レーザーオリジナル

Ag, Cs 添加による高温型銅蒸気レーザー出力特性の改善

木村 博信*・原 一彦*・飯島 智浩*・名雪 琢弥*
藤原 関夫*・斉藤 弘**

(1996年1月29日 受理)

Improvement of the Lasing Performance of Copper Vapor Laser by Adding Ag and/or Cs Atoms

Hironobu KIMURA*, Kazuhiko HARA*, Tomohiro IJIMA*, Takuya NAYUKI*,
Etsuo FUJIWARA* and Hiroshi SAITOH**

(Received January 29, 1996)

The lasing performance of a copper vapor laser (CVL) with 60 mm diameter and 2000 mm discharge length has been successfully improved by adding Ag and/or Cs atoms. As typical results, 33 % increase of output power and wall-plug efficiency has been obtained. The upper laser level is enhanced by the collisional energy transfer from a response of Ag atoms to a resonance-excited state of Cu atoms. In addition, the effective relaxation of the lower laser level is appeared due to the collision of the second kind between the metastable Cu atoms and adding Cs atoms.

Key Words: CVL, Added Ag/Cs, Energy transfer, Laser level enhancement, Relaxation.

1. はじめに

銅蒸気をレーザー媒質とする高温型銅蒸気レーザー(高温型CVL)は、可視域で高出力・高効率・高繰り返し発振可能なパルスレーザーである。最近、この可視域における高出力の利点を生かし、CVLをレーザー同位体分離¹⁻²⁾や産業用精密加工、分光用光源として応用³⁾する試みがなさ

れている。CVLをこれら産業用に应用する場合、高出力化や長寿命化もさることながら、高効率化による運転費の低減をはかることが必要である。CVLの高出力化に関しては、放電長を伸長する方式⁴⁾や口径を増大させる方式⁵⁾で、単機500W以上の出力を得ている。長寿命化に関しては、パルス電源回路^{6,7)}に工夫をこらし、300時間以上の連続運転を可能にしている。一方、高効

* レーザー濃縮技術研究組合 (〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方白根2-76)

** 岩手大学工学部電気電子工学科 (〒020 盛岡市上田4丁目3番5号)

* Laser Atomic Separation Engineering Research Association of JAPAN (2-76 Aza Shirane, Oaza Shirakata, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki 319-11)

** Department of Electrical and Electronic Engineering, Iwate University (4-3-5 Ueda, Morioka, Iwate 020)

率化に関しては、CVLは可視レーザーの中では効率が高いことから、特に高効率化にしばった研究開発は行われていない。一方、メタルハライドレーザーの一種である塩化銅蒸気レーザーや臭化銅蒸気レーザー等の低温型銅蒸気レーザー(低温型CVL)に関しては、銅以外の金属蒸気を導入することにより、発振効率の向上ならびに出力向上の研究がなされている⁸⁻¹²⁾。たとえば、CuBrレーザーにAgBrやCsBrを添加することにより出力及び効率共に30~50%程度の向上を得た報告⁸⁻⁹⁾がある。一方、CuClレーザーにCs蒸気を導入すると発振パルス幅が倍増する実験事実¹⁰⁾やレーザー下準位励起寿命時間の短縮¹¹⁾が報告されている。さらに、最近CuClレーザーにAgとCsを同時に添加し、2.8倍の出力及び効率の向上を得ている報告¹¹⁾がある。

しかし、いままでこれら低温型CVLの成果を高温型CVLに適用した報告は見当たらない。

そこで、われわれは、高温型CVLにAg, Csの蒸気を単独及び複合させて添加し、上記のように、出力及び効率の向上が得られるかどうか初めて実験的に確かめた。

2. 原理

CVLは、強い共鳴捕獲現象を生じる共鳴準位をポンピングに利用し、レーザー動作の反転分布状態は、その共鳴準位と下の準安定準位間に生起させている。ポンピングの際にはこの準安定準位は基底状態との間が禁制遷移であるため、基底状態からの直接励起による原子の分布は非常に少ない。従って、瞬間的なパルス放電励起により容易に反転分布状態を生じ誘導放出が得られる。しかし、レーザー下準位が準安定準位であるため、下準位に分布する原子数が誘導放出により急増し、数10nsの短時間で反転分布は消滅してしまう。いわゆる自己終端型の動作をする。このように出力特性が制限される主要原因は、CVLのレーザー下準位が準安定状態、その励起寿命時間がレーザー上準位の励起寿命時間より極端に長いためである。従ってCVLの出力/効率向上のためには、(1)上準位を占める原子数を増加させる、(2)下準位を占める原子数を減少させ

Fig. 1 Partial energy diagram of Cu, Ag and Cs as well as relevant transitions(wavelength in nm).

