

## 研究

## Ar ジェット放電励起方式色素レーザー

谷口 宏\*・斎藤 弘\*・小林 喬郎\*\*†・稲場 文男\*\*

\* 岩手大学工学部電子工学科 〒020 盛岡市上田4-3-5

\*\* 東北大学電気通信研究所 〒980 仙台市片平2-1-1

(1983年1月13日受理)

## High-Repetition Dye Laser Pumped by Ar-Jet Guided Spark Scheme

Hiroshi TANIGUCHI,\* Hiroshi SAITO,\* Takao KOBAYASHI\*\*† and Humio INABA\*\*

\* Department of Electronic Engineering, Faculty of Engineering, Iwate University,  
4-3-5, Ueda, Morioka 020, Japan\*\* Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University,  
2-1-1, Katahira, Sendai 980, Japan

A compact and high pulse repetition dye laser pumped by the Ar-jet guided discharge has been studied and developed. The Ar-jet guided discharge with very small volume of 1mm diameter and 5-15 mm length with fast rise time of about 60 ns was realized and used to excite efficiently small volume of laser dye with an elliptic cylindrical reflector for achieving low threshold operation. Using Rhodamine 6G dye the threshold value for laser oscillation was 61 mJ and the pulse repetition frequency was extended up to 100 Hz. Design and performance of the Ar-jet guided discharge and the dye laser system are presented and problems for higher pulse repetition operation are discussed.

## 1. はじめに

近年、広範囲に波長可変特性を有する色素レーザーは分光学などの理化学分野やレーザーレーダー、アイソトープ分離をはじめとする広汎な工学分野への応用が活発に進められている。これらの応用面をさらに進展させるための色素レーザーの研究開発として、大型で大出力のパルス発振または連続発振動作を目指す方向と、小型の装置で高速パルス発振動作を実現する方向の二つが期待されている。とくに後者の方向を目指す色素レーザーでは、色素の蛍光寿命が数 ns 以下と短いことと、三重項吸収損失のレーザー発振への影響を避けて効率のよい発振を得るために、立上り時間が数百 ns 以下の短い光源による励起法が望まれている。そのため従来、放電回路のインダクタンスを減らした回路構造の放電管を用いる

もの<sup>1)</sup>や、N<sub>2</sub>レーザーなどの短パルスレーザー光励起によるもの<sup>2)</sup>などがおもに試みられている。

われわれはこのような高速励起法として、Ar ジェット放電励起法<sup>3)</sup>に着目し、放電管の構造の改良や放電回路の低インダクタンス化を検討することにより、立上りが速く、しかも従来の光源と比較して発光径が細く安定な励起光源を得ることができた<sup>4-6)</sup>。この励起光源に、さらに効率のよい集光鏡と高速循環色素セルを組み合わせ、低入力エネルギーで高速繰返し動作の可能な簡易小型の色素レーザー装置を実現した。本論では、この色素レーザー装置の構成とその基本的特性、および実験結果の検討について報告する。

## 2. 高速繰返し色素レーザーの設計条件

放電励起により高速パルス繰返して高効率の色素レーザー発振を得るためには、励起の際の熱的な効果を極力避けることが要求され、そのためには一般に低入力エネルギーで短パルス、高強度の光励起を行なうことが基本的に重要である。そこで、高速繰返し色素レーザー装置

† 現在：福井大学工学部電気工学科 〒910 福井市文京3-9-1  
Present address: Department of Electrical Engineering,  
Faculty of Engineering, Fukui University, 3-9-1, Bun-  
kyo, Fukui 910, Japan

の設計に当たって、とくに留意した条件を次に列挙する。

1) 励起光源としては、(a) 100 ns 以下の速い立上り時間を有し、パルス幅が狭い特性をもつこと、(b) 発光径が 1mm 程度と細く安定な放電光であること、(c) 発光スペクトルが色素の吸収スペクトルに適合していること、(d) 長寿命であること、などである。

