

# レ　ー　ザ　ー　装　置

## ——ルビー・レーザーについて——

齋藤成文・木村達也

マイクロ波領域において誕生したメーザーの原理を、赤外線、可視光線にまで拡張したものがレーザーである。1960年にルビー・レーザーが成功して以来、レーザーは材料、応用等種々の面で、急速な進歩をとげつつある。ここではルビー・レーザー発振装置、および最近発表された連続発振を行なう固体レーザーの装置について記す。

### 1. 序　　言

Maiman<sup>1)</sup>によるルビー・レーザーの成功以来、Ne-He混合気体によるレーザー<sup>2)</sup>、ルビー以外の固体レーザー等が発表され<sup>3)</sup>、わずか二年間で急足な進歩をとげた。レーザーの特色は、その出力光の coherency と monochromaticity にあり、かつ directivity が非常によいことである。光の領域における唯一の coherent な光源として、また、未開発の遠赤外線領域においても原理的に発振可能な光源として、各方面から多大の関心がよせられ、通信への応用、精密機械工作、医療、軍事兵器、物性的研究等の応用研究が盛んに行なわれている。

レーザーは大きく分けて、気体レーザーと固体レーザーに分けられる。前者は Javan 等が最初に成功した、Ne-He 混合気体レーザーがある。一方固体レーザーは、ルビー以外にも種々な物質について、レーザー動作が報告されている。たとえば、CaF<sub>2</sub> 中に U<sup>3+</sup> を dope したものの、BaF<sub>2</sub> 中に U<sup>3+</sup> を dope したものの、CaF<sub>2</sub> 中に Sm<sup>2+</sup> を dope したものの、CaWO<sub>4</sub> 中に Nd<sup>3+</sup> を dope したものの等々、枚挙にいとまのないほどの物質が去年の末から今年にかけて発表されている。これらのレーザーは、impurity によって、出力光の波長が異なり、したがっていろいろな物質での発振が行なわれるほど、レーザーによって cover される波長範囲が広くなり、応用研究

にとっても喜ばしいことである。

ここではルビー・レーザーの装置について、東大生研に輸入された Raytheon 社製のパルス・レーザー、および最近開発された連続発振レーザー装置について述べる。

### 2. ルビー・レーザー装置

Raytheon 社製のルビー・レーザー装置の概要を述べる。その概略図については第1図および口絵写真(8ページ)を参照されたい。

#### (1) ルビー

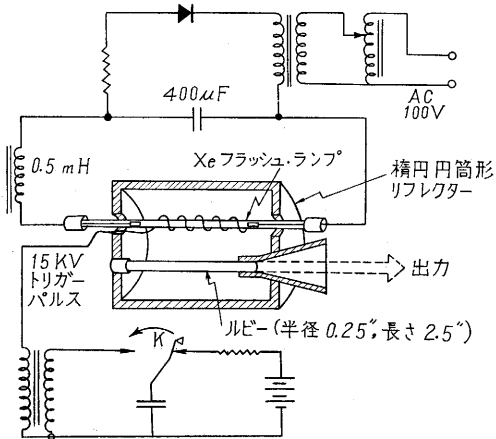
いうまでもなくルビーはこの装置の中心部をなすものであり、レーザー動作を行なう最も重要な部分である。ルビーは Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (サファイア) 中に 0.05% 程度の Cr<sup>3+</sup> イオンを dope してある、いわゆるピンクルビーである。淡いピンクの透明な色をしている。ルビーの結晶は完全なものほどよいが、実際には、完全な結晶は得られず、格子欠陥等のために、共振器中で mode の変換がおきたりして出力光に悪影響を及ぼす。ルビーは円筒形で、その大きさは、直径が 0.25 インチ、長さが 2.5 インチである。その端面は互いに平行度をよくして、平らにし、銀の coating をほどこして、Fabry-Perot 共振器にする。銀の coating のほかに誘電率の異なった誘電体多層膜を coating する方法もある。共振器の二つの反射板の一方は完全に反射するようにし、他方は 2~3% の透過度をもたせて、ここから出力光をとり出す。出力光のとり出し方には、このほかに完全に反射する反射板の中央に小孔をあけて、ここから出力光をとり出す方法もある。

