

# 超高密度ホロー陰極内プラズマにおける光増幅

田中啓一郎,\* 池畑 隆,\*\* 田辺利夫,\*\* 真瀬 寛\*\*

(昭和60年9月4日受理)

## Light Amplification in Plasma Produced by Super-dense Hollow Cathode Discharge

Keiichirou TANAKA,\* Takashi IKEHATA,\*\* Toshio TANABE\*\* and Hiroshi MASE\*\*

*Abstract* — Light amplification in the plasma produced by a specially constructed hollow cathode discharge operating in the super-dense glow mode is described.

In the cavity of this cathode, ions are strongly excited by the trapped energetic electrons and then the intense spectral lines emitted from excited Ar ions are observed.

Light amplification in the plasma is measured by using a resonant cavity. Ratio of the multi-pass gain to the single-pass gain rises up to 20. The absorption coefficient measured by using a reference light source is about  $0.38\text{m}^{-1}$ . Laser oscillation, however, is not achieved.

### 1. まえがき

超高密度ホロー陰極グロー放電における陰極空洞内の強い発光をCWアルゴンイオンレーザに応用すべく基礎実験を試みている。

超高密度ホロー陰極は、陰極の両端に中間電極を設けるなどして陰極の開口部を小さくし、静電的に一次電子をよく捕捉するように工夫してある。この捕捉された電子ビームによって効率よく電離が行われ、大電流密度の放電が可能であり、陰極電流密度は従来のホロー陰極のそれに比較して $10^3$ 倍以上である<sup>(1)</sup>。

通常のアルゴンイオンレーザでは、電子の熱エネルギーによってイオンを励起してレーザ発振をさせるため、極めて大電流密度の放電を必要とする。従って、放電管

内壁の損傷が激しく、寿命も短いという問題がある<sup>(2)</sup>。

超高密度ホロー陰極放電では、陰極空洞中に捕捉された高エネルギーの一次電子ビームによる電離及び励起が有効であり、従来の細管放電と比較して小電流でも同程度のポンピングが可能であろうと考えられる。 $(\int_0^\infty \sigma^* v f(v) dv \ll \sigma^* v_b > n_b)$ 。また、陰極-陽極をひとつのセクターとして、これをいくつか縦続に結合させ、媒質長を容易に長くすることが可能である等の利点がある<sup>(1)</sup>。

本論では、レーザ用超高密度ホロー陰極放電管の構造とその特性、及び光増幅に関する実験結果について記述する。

\* 茨城大学大学院工学研究科電子工学専攻 (日立市中成沢町)

Graduate Student, Department of Electronic Engineering, Faculty of Engineering, Ibaraki University, Hitachi 316, Japan

\*\* 茨城大学工学部電子工学科 (日立市中成沢町)

Department of Electronic Engineering, Faculty of Engineering, Ibaraki University, Hitachi 316, Japan

2. 超高密度ホロー陰極レーザ放電管の構造

超高密度ホロー陰極は、一次電子ビームをよく捕捉する必要がある。従って、開口部直径 $d$ に比べて長さ $l$ が極めて大きい中空円筒状の陰極を用いている。陽極は光を取り出す関係上ホロー陽極にしてある。超高密度ホロー陰極(K)と陽極(A)はボロンナイトライドのリン

グによって絶縁され、さらにブリュースター窓及びガスの注入口、排気口が接続された構造になっている(Fig. 1)。また、陰極及び陽極は、冷却効果を上げるために肉厚の薄いステンレスパイプ(SUS 304, 0.18~1mm)を用いている。

