



加工用大出力 CO₂ レーザー

永井 治彦・菱井 正夫・田中 正明・名井 康人・田畑 則一

三菱電機(株)応用機器研究所 〒661 尼崎市塚口本町 8-1-1

(1985年2月8日受理)

High Power CO₂ Lasers for Material Processing

Haruhiko NAGAI, Masao HISHII, Masaaki TANAKA,
Yasuhito MYOI and Norikazu TABATA

Product Development Laboratory, Mitsubishi Electric Corporation,
8-1-1, Tsukaguchi-Honmachi, Amagasaki 661

1. はじめに

CO₂ レーザーは加工、医療、軍事関係など多様な分野で利用されており、一口に CO₂ レーザーといっても、その用途に応じて種々のタイプのものが開発されている。

CO₂ レーザーを励起方法により分類すると、放電励起方式、ガスダイナミックレーザー (GDL, gas dynamic laser) などの熱励起方式、および化学励起方式とに大別される。このなかでも加工用、医療用をはじめとする一般用途の CO₂ レーザーには放電励起方式が採用されている。熱励起方式や化学励起方式はさまざまな目的の研究用あるいは超大型レーザーなどの軍用として開発されている CO₂ レーザーの励起方式である。

放電励起方式の CO₂ レーザーには連続発振の低速ガス流形と高速ガス流形、パルス発振の TEA レーザー (transversely excited atmospheric laser), あるいは RF 放電を用いた導波管レーザーなどがあり、放電の方式も種類も多様である。

本稿では新しい放電励起方式 SAGE^{1,2)} を採用した、加工用の高速ガス流形・連続発振大出力 CO₂ レーザーについて紹介する。SAGE は silent-discharge assisted DC glow discharge excitation, すなわち無声放電を補助放電として利用した直流グロー放電の励起方式であり、大出力レーザー用に適した放電励起方式である。

通産省の大型プロジェクト「超高性能レーザー応用複合生産システム」(昭和 52~59 年度) では、SAGE 方

式による 10 kW, 20 kW 級の加工用大出力 CO₂ レーザー³⁻⁶⁾ が開発されており、これらの成果を中心に技術内容について以下に紹介する。

2. 励起方式

SAGE 式大出力 CO₂ レーザーは光軸、放電、ガス流の 3 軸が直交した構成の、いわゆる 3 軸直交形レーザーである。図 1 に SAGE 電極系の構成を示す。主放電電極は銅の平板で作られた陽極と、直径 5 mm の太さの Mo の陰極とで構成されている。おのおのの陰極には安定化抵抗が接続され、放電部はガス流の方向に傾けられている。陰極列の上流側には 1 本の棒状の無声放電電極 (SD 電極) が設けられ、この SD 電極と陰極あるいは陽極との間に 25 kHz または 100 kHz の高周波電圧が印加されて、予備放電を起こす。SD 電極は鉄製のパイプの外側をホウケイ酸ガラスで厚さ 1 mm 以下にライニングしたもので、この誘電体の capacitive ballast 効果により均質一樣な高周波の予備放電が維持される。この予備放電により生じたイオンはガス流により主放電電極間に流れ、この結果、主放電も均質一樣に広がった高密度の直流放電となり、短い放電長できわめて大きなグロー放電電力の安定注入が可能になる。

この励起方式 SAGE の特長をまとめると次のようになる。

(1) 安定に注入ができるグロー放電電力は、予備放電を行わない単独直流放電の場合の 2.5~3 倍に増大する。図 2 は後の 4 章で述べる 20 kW 級 CO₂ レーザ

