レーザー解説

高出力アルゴンイオンレーザー

小林 功*

(1982年 8月12日 受理)

High Power Argon Ion Lasers

Isao KOBAYASHI*

(Received August 12, 1982)

1. はじめに

アルゴンイオンレーザーは、1964年米国の Bridges ら¹⁾が発表したのが最初であるが、出現当初より、短波長の可視光でW級の連続出力が得られること、出力パワーが放電電流の累乗に比例して増大し、飽和の値が高いことで注目された。

このため、発振能率が低く、装置がやや複雑になるにもかかわらず、短波長高出力が必要なホログラフィ、ラマン分光、印刷、製版等の分野に、現在多数が用いられている。

パルス高出力の短波長レーザーは、エキシマレーザー等が現在の話題の中心であるが、CWの高出力可視光を追求したアルゴンイオンレーザーの研究がいくつか発表されている。

ここではこれらの研究例を中心に、アルゴンイオンレーザーの高出力化の現状と技術動向について記す。

2. 高出力アルゴンイオンレーザーの現状

現在知られている高出力のアルゴンイオンレーザーは、メーカーが発表した開発・製品段階のものと、高出力の探求を主目的とした研究段階

のものと二つに分類される。

Table 1は開発・製品段階の高出力アルゴンイオンレーザーの代表例である。

Table 1 High power argon ion lasers of TEM₀₀ mode under manufacturing or development.

MAKER	OUTPUT POWER (W)		BORE MATERIAL	STAGE
	SPEC.	MAXIMUM		
LEXEL	12	—	BeO	MANUFACTURING
COHERENT	18	—	GRAPHITE	
CONTROL LASER	20	—	W	
SPECTRA PHYSICS	40	—	BeO	
HITACHI	—	15	BeO	DEVELOPMENT
FUJITSU	—	12	BeO	
NEC	10	15	BeO	

ここに掲げたレーザーはいずれも TEM₀₀モードで発振し、単一波長化、光フィードバック動作、アルゴンガス補給その他の実用的な機能が附加されたものである。

レーザー管は完全封じ切りであり、プラズマ細管径は2.5～3mmφ、細管長は1～2m、放電電流は30～50Aで動作する。1つの共振器中に2本の独立したレーザー管を連続に用いるものもある。

細管材料はベリリア磁器 (BeO)、タングステン、グラファイトの3種類が使われているが、いずれも水冷される。

* 日本電気株式会社電子装置事業部 (〒211 川崎市中原区下沼部1753番地)

* Electron Device Division, Nippon Electric Co, Ltd. (1753 Shimonumabe Nakahara-ku Kawasaki 211)

Table 2 High power argon ion lasers operated at higher discharge current.

Author	Bore material	Bore diameter etc.	Bore length	Discharge current	Discharge voltage	Output power (visible)	Efficiency	Life time	Life factor	Sealed off	Internal or external mirrors	Magnetic field	Remarks	Reference
Fendley and O'Grady	Graphite disc	6.35 ϕ a) 50 ϕ b) 2.5mm c) 3.8mm	1.27m $\times 2$	100 A	315 V $\times 2$	98W	0.16% max	>150H	Brewster window	○	External	T=12% R=8 m 600 G	0.35Torr e)	4)
Seelig and Banse	Aluminum disc	12 ϕ b) 25mm	2.2m	300 A	400 V	150W	0.13% max	1 H	?	×	Internal	T=10% R=6 m No d)	0.15dB/m f)	6)
Alferov et al.	Aluminum disc	16 ϕ b) 25mm	1.5m $\times 2$	390 A	641 V d)	500W	>0.2%	>140H	Cathode	×	Internal	T=8 % R=10m ?	0.4Torr e) 4 m g)	15)
Wang and Lin	Tungsten walled copper disc	12 ϕ b) 40mm	1.85m	360 A	521 V d)	150W	0.08%	?	Mirror	×	Internal	T=12% R=6 m ?	3.5 m g)	14)
Kasamatsu	Graphite disc	7 ϕ a) 52.5 ϕ b) 3 mm c) 5 mm	1.15m $\times 2$	110 A	300 V $\times 2$	80W	0.12%	?	Brewster window	×	External	T=12% R=10m 440 G	0.35Torr e) 3.85m g)	16)
Muuss and Skolaut	BeO segment	12 ϕ b) 148mm	2.4 m	340 A	567 V d)	250W	0.144% max	13H at 140W >1500H	Mirror	×	Internal	T=6 % R=20m 260 G	1.1Torr e) 5 m g)	8)