2) 集光鏡としては、(a) 励起光を効率よく小さな色素セルに集光できること、(b) 放電部からの衝撃波 (shock wave) の影響が小さい構造であること、が挙げられる。

3) 色素セルは、(a) 大きな立体角で励起光が入射できて、効率のよい励起の可能な形状であること、(b) 励起光源の発光径 (実効径) に適合したセル径を有し、かつ励起光の当たらない不活性領域ができるだけ小さいこと、(c) 乱流がなく、色素溶液の高速循環が可能な構造であること、などである。次にこれらの条件をほぼ満足するように考慮して行なったレーザー装置の設計および試作結果について述べる。

### 3. 色素レーザー装置の設計および試作

#### 3.1 色素レーザー装置の基本的構成

Fig. 1 に試作した色素レーザー装置全体の構成の概要を示す。レーザー装置は大別して、色素循環系、レーザーヘッド部、励起光源系から成る。色素循環系は、色素溶液溜から色素循環ポンプ、不純物および気泡除去フィルター、色素セルを通り色素溶液溜に戻る径路から成る。

励起エネルギー蓄積のためのコンデンサーバンクは高電圧電源で充電され、この電圧を Ar ジェット放電電極間に印加し、外部より一方の電極の中心に配置したトリガー電極に高電圧パルスを印加することにより放電を開始させる。放電電極間に生じる Ar ジェット放電の細径発光を楕円筒集光鏡で集光し、効率よく色素を励起できる配置とした。

#### 3.2 色素レーザーヘッド部の構造

試作した色素レーザーヘッド部の構造を Fig. 2 に示す。放電エネルギー充電用のコンデンサーバンクとし

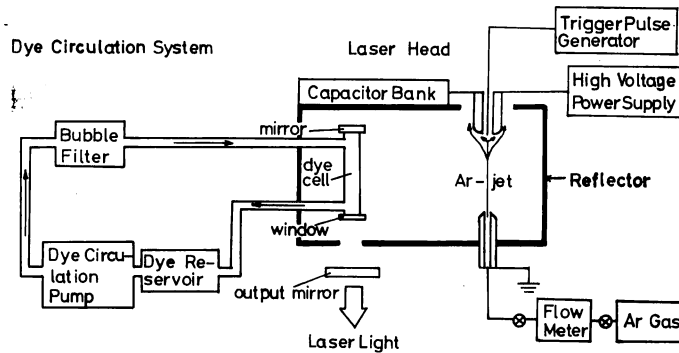


Fig. 1 Block diagram of the dye laser pumped by the Ar-jet guided discharge.

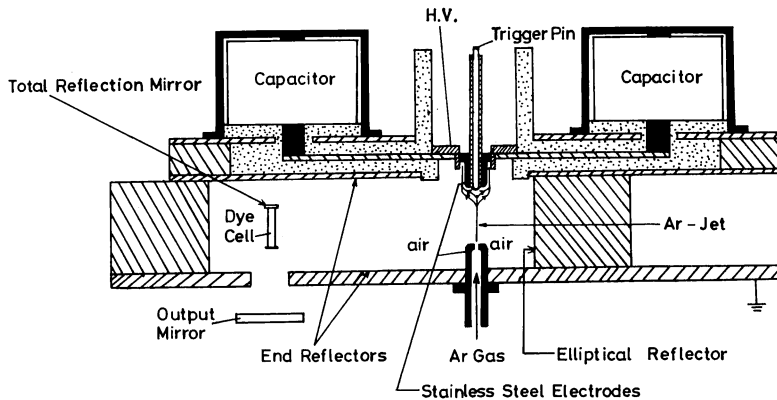


Fig. 2 Cross sectional view of the dye laser head.

