

# 低電力マイクロ波で生成された小型無電極放電ランプの発光特性

志藤雅也\*、仲村竜弥\*\*、芹田卓也\*\*\*、神藤正士\*

(2003年12月15日 受理)

## Radiation Property from Small-scale Electrodeless Discharge Lamp driven by Low Microwave Power

Masaya SHIDO\*, Tatsuya NAKAMURA\*\*, Takuya SERITA\*\*\*, and Masashi KANDO\*

(Received December 15, 2003)

### Abstract

The electrodeless high intensity discharge lamps operated by microwave power has been expected as next generation lamps since they have excellent properties such as long-life, high efficiency and environmental friend. In the present work, a high-pressure microwave discharge in small-size quartz chamber was examined using the slot launchers equipped at the top of a coaxial waveguide where a low-power microwave launched by the magnetron with 2.45 GHz is applied for the lamp ignition. It is important to suppress the microwave leakage from the discharge chamber for the practical use of the present lamp. It was found in the present study that the discharge could be sustained by the microwave power of 10 ~ 30 W even at atmospheric pressure of argon and/or xenon gases, where the microwave leakage from the discharge chamber was much lower than the warning level in the case that the slot is opened at the most suitable position on the launcher of the coaxial waveguide. This feature can be explained in such a way that the microwave is effectively absorbed by the high-pressure gases in the discharge lamps to produce high-density plasmas, which contributes to suppress the microwave leakage from the lamp. A small amount of additives such as metal iodides was included in the discharge lamps to improve the lamp efficacy. As a consequence, the lamp efficiency of 38.8 lm/W was accomplished. The increase in lamp efficiency is originated from light emission in the visible region from Sc and Na atoms produced by vaporized additives in the discharge lamp. However, the lamp efficiency still remains smaller than that for the practical use because the lamp wall temperature is not so high to keep the vapor pressure from additives high enough to improve the lamp efficiency. The new design for the launcher and coaxial-rectangular waveguide converter with low power loss have been taken into account to improve the discharge of the lamp.

### 1. はじめに

高輝度放電ランプ(High Intensity Discharge Lamp)は HID ランプと略称され、現在まで照明用の高圧水銀ランプ、高圧ナトリウムランプ、メタルハライドランプ、特殊用途のキセノンランプや超高圧水銀ランプなどが実用化されている。HID ランプは、高光束、高効率、高輝度である上、寿命が15000時間以上と長いこと、省電力と省力化が可能であり、屋外照明や天井照明用の投光器や道路灯など、広い分野に多く使われるようになってきている。<sup>1)</sup>

開発当初に実用化において主流であった高圧水銀ランプは、青色を発する水銀の線スペクトルが強く発光するため、色度、効率、演色性等の性能が十分ではなかった。このため、メタルハライドと呼ばれる金属ハロゲン化合物をこのランプに添加することによりランプ効率と演色性を改善したメタルハライドランプや、水銀の蒸気圧を数10気圧に高めて線スペクトルに広がり

を持たせて演色性を改良した超高圧水銀ランプが開発された。良く知られているように、道路照明には演色性を犠牲にしてランプ効率を高め寿命を長くした低圧ナトリウムランプが使われてきた。しかし、これは橙色の特異な色度であるため、他の用途には適さずあまり普及していない。近年では、低電力で動作する小型のメタルハライドランプが開発されたが、これは上記の HID ランプの優れた特性を引き継いでおり、店舗照明用、自動車照明用、液晶プロジェクター用など、新たな用途が開けてきている。

既存の HID ランプを小型化して低電力で点灯しただけでは、放電ランプの発光のほとんど全てを担う陽光柱が短くなり、また、電極や放電管からの熱損失が増大する上に放電管内の不純物ガスの比率が増える等の障害が生じるため、ランプ効率の低下を免れることはできない。したがって、高効率の低電力動作のコンパクトな HID ランプを実現する為、放電管形状の最適化や放電管内部で使われる諸部品からの脱ガス技術などの改善が図られてきた。さらに、点灯器などのランプ周辺部品も電子化による小型化が実現され、HID ランプの小型化のみならず瞬時点灯、再点灯などの実用性・利便性も著しく改善されている。この結果、近年登場した小型メタルハライドランプは、これまで困難視されていた自動車照明用ランプとしての利用を可能とするに至っている。これらのランプの特性は ECE 法規<sup>2)</sup>で標準化されており、管電力35 W で光束3200 lm と、低電力にも関わらず約100 lm/W の発光効率と、5500 cd/cm<sup>2</sup>の高輝度を得ている。

\* 静岡大学大学院電子科学研究科、電子材料科学専攻 エネルギー変換講座  
Graduate School of Electronic Science and Technology, Shizuoka University,  
Johoku 3-5-1, Hamamatsu 432-8011, Japan

\*\* 静岡大学大学院理工学研究科、電気・電子工学専攻  
Graduate School of Science and Engineering, Shizuoka University,  
Johoku 3-5-1, Hamamatsu 432-8561, Japan