e) Argon gas pressure

f) Laser gain

g) Resonator length

a) Outer diameter of disc

b) Thickness

c) Interval of discs

d) estimated

Fig.1 Characteristics of 10W argon ion laser

高熱伝導の BeO 細管を用いるものは放電の発熱を熱伝導で冷却水に逃がし、タングステン、グラファイトの場合は放射で冷却する。

寿命は1000~5000時間といわれているが、寿命の要因はカソードの寿命、アルゴンガスの消耗の他に、レーザー管の機械的構造の疲労破壊、やプラズマ細管の電氣的短絡（特にグラファイトを用いるもの）があげられる。

Fig. 1 に定格出力10Wのアルゴンイオンレーザーの出力特性の例²⁾を示す。

Table 2³⁾は研究段階の高出力アルゴンイオンレーザーの例である。

これらは高出力パワーの可能性を主目的としてつくられたもので、大口径長尺のプラズマ細管を用いて出力飽和レベルを高く設定し、大放電電流で動作させて、多波長、マルチモードで高出力を得ようとするものである。

アルゴンイオンレーザーの発振効率是非常に低く、0.1%前後であるから、これらのレーザーはいずれも大規模な電流と冷却装置を必要とするので実現は困難を伴い、表2に示したものが現状のほとんどすべてを網羅する。

表2から共通的に云えることは、レーザー管は封じ切りよりも真空排気装置に接続されたものが多く、従って細管材料に熱伝導のすぐれた入手が容易なアルミニウムとOリングの組合せなどを用いることが可能である。また比較的小口径のクラファイトディスク細管を用いるもの以外はすべて内部ミラー形であることが特徴的である。

表2の中の代表例について装置の内容と結果を示す。

(1) グラファイトディスク細管を用いた外部ミラー封じ切り管の例

RCA社がアメリカ陸軍の依頼で1970年に試作した100W出力のアルゴンイオンレーザー⁴⁾は、比較的小口径のグラファイトディスクを用い、放電電流を最大100Aに留めた従来の製品段階のレーザーの拡張形である。

レーザー管はFig.2に示すようにアノードを

Fig.2 Half-tube laser module (RCA)

Fig. 3 Graphite lobe (RCA).

Fig. 4 Characteristics of argon ion laser (RCA)

中心に、両端にカソードを配置した2分割形の放電部から成り、ブルスタ窓を両端に持つ。

プラズマ細管に用いたグラファイトディスクは、Fig. 3に示すような構造で、切り欠き部分はガスリターンパスとなる。

レーザー管は有機接着剤を用いず、400℃でベーキング可能な封じ切り形である。

動作結果はFig. 4に示すように市販ミラーを用いて、放電電流90Aで、多波長、マルチモードで98Wの出力を得て、150時間は問題なく動作した。シングルモードの場合の出力は10Wに

Fig. 5 Construction of middle segment.

Fig. 6 Characteristics of argon ion laser (Aluminum disc).

過ぎなかった。

(2) アルミニウムディスクを用いた例

Seeligらのレーザー⁵⁾はプラズマ細管としてアルマイト処理したアルミニウムディスクを用い、ディスクをテフロンワッシャーで接続し、アルマイトを絶縁膜としてアルミニウムを直接水浄する。

Fig. 5に中央部分の細管の構造を示す。Fig. 6に出力特性を示す。

可視光150Wの出力⁶⁾を得た後、同一レーザーで紫外発振を試み、Arの2価のイオンレベルの遷移(波長364, 351nm)で61Wの出力を得た⁷⁾。

(3) ベリリア細管を用いた例

ハイデルベルク大学のレーザー⁸⁾はFig. 7に示すようなチタンでカバーしたベリリア細管を用いている。このレーザーはFig. 8の構成で動作し、出力140Wで1500時間損傷なしに動作で

Fig. 7 Construction scheme of a tube segment.