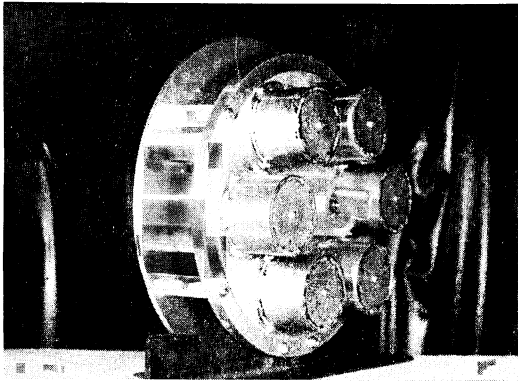


Fig. 3 External view of the dye laser head.

て、市販のセラミックコンデンサー (2,000 pF, 30 kV 耐圧, 6 個) を図の Ar ジェット放電電極を中心に同一円周上に並列に配置した。アルミニウムブロックから切削研磨した楕円筒集光鏡の一方の焦点軸上に Ar ジェット放電電極が、他方の焦点軸上に色素セルが来るように配置してある。また放電回路のインダクタンスを極力減らすために、電流の往復の径路はできるだけ密接して折り返す構造とし、コンデンサーは黄銅の筒で囲んである。図中斜線の部分にはアルミニウムを用い、斑点の部分にはアクリル樹脂板を用いて各電極間の絶縁を施した。レーザーヘッド部の寸法は、直径約 30 cm, 長さ約 10 cm と比較的小型の構造とした。Fig. 3 に試作したレーザーヘッド部の外観を示す。

### 3.3 Ar ジェット放電励起光源および楕円筒集光鏡

高速繰返し動作の色素レーザーでは、励起光源の寿命が重要な問題となる。ここでは、通常の Xe フラッシュランプのような封じ切り形放電管と比べて、石英管などの外管を用いないため、長寿命が期待できる Ar ジェット放電 (Ar-jet guided spark<sup>3,7,8</sup>) 方式を採用した。

Fig. 4 に Ar ジェット放電部の構造を示す。ステンレス製の陰極の内部に内径 0.3 mm のパイレックス管を用い、陰極の中心に直径 0.5 mm のノズルを設け、そこから Ar ガスを噴出させて空気中で放電させることにより、従来の光源と比べてはるかに細径の約 1 mm の発光を得ることができた。これは Ar ガスの絶縁破壊電圧が周囲の空気の高電圧に比べて 1/2 以下と低いため、放電が Ar ガス中に閉じ込められて生じることに起因している。Ar ガスの流量を調節することにより、細い径で安定な発光を得ることができた。また従来の Xe フラッシュランプなどと比較して Ar ジェット放電はほとんど線状光源とみなすことができる。

このような線状光源の発光を細い色素セルに結像さ

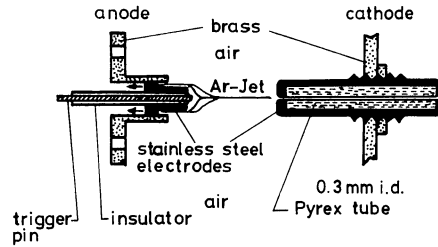


Fig. 4 Configuration of the Ar-jet discharge electrodes.

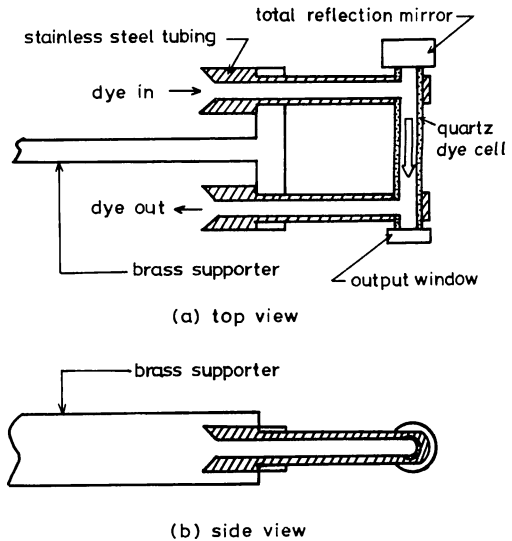


Fig. 5 Cross sectional structure of the small axial-flow type dye cell.