共振器は平行平板のほかに、confocal の共振器も提案されており<sup>4)</sup>、後者の方が発振が容易に行なわれるようである。

ルビー・レーザーの出力光は、波長が 6943 Å の赤い光である。

#### (2) ポンピング

基底状態にある系を、励起状態にもちあげてを、pumping という。ルビーでは、基底状態 <sup>4</sup>A<sub>2</sub> から励起状態 <sup>4</sup>F<sub>2</sub> に励起するのに、約 5600 Å および 4000 Å の光を必要とする。この光は、incoherent な光源でよ



第1図 Raytheon 社のルビー・レーザー

く、通常、Xe 閃光放電管<sup>5)</sup>が用いられる。Xe 放電管は棒状のもので、Edgerton 社製 FX-1 型で、最大入力 400 joule まで使用可能である。

最初は helical な構造の Xe 放電管の中心線上にルビーをおき、そのまわりを reflector でとりかこむ構造のものが用いられたが、棒状の Xe 放電管とルビーとを楕円筒型の reflector の焦点におく構造のものの方が、発振の threshold が約 1/10 程度低くなり、したがって効率がよい。

Xe 放電管の寿命は、前述の FX-1 型で、約 1000 回の放電が可能である。また 1500 V 以上の電圧をかけると Xe 放電管が破壊される。

Xe 放電管を、コンデンサーに充電した電荷で放電させると、急激な立上がり、と、なだらかな立下がりをもった光パルスが得られる。400  $\mu$ F のコンデンサーを 1 kV まで充電して、放電させれば、立下がり 50% までのパルス幅が約 1 msec である。短形の光パルスを得るためには、コンデンサーの電荷をインダクタンスを通して放電させる、パルス成形回路をつくれればよい。

Xe 放電管を放電させるには、放電管にトリガーを加えて行なう。

### (3) リフレクター

Xe 放電管から出た光が、効果的にルビーにあたるようにするため、Xe 放電管とルビーとのまわりを、リフレクターでとりかこむ。リフレクターの形は、断面が楕円形の筒状であって、その楕円の二つの焦点に、ルビーと Xe 放電管とを平行におく。このような構造では、Xe 放電管から出た光はすべてルビーにあたり、効果的な pumping が行なわれる。したがって、楕円状のリフレクターでは発振の threshold が下がり、前述のように、helical な Xe 放電管を用いた場合に比べて、threshold は 1/10 程度に低くなる。

リフレクターの内面は光の反射をよくするために、Al の coating がしてある。

### (4) レーザー・ヘッド

上述の、ルビー、Xe 放電管、リフレクターのほかに、Xe 放電管のトリガーを行なうためのリレー回路を組み

こんであり、全体で直径 13 cm、長さ 18 cm のシリンダーに納めたものが、レーザー・ヘッドである。レーザー・ヘッドには、出力光の方向を見定める照準がついている。

Xe 放電管の電源、トリガー、およびシンクロスコープへのトリガーのケーブルのコネクターはすべて異なったものが用いてあり、混同するおそれがないような設計にしてある。レーザー・ヘッドに、Xe 放電管のトリガー回路を組みこんでいるのは、トリガー高電圧をケーブルで導く必要のないように、一緒にとりつけたものと思われる。

### (5) 電源

Xe 放電管を放電させるための電源である。商用電源を全波整流して、400  $\mu$ F のコンデンサーを充電する。このコンデンサーの電荷を Xe 放電管を通して放電させる。コンデンサー耐圧は 2.5 kV、充電電圧は最大 2 kV、充電に要する時間は約 15 sec. である。

コンデンサーの放電は、パネルについているボタンによるほかに、リモート・コントロールも行なうことができる。

Xe 放電管の電源のほかに、そのトリガー電圧発生回路がついている。

このルビー・レーザー装置の全体の形状については、口絵 8 ページを参照されたい。

## 3. ルビー・レーザーの動作

負温度を作って、誘導放出をおこす最小の入力電力を threshold という。上述の装置で、threshold は、コンデンサーの充電電圧が 800 V の所である。したがって、エネルギーになおせば、約 130 joule となる。

