レーザーオリジナル

同軸型 He-Cd II 白色光レーザーの高出力化

丸尾 秀史*・大田 建久*・佐々木和可緒*

(1989年4月20日 受理)

Optimum Condition for High Output Power of a Coaxial Type He-Cd II White Light Laser

Hideshi MARUO*, Tatehisa OHTA* and Wakao SASAKI*

(Received April 20, 1989)

Optimum conditions for high output power are described concerning a laser operation and a resonator for primary three colors in a coaxial type He-Cd II white light laser. Optimum discharge voltages for three-color operations are quantitatively determined by experimental data obtained from laser oscillation using for some laser tubes with the electrode dimensions designed for a white light laser. A cw white light laser with a 50-cm discharge length is accomplished under the optimum conditions for white light operation. The optimum transmission factors for three colors on the resonator are determined by simulating of laser output power. The simulation is carried out by using the experimental data of spontaneous emission light and lifetimes of the levels for white light oscillation. The results show that when most suitable mirrors are used, a 10-mW white light laser in cw oscillation can be achieved.

Key Words : He-Cd II laser, Coaxial type laser, White light laser, Optimum discharge voltage, Optimum resonator.

1. はじめに

ホローカソード型 He-Cd レーザーは、金属の Cd 蒸気をレーザー媒質として用いるレーザーで、現在までに、紫外から近赤外領域にわたって12本の発振線が報告されている¹⁾。そしてその発振線のうち、可視光領域にある青色、緑色、赤色の光の三原色を同時に発振させることにより白色光レーザーが得られるが、その各発

振線の波長が理想的な光三原色の波長に近いこと、その強度比を変化させることにより任意の色の光ビームを再現できることから、高品位テレビジョン等の映像機器や画像機器、分光用の光源への応用が期待されている。しかし、実用化のためには、①小型である、②連続発振である、③高出力である、④出力が安定である、⑤長寿命であることなどの条件が要求される。そして、一般に、ホローカソードレーザーは、そ

*同志社大学工学部電子工学科 (〒606 京都市上京区烏丸今出川東入)

* Faculty of Engineering, Doshisha University (Karasuma-Imadegawa-higashiiru, Kamigyo-ku, Kyoto 602)

の電極構造の違いにより、笛型^{2,3)}、同軸型^{4,5)}、ハイブリッド型⁶⁾、ツインカソード型⁴⁾、スパイラル型⁷⁾等に分けることができるが、このうち笛型のレーザーでは現在までに長寿命で100 mW程度の高出力で出力が安定な白色光レーザーが開発されている⁸⁾。一方、筆者らの研究室では、操作性に優れ、活性媒質であるCd金属を陽極と陰極の間の比較的広い空間に挿入するために長寿命化が容易であり、また構造が比較的簡単なため工業生産に適しているなどの利点を有する同軸型のレーザーに着目して白色光レーザーの開発を進めてきたが^{9,10)}、その電極構造に起因するいくつかの問題点がある。特に陽極がレーザー活性領域を保持する陰極を覆っているため、過度にレーザー管内部の温度が上昇し、レーザーの出力の低下、効率の低下が起こる^{11,12)}。またレーザー発振に必要なプラズマ空間を光軸に対して一様に作り出すことが難しいことにより三原色の同時発振すなわち白色光発振は非常に困難になっている。このためHe-Cd II白色光レーザーを含めた同軸型のレーザーに関する発振最適化の検討はほとんど行われていない。そこで、筆者らは、このような現状にある同軸型He-Cd II白色光レーザーを連続発振でしかも高出力化するために、レーザーの動作条件と使用する共振器ミラーに関して、その最適化を検討した。レーザーの動作条件の最適化に関しては、レーザー発振およびその出力と密接な関係にあるCd蒸気圧の最適化のために、Cd蒸気圧と密接な関係にあるレーザー管の内部温度(陰極温度)や放電維持電圧に対するレーザー動作について定量的に評価を行い、三原色の最適動作条件を検討した。また、このような放電維持電圧に対するレーザーの発振特性に対して、自然放出光データを用いたレーザー透過光出力のシミュレーションを、レーザー各準位の準位寿命やホローカソードプラズマ中の電子密度分布を考慮して行った。そして、実験結果と比較検討を行い、さらに三原色に対する最適なミラーの透過率について検討した¹³⁻¹⁶⁾。