\*\*\* 株式会社製作所 研究所  
Research and Development Department, Koito Manufacturing Co.Ltd.,  
Shimizukitawaki 500, Shizuoka 424-8764, Japan

ここで、HID ランプの中でも進歩の著しいメタルハライドランプに関わる最近の技術開発状況に関して触れる。ランプに添加される化学物質の改良と放電管材料の改善が進展したことによりランプ性能の改良が進み、数十ワットから数千ワットまでの広いランプ出力範囲のメタルハライドランプが開発され、種々の照明用光源に利用されている。

従来の HID ランプでは放電管に一對の電極が取り付けられている。放電ランプでは、ランプ特性の改善が電極によって制限されることが多い。このため、最近では無電極 HID ランプ<sup>3)</sup>の開発が積極的に進められてきている。無電極 HID ランプは、無電極であることにより以下のような優れた特徴を引き出すことができる。

- (1) 電極と反応するため添加できなかった種々の化学物質を利用できるため、高演色性と高効率化が期待される。
- (2) 電極による熱損失が無くなるため、高効率が可能となる。
- (3) 放電管の構造が著しく単純化され、製造コストを軽減できる。
- (4) 電極金属の蒸発によるランプ壁の黒化が解消され、ランプの長寿命化と高効率化が可能となる。
- (5) 電極-ガラス間のシールの問題がなくなり、長寿命化が可能となる。

無電極 HID ランプではこれらの特徴を生かすことにより、従来の HID ランプに比較して更に高効率、長寿命で、かつ環境に配慮した理想的な光源を実現できる可能性がある。

電極のある HID ランプでは、熱電子放出などにより電極から供給された電子が直流または交流の電界により加速されて中性粒子と電離衝突を行って電離が進む。管壁への両極性拡散や再結合などの損失よりプラズマの生成の方が多い場合に放電が維持される。このように、電極は放電の発生と維持にとって欠くことはできない。無電極 HID ランプでは、電極の代わりに放電管の外部に設けたアンテナを介してマイクロ波や高周波の電力をランプ内の封入ガスに給電する。HID ランプのガス圧は、数 kPa 以上の高圧であるため、電子の衝突周波数は電磁波の周波数に比べて著しく高く、小型ランプでも電磁波のエネルギーは放電に効率よく吸収される。ランプ内部の電磁波電界強度を局所的に高める工夫を施してやれば、無電極でも高周波やマイクロ波により放電の維持が可能となる。

電磁波電力の放電管内への給電方法には、次の3つの方法が実用化されている。1)放電管の外部に取り付けられた電極に高周波を静電的に印加して電子を加速する静電結合方式。2)放電管にコイルを巻いて高周波電流を流し、放電管内に誘導電界を発生させて放電を維持する誘導結合方式。3)アンテナにより放電管内に電磁波を注入してプラズマを発生させる電磁波結合方式。1)静電結合方式と2)誘導結合方式に関しては、既に無電極蛍光ランプとして商品化されているがいずれも輝度が低く、今後高輝度化に向けた研究開発が必要となる。

前述のように HID ランプは一般に放電管内のガス圧が高いため、放電の開始や維持のために外部磁場の効果を利用することはできない。このため、3)の電磁波結合方式は、全て無磁場で行わなければならない。これには後述のようにスロットアンテナを用いた表面波励起プラズマが有効であるが、これ以外にも、空洞共振器や放物面鏡を利用して高周波電界を狭い空間に局所的に集めて、低電力の高周波電力でも強い電界を発生させる放電方法が使われる。しかし、いずれの方法も、

(1) ランプからの電磁波リークの防止と放射光の取り出しを両立することが難しい

(2) 点灯装置が複雑化し高価となる。

などの未解決の問題があり、低電力の HID ランプへの実用化はまだ実現していない。

表面波励起プラズマ<sup>4)</sup>は、0.1 Pa 台の低気圧から大気圧以上の高気圧まで広い封入ガス圧力に対して高周波からマイクロ波にわたる広い周波数の電磁波が利用でき、更に、0.5 mm から15 cm までの広い範囲の管径の放電管に対して無磁場で高密度のプラズマを生成できるため、無電極 HID ランプへの応用に最も適していると考えられる。表面波プラズマの研究<sup>5)</sup>はこれまで Moisan 等により行われてきたが、主に長尺の細い放電管内の円筒状表面波プラズマの研究に限られている。また、放電管とプラズマ表面の境界を電磁波がプラズマを生成しながら伝搬するため、放射と同時に電磁波が放射されるという問題がある。また、長い放電管では発光面が広くなり輝度が低くなる<sup>6)</sup>ので、長尺の円筒状表面波プラズマは無電極 HID ランプに応用することは困難であった。

本研究は、これらの欠点を解消するために小型の高気圧放電管に表面波励起プラズマの生成機構を応用することにより無電極 HID ランプを開発するための基礎実験である。この結果、放電点灯用のランチャーに工夫を加えて低電力のマイクロ波により小型放電ランプを点灯することが可能となった。本論文では、励起子(ランチャー)と放電形態の関係およびランプからの発光特性に関して得られた成果<sup>7)8)</sup>を報告する。