る、(3)(1)および(2)を同時に行う、ことが必要である。

CVLにAg又はCs蒸気を添加した場合の効果を説明するためにFig.1にCu, Ag, Csの部分的なエネルギーダイアグラムを示す。まず、CVLにAgを添加した場合、Ag原子はレーザー管の放電により共鳴準位(29552cm⁻¹及び30473cm⁻¹)に励起される。これらの励起銀原子はCuの基底状態原子とエネルギー移乗を伴う第2種衝突を生じ、Cuのレーザー上準位(30535cm⁻¹及び30783cm⁻¹)の励起原子数を増大させる。この効果は、Fig.1に示すように、Agの共鳴準位のエネルギー値がCuのそれとさきわめて近く第2種衝突の断面積が共鳴的に増大することによる。これはAgの蒸気を適量(Ag蒸気圧はCu蒸気圧の1/10程度^{9,12)})CVLに導入することにより前述した(1)のレーザー上準位占有原子数を効果的に増加させることにつながり、結果的にレーザー性能(出力及び効率)が向上することになる。

次に、CVLにCs蒸気を添加した場合の効果について考える。Cu原子のレーザー下準位(準安定状態)は、基底状態からそれぞれ13245, 11203cm⁻¹上にあり、この準位に分布する原子の寿命時間は、およそ10μs¹¹⁾である。一方、Cs原子は基底状態より11178, 11732cm⁻¹上に共鳴準位が存在し寿命時間はそれぞれ~40, ~30nsである¹⁵⁾。したがって、Cuレーザー下準位とCs原子の共鳴準位間のエネルギー差が非常に小さく、基底状態を占め熱運動しているCs原子と準安定状態を占めている銅原子が衝突すると、Fig.1に示すようにCu原子からCs原子へエネルギー移乗を生じ、準安定状態の銅原子は基底状態に遷移し、

代わりにCs原子は共鳴準位に励起される。しかし、Cs原子のこのエネルギー準位に於ける平均寿命時間は30～40nsと非常に短いため、ただちに蛍光を放射して基底状態へ遷移する。以下この過程が繰り返され、レーザー下準位の平均寿命時間が短くなる。これはとりもなおさず前述(2)のレーザー下準位を占める原子数を減少させることに相当し、結果的にレーザー性能(出力及び効率)が向上する。

以上述べたAg, Cs添加の効果はそれぞれレーザー上準位及びレーザー下準位に独立に働くものと考えられ、同時に添加すれば、前述(3)のようにレーザー上準位粒子密度を増加させ、レーザー下準位粒子密度を減少させる理想的な効果が期待できる。

3. 実験装置及び方法

実験に使用した高温型CVLは、レーザー管内径60mm、放電長2000mmのもので、その構造をFig.2に示す。レーザー管には高純度アルミナ管(ADS-10、純度99.9% 東芝セラミックス社製)を用い、その外周にアルミナファイバ熱絶縁材⁴⁾を巻いた後石英管で保持する。さらにその外周を水冷された真空容器(1部を電気絶縁のためセラミックブレードで分離し、片側に陰極、対向部

に陽極を取り付けさらにレーザー取り出し用窓を設けたもの)中に封入したものである。アルミナ管、断熱材、石英管は、この真空容器の両端のフランジで2点支持固定されている。アルミナ管温度はレーザー運転中常時高温(～1500℃)で保持される。励起用放電電源は、通常のサイラトロンを用いた容量移行型パルス電源にサイラトロンの長寿命化のためフェライトコアを用いた磁気アシスト回路を有するもの⁶⁾であり、電気絶縁されたセラミックブレードの両端にこれを接続し陰極に負の高電圧高繰り返しパルス電圧(立ち上がり100ns、ピーク電圧～19kV)を印加する。陽極は通常アース電位で使用する。充電コンデンサの容量は8nF、ピーキングコンデンサの容量は4nFとし充電電圧19kV、励起パルス繰り返し数は5kHzとした。

次に、Ag及びCs原子の添加方法について述べる。Agの添加は、臭化銅蒸気レーザー等低温型CVLの実験³⁾では、CuBrにAgBrを10%混合した試料をレーザー管内に挿入している。この方法はCuBrとAgBrの蒸気圧がほぼ等しいため使用できるが、高温型CVLではこの方法は適用できない。Fig.3にAg, Cs, Cuの温度に対する蒸気圧の特性¹³⁾を示す。この図から明らかなように、Cu蒸気とAg蒸気の混合比を制御するためには、それぞれの金属の周囲温度を制御する必要

Fig. 2 Experimental CVL arrangement of improving the lasing performance by adding Ag and/or Cs atoms.