本論文では、レーザーの動作条件の最適化に

Fig. 1 Typical electrode of a coaxial-type hollow cathode laser tube viewed from the tube side.

より、陰極長50cmのレーザー管において、連続発振(CW)で三原色合計で約3 mWのレーザー出力が得られたことを論ずる。また、白色光発振に最適なミラーを用いることにより、さらに数10%程度の出力の増加が期待されることを論ずる。

2. 同軸型レーザー

Fig. 1に同軸型レーザー管の電極部の構造を示す。陰極と陽極はそれぞれレーザーの光軸を中心に同軸状に配置されている。陰極とこれを覆っている石英ガラスには、同じ位置に等間隔に孔があけられており、そして、放電はバッファガスであるHe中で、この孔を介して陽極と陰極の内面との間で行われる。このとき、陰極内部には負グロープラズマが重畳するように効率よく閉じ込められ、この結果レーザーの発振に有効なホローカソード効果が生じる。レーザー媒質となるCd粒子は、石英ガラスと陽極の間の空間に封入されている。そして、Cd粒子が放電の熱により蒸気化され、陰極内部のレーザー活性領域へ拡散し、ある適切なCd蒸気圧になるとレーザー発振が可能な状態となる。このように、レーザー活性領域内のCd蒸気圧は、陰極表面の温度や陰極にあけた孔の大きさと数に深く関わりがあり、レーザーの出力に影響を与える要因となる。そこで、孔の間隔と孔の直径はそれぞれ18mm、3.5mmとし、孔の数、すなわち、陰極にあけられた孔の総面積については、式(1)で与えられるような陰極面積損失を指標に用いて、白色光レーザーの実現に最適な約8.0%程度⁹⁾となるように決定した。

Fig. 2 Structure of a hollow-cathode laser tube viewed with a thermocouple for the measurement of cathode temperature.

Table I Electrode dimensions of laser tubes used in the experiment.

	cathode length [cm]	loss of area [%]	inner diameter [mm]
# 1	30	8.17	4.0
# 2	35	8.24	4.0
# 3	50	8.75	4.0
# 4	30	10.67	3.0
# 5	40	5.99	6.0

$$\text{陰極面積損失} = \frac{\text{陰極の孔の総面積}}{\text{孔を含めた陰極内表面積}} \quad (1)$$

さらに、従来行われていないレーザー管内部の温度の評価のために、Fig. 1の電極構造に熱電対を挿入したFig. 2のようなレーザー管を用い、小型で白色光発振可能なレーザー管で実験を行った。また、レーザーの出力は陰極活性領域内の不純物による光損失の影響を受けるので、①融点が高い、②スパッタリングが少ない、③仕事関数が高いなどの条件を満足するような陰極材料を選択する必要がある。筆者らは、これらの条件に加え、保管性(酸化しにくい)、価格、加工性等の条件から、陰極材料に SUS 304 L を用いることにした。

3. 実験

実験は、Table I のような仕様のレーザー管を用いて次のような実験を行った。

放電維持電圧は、同軸型レーザーのようなホロカソードレーザー管を、一定電流で駆動した場合において、内部温度(陰極温度)の上昇にともなう Cd 蒸気圧の変化を反映する。そこで、筆者らは、Table I 中の三原色同後発振(白色光発振)が可能なレーザー管 # 1 を用いて、内部温度、放電維持電圧をモニターしながらレーザー出力の変化を測定した。Fig. 3 は、レーザー管 # 1 を He 圧力 5.1 Torr、放電電流(ピーク値) 1 A、duty 比 35% の繰り返しパルス放電で駆動したときの、放電維持電圧(端子

Fig. 3 Dependence of the laser power of pulse oscillation on discharge voltage in a He-CdII laser with a 30 cm-discharge length.