## 2. 実験装置

本研究では、マグネトロンからの 2.45 GHz マイクロ波を用いて、小型で高圧力の放電管を点灯する方法の確立を目的とし、図 1 に示す実験装置を組み立てて実験を行った。マグネトロンで発振されたマイクロ波は、矩形導波管内を TE01 モードで伝搬し、同軸導波管-矩形導波管変換器で TEM モードに変換されて先端部に放電管を装備した同軸導波管に給電される。スリースタブチューナーと矩形導波管終端部に置かれた可動短絡板は、負荷への給電を最大にするための整合用素子である。マグネトロンの出力は最低でも 200 W 程度であり、本研究が対象とする 20 W 級の低電力マイクロ波に比して過大であるために、マイクロ波回路には 15 dB の減衰器が挿入されている。同軸導波管の先端部に励起子を設置し、図のように放電管を取り付けて放電実験を行った。なお、同軸導波管で生じるジュール損失の大きさは、その外部導体内径と内部導体外径の比に依存するが、本実験ではこの損失が最小となる比 3:1 に設定している。

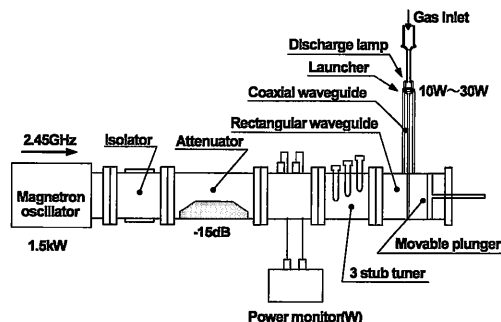


Fig. 1 Schematic diagram of microwave circuit

図2に励起子の拡大図を示す。励起子は同軸導波管の先端部に設けた幅1mmの円環状スロットで構成されている。図3に励起子の動作原理を示す。矩形導波管のH面から同軸導波管先端部までの長さは、同軸導波管の先端部のスロットにマイクロ波の節が合致する長さに設計されている。これによりスロットを横切る方向に強い高周波電流が流れて、その上部に設置された放電管内部に強いマイクロ波電界が誘起されるため、容易に放電を開始することができる。励起子に発生するマイクロ波電界はスロットの半径方向の位置に依存し、放電特性にも大きな影響を与えると考えられる。この影響を調べるために、本研究では、図4に示すように、スロットに切られている位置の相違による3種類の励起子を用意した。いずれもスロット幅は1mmであるが、ここでは、スロットが同軸導波管の外側に近いものから順にスロットA、スロットB、スロットCと呼ぶことに

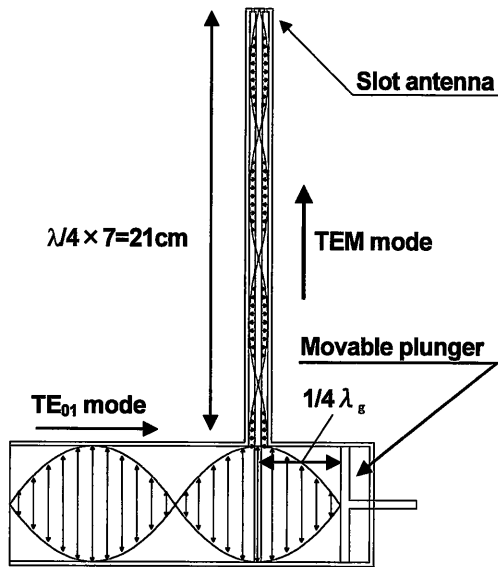


Fig. 2 Launcher for discharge lamp ignition

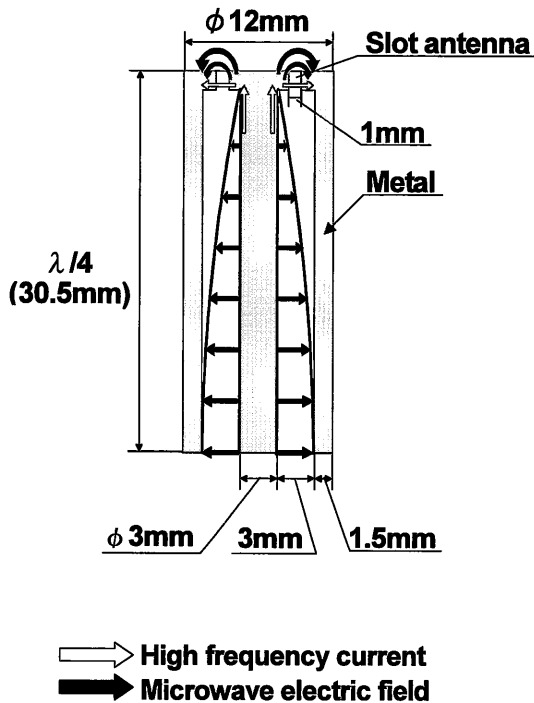


Fig. 3 Details of the launcher

する。

スロット内でのマイクロ波の電界が強い場合には、大気放電の可能性がある。これを抑えるとともに同軸導波管の内部導体の位置を中心に維持するために、それぞれのスロットに厚さ1.5mmの石英スペーサを用意した。この様子を図5に示す。なお、10Wのマイクロ波電力ではスロット間の大気放電は生じないことが判明したため、後半の実験ではスペーサ無しで実験を行った。