せ、高強度の励起を可能とする集光系を種々比較検討した結果、楕円筒集光鏡が励起効率の点で最も優れていることが判明した。ここでは上領らの解析<sup>9</sup>に基づき、製作しやすい条件を考慮し、さらに放電の衝撃波による色素セル部への影響を小さくするために、長径 126 mm, 短径 96 mm, 離心率約 0.64 で、放電部と色素セルの間隔が 80 mm となる大きな楕円筒集光鏡を製作して用いた。

### 3.4 色素セル

放電光励起の小型色素レーザーでは、放電光による色素セル中での熱的な擾乱を避けるため、通常、色素溶液を光軸と直角方向に流す transverse flow 方式<sup>3,10</sup>が採用されている。しかし、従来の集光鏡とセルの構造では、励起光の集光度が悪いため、発振の閾値が比較的高く、発振ビームの形状も悪くなる<sup>3)</sup>欠点があった。そこで本装置では、細線状に効率よく集光できて、均一な励起と低閾値動作が可能な小型の axial flow 形の色素セ

ルを試作し、高速循環用セルとして用いた。

**Fig. 5** に試作した axial flow 形セルの形状を示す。全反射鏡はセル内に取り付けて内部鏡とし、出力側は外部鏡としてセル端にわずかに傾斜をもたせた石英窓を取り付けた。色素セルは石英製で、内径 0.8 mm、長さ 15 mm と小さいため、内部鏡のアライメントには高い精度を必要とした。なお、transverse flow 形のセルも試作して特性を比較した結果、色素溶液の循環速度の点では、transverse flow 形のほうが高速となり、より優れていることがわかった。しかし、後述するように、励起効率の点で axial flow 形よりも劣っていたため、動作実験においては axial flow 形セルを用いた。

#### 4. Ar ジェット放電および色素レーザーの動作特性

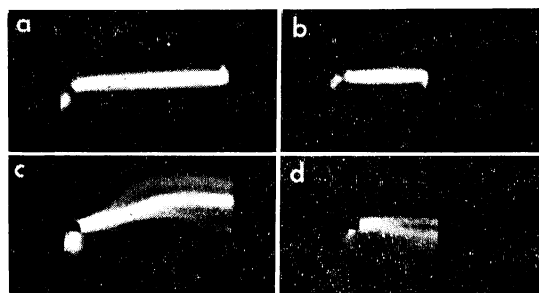
##### 4.1 Ar ジェット放電励起光の特性

###### 4.1.1 放電形状

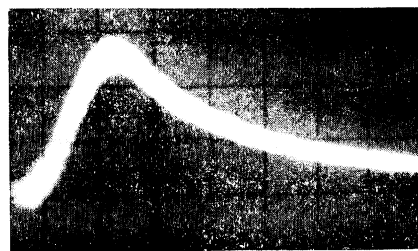
**Fig. 4** に示した放電電極構成で、Ar ジェット放電と、Ar ガスを流さないで大気圧下での空気放電を行なった場合の放電形状の写真撮影による比較を **Fig. 6** に示す。(b)、(d)の空気放電の場合には、各放電ごとに空間的に異なる部分で放電が生じて、全体として広い領域で放電が起こっている。これに対し Ar ジェット放電の場合には、Ar ガス流に閉じ込められた狭い領域内で放電が生じていることが明らかであり、励起光密度が高く、細線状の領域を励起する光源として適していることがわかる。