電圧) に対するレーザー出力の変化を示したものである。レーザー出力の測定において、使用したミラーの反射率はほぼ 100% のものを用いたので、プリュースタ窓からの反射光を便宜的に出力とした。三原色に対して、それぞれ発振最適放電維持電圧が存在することがわかる。また、Fig. 4 より、内部温度と放電維持電圧の間に比例関係があることがわかる。このように、

Fig. 4 Discharge voltage vs. cathode temperature characteristics.

Fig. 5 Oscillation regions for the discharge voltage as a function of discharge current density.

放電維持電圧はレーザー管内部の温度，すなわち Cd 蒸気量を反映し，放電維持電圧が三原色のレーザー動作の重要なパラメータとなることがわかる。Fig. 5 は封入 He 圧力 4～12 Torr の条件下での，レーザー管 #1～#5 のレーザー発振特性を示したものである。この図において，レーザー管 #1～#5 は，それぞれ陰極面積損失や陰極長が異なるために，また同じレーザー

管でも，放電電流値や duty 比の違いによって定常放電電流密度が異なるので，横軸には放電電流密度をとることにした。●○印はそれぞれ青色，緑色，赤色のレーザー発振に最適な放電維持電圧を示している。この図より，どのようなレーザー管においても，三原色が同時に発振する放電維持電圧は 320 V 前後であることがわかる。さらに，同様の実験を陰極内径の異なるレーザー管 #4，#5 を用いて行った場合も，同様な結果が得られた。

4. レーザーの透過光出力シミュレーション

前節に述べたように，三原色に対してそれぞれレーザー発振に最適な放電維持電圧が存在することが明らかになった。そこで，このような放電維持電圧に対するレーザー発振特性を評価するために，次のようなレーザー透過光シミュレーションを行い，白色光動作の最適条件と使用するミラーの最適条件を検討した。

一般に，レーザーの透過光出力 P_{out} は次の式 (2) で表される¹⁷⁾。

$$P_{out} \propto \eta \times \frac{T}{T+1} - T \quad (2)$$

ここで，

$$\eta = \frac{\Delta N}{\Delta N_{min}} \quad (3)$$

$$T = \frac{K_t}{K_0} \quad (4)$$

であり，各記号は，

T : 出力結合係数

K_t : 出力結合による振幅減衰率

K_0 : ミラーの振幅透過率 $T_0 = 0$ すなわち $K_t = 0$ のとき共振器の振幅減衰率

η : 相対励起強度

ΔN : レーザー発振前の反転分布

ΔN_{min} : $K_t = 0$ の時の反転分布

である。前節で検討したように，同軸型レーザーでは，Cd 蒸気圧と密接な関係にある相対励起強度 η の見積りに，まず，反転分布数 ΔN が

Fig. 6 Dependence of the spontaneous emission intensity in a He-CdII laser.

Fig. 7 Experimental arrangement for the measurement of spontaneous emission.

上準位のみで決まる（下準位の減衰確率が上準位の減衰確率に比べて非常に大きい）と仮定して、各レーザー発振線の上準位分布数を反映する自然放出光（エンドライト）データを用いることにした。ここでは、誘導吸収による影響は考慮していない。Fig. 6は、レーザー管 #2 を用いて、He 圧力 7.2 Torr、放電電流 1 A、duty 比 35% で、自然放出光を測定した結果である。自然放出光の強度もレーザー出力と同様に、放電維持電圧の変化に対して著しく変化することを示している。この結果に基づいて、上準位分布数 N を次のように見積った。

Table II Transition rate of spontaneous emission and stimulated emission for the levels concerning red and green oscillations.