Fig. 8 Schematic diagram of the laser

Fig. 9 Laser output power vs. discharge current (Δ optimized values, pressure: $0.6 \leq p \leq 1.1$ Torr; $\circ$ constant pressure: 1.1 Torr; constant magnetic field: 260G)

Fig. 10 Experimental arrangement.

Fig. 11 Graphite disc.

Fig. 12 Structure of discharge region.

きた。

Fig. 9 に出力特性と磁界の効果を示す。

(4) 大口径グラファイトディスク細管を用いた内部ミラー形アルゴンイオンレーザー

Fig. 10 は筆者らが通産省工業技術院の大型プロジェクトの中で試作した高出力アルゴンイオンレーザー装置⁹⁾である。

ここで用いたレーザー管は、Fig. 11 に示すグラファイトディスクを10mm間隔に1.5mに亘ってアルミナ棒で連結し、透明石英管に収納し、両端に水冷銅製アノードとディペンサー形カソードとを配置したFig. 12の放電部分から成る。

アルゴンガスはカソード側から供給され、Fig. 12の放電部を通りアノード側から排出されるガ

スフロー形の構成で、内部共振器ミラーは、真空中で外部から開閉可能なスイングペローを介して装着され、グラファイトディスクのガス出し放電中にミラー面を保護する。

Fig. 13 Output power and discharge voltage vs discharge current

Fig. 13に電気特性と出力特性の例を示す。使用ミラーは $\text{ZrO}_2/\text{SiO}_2$ 多層膜を合成石英上に蒸着したもので、出力側透過率は10%である。低ガス圧と大電流の場合に放電電圧の異常上昇が観測されたが、ディスク形のプラズマ細管に特有な、ガスリターンパスを通した放電現象に関係したものと考えられる。

ガス圧0.14Torr、磁界150ガウスでは発振のスレッシュホールドは10数Aであるが、出力飽和レベルが低く、高出力は得られない。

Fig. 12と同一の放電部を用い、外部ミラー形を実験したところ、ガス圧、磁界条件を変化しても出力パワーは20W程度で飽和する現象が観測された。

3. 高出力アルゴンイオンレーザーの出力パワー

アルゴンイオンレーザーの出力パワーを定める主要要素はプラズマ細管径、細管長、放電電

流の3点であり、ガス圧、磁界、ミラー透過率等は実験的に容易に最適値を選択できる。

出力パワーを求める計算方法には確立されたものが少なく、経験的なスケージングによるものが多いが、Fendleyら⁴⁾とHerzigerら¹⁰⁾による二つの代表的なものがある。

Fendleyらによるものは経験的なものであるが根拠は明らかにされていない。結果は例えばFig. 14に示すように、設計に便利な図で与えられている。

Fig. 14 Calculated optimized bore length (RCA)

Herzigerらによるものはレート方程式を解いて実験値を付加して得たものであって、結果は次のように与えられる。

$$\phi \cong 5.5 \times 10^{-3} \frac{T}{v}$$

$$\frac{R^4 L j^2 E_{z0}^2 \{ \sqrt{1 + \xi j^2} + \sqrt{\xi j^2} \}^2}{\sqrt{\frac{k T e}{e_0}} \cdot e^{e_0 v_i / k T e} \left\{ 1 + 0.47 \frac{k T e}{e_0} \right\}^2} \quad (1)$$

$$(\Delta N \gg \Delta N_e)$$

ただし、

ϕ : 488 nmにおけるレーザー出力(W)

$$\xi = \frac{9 \times 10^{-4}}{\left(\frac{k T e}{e_0} \right)^3 E_{z0}^2}$$

T : ミラー透過率

v : シングルパスの共振器損失

R : 細管半径 (cm)

L : 細管長さ (cm)

j : 放電電流密度 (A/cm^2)

