安定準位となる。大きい光学的遷移確率を持つ準位は、電子衝突励起断面積も大きくなる。したがって、レーザーの上準位 2P への電子励起はレーザーの下準位 2D へのそれより大きくなり、ここに反転分布が形成される。一方、準安定状態 2D の緩和には制限があるため反転分布は過渡的になる。発振させるには、上準位の寿命よりも短い立ち上りの速いパルス放電で励起する必要がある。また、レーザー下準位の分布密度をできるだけ速く緩和させることも重要である。これに寄与するのは、管壁への非弾性衝突、原子と原子、原子と電子などの衝突である。このように、上準位より光を放出して、下準位に移行して終わってしまうレーザーを、自己終端レーザーと呼び、その動作はパルス発振となる。し

かし、連続発振レーザーのように上準位への励起と緩和が同時に進行しないので、高効率を期待できる。

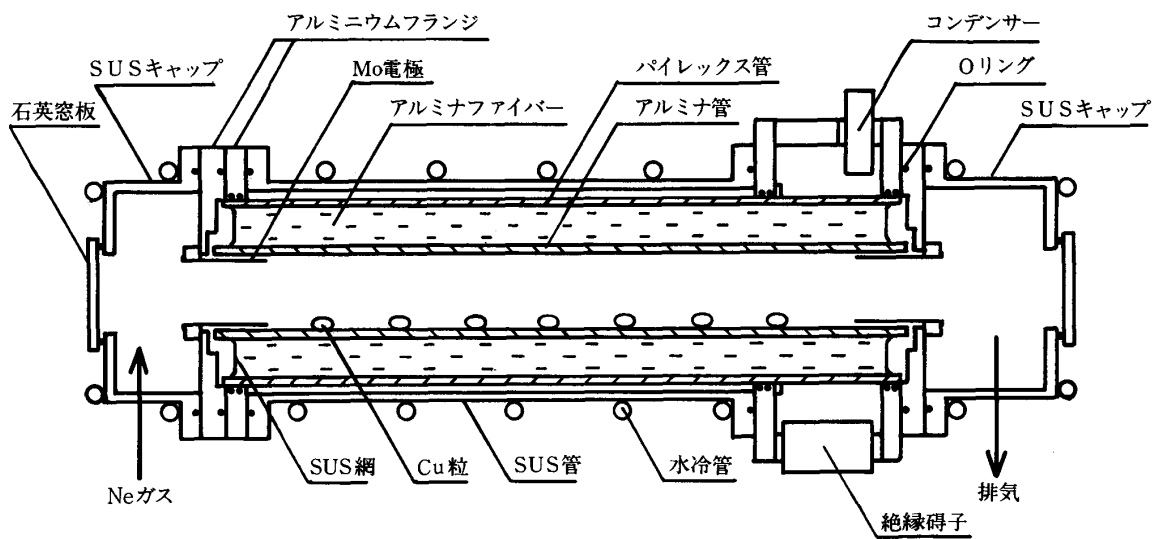
3. レーザー管

レーザー管の概要を図II, 図IIIに示す。レーザー管の全長は約1200mmで、外側よりステンレス鋼管、パイレックス管、アルミナ管の三重管構造である。

外管はステンレス鋼管(外径100mm)の両端にJIS真空フランジを溶接した中央部と、その両端に取り付けるステンレス鋼管製のキャップから成る。中央部と右側キャップとの間は、



図II レーザー管の全体写真



図III レーザー管の概略図

パイレックス管を露出させ放電電極を電氣的に絶縁する。キャップの両端にはレーザー光取り出し用の石英窓板を取り付ける。外管とパイレックス管の間は、断熱のため油回転ポンプにより排気する。

