

研究調査報告書

# 無電極放電システムの研究調査

2002年5月

社団法人 照 明 学 会

無電極放電システム研究調査委員会

# 無電極放電システム研究調査委員会報告書

## 目次

序論	1
第1章 電界結合型無電極放電(バリヤ放電)の現状	
1.1 概説	3
1.2 ディスプレイ分野	5
1.3 線光源、面光源	9
1.4 化学反応用光源分野	13
第2章 磁界結合型無電極放電の現状	
2.1 概説	21
2.2 一般照明用光源分野—3つの無電極蛍光ランプを中心に	22
2.3 一般照明用光源としての無電極放電ランプ	25
2.4 イオン源分野	30
第3章 マイクロ波放電の現状	
3.1 概説	33
3.2 イオン源分野	35
3.3 分析用光源分野	41
3.4 一般照明用光源分野	44
3.5 その他の応用分野	51
第4章 高周波発振器の現状	
4.1 概説	53
4.2 磁界結合型無電極放電における高周波発振器技術	54
4.3 マイクロ波帯における高周波発振器技術	56
付録	
委員名簿	60
協力者名簿	60



### 本委員会の目的、調査対象

無電極放電そのものは目新しい放電方式ではない。電界結合型(バリヤ放電)はレーザ発振管やオゾナイザーなどで、磁界結合型やマイクロ波放電は半導体プロセス用イオン源、分析用イオン化源などで古くから応用されてきた。しかし一般照明用光源に本格的に応用が始まったのはまだ15年ほど前からである。無電極放電では通常10MHz以上の高周波を用いる(バリヤ放電では基本周波数は通常100kHz以下であるがパルス波形を用いるため帯域では10MHz級になる)。このための高周波発振器価格が一般照明に使用するにはあまりに高価格であった。

近年、移動通信が爆発的に普及し、携帯機器や基地局に使用する高周波発振器・半導体素子の価格低下が急速に進んでいる。高周波発振器価格の低下により無電極放電の研究、開発も進み始めた。一般照明用光源で市場に出た先駆けはヨーロッパでは Philips Lighting 社の QL ランプ、日本では松下電工のエバーライトであろう。両ランプとも磁界結合型の低圧水銀(蛍光)ランプである。

無電極ランプ最大の利点は電極を用いないため、電極との反応から有電極ランプでは利用できない物質も発光材として利用できる点と、点滅を含めた長寿命である。典型的な例は Fusion Lighting 社の硫黄を用いたマイクロ波光源ならびに東芝ライテック社からの 150 lm/W を越える磁界結合型無電極 HID ランプの発表であろう。また水銀レスランプへの応用も注目されている。すなわち磁界結合型放電は放電路長が短くなるので大電流・低電圧にならざるを得ない。これは逆に水銀レスランプ特性に適合させやすい。また電界結合型(バリヤ)放電では管壁(バリヤ)インピーダンスを下げるためにパルス電圧印加を用いる。パルス放電は水銀に代わる発光ガスであるキセノン放電に有効である。キセノンガスを用いたバリヤ放電は発光の温度依存性がなく、光束立上りが速いなどの利点があるため、プラズマディスプレイ、バックライトなど表示用光源や光学読取用光源などに広く使用されるようになってきた。このように無電極放電は新光源開発のポテンシャル技術として急速に注目を得るようになった。

本委員会は新光源開発のポテンシャル技術として無電極放電を取り上げ、その研究・開発状況を調査し、今後の光源開発の指針を得ることを目的に1999年5月に発足をした。第1回委員会で目的と、それを受けての調査対象範囲を討議した。調査範囲はシーズ面からは将来性を知るために光源用に限定せず、イオン源を含めた無電極放電が用いられている各種分野とし、またニーズ面から調査するために各種光源の応用分野についても調査をすることにした。

### 活動経過

本委員会は委員名簿に挙げてある15名の委員で発足し、第1回委員会を1999年5月20日に開催、計10回の委員会を開催してきた。委員会の運営は、毎回設定した調査対象・項目について各委員が分担して調査をし、その結果を委員会で報告、討論した。この間、委員外で、上村氏(東芝ライテック)、和田氏(松下電工)、寒川氏(東北大学)、木下氏(岩崎電気)、志賀氏(東京電気通信大学)、山本氏(東芝)、田口氏(山口大学)にそれぞれお願いして講演をいただいた。ご協力に対し深く感謝を申し上げる。各回の主用議題と講演者は以下の通りである。