本研究では、希ガスの基礎的な放電状態を調べる目的で、放電管内に希ガスを流しながら放電を行うガスフロータイプ放電管と、実際の無電極放電ランプ同様に希ガスと金属沃化物を封じ切った放電管の2種類の放電管を用いている。図6は、ガスフロータイプ放電管の形状である。放電管は無水石英ガラスで作製され、放電部の高さおよび内径は7mmである。放電管内に高圧でアルゴンまたはキセノンを流し、励起子上で放電を発生させる。表1にガスフロータイプ放電管の仕様を示す。図7

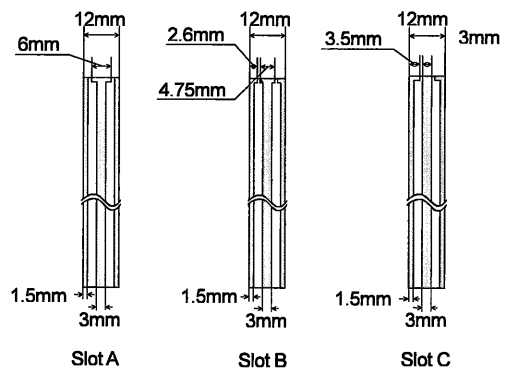


Fig. 4 Cross section of launcher A, B and C

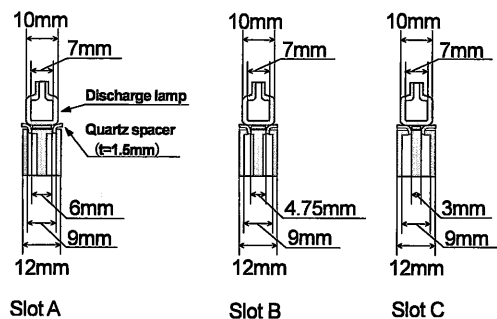


Fig. 5 Cross section of discharge lamp, quartz spacer and launcher

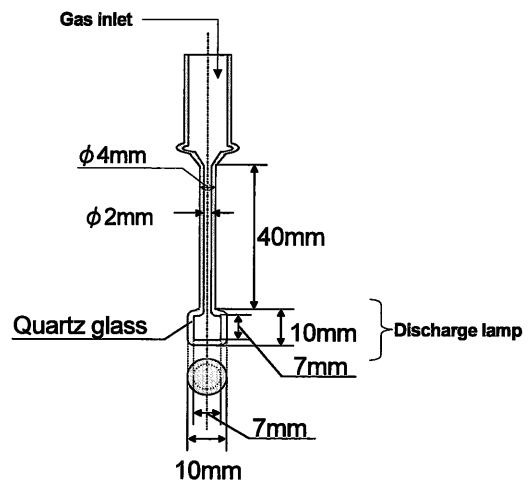


Fig. 6 Schematic diagram of "gas-flow type" discharge lamp

は、封じ切りタイプ放電管の形状である。放電部の高さ違いにより、タイプAとタイプBの2種類の放電管を作製した。表2に封じ切りタイプの放電管の仕様を示す。この表のガス圧は封じ切り時に印加した放電開始前の圧力である。光色の改善と発光強度を高めるために放電管に添加する金属化合物は、一般照明用HIDランプの中でも特に高効率に要求される用途に多く使われている、活化ナトリウムと活化スカンジウムの混合物を使用した。

これらの放電管は市販の放電管とはほぼ同じ材料を使って、ほぼ同じ製造工程で製作されている。放電管材料としては、SiO<sub>2</sub>の含有量が99.99%以上でOH含有量が100 ppm以下の無水石英ガラスを使用した。さらに、OH含有量を数 ppm以下に減らすため、1050℃で1時間の真空熱処理を行っている。石英ガラス放電管をアルゴンのグローブボックス内で高純度アルゴンを使って洗浄した後、キセノンまたはアルゴンと金属化合物を封入し、その後、パーナーで放電管の上部ガラスを封じ切る。一般に放電ランプは封入物質が酸素や水分などの不純物の影響を受けて変質しやすく、酸素や水分の影響で発光効率の低下や管壁の黒化と失透を起しやすいが、この封じきりタイプの放電管においては、これらの不純物はほぼ市販の放電ランプ以下に抑えられている。