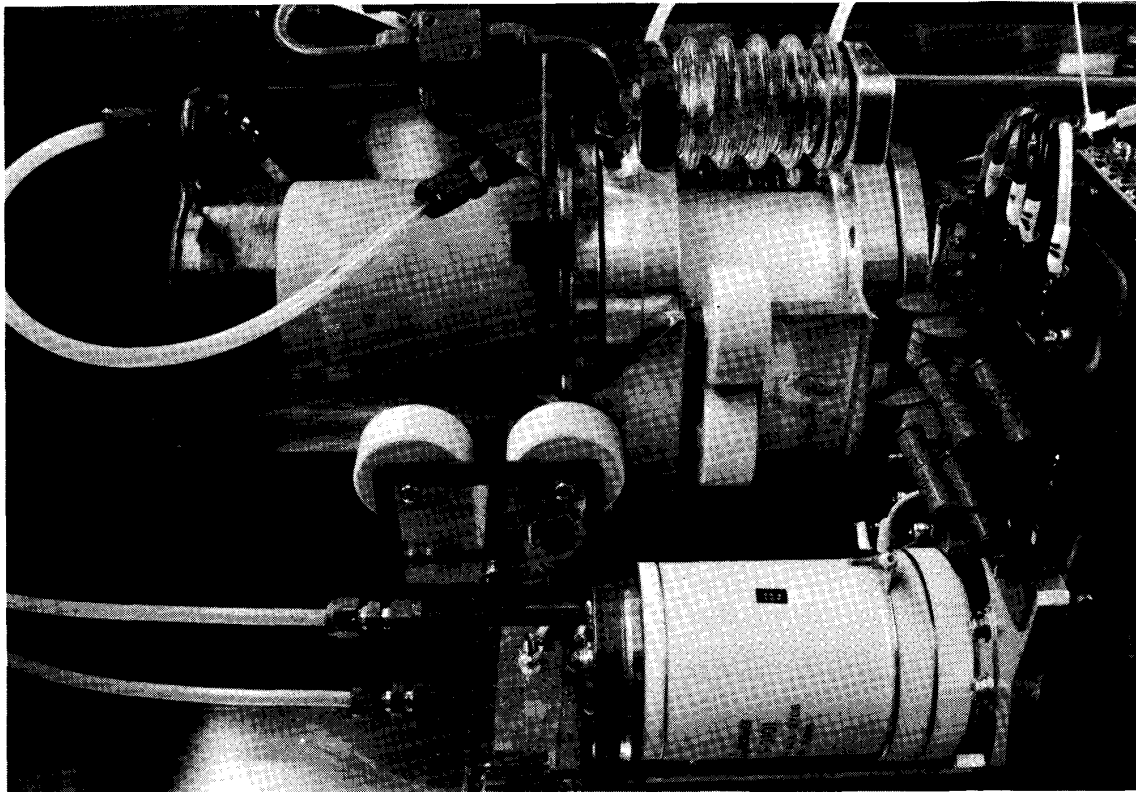
内管は放電管としてレーザー活性部になり、動作中は約1500℃の高温となる。この高温に十分耐えられる素材としてアルミナ管（全長890mm，外径40mm，内径33mm）を用いた。使用したアルミナ管の線膨張係数は $8 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ で、温度上昇を1500℃とした場合、長さ方向の伸びは約13mm，径方向の伸びは約0.6mmとなる。室温での、アルミナ管と電極取付フランジとの隙間は長さ方向17mm，径方向1mmとした。

アルミナ管の内側と外側での温度差が大きいと、内側は温度上昇により外側より圧縮力を受け、外側は温度が低いので内側より引張力を受ける。この時、アルミナ管に亀裂や破壊を生じる。この熱衝撃は、特にアルミナ管のような脆性材料には多くみられる。これを防止するためにアルミナ管の外側の断熱を良くし、アルミナ管全体の温度分布をできるだけ均一にする。

アルミナ管からの放熱は、熱伝導と熱輻射が考えられる。アルミナ管内部は、希薄な緩衝ガスによる対流伝導である。よって、その排熱損失は少ない。外部では、輻射による熱の逸散が考えられる。完全黒体におけるプランクの輻射公式により、放電部を1500℃にしたとき、輻射による損失は約60kWにも達する。このアルミナ管からの熱輻射を少なくするため、綿状のアルミナファイバーを断熱材として使い、パイレックス管との隙間に充填する。輻射損失を小さくするためには、アルミナファイバーの充填密度は高い方がよい。そこで、治具を用いてアルミナ管とパイレックス管を同心状に固定し、一端から棒で押し固めながらファイバーを詰めた。パイレックス管の両端より20mmのところ、薄いステンレス鋼の枠にステンレス鋼網（400メッシュ）をスポット溶接したものを取り付けてアルミナファイバーが出てこないようにした。