放電管は陰極-陽極を一对として何対かを直列に結合し、レーザ媒質の長さを変えることができるようにしてある。

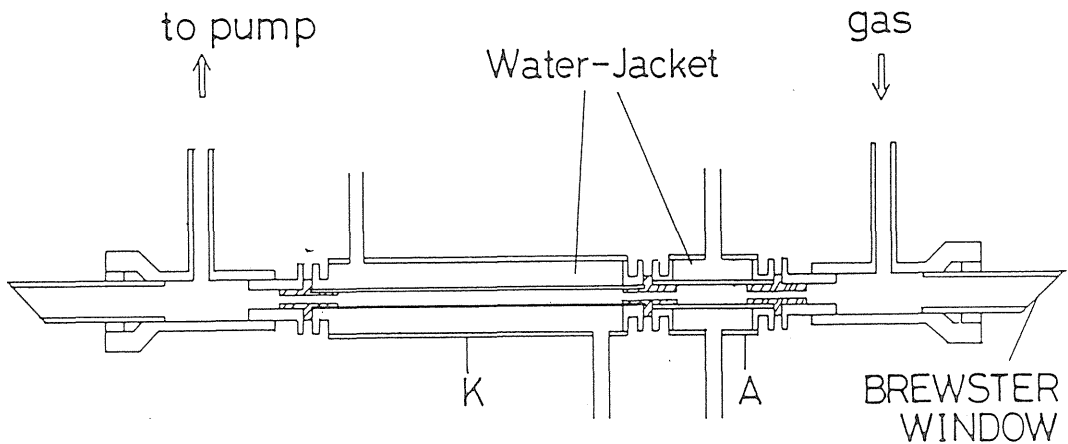


Fig. 1 Illustration of the discharge tube.

実験には、主として陰極の直径 $d$ 、長さ $l$ と放電特性及び分光特性の関係を調べるために、数種類の陰極を用いた。使用した放電管の寸法と実験条件等をTable.1にまとめてある。

Table 1 Types of tubes and experimental conditions.

Tube	Cathode	Anode	gas	* pressure (Torr)	current (A)
8d200	8mmIDx200mmI	8mmIDx50mmI	Ar	0.3--4.0	0.1--1.0
6d135	6mmIDx135mmI			0.7--4.0	0.2--1.0
4d125	4mmIDx125mmI			0.5--4.0	0.2--1.2
2.4d115	2.4mmIDx115mmI			0.7--4.0	0.2--1.0

\* pressure in gas reservoir

3. 実験結果とその考察

3.1 放電特性

まず放電管の放電特性の測定結果について述べる。アングオンガスを注入し、ガス圧をパラメータとして放電電流 $I$ と放電電圧 $V$ を測定し、超高密度ホロー陰極放電の

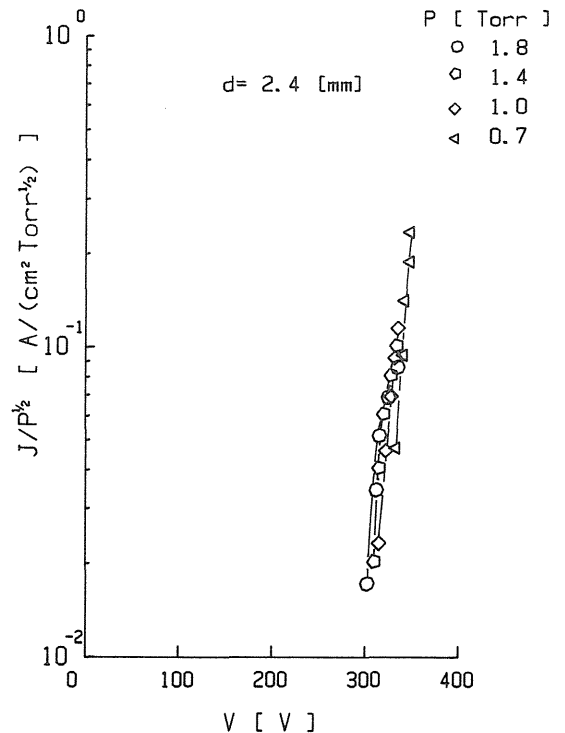


Fig. 2 Voltage-current characteristics expressed as a function of  $j/p^{1/2}$ .