E_{z0} : 小電流密度 ($j \leq 1 A/cm^2$) での細管長さ方向電界強度, 実験的に $E_{z0} \approx 0.6/R$

k : ボルツマン定数

Te : 電子温度

e_0 : 電子電荷

Vi : Ar のイオン化エネルギー

ΔN : 反転分布密度の差

ΔNt : 発振スレッシュホールドにおける反転分布密度の差

この結果を要約すると

(1) $2R \ll 2mm$, $j \leq 400 A/cm^2$ では,

$$\phi \propto j^2 R^2$$

(2) $2R \geq 10mm$, $jR \geq 250 A/cm$ では,

$$\phi \propto j^4 R^4$$

となる。

Fig. 15 は (1) 式による計算結果例である。

Fig. 15 Calculated output power.

4. 材料, 部品

高出力のアルゴンイオンレーザーを実現する際に問題となるのは, 大電流放電, 高出力可視光に耐えるレーザー管の材料・部品である。

(1) プラズマ細管材料

アルゴンレーザー用のプラズマ細管は, 前述のように使用材料により放射形冷却と伝導形冷却とに分かれる。

グラファイトディスク細管に代表される放射形冷却のレーザー管では, ディスク中央の細孔の周囲に多数の小孔を設けることにより, ガスリターンパスを構成できる。このため比較的強固な構造にすることが容易であるが, 欠点としてグラファイト粉末がブルスタ内面や内部ミラー面に付着したり, 長時間の運転でディスク間に堆積してディスクを短絡することがある。

タングステンディスクの場合は, 粉末が出ることはないが, 放射率とイオン耐衝撃性がグラファイトより劣るので, 放射冷却だけではスパッタが激しい。

この対策として, 製品では, カソード・アノードとブルスタ窓間で弱い補助放電を行い, グラファイト粉末をトラップしたり, ディスクがイオンにたたかれて削りとられることを防ぐ意味で, あらかじめイオンに削られる部分の内径を大きくすること¹¹⁾が行なわれる。なおタングステンディスクを用いるものでは, 伝導冷却によるものも発表されている。

放射冷却の場合のプラズマ細管のディスク外周温度は, ディスク列を一つの円筒とみなした黒体放射に従う⁴⁾ものと考ええると実測とよく一致する。プラズマ細管に流せる最大電流は, ディスクを収容する透明真空容器の耐熱性で定まり, 石英ガラスを用いる場合は1000℃前後となる。

一方ベリリア磁器細管に代表される伝導冷却形では, 動作中のプラズマ細管温度は冷却水の沸点以下, すなわち 100℃以下におさえられ, 動作の立上りが早く, 光軸安定性も良い。またアルゴンガスのクリーンアップも少く, 細管の

Table 3 Materials for argon ion lasers.

MATERIAL	BeO	グラファイト	W	Mo	Ta	Al	Al ₂ O ₃
TERM							
THERMAL CONDUCTIVITY cal/cm/sec/C	0.53	0.15	0.41	0.34	0.13	0.57	0.07
THERMAL EXPANSION COEFFICIENT /C	8×10^{-6}	6×10^{-6}	4.5×10^{-6}	5.0×10^{-6}	6.5×10^{-6}	23.2×10^{-6}	5×10^{-6}
DENSITY g/cm ³	3.01	1.75	19.3	9.01	16.6	2.7	4.1
MELTING TEMPERATURE °C	2570	3550	3387	2610	2996	660	2034
WORK FUNCTION eV	—	4.6	4.71	4.15	4.17	4.39	—
EMISSIVITY (μm) °K	—	0.95 (0.65) —	0.47~0.40 (0.65) 290~3655	0.42~0.33 (0.65) 273~2890	0.55~0.36 (0.65) 300~3300	—	—

微粉末の影響も極めて少ないなどの特長があるが、ベリリア磁器は入手困難であること、レーザー管の構造が複雑になること、ベリリア材料間あるいはベリリアと他の材料との強固な接続技術が必要となることなどの製造技術的な問題がある。