Fig. 3 Vapor pressure data for Ag, Cs and Cu.

がある。本実験では、Agの蒸気圧制御のためレーザー管内部の温度分布を利用して、Agの温度を制御している。すなわち、レーザー管端部においては、放射冷却によりレーザー管温度が低下することを利用し、Agをこの端部の最適温度の位置に挿入し、蒸気圧を制御する。尚、Agの温度はChinon IR-P3C放射温度計により非接触で測定した。

次に、Cs添加の方法は、塩化銅蒸気レーザー等では、レーザー管にT型の枝管を設けてCs蒸発器を取り付け、レーザー管内にCs蒸気を導入する方法¹²⁾を用いている。高温型CVLの場合レーザー管温度が～1500℃と高温で上記の様な枝管を設けることは技術的に困難であるため、Fig. 2に示すようにレーザー管のバッファガス(Ne + 0.5% H₂)導入路にヒーター付Cs蒸発器を設置し、バッファガスを5 l/hの流量で注入することによりレーザー管内にCs蒸気を導入した。Cs蒸気圧は蒸発器外側に巻いたヒーター（最大

温度160℃）で制御した。なお、Csは大気にさらすとすぐ酸化するため、アンプルに封入した状態で蒸発器に入れ十分真空排気しバッファガスに置換した後アンプルを割って実験に供するようにした。なお、Ag, Cs添加実験においては、レーザー管内バッファガス圧力は 3×10^3 Pa一定に保った。また、レーザー管はニードルバルブを通じて、常時排気されており、添加金属蒸気が、真空ポンプから大気中に排出されることを防止するため、レーザー管と真空ポンプ間にアルミナファイバを充てんしたトラップを設けた。また、CVL共振器は、誘電体多層膜コートの全反射平面ミラー（反射率99%以上）と片面無反射コートの平行平面基板（反射率4%；レーザー出力ミラー）で構成した。レーザー発振光パルス波形はバイプラナー光電管（浜松ホトニクス社製R1193U）とオシロスコープ（テクトロニクス社製2445A）で、レーザー出力は精度±5%以内のレーザーパワーメーター（サイエンテック社製モデル360801）で測定した。

4. 実験結果及び考察

4.1 Ag添加実験

Ag蒸気圧に対する出力依存性を調べるため、Agの温度を変化させてレーザー出力特性を測定した。Ag温度としては700℃、850℃、1100℃、1300℃の4点で実験した。実験結果をFig. 4に示す。この図から明らかなようにAg添加においては、Ag温度でかなりレーザー出力の変化が大きく、温度1100℃の時に最も大きな添加効果が得られた。添加Ag蒸気圧は、Fig. 3の各金属の蒸気圧特性からCuの～10%程度であり、低温型CVLで得られている混合比とほぼ同等であった。CVLの出力は64Wで、添加なしの場合の出力57Wに比較して12%（投入電力は添加条件によらず一定の7.2kWであるため効率も0.79%から0.89%に改善）の向上が観測された。この時のレーザー出力光パルス波形をFig. 5に示す。この実験データからレーザー出力波形は、パルス幅が若干広がる傾向が見られた。今回得られた高温型CVLの結果では、レーザー出力及び効率の向上がAg添加の場合12%であったが、従来の低