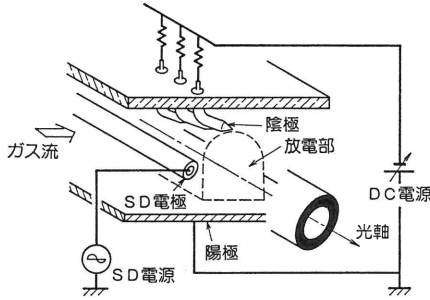


図1 SAGE電極系の構成

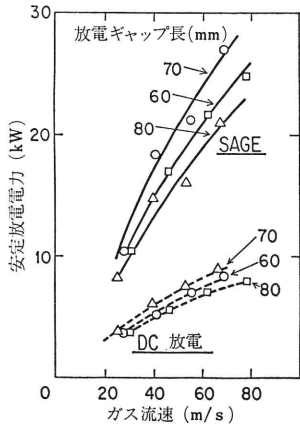


図2 SAGEとDC放電との安定注入放電電力の比較

放電長 45 cm, ガス圧力 100 Torr, CO₂-CO-N₂-He=2-1-6-32, SD 電力 1.2 kW.

一的设计に着手する前に、20 kW 機の 6 分の 1 モデルの放電実験装置を製作し、SAGE 放電の性能試験を行なって得た結果である。20 kW レーザーの動作ガス流速である 80 m/s では、単独直流放電の場合の約 3 倍の安定放電電力の注入が実現された。

(2) 次に、レーザーの動作ガス圧力を p (Torr)、放電ギャップ長を d (cm) とすると、SAGE では $pd = 700 \sim 1,000$ Torr·cm の条件下での安定放電が可能である。つまり、放電ギャップ長が大きい大断面放電、あるいは高ガス圧力での安定放電が可能となり、その結果不安定形共振器による大出力ビームの取出し、あるいは高ガス圧力・ガス封じ切り方式⁷⁾での運転動作に適している。

3. 不安定形共振器

大出力 CO₂ レーザーにとって励起方式とともに重要な技術が、不安定形共振器 (通称リングモード共振器) である。安定形共振器の TEM₀₀ モード径は共振器長

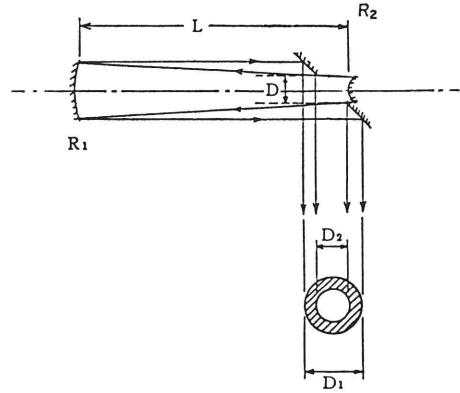


図3 正分岐共焦点不安定形共振器の構成とビームパターン

と 2 枚のミラーの曲率半径とで決定され、これを 13~14 mm 以上の大きさにすることは幾何学的にも実際上困難である。しかし、不安定形共振器ではビーム径を任意に選ぶことができるのみならず、拡大率 M を選定し、ビームの発散角を規定することもできる。したがって、安定形共振器における出力ミラーの耐光強度の問題も緩和できるうえ、大出力で低発散角の集光性のよいビームを得ることも可能である。

加工用の大出力 CO₂ レーザーに通常使用されている不安定形共振器は、図 3 に示す構成の正分岐共焦点形共振器 (confocal positive-branch unstable resonator) で代表される。この共振器は凸面の全反射ミラーと凹面の全反射ミラーとで構成されており、凸面ミラーではビームをミラーの外周のほうへ発散させ、凹面ミラーによりこれを平行ビームに変換する仕組みになっている。これを凸面ミラーの極く近傍に配置された穴あきの取出し用全反射ミラーで真横に反射させ、リング状パターンの出力光を取り出す共振器である。

3.1 発振モードとビーム径

不安定形共振器には安定形共振器の高次モードに対応するモードは発振しない。これは横モードごとの損失が大きく異なるため、最低損失のモードだけが発振する結果である。不安定形共振器では、リング状パターンの外径 D_1 と内径 D_2 との比を拡大率 M 、すなわち

$$M = D_1/D_2$$

と定義し、これが重要なパラメータとなる。拡大率 M を決めると、共振器を構成する 2 枚のミラーの曲率半径 R_1, R_2 が共振器長 L の関数として決定される。正分岐共焦点形共振器について、この計算例を図 4 に示す。