相似則に従って, 放電電流を換算電流密度  $J/p^{1/2}$  で整理したものを Fig. 2 に示す。放電電圧  $V$  は,  $V=f(J/p^{1/2})$  の相似則にはほぼ従い, また実験の範囲で定電圧特性を示している。

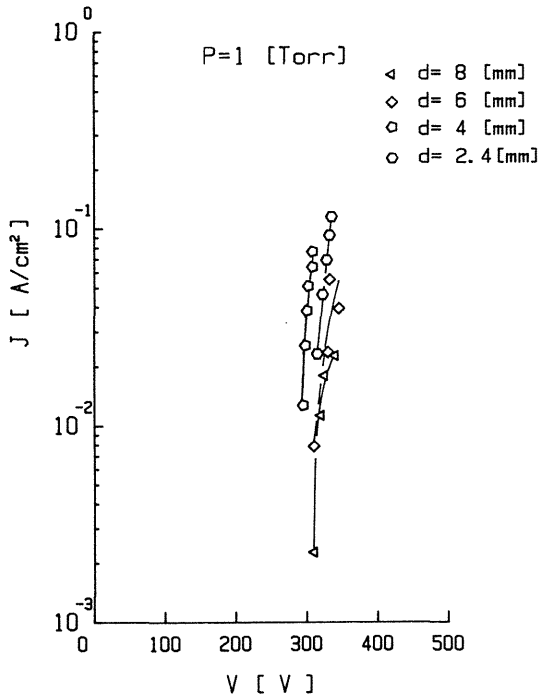


Fig. 3 Voltage-current characteristics of various discharge tubes.

圧力を 1 Torr に固定した場合の陰極直径  $d$  による放電特性の変化は, Fig. 3 に示すようになる。  $d = 4$  mm では他の 3 種数に比べて電圧が 10~30V 低くなっているが, 直径による大きな差はみられず, ほぼ同一の特性を示し, 従来のホロー陰極放電のように放電特性が  $dp$  積に強く依存するようなことはない。放電特性が  $dp$  積に依存しないという性質は, この超高密度ホロー陰極放電の特徴のひとつである。この実験で  $d = 2.4$  mm の細管陰極でもグローモードでの放電が可能であることがわかった。陰極直径を小さくできることは, 陰極空洞内のプラズマへの注入エネルギー密度の増大が容易になり, レーザ放電管として好都合である。

### 3.2 発光スペクトルの測定結果と考察

超高密度ホロー陰極内のプラズマからは, 紫外から赤外の広い領域にわたって放射光が観測されるが, ここでは主に, アルゴンイオンレーザの発振線 (可視光) をカバーする範囲 (4500Å~5200Å) の分光測定結果について述べている。

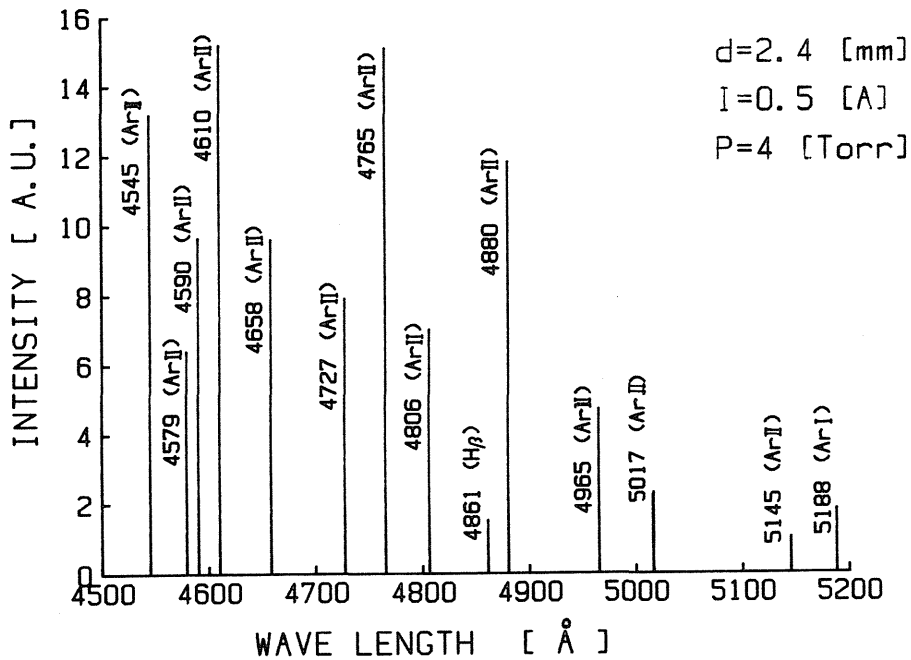


Fig. 4 Intense spectral lines emitted from the plasma in the cathode cavity.