高温型 CVL^{9, 12)}では～50%の出力や効率の向上が得られている。また、レーザー光パルスに関しては、今回の高温型 CVLでは半値幅が微増したが、従来の低温型 CVLでは明らかに光パルス幅が伸長している。これらのことから、高温型 CVLの Ag 蒸気添加は、明らかに出力や効率などの性能向上につながるものの、低温型 CVLに比較するとその効果は1/5程度にとどまった。また、高温型 CVLに Ag 原子を添加する実験では、添加効果が Ag 温度(蒸気圧)に強く依存することがわかった。今回実験したパラメータの範囲では、Fig. 3, Fig. 4より Ag 蒸気圧が、～4Pa程度(高温型 CVLでは Cu 蒸気圧は～40Pa)で添加の効果が見られ、他の条件特に Ag 蒸気圧が Cu 蒸気圧の3倍に当たる Ag 温度1300℃ではレーザー出力が～1/10程度に激減している。この理由は、レーザー媒体となる Cu 原子数より添加の Ag 原子数が増大することにより、放電中の電子温度が低下し、Cu 原子を十分に励起出来なくなるためと考えられる。一方 Ag 添加量が1%以下の場合(Fig. 4で、Ag 温度850℃、及び700℃)もレーザー出力が Ag 添加前より多少小さくなっている。この理由は、Ag 蒸気圧が低いために Ag 原子の共鳴準位における共鳴捕獲現象が弱く、励起状態の寿命時間がレーザー上準位の Cu 原子の寿命時間(615ns)¹¹⁾より短くなり、エネルギー移乗の方向が逆転するためである。

このように高温型 CVLに Ag を添加して性能向上をはかる場合、Ag 蒸気圧 (Ag 蒸発源温度) の

Fig. 4 CVL output characteristics by adding Ag atoms at various Ag temperatures and pressure.

Fig. 5 Laser output temporal profiles with or without adding Ag vapor.

制御が重要であると思われる。

4.2 Cs 添加実験

Cs 蒸気圧のレーザー出力依存性を調べるため、Cs 蒸発器の温度を 30℃～160℃に変化させて高温型 CVL の発振出力の測定を行った。Fig. 6にレーザー出力とセシウム蒸発器の温度との関係を示す。この結果から、Cs 添加の場合レーザー管内部の Cs 密度換算で～ 10^{11} 個/cm³ (Cu の蒸気圧の～ $1/10^4$ 程度)まで単調に CVL 出力が向上することが示された。また Cs 添加によりセシウム蒸発器温度 160℃においてレーザー出力が 73W、効率が 1.0% となり最大 28% の出力及び効率の向上が見られた。またこの時のレーザー出力光パルス波形を Fig. 7 に示す。この実験データからレーザー出力波形は Cs 添加によりパルス幅が広がっていることが明らかとなった。今回得られた高温型 CVL への Cs 添加実験結果では、レーザー出力及び効率の向上が最大で 28% であったが、低温型 CVL では、出力及び効率が 1.3～7 倍^{8, 10)}となっている。一方、レーザー発振パルス幅は、高温型 CVL では 20% の伸長が得られたのに対し、低温型 CVL では、～4 倍に伸長している。これらの結果から、高温型 CVL の Cs 蒸気添加は明らかに出力/効率などの性能向上につながるものの低温型 CVL に比較するとその効果はかなり低下することがわかった。本実験において、よ

り大きなCs添加密度領域に関しては、Cs蒸発器の真空シール部分にバイトン製Oリングを使用したためその耐熱温度160℃以上に昇温出来なかったことを付記しておく。

4.3 Ag, Cs 同時添加実験

高温型CVLでAg, Csを同時に添加した場合の性能向上特性を測定するため、CVLレーザー管内温度1100℃の位置にAgを挿入し、レーザー発振出力が飽和した後、Cs蒸発器内のCsアンプルを割って加熱を開始し、蒸発器温度が160℃に達するまで測定を行った。これらの条件は、Ag, Csの添加蒸気圧がそれぞれの最適動作条件となる値に設定したものである。この実験時のレーザー出力チャートを図8に示す。この図から明らかに、まずAg添加の効果が明白に現れ、その後Cs蒸気圧の上昇とともにCVLの出力が向上した。Oリング耐熱限界のためCs蒸発器温度が160℃に達した時点で実験を中止したが、最終的にレーザー出力は76W発振効率は1.1%となり、添加なしに比較して33%の出力及び効率向上が観測された。この結果から、Ag, Csを同時に添加した場合それぞれの効果がほぼ加算されてあらわれることがわかった。一方、低温型CVL

Fig. 6 CVL output power by adding Cs atoms at various Cs temperatures.

Fig. 7 Laser output temporal profiles with or without adding Cs vapor.