またアルミニウムディスクを用いる伝導冷却形では、電気絶縁をアルマイト薄膜、ディスク間真空気密をOリングによるなど、封じ切りが困難で実用的には大きな問題があるものが多い。

Table 3 にアルゴンイオンレーザーのプラズマ細管として考えられる材料の比較¹²⁾を示す。

(2) 電極

アルゴンイオンレーザー管用のアノードとカソードは、大電流動作にもかかわらず、比較的問題は少ない。

カソードにはタングステンスポンジにBaをはじめとした電子放出材料を含浸させた、ディスクペンサカソードが容易に用いられる。このカソードは数百Aにおよぶ電子放出が得られるものも入手可能で、不純ガスに気をつければ設計の自由度は大きい。商品レベルのアルゴンイオンレーザーでは、Fig. 16のように、フィラメントコイルの先端に放電が集中して電子放出が部分的に過大になることを防ぐための工夫をしたもの¹¹⁾もある。

アノードも大きな問題はないが、陽極損失から材料と構造を決定する。

陽極損失は、陽極での電圧降下を無視できる

Fig. 16 Cross sectional view of traditional (A) and tapered cathode (B). The emitting surface area of both is identical.

場合次のように示される¹³⁾

$$P_A = I(\phi_A + Te/11,600) \quad (2)$$

ただし、

P_A : 陽極損失

I : 放電電流

ϕ_A : 陽極材料の仕事関数

Te : アノードに集束される電子の温度

陽極を水冷構造として、冷却水の入出力温度から陽極損失を求めると、(2)式の結果とほぼ一致する。

(3) ブルースタ窓

Table 2 から分るように、放電電流 100 A、出力パワー 100 W を超すアルゴンイオンレーザーでは、ブルースタ窓を持つレーザー管、すなわち外部ミラー形のものは存在しない。

大口径プラズマ細管を用い、大放電電流で動作するアルゴンイオンレーザーでは、放電光を含んだ放射強度に依存する光の吸収と散乱が、通常の石英等を用いたブルースタ窓に生じ、出力パワーが低いレベルで飽和することが実験的に確認されている¹⁰⁾

プラズマ細管径 12mmφ では 20W 程度で飽和するが、内径が 6mmφ のものでは 100W の出力が得られている。細管径、放電電流と飽和出力パワーの関係を良く説明した文献は見当たらないが、放電電流 100 A 以上で動作する高出力アルゴンイオンレーザーでは、ブルースタ窓材料の改良が伴わない限り、内部ミラー形が有利である。

(4) ミラー透過率

高出力アルゴンイオンレーザーでは、ミラーの耐光性と透過率が出力パワーに強く関係する。

Muuss らによれば、内部ミラー形を用いた場合、出力ミラーの最適透過率は 3～4% 以下の比較的低い領域にあり、10% 以上の透過率を用いた場合に比べて数 10% 以上の出力パワーの増加が得られる。

しかし出力側ミラーの透過率減少はミラーの光学損傷を招き易く、損傷との関係で使用可能透過率が制約される⁸⁾

2 (4) 項に示した筆者らの実験結果では、ミラー透過率を下げて出力パワーの上昇は観測されなかったが、内部ミラー形アルゴンイオンレーザーの高出力化には特に低損失、高耐光性の蒸着膜を得ることが重要な要素であることは間違いない。

5. プラズマ細管長とレーザー発振効率

Table 2 に示した高出力アルゴンイオンレーザーの例で気付くことに、プラズマ細管長とレーザーの発振効率の関係がある。

アルゴンイオンレーザーの発振効率、すなわちレーザー出力パワーと放電電力の比は、0.1% 近辺にあるが、プラズマ細管長が大きい程発振効率が高い¹⁴⁾

Fig. 17 Laser output power efficiency vs effective plasma length.