M が大きくなると、リング状ビームの中抜き部分は

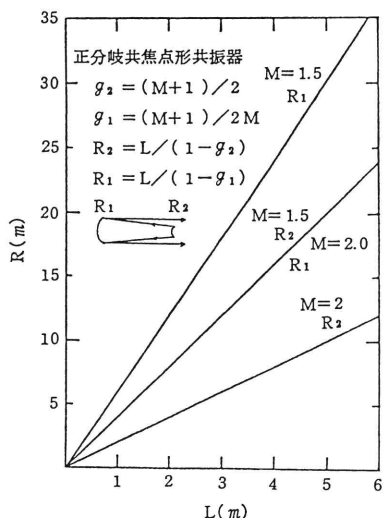


図 4 不安定形共振器のミラー曲率半径

小さくなるが、共振器の回折損失が増大し、発振効率は低下する。しかし、ビームの発散角は小さくなり、集光特性はよくなる。図 4 からわかるように、 R_1, R_2 を選べば M の値を変えることができ、次節で述べるように、いろいろな発散角のビームを得ることができる。

また、ビームの内径はビーム取出し用穴あきミラーの内径 (図 3 の D) で決定され、外径はそれに M を乗じた値で与えられる。このため、不安定形共振器では、ビームのうち、外径を任意に選ぶことができ、それに従って発散角も決定される。不安定形共振器が大断面の放電空間から低発散角の良質のビームを取り出すことができ、大出力レーザー用に適した共振器であるということは以上のような理由による。

3.2 リングモードの遠視野パターン

リング状で、一様強度分布の平面波の回折パターンはフレネルの積分方程式を解いて得られる。また、この平面波をレンズで集光した場合、焦点での強度分布が遠視野像と等しい強度分布を示すことは回折理論で証明されており、よく知られているとおりである。

正分岐共焦点形共振器からの発振ビームは理想的には平面波であるが、強度分布をもつ。しかし、ビームの発散角はほぼ波面で支配的に決定されるので、リング状の一様強度分布の平面波を出力ビームと仮定し、計算して得られる遠視野でのパターンは実際に測定して得られる遠視野でのパターンとかなりよい対応を示す。むしろ、この計算と測定との間の違いが、平面波を基準とした波面からの位相ずれを表わしているといえる。