パイレックス管は、絶縁間隙の両側と他端の3ヶ所をそれぞれ2本の弗素ゴムのOリングで支え、フランジで締め込む。このようにして、パイレックス管とレーザーの外管との中心軸を一致させ、同時に外気とレーザー管内との気密封止をする。パイレックス管は高温になるので、2本ずつ組み付けたOリングの隙間に冷却水を流し、Oリングの高温劣化を防ぐ。また、パイレックス管の温度変化による伸縮や膨張は、Oリングの滑りや圧縮によって吸収する。温度上昇によるパイレックス管の伸びは小さいので、Oリングへの機械的負荷は少ないと考える。

放電電極は厚さ0.1mmのモリブデン箔を2～3重に巻き付け、アルミナ管の内側に沿って挿入し、端を切って放射状に外側に直角に曲げ、電極取付け金具を用いてフランジに固定する。電極の先端は、尖った所のないよう処理をし、放電が一点に集中しないようにした。電極の長さは約90mmで放電長は約750mmである。この電極は電氣的にレーザー外管と一体化しており、図Ⅲの左側を接地、右側に負の高圧を印加する。パイレックス管が露出している部分にあるフランジの4ヶ所のボルト穴のうち、3ヶ所に絶縁碍子を付け、この部分を機械的に補強する。他の1ヶ所には、ピーキングコンデンサーを取り付ける。この絶縁碍子付近を図Ⅳに示す。



図IV レーザー管の絶縁碍子付近

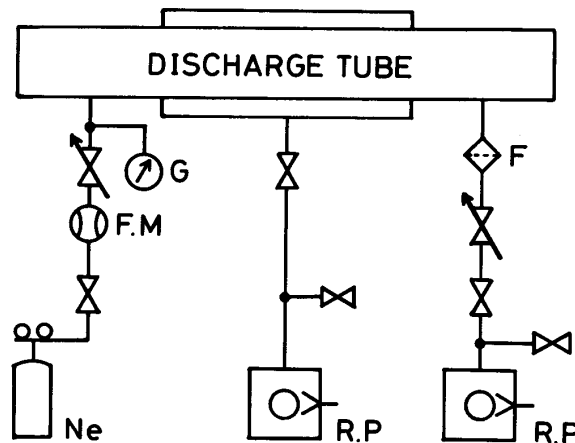
4. 冷却系

冷却水はレーザー管の近くで圧カスイッチを経たのち、分岐管により5系統に分け、1/4"のチューブを用いて配管する。3系統はパイレックス管を支持する3組のOリングを冷却する。サイラトロンのアノード電極を冷却するため1系統用いる。サイラトロンのヘッド部分に、黄銅で加工した蓋を取り付け、その中に通水してアノード部分の過熱を防ぐ。5系統目はレーザー管の外管の冷却に用いる。このため、外管に通水用の銅管を螺旋状に半田付けする。両端のレーザー管ヘッドにも同様に、銅管を半田付けしレーザー光取り出し窓の過熱を防ぐ。分岐管より出た5系統の冷却水は、別々の経路を通して排出することにより、排水抵抗の軽減と各系統ごとの流量の確認を行う。

これらの水冷とともに、サイラトロンの取付けフランジ側および高温になる恐れのある部分は、送風機を用いて強制空冷する。

5. ガス系

放電のための緩衝ガスとしてネオンを流す。ネオンの流量およびレーザー管内の圧力を調整するためのガス系を図Vに示す。放電管内にはネオンガスと加熱蒸発した銅蒸気があり、放電励起によってイオン化されるネオンと銅のうち、ネオンイオンの易動度の方が大きいので、先



図V ガス配管。G：圧力ゲージ，F.M：フローメーター，Ne：ネオンガスボンベ，R.P：油回転ポンプ，F：フィルター。

に陰極側に引き寄せられ，残った銅イオンは陽極側に多くなる。この銅イオンが接地側電極や窓に付着する恐れがあるので，陽極側よりネオンを流入させ，陰極側から排気する。高電圧側フランジへのガス配管は，電気絶縁のためパイレックスの細管を用いる。