Fig. 17 は Table 2 に示したアルゴンイオンレーザーと、商品レベルの低出力アルゴンイオンレーザーについてプラズマ細管有効長と発振効率の関係を示したものである。

これから分るように、アルゴンイオンレーザーの発振効率は細管有効長に対し単調に増加し、Fig. 17 から経験的に次式が導かれる⁹⁾

$$\eta = 4.5 \times 10^{0.21L - 4} \quad (3)$$

ただし、

η : レーザー出力パワーと、そのときの放電電力との比、すなわちレーザー発振効率

L : プラズマ細管有効長 (m)

この式によれば、高出力を得るには、単に大口径大放電電流で動作させるだけではなく、細管長を大きくすることが発振効率を高める意味で有効である。

6. 高出力アルゴンイオンレーザーの用途

以上のような 100 W を超える高出力のアルゴンイオンレーザーが何に用いられるのかは、必ずしも明確ではない。

従来の製品化されたアルゴンイオンレーザーの用途は、工業的に確立されているものの他に研究段階のものとして、短波長の特徴を生かした生化学反応、物性、ダイレーザーの励起光源などがあげられる。

工業技術院の大形プロジェクト「超高性能レーザー応用複合生産システム」においては、高出力の希ガスレーザーの開発と、これを用いた金属の微細加工が研究目標の一つとして掲げられているが、欧米の高出力アルゴンイオンレーザーの研究目的は、高出力化の可能性の探求とレーザーそのものの研究以外には不明である。

Seeligらは散乱や非線形光学用に魅力があるといっているが⁶⁾、高出力アルゴンイオンレーザーによる画期的な成果は聞かない。

Table 4 Power levels of other lasers that would be necessary to exhibit same power densities as 150W argon ion laser.

C-W Nd-YAG 1.06 μ m	$\phi = 0.7 \text{ kW}$
C-W CO ₂ 10.6 μ m	$\phi = 70 \text{ kW}$

ϕ : Laser output power

Table 4⁶⁾は150Wのアルゴンイオンレーザーと同等のレーザーパワー密度を得るのに必要な、他のレーザーの出力パワーを比較したものである。散乱や非線形光学では、現象のスレッシュホールドパワー密度が重要であり、これはレーザーの波長で定まる集束能力で限界が定まる。このことは高出力アルゴンイオンレーザーの目的に対する一つの解答になるかもしれない。

しかしエキシマレーザーをはじめとして、短波長高効率の新しいレーザーが発表されつつあり、これらのレーザーと競合しながら今後の高出力アルゴンイオンレーザーの動向は用途によって左右されるであろう。

7. おわりに

高出力アルゴンイオンレーザーの現状と設計論的見地からの技術的問題点とについて記した。

技術的問題は未解決のものが多いが、現状のアルゴンイオンレーザーは20W以下のパワー領域で工業的に盛んに使われており、高信頼化に活動の重点が置かれている。

参 照 文 献

- 1) W. B. Bridges: Appl. Phys. Lett. 4, 128.
- 2) 小林他: 昭和55信学総全, 767.
- 3) 小林: 電気学会東京支部レーザー加工講演会予稿, 昭和55年, 10.
- 4) J. R. Fendley, Jr and J. J. O'Grady: AD-717298, 1970.
- 5) G. Schäfer und W. Seelig: Z. angew. Physik, 1970, 246.
- 6) W. H. Seelig and K. V. Banse: Laser Focus, Aug. 1970, 33.
- 7) H. R. Lüthi et. al.: Appl. Phys. Lett. 31, 670.
- 8) H. Muuss and W. Skolaut: Appl. Phys. 17, 417.
- 9) 小林: 超高性能レーザー応用複合生産システムレーザー技術研究成果中間発表会論文集, 昭和57年, 87.
- 10) G. Herziger und W. Seelig: Z. Physik, 215, 437.
- 11) J. P. Wheeler: Proc. S. P. I. E., 122, 167.
- 12) 小林: 応用物理学会量子エレクトロニクス研究会昭和55年夏期研究会, 1.
- 13) K. G. Hernqvist and J. R. Fendley, JR.: IEEE J. Q. E., QE-3, 66.
- 14) C. P. Wang and S. C. Lin: J. Appl. Phys. 44, 4681.
- 15) G. N. Alferov et al.: JETP Lett., 18, 369.
- 16) 笠松: 電子技術総合研究所彙報, 41, 938.