###### 4.1.2 放電光の立上り時間特性

通常の大出力色素レーザーの励起には、 $1\mu\text{s}$  程度の比較的遅い立上り時間をもつ励起光源が使用されることが多いが、低閾値の色素レーザー発振を実現するためには、さらに立上りの早い励起光が必要となる<sup>11)</sup>。本研究で試作した Ar ジェット放電は、放電間隙長  $L_g=5\sim 15\text{mm}$ 、印加電圧  $V_c=3\sim 11\text{kV}$  の領域で、立上り時間  $t_r=60\sim 80\text{ns}$ 、半幅幅  $\Delta t=120\sim 140\text{ns}$  の急峻でパルス幅の狭い発光特性を示し、色素レーザーの励起光として適した発光時間特性を有することがわかった。なお比較のため、**Fig. 2** の構造とは異なり、セラミックコンデンサの両端をアルミニウムの平板ではさみ、その間に同一の Ar ジェット放電電極を配置した構造の場合には、 $t_r=130\sim 150\text{ns}$ 、 $\Delta t=500\sim 800\text{ns}$  と大幅に増大した。この結果より、**Fig. 2** の構成で使用した放電電流の往復の径路を密接して折り返す構造が低インダクタンス回路となり、放電発光の立上り時間およびパルス幅の



**Fig. 6** Comparison of the shape of the Ar-jet guided discharge and the air discharge. (a), (b) Ar-jet and (c), (d) air discharge. Electrode spacing is 12 mm in (a), (c) and 7 mm in (b), (d)



**Fig. 7** Oscilloscope trace of light pulses from the Ar-jet guided discharge. Pulse repetition rate is 25 Hz and sweep rate is 50 ns/div.

短縮に大きく寄与していることがわかる。

**Fig. 7** に電極間隙  $L_g=8\text{mm}$ 、Ar ガス流量 3 ml/s、パルス繰返し周波数 25 Hz での、Ar ジェット放電発光波形の測定例を示す。印加電圧  $V_c=8\text{kV}$  において、繰返し周波数約 25 Hz まで出力変動の小さい励起光パルスが得られた。しかし、繰返し周波数が 100 Hz 程度になると、励起光パルスの出力変動がかなり大きくなった。

###### 4.1.3 放電光のスペクトル特性

次に、**Fig. 8** に Ar ジェット放電の発光スペクトル特性の分光写真による測定結果を示す。写真の上段の輝線スペクトルは、水銀ランプの波長参照線である。Ar ジェット放電の発光スペクトルは、約  $2,650\sim 6,350\text{\AA}$  にわたって数多くの輝線スペクトルと連続スペクトルから成っていることが判明した。この結果より、ローダミン 6G 色素のエタノール溶液 (以下 Rh-6G の EtOH 溶液と略す) のように、 $2,000\sim 5,700\text{\AA}$  の広い波長範囲にわたる吸収帯を有するレーザー媒質<sup>12)</sup>の励起には、この Ar ジェット放電の発光がスペクトル特性においても適

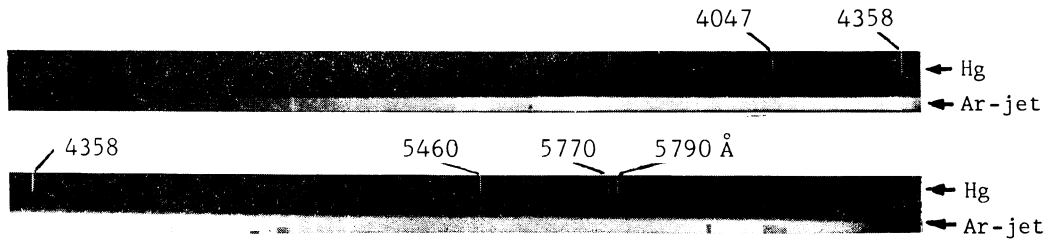


Fig. 8 Emission spectra of the Ar-jet guided discharge. Emission lines from an Hg lamp are also shown for the spectral reference.