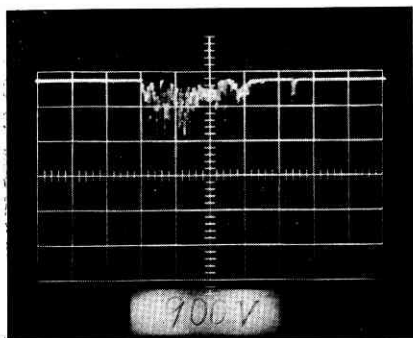
レーザー出力光の波長は、 $R_1$  線によるもので、6943 Å である。出力パルス幅は、pumping の電圧によって異なるが、約数百  $\mu$  sec であり、その波形は、relaxation oscillation といわれる振動が重なり合った複雑な波形を示す。出力波形の一例は、写真 2 に掲げた。一般にルビー・レーザーでは、結晶の homogeneity、共振器の flatness、ならびに平行度等の関係で、きれいな出力波形を得ることは困難であり、大出力をとり出すのに適している。Maiman によれば<sup>6)</sup>、1.25cm<sup>3</sup> のルビー試料を用いて、パルス動作をさせた場合、ピークの出力は 5 kW、全出力エネルギーは約 1 joule である。

## 4. 固体レーザーの連続発振

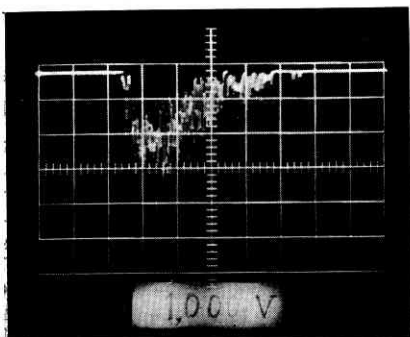
固体レーザー開発の初期には、大振幅のパルス動作しか行ない得なかったが、通信等への応用には、連続発振をすることが望ましく、多くの研究者達によって、固体レーザーの連続発振の研究がなされていた。1962 年に



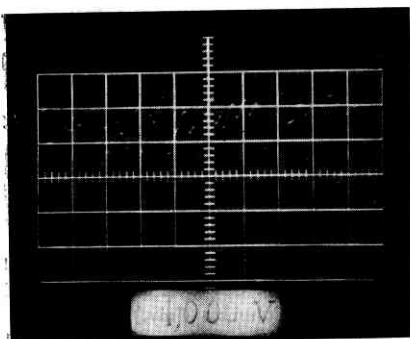
写真 1 レーザー・ヘッド



(a) pumping 電圧 900 V, 横軸は 100  $\mu$  sec/cm



(b) pumping 電圧 1000 V, 横軸 100  $\mu$  sec/cm



(c) pumping 電圧 1000 V, 横軸 5  $\mu$  sec/cm

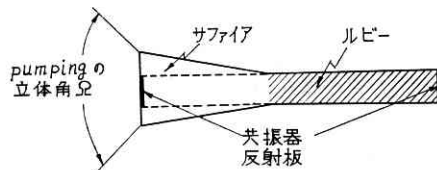
写真 2 レーザー出力波形

入ってから、Bell 電話研究所で、固体レーザーの連続発振をした報告が、二三発表された。ここで、主にその装置の面から、それを紹介する。

(1) 光学系を用いたルビー・レーザーの pumping<sup>7)</sup>

Bell 研究所の Nelson, Boyle によるものである。このレーザーでは、pumping の光源として、高圧水銀クセノンランプを用いている。また、ルビーの一方の面には、ラッパ状のサファイアをつけ、この端の面から pumping を行なう(第 2 図)。このルビーを液体窒素の中にひたし、凹面鏡を三個用いて、ルビーの端のラッパ状の部分に、水銀灯からの光をあつめる。高圧水銀クセノンランプはアークの長さが短くて、光学系で集光しやすい。

水銀灯の後方に凹面鏡をおき、光を前面に出す。前面に出た光を、相対した二個の凹面鏡で、ルビーのラッパ状部に集光する。ラッパ状のサファイアは、その大きな面に入る光はすべて、内面で反射されて、その小さな面に到り、ルビーの結晶に入る。したがって、このラッパ状の部分により、両端面の面積の比だけ光を集光すること