Transition rate by spontaneous emission [MHz]							Transition rate by stimulated emission [MHz]	
A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	W_1	W_2
30	100	100	100	200	200	1000	60	100

$$N = \frac{C \times S_P}{A} \quad (5)$$

ここで、 S_P は、Fig. 7の系でレーザー放電管の自然放出光を受光しない時、背景光の影響が無視できることを確認して、測定された自然放出光データを与える。比例定数 C は、自然放出光の測定に使用した分光器が波長により感度が違うため、補正するために用いた。また、 A はレーザー上準位の自然放出確率を表す。ここで、三原色に対する自然放出確率の値は、文献18)で用いられた値 (Table II 参照) を適用した。また、共振器に透過率 0% のミラーを用いた場合での、レーザー発振が開始する放電維持電圧に対する自然放出光データを S_{PTH} としたとき、それに対応する上準位分布数 N を N_{TH} とした。この N と N_{TH} を、式(3)の ΔN と ΔN_{min} に適用して、相対励起強度 η は

$$\eta = \frac{S_P}{S_{PTH}} = \frac{N}{N_{TH}} \quad (6)$$

とした。この結果、Fig. 6より、相対励起強度 η は放電維持電圧の変化にともない著しく変化する。また、レーザー管の K_0 は、次のようにして見積った。振幅透過率 T_0 を有するミラーで、レーザー発振が開始する放電維持電圧に対する自然放出光データ S'_{PTH} とそれに対応する N'_{TH} より、相対励起強度 η' は次のように表される。

$$\eta' = \frac{S'_{PTH}}{S_{PTH}} = \frac{N'_{TH}}{N_{TH}} \quad (7)$$

Fig. 8 Comparison of the laser output power between experimental data and the simulation in a 441.6 nm line.

Fig. 10 Comparison of the laser output power between experimental data and the simulation in a 636.0 nm line.

Fig. 9 Comparison of the laser output power between experimental data and the simulation in a 537.8 nm line.

この相対励起強度 η' のとき、振幅透過率 T_0 のミラーを用いてレーザー発振が開始するので、これらの値を用いて式(2)のシミュレーションを行うことにより、レーザー管の K_0 を見積ることができる。そこで、Fig. 6 の自然放光データと K_0 と K_t を、上述の式(2)に適用し、三原色のレーザー透過光出力のシミュレーションを行った。また実験から $K_0 = 3.2\%$ とした¹⁵⁾。このシミュレーションの結果を Fig. 8～10 に示す。青色 (Fig. 8) においては、実験結果 (○印) とシミュレーション結果 (破線) が比較的良好に一致している。緑色 (Fig. 9) の場合は、シミュレーションの結果 (破線) を見ると放電維持電圧の上昇とともにレーザー出力は 360 V 付近で、また赤色 (Fig. 10) の場合は、放電維持電圧 345 V あたりでレーザー出力が最大になるような振舞いをし、併せて示す実験結果 (○印) とは放電維持電圧の高い側で異なった振舞いをする。このように赤色と緑色においてシミュレーション結果と実験結果が一致しないのは、赤色と緑色がカスケードの関係にあること、赤色と緑色

Fig. 11 Energy levels for the rate equations with the simultaneous oscillation in a He-CdII laser.

の上準位の寿命がそれぞれ $\sim 20\text{ns}$, $\sim 5\text{ns}$ と比較的近い値をとるため、反転分布量を論ずるとき下準位の分布数を無視できないと考えられる。一方、青色において、実験結果とシミュレーション結果がよく一致するのは、上準位の寿命が $\sim 700\text{ns}$ と非常に長く、下準位の寿命が $\sim 2\text{ns}$ と短いため、自然放出光強度がそのまま反転分布を反映するためと考えられる¹⁶⁾。