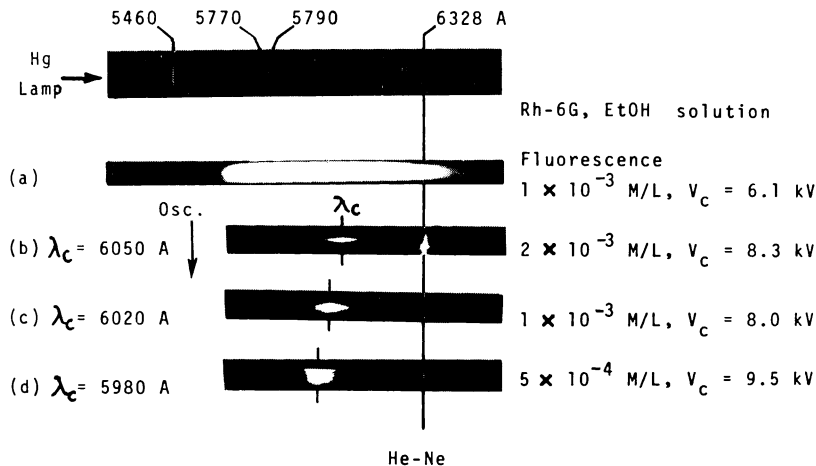


Fig. 9 Comparison of fluorescence spectrum (a) and laser oscillation spectra (b)-(d) of Rhodamine 6G dye. Hg lamp spectral lines are on the top.

していることがわかる。

#### 4.2 色素レーザーの発振特性

Rh-6G の EtOH 溶液をレーザー媒質として用い、色素レーザーの発振特性を調べた。レーザー発振の閾値入力エネルギー ( $E_{th}$ ) は、axial flow 形セルの場合に、 $E_{th} \approx 61$  mJ、transverse flow 形セルでは  $E_{th} \approx 87$  mJ であった。このため以下の実験においては、励起効率の高い axial flow 形セルを用いている。

##### 4.2.1 発振波長

RH-6G の EtOH 溶液の濃度を変えた場合の発振波長の変化を分光写真法によって測定した。共振器には内部および外部鏡ともに、波長  $6,000 \text{ \AA}$  で約 98% の反射率の誘電体多層膜平面鏡を用い、共振器長は約 2.5 cm である。Fig. 9 に色素溶液濃度による発振波長の変化の様子を示す。各濃度におけるレーザー発振の中心波長を  $\lambda_c$  で示した。また、(a) のけい光スペクトルは出力鏡を取り外して測定したものである。 $5 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-3}$  mol/l と色素濃度を変えることにより、レーザー発振の中心波長が約  $70 \text{ \AA}$  変化することが認められた。

##### 4.2.2 出力の Ar ガス流量依存性

次にレーザー出力の Ar ジェット放電における Ar ガス流量依存性を調べた。一般に Ar ガス流量が最適値よりも大きい場合には、Ar ガスジェット流に乱流を生じ、反対に小さい場合には、Ar ジェット放電の発光径が大きくなり、色素セルの径よりも大きくなって励起効率を低下することが実験的に確かめられた。本実験では、 $2.5 \sim 4.5$  ml/s の範囲の Ar ガス流量で、安定でかつ最大のレーザー出力が得られた。このような最適レーザー動作条件は、ガスジェット流の形状にも依存しており、ガス噴出口と対向する電極の形状の設計も重要なものと考えられる。

##### 4.2.3 出力のパルス繰返し周波数特性

Ar ジェット放電電極の陽極の中心に設けたトリガー電極に高電圧トリガーパルス印加して、放電のパルス繰返し周波数を変化させた場合のレーザー発振出力の変化を測定した。Fig. 10 に  $5 \times 10^{-4}$  mol/l の濃度の Rh-6G 色素溶液を用い、入力エネルギー  $E_p = 542$  mJ (印加電圧  $V_c = 9.5$  kV)、パルス繰返し周波数  $f = 100$  Hz の



Fig. 10 Typical multi-exposed oscilloscope trace of laser output pulses from Rhodamine 6G dye. Pulse repetition rate is 100 Hz and sweep rate is 50 ns/div.