における同様の実験¹¹⁾では、レーザー出力が同時添加の効果で2.8倍に上昇している。この実験結果からも高温型CVLの場合、Ag, Csの同時添加効果は観測されるもののその効果は、低温型CVLの1/10程度となっている。また高温型CVLでは、Ag添加出力に対してCs添加による出力及び効率向上は19%なのに対し、同様の低温型CVLに対する性能向上は2倍となっている。ここでも高温型CVLの添加効果は低温型のそれに比較して1/10程度になっている。またレーザー出力は、Ag, Csなどの蒸気の導入に対しては安定で、放電等の不安定現象は観測されなかった。

4.4 実験結果のまとめ

以上述べたように、高温型CVLにAg, Csの蒸気を添加し性能を向上する実験を行い、Ag添加で12%の出力及び効率の向上が得られ、Cs添加では28%の出力及び効率の向上が得られた。さらに、Ag及びCsを同時に添加した場合は33%の出力及び効率向上が得られた。これらの実験結果をTable Iにまとめた。

この結果を臭化銅蒸気レーザーや塩化銅蒸気レーザー等低温型CVLにおける同種の添加実験と比較すると、その効果はかなり減少していることがわかった。Ag及びCsの添加によるCVL性能向上の原理として、前述したように原子間における第2種衝突によるエネルギー移乗があ

Fig. 8 CVL output power by adding Ag and/or Cs atoms.

げられる。この衝突周波数が、高温型 CVL と低温型 CVL で大きく異なる実験条件の一つである。レーザー管の動作温度に関して衝突周波数がどのように変化するか以下に考察する。マクスウェル-ボルツマン分布を有する気体系の原子間衝突では、粒子間の衝突周波数 ν_c ¹⁴⁾は

$$\nu_c = \frac{4\sqrt{\pi}Pd^2}{\sqrt{mkT}} \propto \frac{P}{\sqrt{T}} \quad (1)$$

で示される。ここで、 d は原子直径、 m は質量、 k はボルツマン定数、 P は圧力、 T は絶対温度である。この式は、単一原子モデルの時に成立する式であり、実際は多体衝突問題でありこの式はど単純化できないが、高温型 CVL と低温型 CVL の第2種衝突頻度の傾向を評価するには十分と考えられる。高温型 CVL も低温型 CVL も添加金属原子の分圧には大きな差はなく、レーザー管動作温度 T だけが大きく異なっている。(1)式に代表的な低温型 CVL の動作温度 300℃ (絶対温度では 573K) 及び高温型 CVL の動作温度 1500℃ (絶対温度では 1773K) を代入し、高温型 CVL と低温型 CVL の衝突周波数の比を求めると、約 1/2 となる。したがって、高温型 CVL は低温型 CVL に比較して添加効果が小さくとなると考えられる。

さらに、今回実験に使用した高温型 CVL のレーザー管口径は、60mm と大口径であり、(引

用した低温型 CVL の口径は 12～26mm と小口径である) Kushner ら¹⁵⁾によれば、高温型レーザー管中心部のガス温度は、3000K を越えることも報告されている。したがって、上記試算よりさらに衝突周波数が低減すると考えられる。また、この中心部のガス温度の上昇により、放電アフターグロー中 Cu のレーザー下準位 (準安定準位) に熱的に励起された粒子が¹⁶⁾一定量存在しており、Cs 等の添加効果を弱める要因にもなっていると考えられる。さらに、Cs 原子の第一イオン化エネルギーは、3.89eV と小さいので、高温型 CVL では、実質的にエネルギー移乗現象に関与できる中性原子数が減少している。高温型 CVL に Ag, Cs を添加し、出力及び効率等の性能向上が実現されたが、その効果は、低温型 CVL で観測されたようなドラスティックな効果は期待できないことがわかった。

5. おわりに

口径 60mm、放電長 2000mm の高温型 CVL に、Ag 及び Cs を添加して、出力及び効率を向上させる試みを初めて行った。その結果、Ag 単独添加で 12%、Cs 単独添加で 28%、Ag と Cs を同時に添加することにより、33% の出力及び効率の向上が得られた。しかし、この効果は、先に報告されている低温型 CVL の実験結果よりかなり小さ

Table I Typical experimental results of lasing performance of CVL by adding Ag and/or Cs atoms.