第 2 図 Nelson, Boyle によるルビー試料

ができる。ルビーに入った光は、ルビー内面で反射されながら、その端面の反射板にまで達する。この光のうちの  $5600 \text{ \AA}$  付近および  $4000 \text{ \AA}$  の成分によって Cr イオンが励起されるわけである。結晶内面で pumping 光が全反射されるために、光の行程が長くなり、それだけ光の強度が増加するのと等価である。したがって pumping の効率がそれだけよくなる。

ルビーの大きさは、直径 0.061 cm, 長さ 1.15 cm, その中に含まれる Cr イオンの濃度は  $1.6 \times 10^{18} \text{ l/cm}^3$  である。またサファイア・ラッパ状部分の大きさは、大きな面の直径が 0.150 cm, 長さが 1.05 cm, 小さい面の直径はルビーの直径と同一である。サファイア・ラッパ状部分の端面は光学的な精度にまで磨いてある。両端面は平行で、その平面度は  $1/10$  波長以上である。ルビーの端面は銀メッキをして不透明にし、ラッパ状部分の大きな面の中央に、直径 0.061 cm の円を、透過率 5% の銀メッキをしてあり、これが Fabry-Perot 共振器を形成している。

前述のように、結晶の冷却には液体窒素を用いるが、上述のルビーでは 0.3 watt の pumping 光を吸収し、その表面から約  $0.9 \text{ watt/cm}^2$  の熱が液体窒素に伝わることになる。一方、液体窒素はその沸点付近の温度で、この十倍くらいの熱を吸収すると考えられるから、冷却の効果は十分にはたすわけである。

pumping の光源は、この実験のために作られた高圧水銀クセノンランプを使用している。その電極間距離は、サファイア・ラッパ状部分の開口直径と同じになるように作られた。光源は直流で点灯され、その光は 120 cps のリップルを約 3% 含む。集光光学系により、立体角で 0.73 ステラディアン範囲の光を集光することができる。

このレーザーの連続発振の threshold は、入力電力で 850 watt である。レーザー出力光は、入力電力 930 watt のときに、約 4 mW であり、連続発振をさせると出力が非常に小さくなるのがわかる。ルビーに吸収される

緑および紫の波長領域の入力が約 0.3 watt であることを考えれば、出力は 16 mW 程度まで増加し得るであろうと述べている。出力光には、relaxation oscillation がみられる。これは通信に応用するとき雑音の原因ともなり得るし、また relaxation oscillation それ自体も物理的に興味深い問題であるので、この方面の今後の研究が期待される。

出力光にみられる  $10^2 \sim 10^3$  cps の振動は、ルビーの機械的な振動にもとづくものであろう。この雑音および retaxation oscillation は液体窒素の沸騰や、pumping 光のリップルによるものではないことが確認されている。出力光の指向性は、その広がりが約  $0.7^\circ$  である。

ここに提案されている結晶の幾何学的な形状と光学系は、そのまま太陽光線による pumping に応用できる。

### (2) 楕円形シリンダーのリフレクターを用いたレーザーの連続発振<sup>9)</sup>——I

これも Bell 研究所で研究されているものである。レーザーの材料は、三価の Nd イオンを含む  $\text{CaWO}_4$  で、発振波長は  $1.065 \mu$  である。pumping の波長は、 $0.588 \mu$  付近である。

この実験に用いられたリフレクターは、前述の Raytheon 社のリフレクターと同じ構造であり、断面が楕円形のシリンダーである。その内面は機械工作の後に手でみがいたもので、アルミニウムをメッキしてある。

断面の楕円の二つの焦点には、結晶と、高圧水銀灯をおく。結晶は、液体窒素温度まで冷却した液体酸素にひたして冷却する。これは沸騰によって生ずる泡が冷却効果をさまたげないためである。その外側をとりまいて、 $4000 \text{ \AA}$  以下の紫外線を吸収するために、亜硝酸ナトリウム溶液をフィルターとして流す。このフィルターは発振の threshold にはほとんど影響を及ぼさず、連続発振には欠くことのできないものである。