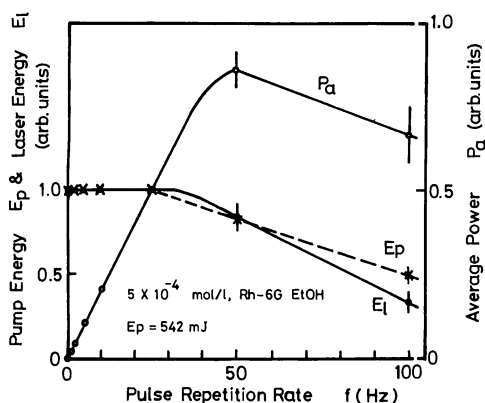


Fig. 11 Dependence of the pumping energy, the laser output energy and the laser average power on the pulse repetition rate of the Rh-6G dye laser.

場合のレーザー発振波形の多重パルスについての測定例を示す。Ar ガス流量は 5 ml/s, 色素溶液の循環は 120 ml/min の割合で行なった。この結果より, レーザー発振出力の立上り時間は約 10 ns, パルス幅は約 50 ns であることがわかる。

また Fig. 11 にはレーザーのパルスエネルギーと平均出力電力のパルス繰返し周波数に対する変化特性を示す。パルス繰返し周波数  $f$  が 1~25 Hz の範囲では, レーザーパルスエネルギーの変動は 10% 以内である。印加電圧  $V_c=7$  kV での測定値はピーク出力の最大値が約 340 W, パルスエネルギー約 17  $\mu$ J, パルス幅 50 ns であり, 30 Hz のパルス繰返し周波数で平均出力電力が約 0.25 mW であった。一方, レーザービームの拡がり角は半値角で約 1.5 mrad とかなり鋭い出力ビームが得られた。

## 5. 実験結果の検討

本論文では, まず Ar ジェット放電光源の諸特性について検討し, 小型の色素セルを励起するのに適した光源

であることを実験によって確認した。次に, 繰返しパルス動作の高速化における問題点を取り上げて考察を加える。

本実験で用いた励起放電部は, 石英管等で電極外部を包み込んでいない, いわゆる open spark gap の形になっているため, 通常用いられる励起光源用ランプと違って破壊等の心配がまったくなく, 長寿命動作が可能であるという利点を有している。しかし, この方式により長時間動作を行なうと, 放電電極のスパッタリングや, 放電生成物の影響を受け, 集光鏡内面の反射率が低下して, 約  $4 \times 10^5$  ショットで鏡面の清掃または再研磨が必要であった。この問題は, 放電電極外部に手軽に交換可能な, 端面開放型の石英管の外筒を設け, 石英管の内面に沿って強制的に空気などを流すことによって改善できるものと考えられ, Ar ジェット放電方式のさらに長寿命化が期待されるものと思われる。

また, レーザー出力の低下が, 繰返し周波数 50 Hz 以上のパルス動作領域で顕著になった。これは, 励起エネルギー ( $E_p$ ) の低下が主要な原因と考えられ, 電源容量の大容量化によって, より高い繰返し周波数までレーザー出力の低下を防止できるものと考えられる。また, 低い繰返し周波数のパルス動作領域においても, 長時間の動作においては, 初め徐々にレーザー出力の低下が認められ, 色素溶液の温度分布が均一となる時間経過後にはレーザー出力が一定値に落ち着くことから, これは, 熱的な影響にもとづく色素溶液温度の不均一性によって屈折率勾配が生じ, それが速やかに解消されないことによる<sup>13)</sup>ものと判断される。この問題は, 乱流を伴うことなく色素溶液を高速循環できるブリュースタ窓構造の色素セルを用いる方法などによって解決できるものと考えられる。