無電極放電ランプの評価においては「消費電力1Wあたりのランプから光束」として定義されるランプ効率(lm/W)と色度が重要であるため、全光束と分光分布の測定が求められる。しかし、全光束F(lm)の測定には積分球(光束球とも呼ばれる)が利用されるが、実験設備が煩雑となり容易ではない。本実験では、

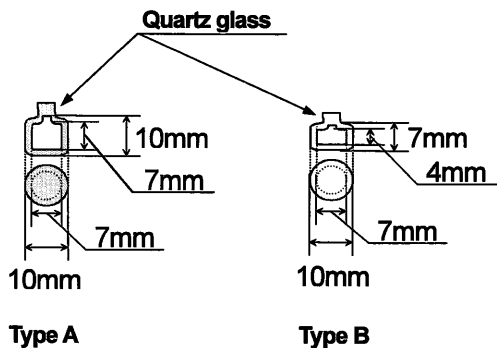


Fig. 7 Schematic diagram of “gas-flow type” discharge lamp

Table 1 Specification of “gas-flow type” discharge lamp

|                   |                       |
|-------------------|-----------------------|
| Inner diameter    | 7 mm                  |
| Height of chamber | 7 mm                  |
| Volume            | 270 mm <sup>3</sup>   |
| Gas               | Ar                    |
| Gas pressure      | 55Torr~760Torr        |
| Wall load at 20W  | 8.7 W/cm <sup>2</sup> |

Table 2 Specification of “sealed type” discharge lamp

|                   | Type A-1              | Type A-2              | Type B-1               | Type B-2               |
|-------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
| Inner diameter    | 7 mm                  | 7 mm                  | 7 mm                   | 7 mm                   |
| Height of chamber | 10 mm                 | 10 mm                 | 7 mm                   | 7 mm                   |
| Volume            | 270 mm <sup>3</sup>   | 270 mm <sup>3</sup>   | 154 mm <sup>3</sup>    | 154 mm <sup>3</sup>    |
| Wall load at 20W  | 8.7 W/cm <sup>2</sup> | 8.7 W/cm <sup>2</sup> | 12.0 W/cm <sup>2</sup> | 12.0 W/cm <sup>2</sup> |
| Ar Gas            | 1 Torr                | 300 Torr              | 1 Torr                 | 300 Torr               |
| NaI               | 2.5 mg                | 0.45 mg               | 2.5 mg                 | 0.45 mg                |
| ScI <sub>3</sub>  | 2.5 mg                | 0.45 mg               | 2.5 mg                 | 0.45 mg                |

照度計を用いた簡易的な測定法を用いて、Fの概算値を算出することにした。図8に照度の測定方法を示す。光源の直径の10倍以上離れた位置d(m)では、ここで用いた小型ランプは均等点光源と近似できる。このため、放電から50 cmの位置に照度計を設置して照度E(lx)を測定し、式(1)および(2)より全光束Fと輝度L(cd/m<sup>2</sup>)を算出した。

$$F = 4\pi d^2 E \quad (1)$$

$$L = Ed^2 / A \quad (2)$$

ここで、A(m<sup>2</sup>)は放電管の断面積である。

放電管からの発光スペクトルの測定は分光器(Ocean Optics Inc. S2000)を用いて行った。この分光器は350 nmから1000 nmの範囲において、0.27 nmの波長分解能を持つ。なお、分光器の校正は、発光スペクトル分布が既知の500 W標準白熱電球を使用して行った。

マイクロ波電力は、図1に示したパワーモニターにより入射電力と反射電力とに分離して測定し、両者の差が20 Wになるようにマイクロ波発振器出力を調整した。本実験における反射電力は、入射電力のおよそ2%であった。

無電極放電ランプをマイクロ波電力で点灯する場合、マイクロ波のリークが問題となる。このため、図9に示す方法でマイクロ波リークの測定を行った。放電管から6 cm離れた位置でリークディテクタ(マイクロ電子社製 LD10M)の測定子の向きを変化させて、最大の測定値を放電管からのマイクロ波リーク量として記録した。

### 3. 実験結果及び考察

#### 3.1 ガスフロータイプ放電管の特性

アルゴンガスを流したガスフロータイプ放電管において、マイクロ波入射電力を10 Wから30 Wまで変化させて放電の様子を調べた。図10に入射電力10 Wにおける放電の観察結果を示す。スロット位置が外側にある(スロットA)ほど放電は起こりやすく、スロットAとスロットBにおいては、55 Torrから760 Torrの圧力範囲でプラズマが励起されることが分かった。放電モードは低気圧ではグロー状であり、放電は放電管取り付け管のある最上部にまで広がっているが、圧力がおよそ200 Torr以上になると放電はフィラメント状に変化し、かつ放電は放電管内に留まるようになったが、ほぼ大気圧においても、安定した