モノクロメータ (ニコン P 250) を用いた観測結果のうち、4500Å ~ 5200Å の波長範囲における主なスペクトルを Fig. 4 に示す。アルゴンイオンレーザの可視領域 (青 ~ 緑) の発振線である 4545Å, 4579Å, 4658Å, 4727Å, 4765Å, 4880Å, 4965Å, 5078Å, および 5145Å は全て検出された。特徴的なのは、4765Å のスペクトル強度が非常に強いことである。

Table 2 Intensity ratios of the emitted AII lines in some different type discharge plasmas.

Intensity Ratio	A:SDHC discharge	B:Output of typical laser	C:Conventional capillary discharge (6)	A/B	A/C
I ( $\lambda=4765\text{\AA}$ ) I ( $\lambda=4880\text{\AA}$ )	1.28	0.36	0.83	3.56	1.54
I ( $\lambda=4765\text{\AA}$ ) I ( $\lambda=5145\text{\AA}$ )	16.70	0.36	1.00	46.39	16.70

Table 2 に、4765Å, 4880Å, 5145Å のスペクトル強度 (I 4765Å, I 4880Å, I 5145Å) の比較を示す。この表からわかるように、4765Å のスペクトル強度は、通常のアルゴンイオンレーザで大きな出力が得られている 4880Å や 5145Å のスペクトル強度よりはるかに大きい (Table 2)。4880Å や 5145Å の発振線は、電子衝突による階段的励起であると考えられる。これに対して 4765Å は、電子衝突による直接励起が主な励起機構であると考えられている<sup>(3)</sup>。従って、超高密度ホロー陰極放電におけるイオンの励起は、捕捉一次電子ビームによる直接励起が強く作用しているといえる。

また、Ar I, II のスペクトルの他に、Ar III のスペクトルの紫外発振線も観測されている。さらに、鉄 (Fe I 3441Å, 3737Å 他) 窒素 (N III 4641Å) 水素 (H $\alpha$  H $\beta$ ) 等の不純物のスペクトルも観測されている。3060Å ~ 3200Å の流長範囲にかなり強いスペクトル線が多数現れている。これらのスペクトル線の大半は、放電管を構成している材質 (Fe, Cr, Ni, Cu, Zn 等) あるいは、窒素、酸素、水といった不純物が考えられるが、充分な同定を終えていない。陰極に Ti を用いると陰極からの不純物ラインを大巾に減らすことが可能である。ただし、加工がやかっかいで放電管制作上の困難が伴う。

3.3 光増幅に関する実験結果と考察

発光スペクトルの測定で、Ar イオンレーザの発振線が確認できたので、これらの光の光増幅に関する 2 つの実験を行った。

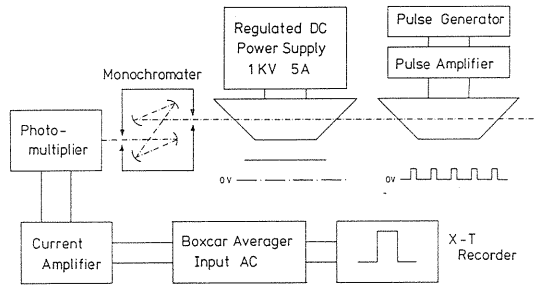


Fig. 5 Experimental setup for measuring the absorption coefficient of the medium.

第一の実験は、Fig. 5 のように同種の放電管を 2 つ用い、一方をパルス光源、他をレーザ媒質として利得を求めた<sup>(4)</sup>。その結果、単位長あたりの利得あるいは、負の吸収係数  $\alpha$  として、 $\alpha = 0.38 \text{ m}^{-1}$  を得た。これは、系の損失が 3% 以下であるような共振器を用いれば、媒質の長さが 10cm 程度でも充分発振が期待できる値である。

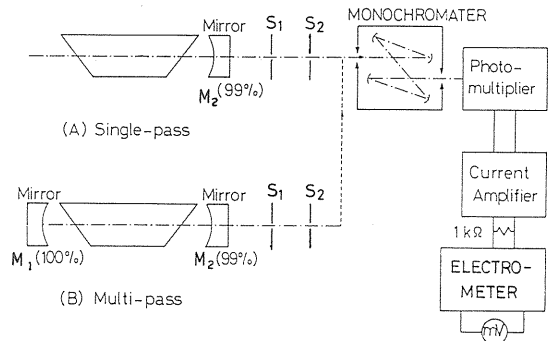


Fig. 6 Experimental setup for laser oscillation. Single-pass output and multi-pass output are measured.