このようなリング状パターンの遠視野での計算例を

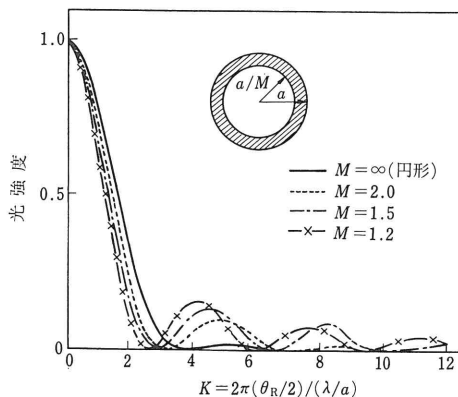


図 5 リングモードの遠視野パターン

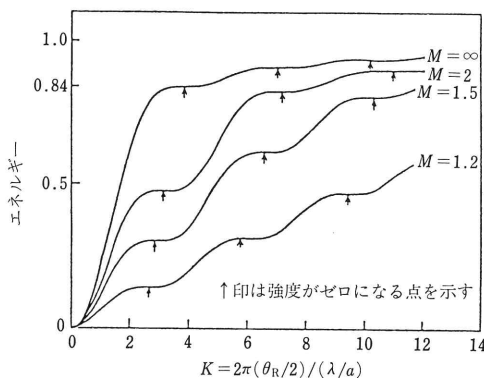


図 6 リングモードパターンのエネルギー分布

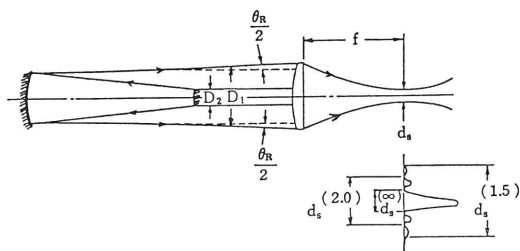


図 7 不安定形共振器ビームの発散と集光

図 5 に、そのエネルギー分布を図 6 に示す。 M が大きいほど、エネルギーの集中度は中央部へ寄ることがわかる。不安定形共振器から出るビームの発散角と集光スポット径は、図 7 の定義に従って次のように表わせる。

〈発散角〉

$$\theta_R = K(2/\pi)\lambda/D_1 = 0.637K\lambda/D_1$$

ここで $D_1 = 2a$

(a) 第 1, 第 2 サイドパターン基準

$M=1.5$ のとき $\theta_R^{(1.5)} = 6.55\lambda/D_1 \dots$ 第 2 サイドパタ

ーンまで、80% のエネルギーを含む。

$M=2.0$ のとき $\theta_R^{(2.0)}=4.57 \lambda/D_1$ … 第1サイドパターンまで、82% のエネルギーを含む。

$M=\infty$ のとき $\theta^{(\infty)}=2.44 \lambda/D_1$ … 中央部のみ83.8% のエネルギーを含む (エアリーディスク)。

(b) 83.8% エネルギー基準

$M=1.5$ のとき $\theta_R^{(1.5)}=7.51 \lambda/D_1$

$M=2.0$ のとき $\theta_R^{(2.0)}=5.22 \lambda/D_1$

〈集光スポット径〉

$M=1.5$ のとき $d_s^{(1.5)}=f \cdot \theta_R^{(1.5)}$

$M=2.0$ のとき $d_s^{(2.0)}=f \cdot \theta_R^{(2.0)}$

$M=\infty$ のとき $d_s^{(\infty)}=f \cdot \theta^{(\infty)}$

4. 装置と特性

励起方式 SAGE および不安定形共振器を採用した 20 kW および 10 kW 出力の、加工用大出力 CO₂ レーザーが冒頭で述べた大型プロジェクトで開発された。図 8 は三菱電機(株)応用機器研究所に設置され、昭和 59 年度に 20 kW 級の加工実験用として使用されたときの

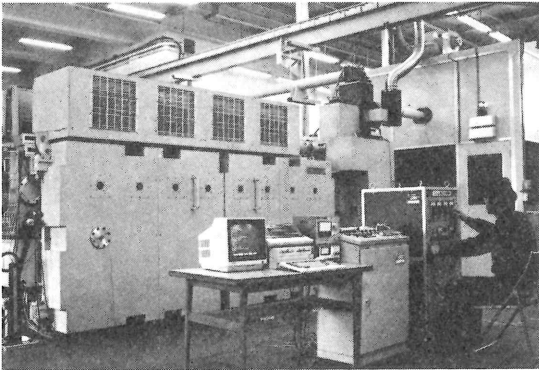


図 8 SAGE 式 20 kW 級 CO₂ レーザー
最大出力 26.5 kW, 発振効率 16.5%.

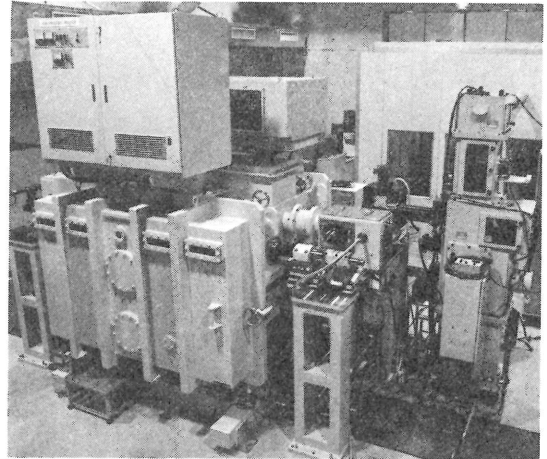


図 9 筑波実験プラント内設置の SAGE 式 10 kW 級 CO₂ レーザー
最大出力 11 kW, 発振効率 13.5%.