また本実験で使用した axial flow 形セルの内径は 0.8 mm と小さいために, 一度セル内に生じた気泡は内部にトラップされてしまい, 色素溶液の循環によって除去することが困難であった。Watson ら<sup>14)</sup>は, 内径 10 mm のレーザーセルにおいても高出力の得られない理由の一つとして小さな気泡がセル内に閉じ込められることを挙げている。本実験で用いた内径の小さなセルでは, セル内の気泡により光が散乱されてしまい, レーザー発振に支障をきたすことになる。これを防止して安定な高速繰返しレーザー発振を得るためには, 色素循環セルの構造のみならず, 色素循環チューブの連結部など, 色素溶液の循環系全体にわたって気泡が発生しないようにすると同時に, 生じた気泡を容易に取り除くことのできる

構造に改良することが必要であると考えられる。

## 6. おわりに

小型の色素セルを用いて低入力で高速パルス繰返し動作を目的とした小型の Ar ジェット放電励起方式色素レーザー装置を設計試作し、その装置構成法や基本的な発振特性について検討した。その結果、励起光として約 60 ns の立上り時間をもつ細線状の Ar ジェット放電を得ることができた。またこれを励起光源として Rh-6G 色素レーザーを構成し、61 mJ の低閾値エネルギーと、入力エネルギー 294 mJ でピーク出力 340 W、出力エネルギー 17  $\mu$ J、パルス幅 50 ns の発振出力特性が得られ、さらにパルス繰返し周波数として 100 Hz までの動作が実現できた。またこれらの特性に基づいてさらに高速繰返しパルス動作のための問題点についても検討を加えた。

今後、本励起方式およびレーザー装置を改良して、より高出力の高速パルス繰返し動作および広帯域波長可変発振について実験的検討を進めるとともに、動作特性の理論的解析を行なうつもりである。

本研究は、著者の一人谷口が東北大学電気通信研究所稲場研究室に昭和 51 年度文部省内地研究員として留学中に開始され、その後、岩手大学工学部電子工学科斎藤研究室において進められたもので、有益な助言をいただ

いた稲場研究室の諸氏および実験や装置の製作に協力された岩手大学の石田芳郎、鈴木勉、松本庄市、明翫博の各卒業研究生および工場の田中博、徳田春男の諸氏に感謝の意を表する次第である。

## 文 献

- 1) たとえば P. P. Sorokin, J. R. Lankard, V. L. Moruzzi and E. C. Hammond: *J. Chem. Phys.*, **48** (1968) 4726.
- 2) たとえば J. A. Myer, C. L. Johnson, E. Kierstead, R. D. Sharma and I. Itzken: *Appl. Phys. Lett.*, **16** (1970) 3.
- 3) C. H. Weysenfeld: *Appl. Opt.*, **13** (1974) 2816.
- 4) 谷口 宏, 小林喬郎, 稲場文男: 昭和51年度電気関係学会東北支部連合大会講演論文集, 1E-3 (1976).
- 5) 谷口 宏, 小林喬郎, 稲場文男: 昭和52年度電子通信学会総合全国大会講演論文集, 735 (1977).
- 6) 谷口 宏, 斎藤 弘, 小林喬郎, 稲場文男: 電子通信学会技術研究報告, OQE 77-42 (1977).
- 7) D. P. C. Thackeray: *Nature*, **180** (1957) 913.
- 8) H. van der Piepen and W. Schröder: *Z. Angew. Phys.*, **31** (1971) 189.
- 9) 上領香三, 松沢秀典, 鹿野哲生, 吉田光男: 東北大学電通談話会記録, **34** (1965) 38; **34** (1965) 9.
- 10) M. Boiteux and O. de Witte: *Appl. Opt.*, **9** (1970) 514.
- 11) 前田三男, 宮副 泰: 第34回応用物理学関係連合講演会講演予稿集, 18a-N-7 (1973).
- 12) K. H. Drexhage: *Dye Lasers*, Chap. 4, ed. F. P. Schäfer (Springer, Berlin, 1973) p. 168.
- 13) B. B. Snavely: *Proc. IEEE*, **57** (1969) 1374.
- 14) W. Watson, S. Reich, A. Lempicki and J. Lech: *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-4** (1968) 842.