そこで、筆者らは、赤色と緑色については、自然放出光の振舞いだけでは、レーザーの発振特性を説明することができないので、これらの発振線の発振特性をより適切に評価するために、新たにFig.11のようなモデルを考えることにした。このFig.11で、各準位への励起はドリュベステン関数で与えられる電子密度分布に従うものとした¹⁹⁾。これは、ホローカソードプラズマ中の電子エネルギー分布が、このような関数に従うことが報告されており、また、Cd IIの緑色と赤色の各上準位への励起には、主として、電子が寄与していることが報告されているからである^{18,20)}。そして、このドリュベステン関数は、

電界や平均自由行程によって変化するが、Cd 蒸気圧は、内部温度と密接に関係しており、また陰極温度と放電維持電圧の間に比例関係があることにより、ドリュベステン関数は、放電維持電圧の関数として表すことができることが明らかになっている²⁰⁾。まず、赤色の下準位については、赤色の下準位と緑色の上準位が一致しているので、緑色の自然放出光強度を用いてその下準位の分布数を見積った。つぎに、緑色の下準位については、Fig.11のモデルでレート方程式を与えた。そして、定常状態で解くことによって、その分布数を見積った。すなわち、Fig.11中の N_3 は、

$$N_3 = \frac{\rho_3 N_0 + (W_2 + A_3) N_2}{A_5 + A_6 + W_2} \quad (8)$$

であり、Table IIに誘導放出確率 W_1 および W_2 、自然放出確率 $A_1 \sim A_7$ の値を示す。ここで、 ρ_3 は電子密度を表し、ここでは緑色の下準位のエネルギー準位に相当する電子に注目した。また、 ρ_3 は、前述のドリュベステン関数に従い、 ρ_3 と N_0 の積は、

$$\rho_3 N_0 = (A_5 + A_6) N_3 - W_2 (N_2 - N_3) - A_3 N_2 \quad (9)$$

を満足するものとした。これで、赤色、緑色ともに上下準位の分布数がわかるので、反転分布が求まる。これを式(3)の ΔN に代入することにより、自然放出光データのみを用いてシミュレーションした場合と同様に、放電維持電圧に対するレーザー透過光出力のシミュレーションができる。その結果を、Fig.12~13に示す。赤色、緑色ともにシミュレーション(破線)と実験結果(○印)が比較的良好一致する。これらの結果、同軸型 He-Cd II レーザーを白色光レーザーとして用いる場合には、放電維持電圧が320 V前後であれば、効率のよい白色光レーザーとなることが明らかであり、理論的にも、前節で述べたような実験の結果と一致する。

そこで、このシミュレーションを利用して、さらに使用する共振器ミラーのレーザー出力が最大になるような、ミラーの透過率を、三原色

Fig. 12 Comparison of the laser output power between experimental data and the simulation using Druyvesteyn function indicated electron density in the hollow cathode plasma in the 537.8 nm line.

Fig. 13 Comparison of the laser output power between experimental data and the simulation using Druyvesteyn function indicated electron density in the hollow cathode plasma in the 636.0 nm line.

に対してそれぞれ見積ることができる¹⁷⁾。

$$K_{\text{topt}} = (\sqrt{\eta} - 1) K_0 \quad (10)$$

K_{topt} : 出力を最大にする結合係数

赤色, 緑色, 青色の三原色は式(2)より明らかなように, K_0 と K_t が一定ならば, 相対励起強度 η が最大の時, つまり, 最適放電維持電圧で出力は最大となり, また, 出力は相対励起強度 η の変化に比例して変化する。この最大相対励起強度 η_{max} は, 上述のような自然放出光データを用いたシミュレーションにより求められるので, 式10を用いてそれぞれ各色のレーザー出力が最大になるような振幅透過率が求まる。ところが, 同軸型He-Cd II 白色光レーザーの高出力化を検討する場合には, 赤色が一番利得が低く, 出力が弱いので, 赤色の発振最適放電維持電圧(320 V)で, レーザー管を駆動することになるので, 青色と緑色についても赤色の最適放電維持電圧

Fig. 14 The relative excitation intensity η versus discharge voltage in the 441.6 nm, 537.8 nm and 636.0 nm lines.