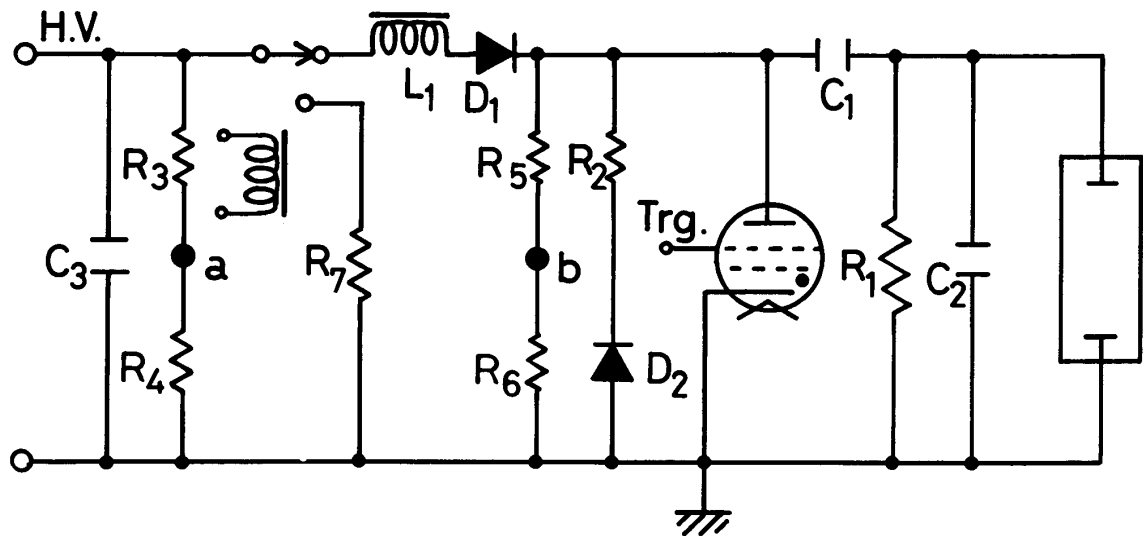
レーザー管からの排気中には，放電に付随して発生するアルミナファイバーの小片が含まれる。これを除去するため $7\mu\text{m}$ のフィルターを設けた。レーザー管内のネオン圧力及び流量は，給気側，排気側に取り付けた2個のニードルバルブで調節する。

6. 電気回路

6.1 主放電回路

放電回路を図VIに示す。銅蒸気レーザーでは発振パルス幅が約 30ns であり放電パルスの立ち上がり時間内に発振が終了してしまうので，放電電流の立ち上りを速くする必要がある。さらに，高出力を得るため，放電の繰り返し周波数は高いほど良い。

この要求を満たすためスイッチ素子として水素サイトロンを用いる。また，倍電圧を得るため，主放電用コンデンサー C_1 へチョークコイル L_1 を通してレゾナントチャージングを行う。抵抗 R_1 はコンデンサー C_1 を充電するときには，放電管の両端を短絡させ，コンデンサーの放電時に開放させる役目をもつ。 R_1 のインピーダンスが L_1 ， C_1 のそれに比べて十分小さいとき，高圧直流電源の約2倍の電圧が主放電用コンデンサー C_1 に充電される。充放電の繰り返し周波数は， $2f_0$ ($f_0=1/2\pi\sqrt{L_1C_1}$)まで可能で，入力電力は繰り返し周波数に比例する。これ以上の繰り返し動作では C_1 が完全に充電される以前に放電が始まり，入力電力は飽和する。 C_2 は放電の立ち上りを速めるためのピーキングコンデンサーである。また，放電回路の残留インダクタンスも放電特性に大きい影響を与える。残留インダクタンスを減少させるため，放電の