もうひとつの実験は、Fig. 6 のように共振器 ( $M_1$ : 反射率  $R = 100\%$  (4510Å ~ 5600Å), 曲率半径  $\rho = 60\text{cm}$ ,  $M_2$ :  $R = 99\%$  (4880Å ~ 5145Å),  $\rho = 120\text{cm}$ ) を用いたレーザ発振の試みである。出力側ミラーと分光器の間に 1mm  $\phi$  のスリット  $S_1, S_2$  を 2 枚置き、光軸上の光のみを検出するようにしてある。反射鏡の調整や光軸合わせを入念に行ったが、まだ、発振には至っていない。ただし、反射鏡  $M_1$  をおとした場合の発振線の出力 (シングルパスゲイン) と  $M_1$  を用いた場合の光出力 (マ

ルチバスケイン) の比  $G$  は, 最高で約20倍になった。また, 共振器を調整しておき, その共振器中にHg標準ランプを置いた時の  $G$  値は, 高々 1.1 ~ 1.3 程度であった

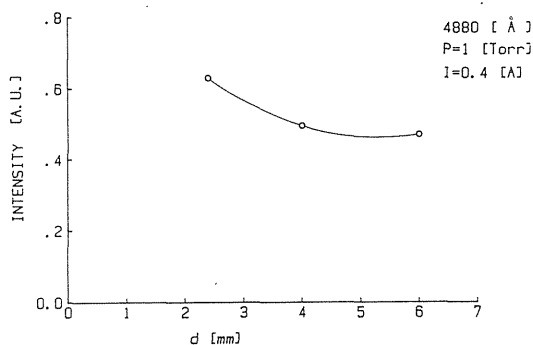


Fig. 7 Variation of line intensity with the cathode diameter.

ので, ミラーのフォーカシングの効果はほとんどないといえる。従って, 光増幅は明らかに行われているといえるであろう。放電管の径を小さくするとスペクトル強度は増大する (Fig. 7) が  $G$  値には殆ど影響を与えない。線形の考えでは, 利得が損失を上回ると発振する ( $G \rightarrow \infty$ ) はずであるが,  $G$  値が僅か20に抑えられてしまっている。これは, 非線形効果により, 光子数が充分に増大できないためと考えられる。さらに, ブリュースター窓反射鏡などの汚れ, 不純物の混入の影響も考えられよう。

#### 4. まとめ

以上, 超高密度ホロー陰極を用いた新方式のArイオン

レーザの可能性を調べるための基礎実験について記述した。

レーザ発振には至らなかったが, 2つの方法で新方式のレーザ管の光増幅が確認された。得られた利得は  $\alpha = 0.38 \text{ m}^{-1}$  である。発振に至らなかった理由としては, 光学系による損失, 不純物の影響, ポンピング不足が予想されており, 現在, これらを克服する対策を講じている。もし, 発振に成功すれば, 従来のArイオンレーザに比較して, 小型で高出力しかも格段に廉価なレーザ管が実現できよう。

#### 参 考 文 献

- (1) 新井, 田辺, 真瀬, 真鍋: 茨城大学工学部研究集報 28, (1980). 49.
- (2) M.W. Dowley: Appl. Opt. 21, 10, (1982) 1791.
- (3) W.R. Bennett. et, al, Appl. Phys. Lett. 4, 10, (1964) 180.
- (4) 豊田, 三浦: 昭和56年度茨城大学工学部電子工学科卒業論文.
- (5) 宅間: 量子エレクトロニクス入門 第5章 (培風館, 1972).
- (6) A.R. Striganor and N.S. Sventitskii: Tables of Spectral Lines of Neutral and Ionized Atoms, (plenum, N.Y., 1968).
- (7) 田中, 池畑, 田辺, 真瀬; 物理学会'84秋の分科会予稿 5 aII0 (1984).