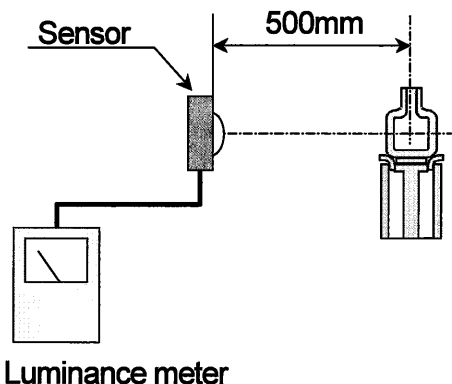


Fig. 8 Schematic diagram of illumination measurement

放電が得られることが判った。発光色は、低気圧ではアルゴン原子からの発光である赤色(696.5 nm, 706.7 nm)であったが、高気圧になるにつれて青色(415.9 nm, 419.8 nm, 420.0 nm)に変化した。この変化は、プラズマ内の電子温度の変化を反映していると思われる。

図11に各々のスロットにおいて、封入圧力を変えた場合のマイクロ波リーク電力を示す。いずれも、測定子を管軸方向と方位角方向に移動させながら、それが指示する最大値を記録した。人体に対する警告値は $2\text{mW}/\text{cm}^2 \sim 5\text{mW}/\text{cm}^2$ の範囲であり、 $5\text{mW}/\text{cm}^2$ 以上が危険値である。スロットAの場合、低気圧で危険値を上回っている場合があるが、圧力の増加とともにリーク電力は減少した。圧力の増加に伴ってリーク電力が減少するのは、生成されるプラズマの密度が遮断密度以上であることによるものと考えられる。すなわち、高気圧マイクロ波放電では、電子の中性原子との衝突頻度が高く高密度プラズマでも表皮厚が増すので、マイクロ波がプラズマ内部に侵入できるために高密度プラズマが生成されやすくなっているものと考えられる。

### 3.2 封じ切りタイプ放電管の特性

放電管形状、封入ガス圧、封入物の異なるタイプA-1、A-

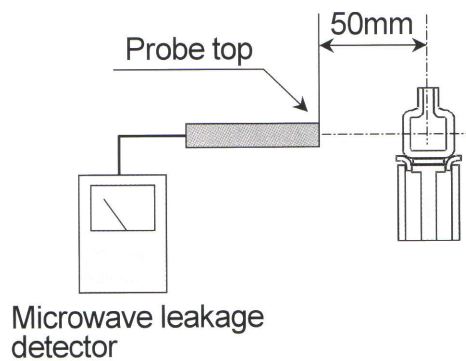
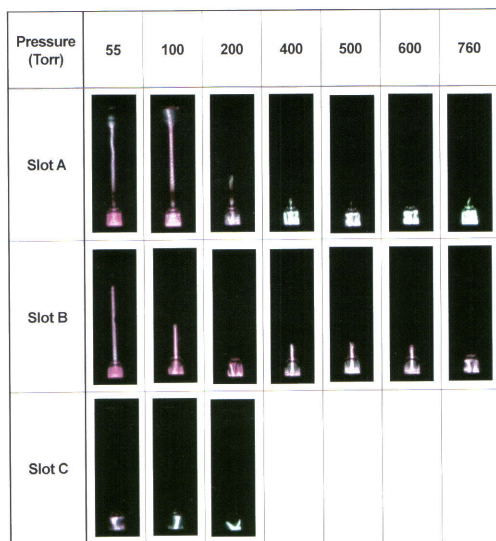


Fig. 9 Schematic diagram for microwave leakage measurement



Incident power: 20 W, Reflected power: 0 W, Shutter speed: 1/30, Iris: F9.5

Fig.10 Discharge modes using slot A, B and C as a function of Argon pressure

2、B-1、B-2の4種類の放電管を用いて、マイクロ波入射電力を20W一定にして点灯実験を行った。表2はそれらの仕様である。いずれの点灯実験においても、ガスフロアタイプの放電管の点灯実験で一番安定な放電が得られたスロットAを使用した。実験結果の代表的な結果を表3に示す。また、表3の内、A-1とB-2における発光の様子を図12に示す。いずれの放電管においても石英スペーサのある場合と無い場合とを比較すると、スペーサが無い方がより明るい発光が得られた。これはスペーサが無い方が放電管とランチャーとの結合が良いためと考えられる。これら実験で発光効率と輝度が最も高かったのはタイプB-2放電管の $38.8\text{lm}/\text{W}$ および $220.5\text{cd}/\text{cm}^2$ である。無電極HIDランプの発光効率と輝度の目標値は自動車照明用小型メタルハライドランプの実力値である $100\text{lm}/\text{W}$ 、 $5500\text{cd}/\text{cm}^2$ であるが、今回の実験結果はこの目標値に対し、発光効率で約1/3、輝度で約1/30に留まっており実用化レベルには到達して