での相対励起強度を用いて, ミラーの最適透過率を求める必要がある。(Fig.14参照)そして, 最終的に求められるミラーの最適透過率は, 赤色に対しては, およそ0.42%, 緑色に対しては, およそ2.22%, 青色に対してはおよそ0.61%である。このようなミラーを用いると, 実験に使用したレーザー管#2では, 赤色のレーザー出力は1.5倍, 緑色は1.0倍, 青色は1.4倍に

増加する。しかし、理想的な白色光レーザーを実現するためには、三原色レーザー出力がバランスよくするように、ミラーの透過率を、レーザー発振の条件から逸脱しない範囲で決定しなければならない。また、He-Cd IIレーザーのような金属蒸気レーザーにおいては、金属蒸気のブリュースタ窓への拡散、付着を防止するために拡散防止板を取り付けてあるが、内部損失に関係した K_0 の変化が経時的に起こりうるため、レーザー発振に最適な透過率のミラーを用いても、レーザーの出力の自然な変動が起こる。このような Cd 粒子の付着による K_0 の変動が起こった場合においても、レーザー出力の変動を小さく抑え、またレーザー発振条件から逸脱しないようにするには、より励起強度の大きいレーザー管であることが要求されるとともに、ブリュースタ窓への Cd 蒸気の付着防止の方法について、さらに検討することが必要である¹⁵⁾。

5. 同軸型 CW 白色光レーザー

同軸型 He-Cd II レーザーにおける白色光動作の最適条件は、放電維持電圧 320 V 前後であることが、実験的、理論的に明らかになった。そこで、筆者らは、同軸型レーザーでは、Fig. 1 に示すように、レーザー活性領域である陰極を陽極がすっぽり覆っているため、内部温度の制御が困難であるという理由により、従来パルス放電でしか得られなかった三原色同時発振（白色光発振）を、放電維持電圧を指標にして、レーザー管 #5 を用いて連続発振（CW）を試みた。Fig. 15 は He 圧力 4 Torr、放電電流 0.66 A でレーザー管を駆動したときの結果である。赤色発振が開始する 300 V から三色同時発振が開始し、青色の発振が停止する 385 V まで続く。そして、その発振最適放電維持電圧は、青色は 355 V、緑色は 370 V、赤色は 360 V となり、前述したレーザー発振特性とはほぼ一致する。ここで、Fig. 15 においてみられる三原色のレーザー出力の低下は、放電が不安定なためにあらわれたものと考えられる。そして、これらの最適放電維持電圧で得られた出力は、青色は

1.63 mW、緑色は 0.49 mW、赤色は 0.75 mW が得られた。また、放電維持電圧の変化によっ

Fig. 15 The dependences of the laser output power of cw oscillation on the discharge voltage in the He-CdII laser of 50-cm discharge-length in the 441.6 nm, 537.8 nm and 636.0 nm lines.

Fig. 16 The color hue dependences of the laser output light in the He-CdII laser on discharge voltage.

て三原色のレーザー出力が変化するため、レーザービームの色相もまた変化するので、この様子をCIE色度図に示すとFig.16のようになる。この図より、放電維持電圧335～380Vの範囲では白色光レーザーとなっていることがわかる。しかし、CW白色光レーザーの実現できたミラーの透過率は、青色、緑色、赤色に対して、それぞれ、1.6%、0.3%、1.4%であるため、三原色の出力のバランスという観点からは必ずしも理想的ではない¹⁶⁾。