SAGE 式 20 kW 級 CO₂ レーザー装置の外観である。図 9 は筑波の実験プラント内に設置され、歯車の溶接や表面焼入れに使用された SAGE 式 10 kW 級 CO₂ レーザー装置の外観である。

これらの大出力機の共振器構成を図 10 に示す。いずれも正分岐共焦点の不安定形共振器であり、拡大率は 1.5 である。これは取出し率 δ に換算すると 56% ($\delta=1-(1/M^2)$) に相当する。表 1 に SAGE 式 20 kW, 10 kW CO₂ レーザーの特性をまとめた。20 kW 機と 10 kW 機と異なる点は放電長と共振器長で、その他放電ギャップ長やガスの条件はまったく同一である。ビーム取出し用の窓としては KCl, あるいは ZnSe が使用された。ZnSe は耐光強度が高く、出力 20 kW を取り出しても破壊することはない。しかし、光学歪 (optical distortion), いわゆる熱レンズ効果が大きく、長距離伝

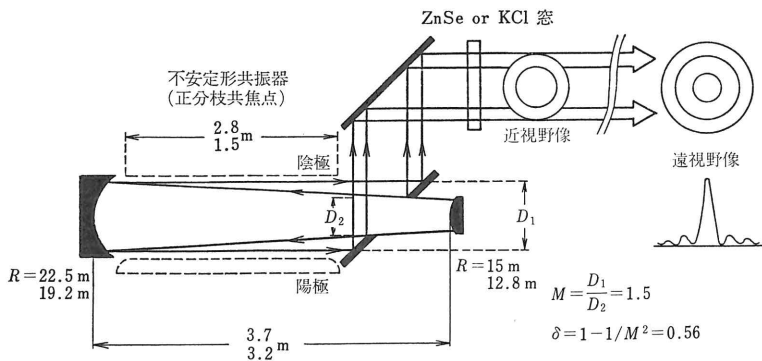


図 10 20 kW および 10 kW CO₂ レーザーのビーム取出し用光学系の構成
長さを示す上側および下側の数字はそれぞれ 20 kW および 10 kW レーザーに対応。

表 1 SAGE 式 20 kW, 10 kW CO₂ レーザーの特性

	励起方式 (放電長) (放電ギャップ)	レーザーガス (圧力) (流速)	共振器 (共振器長) (拡大率 M) (発散角)	窓 (ビーム径)	最大出力 (発振効率)	装置の大きさ
20 kW CO ₂ レーザー	SAGE (2.8 m) (70 mm)	CO ₂ -CO-N ₂ -He=2-1 -6-32 (80 Torr) (80 m/s)	正分岐共焦点 不安定形共振器 (3.7 m) ($M=1.5$) (1.3 mrad 理論) (1.6 mrad 測定)	ZnSe あるいは KCl (~80 mm)	26.5 kW (16.5%) ガス封じ切り	3.4 m L × 1.8 m W × 1.7 m H
10 kW CO ₂ レーザー (筑波プラント)	SAGE (1.5 m) (70 mm)	CO ₂ -CO-N ₂ -He=2-1 -6-32 (80 Torr) (80 m/s)	正分岐共焦点 不安定形共振器 (3.2 m) ($M=1.5$) (1.1 mrad 理論)	ZnSe あるいは KCl (~80 mm)	11 kW (13.5%) ガス封じ切り	2.3 m L × 2.0 m W × 2.0 m H