Adding atoms	Average total power (Wall-pulg efficiency)		Output power/efficiency increase (%)	Experimental parameters
	Without adding atoms	With adding atoms		
Ag	57W (0.79%)	64W (0.89%)	12%	Charging voltage : 19kV Storage capacitance : 8nF
	57W (0.79%)	73W (1.0%)		Repetition rate : 5kHz Input electrical power : 7.2kW
Cs	57W (0.79%)	76W (1.1%)	33%	Buffer gas : Ne(99.5%)+H ₂ (0.5%) Pressure : 30mb
	57W (0.79%)	59W (0.82%)		Flow rate : 5 ℓ /h Operating temperature : 1500°C

かった。この理由として、(1)高温型 CVL の動作温度 (～1500℃) が低温型のもの (～300℃) に比較してかなり高いこと、(2)使用した高温型 CVL の口径が60mmと大口径であるため、放電によるレーザー中心部のガス温度が上昇し、これによりレーザー下準位が熱的に励起された状態であることや添加 Cs のイオン化が進んでいること、などが考えられる。

また、Ag 添加に関しては、最適添加濃度が Cu の10%程度であるため、レーザー管内に Ag と Cu の蒸気濃度比を一定に保つための制御がかなり難しいことがわかった。一方 Cs 蒸気添加に関しては、Cs が大気中で自然発火するため、アンプルに封入した状態で Cs 蒸発器に入れ真空排気しガス置換した後に外部よりアンプルを破壊して蒸気を発生する操作が必要となった。また、添加蒸気がレーザー管通過後真空ポンプより大気中に排出されることを防止するため、セラミックウールを充てんしたトラップをレーザー管と真空ポンプの間に設ける必要があった。

今回の実験で、高温型 CVL でも Ag, Cs 等の添加効果があることがわかったので、今後より便利な蒸気圧制御方法の開発や、添加金属が長期にわたり CVL に与える影響 (装置寿命等) を評価したいと考えている。

謝 辞

実験全般にわたって協力して戴いた、レー

ザー濃縮技術研究組合の森岡昇氏、佐藤康彦氏、森秀夫氏、天野治氏、小松幸男氏、川崎聡子氏に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) J. L. Emmett, W. F. Krupke and J.I.Davis: IEEE J. Quantum Electron. QE-20 (1984)591.
- 2) N. Morioka: *Proc. SPIE Laser Isotope Separation, Los Angeles California, 1993* (SPIE vol. 1859, Washington, 1993) P2.
- 3) M. Nikonchuk: *Proc. SPIE Gas and Metal Vapor Laser and Application, Los Angeles-California, 1991* (SPIE vol. 1412, Washington, 1991) P38.
- 4) H. Kimura, N. Aoki, C. Konagai, S. Shirayama and T. Miyazawa: J. Nucl. Sci. Tec. **31** (1994) 34.
- 5) 木村博信, 飯塚静夫, 小長井主税, 青木延忠, 小林徳康, 馬場洋介: レーザー学会第15回年次大会予稿集 (1995年1月).
- 6) H. Kimura, R. Otani, N. Aoki, C. Konagai, S. Shirayama and T. Miyazawa: Rev. Laser Eng. **23** (1995) 210.
- 7) 高橋知幸, 木村博信: 日本原子力学会誌 **32** (1990) 476.
- 8) S. Sakata, K. Oohori, M. Higuchi, K. Fujii, K. Oouchi, S. Ueguri, Y. Ueda, S. Takemori, T. Sato and H. Saitoh: IEEE J. Quantum Electron **30** (1994) 2166.
- 9) K. Oouchi, M. Suzuki and K. Fujii: IEEE J. Quan-

- tum Electron 27 (1991) 2473.
- 10) H. Saitoh and H. Taniguchi: Appl. Phys. Lett. 47 (1985) 440.
- 11) 齊藤弘, 大槻寿枝: レーザー研究 20 (1992) 777.
- 12) Y. Masumura, T. Ishikawa, H. Saitoh, M. Ishibashi and K. Fujii: Appl. Phys. Lett. 64 (1994) 3380.
- 13) 日本金属学会編: 金属データブック改訂 2 (丸善, 東京, 1984) P.82
- 14) 電気学会編: 放電ハンドブック改訂 5 (オーム社, 東京, 1984) p.5.
- 15) M. J. Kushner and B. E. Warner: J. Appl. Phys. 54 (1983) 2970.
- 16) Y. Iseki, I. Hayashi, E. Watanabe, E. Noda and S. Suzuki: Jpn. J. Appl. Phys. 33 (1994) L860.