5. まとめ

筆者らは、比較的構造が簡単で、長寿命化が容易な同軸型He-Cd II白色光レーザーの高出力化に関し、レーザーの動作条件と使用する共振器ミラーの条件の最適化を検討した。動作条件の最適化には、放電維持電圧を動作パラメータとして用い、三原色に対する最適動作条件を、実験とレーザー透過光出力のシミュレーションによって検討した。シミュレーションにおいて、レーザー各単位の寿命やホローカソードプラズマ中の電子密度分布を考慮した解析モデルを適用すると、レーザーの発振特性がシミュレーションと実験とが一致することより、実験的、理論的に同軸型He-Cd IIレーザーを白色光レーザーとして用いるための最適な放電維持電圧は320V前後であることが明らかになった。この結果、従来同軸型のレーザーでは実現が困難であった三原色同時発振が放電維持電圧を指標にすることにより、実現が容易になった。そして、さらに、放電維持電圧を指標にして、レーザー管を駆動することにより、陰極長50cmのレーザー管#5において、CW発振(放電電流0.66A)で三原色合計約3mWを得た。また、共振器ミラーの最適化に関しては、以上のようなシミュレーションにより、三原色のレーザー出力が最大になるようなミラーの透過率を見積ることができるとを示した。この結果、そのようなミラーを用いることにより、白色光出力として数10%程度の増加が期待できる。

謝辞

実験に御協力いただいた、高岸大明氏、神部貴行氏、阪田勝哉氏、赤野由紀嬢、久保英樹氏に感謝致します。

参考文献

- 1) S.C. Wang : SPIE **232** (1980) 42.
- 2) K. Fujii, T. Takahashi and Y. Asami : IEEE J. Quantum Electron. **QE-11** (1975) 111.
- 3) 川瀬 : 応用物理 **54** (1985) 1320.
- 4) M. Otaka, T. Oshima, M. Takeuchi, T. Okikawa and K. Fujii : IEEE J. Quantum Electronics. **QE-17** (1981) 414.
- 5) 木村, 佐々木, 大田 : 電子通信学会技術研究報告光・量子エレクトロニクス研究会 (1985) 105.
- 6) K. Fujii, T. Oshima, N. Nagashima, S. Miyazawa and T. Oikawa : IEEE J. Quantum Electronics. **QE-16** (1980) 590.
- 7) H. Koch : J. Phys. E : Sci. Instrum. **16** (1983) 122.
- 8) 川瀬 : 光学 **17** (1988) 386.
- 9) 佐々木, 木村, 大田, 他 : 昭和58年度電子通信学会半導体・材料部門全国大会 (1983) 347.
- 10) 海老名, 佐々木 : 電子通信学会技術研究報告 (1986) OQE 86-49.
- 11) I. Ebina, W. Sasaki and T. Ohta : Trans. IECE of Japan, **E69** (1986) 367.
- 12) W. Sasaki, T. Ohta and I. Ebina : Digest of Technical Papers, WV6, CLEO88 Anaheim, California (1988).
- 13) 丸尾, 大田, 佐々木, 高岸, 神部 : 昭和63年度電子情報通信学会春季全国大会予稿集 (1988) C-336.
- 14) 丸尾, 大田, 佐々木, 阪田, 赤野, 久保 : 昭和63年度電子情報通信学会秋季全国大会予稿集 C-183 (1988).
- 15) 丸尾, 大田, 佐々木, 赤野, 久保 : 昭和63年度電気関係学会関西支部連合大会予稿集 (1988) G11-22.
- 16) 丸尾, 大田, 佐々木 : 電子情報通信学会技術研究報告 (1989) OQE 88-136.
- 17) 霜田 : 「レーザー物理入門」 p.112 : 岩波書店 (1983).
- 18) W. Sasaki, H. Ueda, T. Ohta : IEEE J. Quantum Electronics. **QE-19** (1983) 1259.
- 19) V.S. Borodin : Sov. Phys. Tech. Phys. **11** (1966) 131.
- 20) 井谷, 佐々木, 大田 : 電子情報通信学会技術研究報告 (1988) OQE 88-53.