図VI 主放電回路

帰路にステンレス鋼管を共用し、コンデンサー C_1 、 C_2 、およびサイラトロンはステンレス鋼管のすぐ近くに配置する。

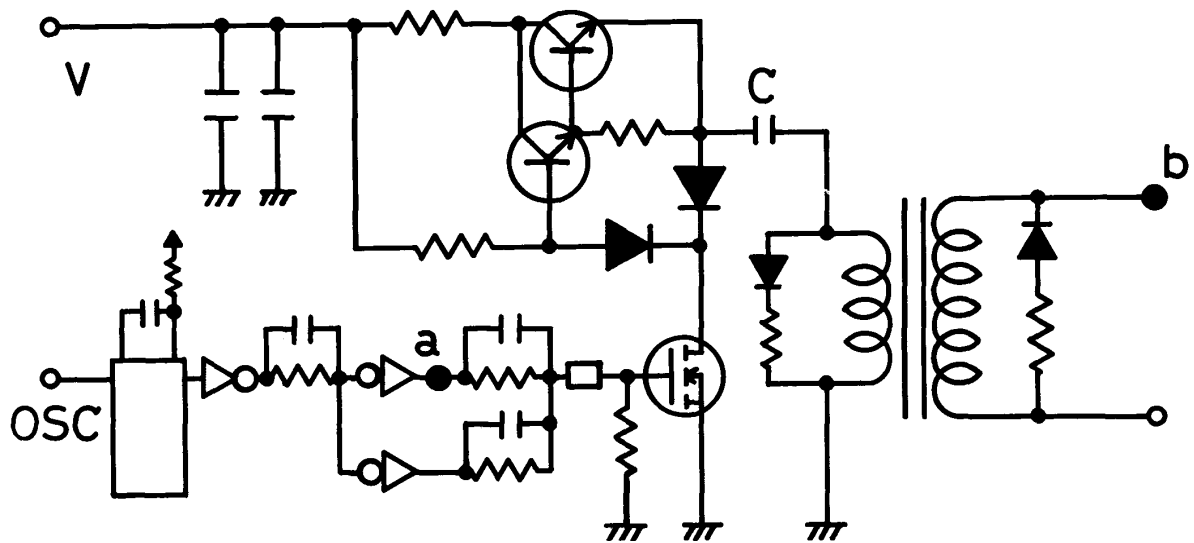
同軸管のインダクタンスは、 $L = \mu l \ln(b/a) / 2\pi$ (μ : 透磁率, a : 中心導体半径, b : 外部導体半径, l : 長さ) と表わされる。したがって、放電管部のインダクタンスは、 $l = 800$ mm, $a = 33$ mm, $b = 96$ mmより、 $L \approx 170$ nHとなる。サイラトロンやコンデンサーへの配線を含めると、全残留インダクタンスはその約2倍と見積られる。

6. 2 トリガー回路

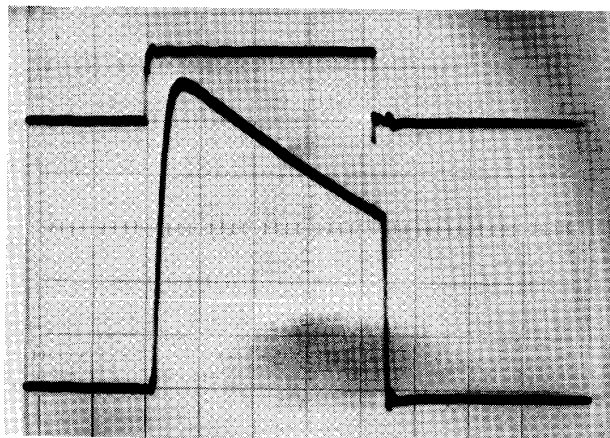
サイラトロンを高速スイッチとして安定に動作させるためトリガー回路は重要である。

放電用コンデンサ C_1 の充電中は、制御グリッドに負のバイアス電圧を加え、カソードから出る熱電子をここで反撥させて、アノードに到達しないようにする。 C_1 を充電した後、制御グリッドに正のトリガーパルスを重畳させ、カソードとアノードの間を導通させる。このトリガーパルスを発生させる回路を図VIIに示す。