(注) 発散角は 83.8% のエネルギー基準による値である。

播や集光特性に支障が生ずる。一方、KCl は光学歪が小さく、きわめて良質の窓であるが、単結晶であるため、破壊しやすいのが欠点である。しかし、大プロ計画のなかで開発された AR コーティング付防湿窓は、表面を気体による強制冷却を行なうことにより、20 kW 出力の取出しに成功している。なお、大プロ計画における KCl 窓は、堀場製作所(株)が基板を製作し、松下技研(株)がコーティングと評価を受けもって開発された。

次に、20 kW レーザーの特性と性能について述べる。昭和 58 年度に 20 kW 機を試作し、最初に発振実験を行なったときは最大出力 20.8 kW までしか得られなかった。SAGE 法による放電電力の安定注入にはまだ十分余裕があったのであるが、出力のほうが飽和してしま

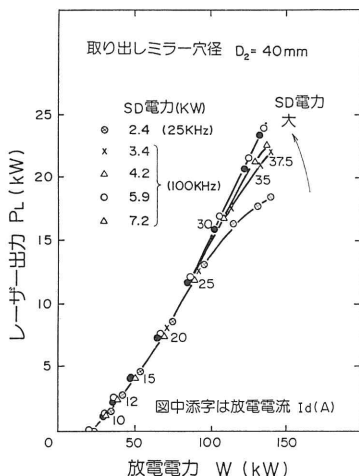


図 11 レーザー出力の SD 電力に対する依存性

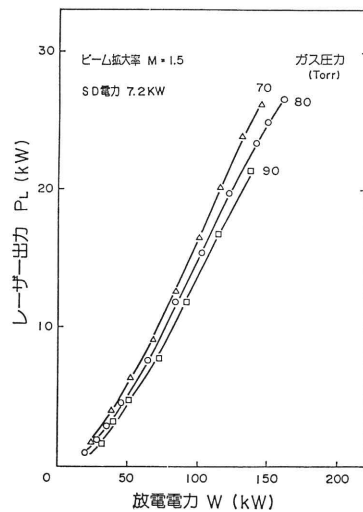


図 12 SAGE 式 20 kW CO₂ レーザーの発振出力特性
 $D_2=43$ mm.

ったためである。この原因を種々追求した結果判明したことは、SD 電力が不足するとレーザー出力の直線性が失われることである。図 11 に予備放電用の SD 電力とレーザー出力との関係を示す。SD 電力を 7.2 kW まで増加させると、ほぼ完全な直線出力が得られるようになった。この条件でさらに出力増大を図った結果が図 12 である。

ガス圧力 80 Torr, ガス封じ切り条件の下で、最大出力 26.5 kW, 発振効率 16.5% が得られ、大プロ計画の目標値である出力 20 kW, 発振効率 15% を越える性能を

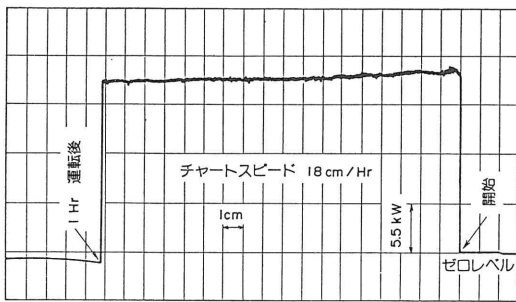
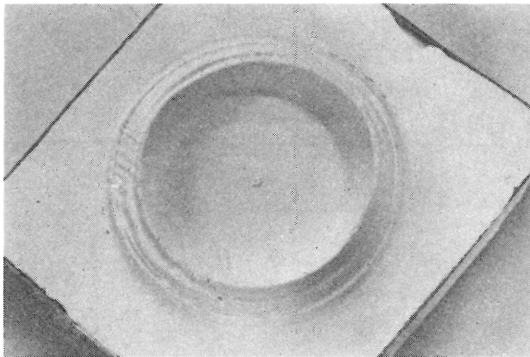
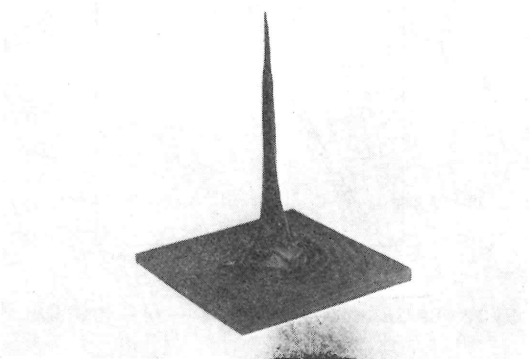