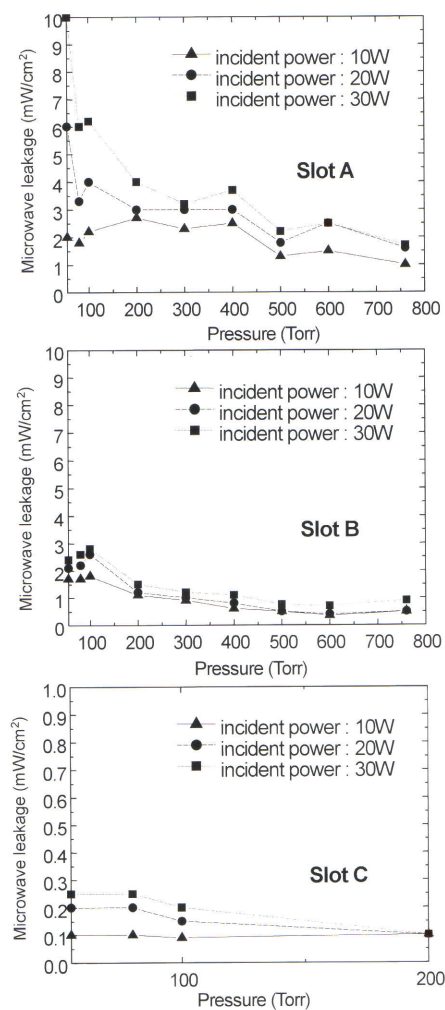


Fig.11 Microwave leakage as a function of Argon pressure for the slot A, B and C

Table 3 Experimental result of “sealed type” discharge lamp

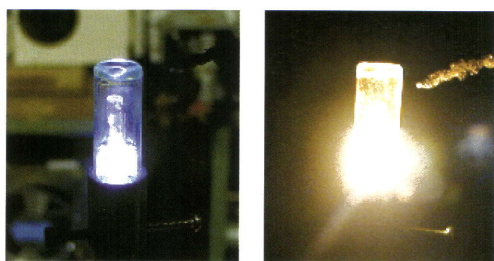
| Type                             | A-1                     | A-1                     | B-1                     | B-2                      |
|----------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Spacer                           | With spacer             | Without spacer          | Without spacer          | Without spacer           |
| Illumination                     | 0.21 lx                 | 13.2 lx                 | 61 lx                   | 247 lx                   |
| Total luminous flux (Calculated) | 0.7 lm                  | 41.5 lm                 | 192 lm                  | 776 lm                   |
| Luminous efficacy (Calculated)   | 0.04 lm/W               | 2.08 lm/W               | 9.61 lm/W               | 38.8 lm/W                |
| Brightness (Calculated)          | 0.10 cd/cm <sup>2</sup> | 6.73 cd/cm <sup>2</sup> | 54.5 cd/cm <sup>2</sup> | 220.5 cd/cm <sup>2</sup> |

いない。

図13に、本ランプの発光スペクトル分布を示す。Na原子からのスペクトルとSc原子からの多数のスペクトルが見られるが、一般のHIDランプで見られるようなNaのスペクトルの自己吸収やScの幅の広いスペクトルは観測されていない。図14は熱電対により測定した放電管上部の管壁温度の点灯開始後の時間変化であるが、700℃程度に留まっていることが分かる。表4は放電管の管壁温度と管内のガス圧と関係を示す。この表から添加物が発光して発光効率が改善されるようになるには、1000℃程度の管壁温度が必要であることがわかる。したがって、発光効率が上がらない理由の一つとして、管壁温度の不足が考えられる。

#### 4. 結論

我々は小型で高輝度の無電極マイクロ波放電ランプの実用化を目指す研究を行っている。その後の研究において表面波励起プラズマのプラズマ生成法を応用することにより、数10Wの低電力のマイクロ波で大気圧の高気圧放電ランプの点灯が可能であることが明らかにされた。また、マイクロ波放電で常に問題となる放電管からのマイクロ波の漏洩は、スロットの位置を最適化することで十分に抑制できることが確かめられた。これより、このプラズマ励起方法は無電極放電ランプへの応用に最適



放電管：A-1

放電管：B-2

Fig.12 Observation of discharge for “sealed type” discharge lamp

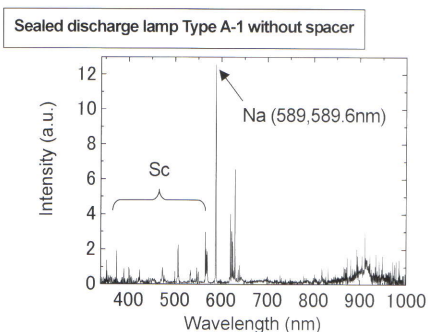
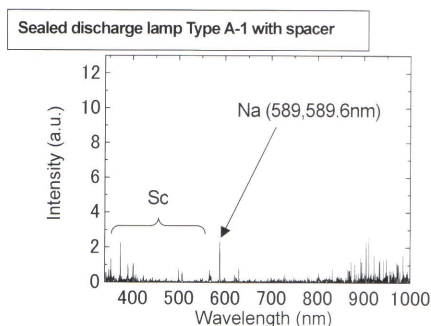


Fig.13 Spectrum distribution of the light emission from “sealed type” discharge lamp