この結晶の端面の共振器は、confocal な球面である。この面は銀の coating により反射率を高くし、一端だけ約 1% の透過率にしてある。

pumping の光源としては、水晶の高圧水銀灯を使用し直流で動作させている。この光源は水冷にして、温度上昇を防いでいる。この高圧水銀灯とは別に、楕円の焦点とは離れた所に Xe の閃光放電管をおき、パルス動作もさせることができる構造になっている。

結晶の大きさおよび発振の threshold についての記述がないが、threshold は、入力電力  $1000 \sim 1200 \text{ watt}$  であろうと思われる。

出力波形には、入力の 60 cps のリップルがそのまま現われているが、relaxation oscillation は認められないようである。

### (3) 楕円形シリンダーのリフレクターを用いたレーザーの連続発振<sup>9)</sup>——II

前節に述べたのと同じ構造のリフレクターを用いたもので、 $\text{CaF}_2$  中の三価の U イオンによる  $2.613 \mu$  の光の発振についての報告である。これも Bell 研究所における研究である。有効な pumping の波長は  $0.88 \sim 0.92 \mu$  である。

Xe 閃光放電管によって励起した場合、温度を変えて、発振の threshold を測定すると、 $20^\circ\text{K}$  で 2.0 joule,  $77^\circ\text{K}$  で 3.78 joule,  $90^\circ\text{K}$  で 4.32 joule,  $300^\circ\text{K}$  では約 1200 joule である。

この試料でも、Fabry-Perot 共振器は confocal なものを用いている。液体窒素温度まで冷却した液体酸素を冷却に用いていることも前節の実験と同様である。液体フィルターとしては、 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  のうすい溶液を用い、pumping 光から  $0.5 \mu$  以下の波長の光をとり除く。

高圧水銀ランプを直流で点火すると、連続発振が認められた。連続発振の threshold に関する記述はない。

興味深い点は、パルス動作のときに存在していた、relaxation oscillation は、レーザー動作を開始してから数 msec でなくなるということである。また一方、ルビー・レーザーの連続発振においては、relaxation oscillation は消えなかったと報告されている。

この  $\text{CaF}_2: \text{U}^{3+}$  レーザーの出力は 10 mW である。Javan 等による Ne-He 気体レーザーの連続発振の出力は、15 mW と報告されている。また気体レーザーの方が波形がきれいであるから、固体を使う以上、出力の大きい連続発振を得ることが必要であろう。

(1962年5月31日受理)

## 文 献

- 1) T. H. Maiman: Nature, **187**, (1960), 493.
  - 2) A. Javan et. al.: Phys. Rev. Lett., **6**, (1961), 106.  
D. R. Herriott: J. Opt. Soc. Amer., **52**, (1962), 31.  
Ad. in Q. E. (Columbia Univ.) p. 18.
  - 3) L. F. Johnson: J. App. Phys., **33**, (1962), 756.  
L. F. Johnson: J. App. Phys., **33**, (1962), 757.  
L. F. Johnson, et. al.: Proc. I. R. E., **49**, (1961), 1704.  
L. F. Johnson, et. al.: Proc. I. R. E., **50**, (1962), 86.  
E. Snitzer: Phys. Rev. Lett., **7**, (1961), 444.  
D. J. Morantz, et. al.: Phys. Rev. Lett., **8**, (1962), 23.  
H. Kogelnik, et. al.: Proc. I. R. E., **50**, (1962), 219.
  - 4) C. G. Boyd, et. al.: Bell Syst. Tech. J., March 1961), 489.
  - 5) Ad. in Q. E. (Columbia Univ.) p. 276.
  - 6) Ad. in Q. E. (Columbia Univ.), p. 91.
  - 7) D. F. Nelson, et. al.: App. Opt., **1**, (1962), 181.
  - 8) L. F. Johnson, et. al.: Proc. I. P. E., **50**, (1962), 213.
  - 9) G. D. Boyd, et. al.: Phys. Rev. Lett., **8**, (1962), 269.
- (注) Ad. in Q. E. は、Advances in Quantum Electronics, (Columbia University Press), 1961, edited by J. R. Singer の略である。