図 13 20 kW 出力での連続運転 (ガス封じ切り状態)



(a)



(b)

図 14 SAGE 式 20 kW CO₂ レーザーのビームパターン

(a)近視野パターン, (b)遠視野パターン.

実現した. このとき窓には市販の ZnSe が使用され, 最大出力は電源の容量で制限されている. また, 図 13 に示すように, ガス封じ切り状態で1時間の 20 kW 連続発振も行ない, 安定な出力を確認した.

出力 20 kW 級でのリングモードのビームパターン

(近視野像)を図 14(a)に, 遠視野パターンを図 14(b)に示す.

図 14(a) はアクリルバーンパターンのレプリカを製作したものであるが, 軸対称性のよい, 均質なパターンが得られている. また, このパターンを曲率半径 22.5 m の凹面ミラーで集光させ, その焦点近傍で得たアクリルバーンパターンのレプリカが図 14(b)である. この集光ビームの中央部, 第1, 第2のサイドパターンの直径は, 先に 3.2 節で述べた計算による集光スポット径と比較すると, 計算値よりわずかに大きな値を示すものの, ほぼ一致した傾向を示した⁶⁾. 発散角も表 1 に示したように, 理論値 1.3 mrad に対して実測値は 1.6 mrad である.

5. おわりに

通産省の大型プロジェクトの一環として開発された SAGE 式大出力 CO₂ レーザーについて, 励起法, 共振器を中心に解説するとともに, 開発された 20 kW, 10 kW レーザーの性能と特性を紹介した.

今後, これらの大出力機は鉄鋼業, 重工業あるいはエネルギー関連産業へ, 溶接用や表面改質用として幅広く実用化されるものと思われる.

文 献

- 1) 秋葉稔光, 永井治彦, 菱井正夫: 横方向励起形気体レーザー発振装置. 特許公報 昭 57-39070.
- 2) 永井治彦: 無声放電補助直流グロー放電励起法. 工業技術院大型プロジェクト“超高性能レーザー応用複合生産システム”, レーザ技術研究成果中間発表会論文集 (1982) p. 75.
- 3) N. Tabata, H. Nagai, H. Yoshida, M. Hishii, M. Tanaka, Y. Myoi and T. Akiba: Industrial 20-kW cw CO₂ SAGE laser. CLEO' 84, Technical Digest TUC 4 (1984) p. 54.
- 4) N. Tabata, H. Nagai, H. Yoshida, M. Hishii, M. Tanaka, Y. Myoi, T. Akiba and T. Takahashi: High power CO₂ lasers for FMS...10 kW and 20 kW class SAGE lasers. ICALCO '84 (Boston, 1984).
- 5) H. Nagai, N. Tabata, T. Akiba and M. Ikeda: High power CO₂ lasers in the Japanese National Project. IVA (The Royal Swedish Academy of Engineering Sciences) シンポジウム “Lasers-Tools for Competition” (Stockholm, 1984).
- 6) 菱井正夫, 田中正明, 名井康人, 永井治彦, 田畑則一: 20 kW CO₂ レーザー. レーザー学会研究会報告 RTM-84-26 (1984) p. 19.
- 7) H. Nagai, M. Hishii, K. Shibayama, A. Nagai and T. Akiba: High pressure sealed cw CO₂ laser with high efficiency. IEEE J. Quantum Electron., QE-18 (1982) 416.