であると考えられる。

上記の結果を踏まえて、本方式のランプの実用化を念頭にして、可視領域の発光強度を高めるために微量の金属沃化物を封入して封じ切りをした無電極放電ランプで点灯実験をおこなった。その結果、点灯は可能でも発光効率が最高で38.8lm/Wに留まることが明らかになった。これは、放電管の管壁温度を十分に高められなかったために添加物の蒸気圧を十分に高めることができず、発光効率が実用化レベルに到達できないことが明らかになった。

この問題への対策として、断熱性や保温性を考慮したランチャーや放電管の設計の見直しを行うことによりランプの管壁温度の向上を図ると共に、マイクロ波損失の少ない新型の同軸一矩形導波管変換部の製作を予定している。また、これに関連して、第3章で述べたように、ランチャーの長さおよびランプのランチャーへの取り付け方も放電モードに敏感に影響していることが判っており、これらに関して最適な条件を探すことによりランプの発光効率の向上を図る。また、スペクトル分布や

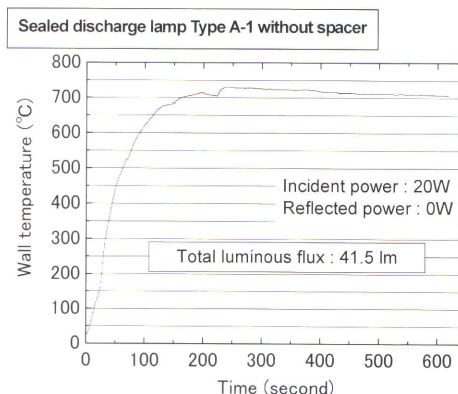
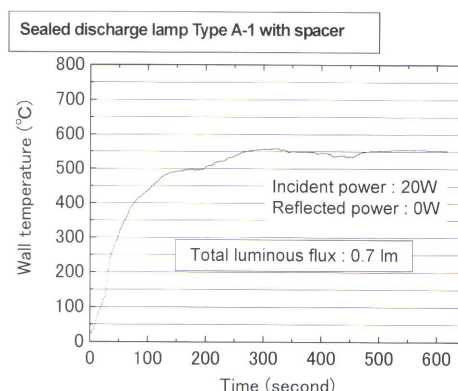


Fig.14 Wall temperature at the top of “sealed type” discharge lamp

Table 3 Pressure of “sealed type” discharge lamp theoretically calculated

|                    |                  | Type A-1 | Type A-2 |
|--------------------|------------------|----------|----------|
| Normal Temperature | NaI              | 0        | 0        |
|                    | ScI <sub>3</sub> | 0        | 0        |
|                    | Ar               | 1        | 300      |
|                    | Total            | 1        | 300      |
| 700℃               | NaI              | 1        | 1        |
|                    | ScI <sub>3</sub> | 3        | 3        |
|                    | Ar               | 3        | 973      |
|                    | Total            | 7        | 977      |
| 1000℃              | NaI              | 44       | 44       |
|                    | ScI <sub>3</sub> | 544      | 544      |
|                    | Ar               | 4        | 1273     |
|                    | Total            | 1773     | 1861     |

光束の測定精度の改善、電子温度やプラズマ密度、放射光のスペクトル分布などの測定を行ってプラズマの状態を把握し、ランプ効率の向上に役立てる予定である。

#### 参考文献

- 1) C.Meyer and H.Nienhuis: "Discharge Lamps", Philips Technical Library, Kluwer Technische Boeken B.V., Deventer-Antwerpen (1988)
- 2) ECE Regulation No. 99, "Uniform Provisions Concerning the Approval of Gas-Discharge Light Sources for Use in Approved Gas-Discharge Lamp Units of Power-Driven Vehicles" (1995).
- 3) (社)照明学会編: 無電極放電システムの研究調査報告書 (2002).
- 4) C.M.Ferreira and M.Moisan: "Microwave Discharges Fundamentals and Applications", NATO ASI Series, Plenum Press, New York and London, pp.427-444, (1993).
- 5) 神藤正士: 小特集「表面波プラズマの生成とその応用」、プラズマ・核融合学会誌、Vol.72、No.7(1996)、pp.621-662.
- 6) 神藤正士、田中良和、山本鉄二、御園勝秀: "表面波プラズマの基礎特性と光源への応用"、第13回光源物性とその応用研究会、研究会資料 pp.13-18.(1999).
- 7) T.Nakamura, M.Shido, A.Etoh, M.Kando and H.Matsuo: "Application of microwave surface wave discharge to the electrodeless discharge lamps", Proc. of 16th ESCAMPIG/5th ICRP, (July 14-18, 2002, Grenoble France) Vol.1, pp.371-372.
- 8) M.Shido, T.Nakamura, T.Serita, H.Matsuo and M.Kando: "High-pressure Low-power Microwave Discharge using Annular Slot Antenna at the top of the Coaxial Tube", Proc. of 26th ICPIG, (July 15-20, 2003, Greifswald, Germany) Vol.2, pp.97-98.