発振器よりのトリガー信号は、ワンショットマルチバイブレーター (74LS123)によりパルス幅 $2 \mu\text{s}$ のパルスに整形する。さらに、バッファを介してスイッチ素子であるパワーMOSFET (以下単にFETと記す)に加える。このFETはゲート・ソース間電圧 10V で導通し、この時のターンオン時間は 150ns 、オン抵抗は 0.4Ω である。ゲートの静電容量は 2.7nF と大きく、大きな充電電流が流れるため、CCDのクロック駆動用素子を応用して、これを2個並列にし、ゲートを駆動する。FETがオンになると、コンデンサー C の電荷がFETを流れてパルストランス (10:20)に流れ、2倍に昇圧されたトリガーパルスが2次側に得られる。駆動素子の出力 (図VIIのa点)とトリガー回路の出力 (図VIIのb点)の波形を図VIIIに示す。出力波形より、トリガーパルスの立ち上がり時間は約 100ns 、パルス幅は約 $2 \mu\text{s}$ 、出力インピーダン



図VII トリガー回路



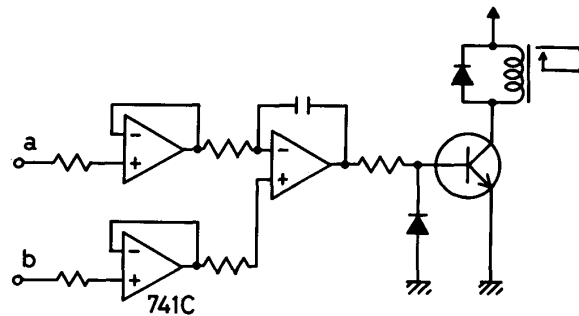
図VIII トリガー回路の出力波形。上：図VIIのa点，縦軸10V/div，横軸500ns/div。下：図VIIのb点，縦軸120V/div。電源電圧400V，負荷抵抗120 Ω 。

スは約20 Ω であることがわかる。このトリガー回路の電源側に入れたトランジスタは、コンデンサーCの充電時に低インピーダンスとなり充電時間を短縮し、FETがオンになったとき高インピーダンスとなり電源の短絡を防止する役割をもつ。

6.3 保護回路

放電回路のインピーダンスは放電管の放電状態により大きく変わり、その値を正確に把握することは困難である。したがって、インピーダンスの不整合は避けがたく、反射による逆電圧がサイラトロンに加わる。図VIの抵抗 R_2 とダイオード D_2 により、この逆電圧を吸収する。また、放電後もサイラトロンのアークが切れず、続流することが考えられる。この続流に対する

保護回路を図IXに示す。高压電源電圧とサイラトロンのアノード電圧を図VIのa, b点で検出し、アノード電圧の低下が放電周期を越える時、ソレノイドを動作させ、高压電源と放電回路



図IX 保護回路. a, b点が図VIのa, b点と対応し、右端のリレーで図VIのソレノイドで駆動する。

との接続を遮断する。同時に主電源を遮断し、平滑コンデンサに残る電荷は抵抗を通して放電させる。

システム全体の信頼性を向上させるため、主電源は次の条件が満たされる時にのみ起動する。

- i) レーザー管およびサイラトロンの冷却水圧が規定圧以上である。
- ii) サイラトロンフランジ側送風機の風圧が規定圧以上である。
- iii) サイラトロンのカソード・ヒーター, リザーバー・ヒーターの予熱が完了している。
- iv) 主電源の電力調整器のダイヤルが零位置にある。
- v) 高压印加部分の遮蔽パネルがすべて取り付けられている。

主電源の電磁接触器の結線は自己保持型とし、上記のいずれかの条件が満たされず、動作中に遮断された場合、自動的に再起動することはない。

7. まとめ

以上、銅蒸気レーザーのレーザー管の構造、冷却系、ガス系および電気回路について述べた。銅蒸気レーザーは比較的簡単に自作でき、長さ750mm、内径33mm程度の放電体積で入力3kWのとき10~15Wの大きな平均出力が得られた。このレーザーの発振特性、および理工学・医学への応用については次の機会に紹介する。

文 献

- 1) 霜田光一, 矢島達夫編著 量子エレクトロニクス(上)第2章, 裳華房(1972)

(1987年9月10日受理)