開催日	会場	主要議題	講演者
第1回 5月20日	三重大学	活動計画審議	
第2回 8月31日	大阪中央電気倶楽部	バリヤ放電の現状	竜子
		磁界結合型放電の現状	四宮
		マイクロ波放電の現状	井上
		ICOPS99 報告	吉岡
第3回 12月3日	東京照明学会	磁界結合型放電特性	渡辺、川口
		高周波発振器の現状	清水、原田
第4回 3月17日	名古屋松下電工ビル	磁界結合型 HID ランプ	上村
		マイクロ波 HID ランプ	片瀬
		発光金属探索の紹介	和田
第5回 6月16日	大阪中央電気倶楽部	核融合用イオン源	松岡
		電界結合放電文献紹介	四宮、野本、渡辺
第6回 9月14日	東京照明学会	半導体プロセス用マイクロ波放電	寒川
		マイクロ波プラズマ源	岡本
		高周波発振器用半導体素子の現状	山本
第7回 3月22日	名古屋松下電工ビル	エキシマランプとその応用	吉岡
		磁界結合型ランプの商品開発の現状	河合
		紫外線光源とその応用状況	木下
		表面波マイクロ波放電	神藤
第8回 6月29日	東京照明学会	白色 LED の現状	田口
		PDF 開発の現状	志賀
		無電極ランプの商品開発紹介	野本
第9回 9月5日	山口大学	報告書構成の検討	
第10回 12月14日	大阪中央電気倶楽部	報告書構成の検討	

第10回委員会以降は各執筆担当で原稿を作成し、幹事が取り纏めて2002年5月末に報告書として完成させた。

経済状況の大変厳しい時期に、また大学関係も激動に突入した時期に本調査委員会活動が重なったこともあり、委員の方ならびに講演者には一方ならぬ苦勞をおかけした。それでも報告書をまとめることができ、ご協力をいただいた執筆者・委員に深謝申し上げる次第である。この報告書が光源開発を目指す方々の参考にいくらでかでもなればと委員一同念じている。

# 第1章 電界結合型無電極放電（バリア放電）の現状

## 1.1 概説

電子雅俊（明石高専）

図1のように放電管外部に1対の電極を対向させて電極間に高周波電界を掛けて起こる放電を電界結合放電あるいは静電（容量）結合放電という。電界結合放電は外から加える高周波電界で電子を加速して電離を起こす訳であるが、高周波パワーの吸収機構によって次の3つに分類されている。<sup>(1)</sup>

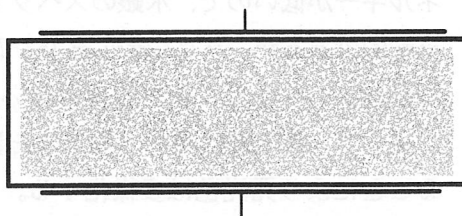


図1 電界結合型放電管

- ①プラズマ領域でのジュール加熱（ $\alpha$  放電）
- ②電極からの2次電子放出（ $\gamma$  放電）
- ③シース振動による統計的加熱（フェルミ加速）

実際の放電がこれらの内のどのモードになるかは、ガス圧、電源周波数、電極間隔、電流密度等で決まってくる。

①はガス圧が比較的高く、電極間隔が長い場合に多く、電場で加速された電子は  $\alpha$  作用を繰り返しながら進むので、直流グロー放電の陽光柱を維持している機構と同じと考えられる。

②はガス圧が比較的低く、周波数が低く（1 MHz 程度以下）、電流密度が結構高い場合に多い。正イオンがシースで加速され、壁（管壁或いは電極被覆誘電体）に衝突して出る2次電子がシースで加速されてプラズマ領域に飛び込んで行く。イオンが電界に追従できる程度の周波数（概略1 MHz 以下）では直流グロー放電の陰極と同じことが起こっていると考えてよい。

③の放電モードはガス圧が低く、放電パワーが小さいときに見られる。この場合の電子加熱はシースの厚さが放電周波数で振動することによって起こると言われている。

ここでは、②のモードについて事例に基づいて紹介する。<sup>(2)</sup>

図2のような内部に全く電極のない放電管に例えばネオン（1,000Pa 前後）と水銀とを封入し、図のように2組の外部電極を設ける。（長さ方向については片方あるいは両方とも通常の内部電極でもよい）

これらの外部電極間に数十～数百 kHz 程度の比較的低い周波数の電圧を印加する。この場合、放電は上述の②のモードとなり、各外部電極の内側には直流グロー放電の場合と同じ色（今の例ではネオンの赤橙色）の負グローが現れる。この赤橙色はその電極が負電位の時間にのみ出現し、直流グロー放電と同様のことが起こっていると考えられる。

A電極対のように外部電極の間隔の長い場合には中間に陽光柱が出現し、上述の封入ガスでは水銀の青色となる。ただし、B電極対のように間隔の短い（数 mm）場合には陽光柱らしきものは殆ど観測されない。

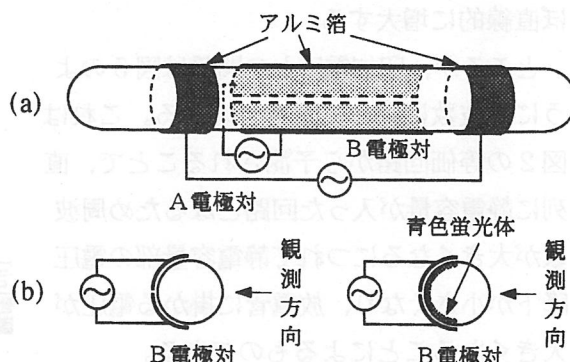


図2 外部電極放電管の例

A, B 両電極対の電力比を変えると (b) 図の観測方向から見た放電管の発光色は変化する。陽光柱に相当する部分は電子のエネルギーが低いので、水銀のスペクトルが支配的であるが、中でも紫外線 253.7nmHgI は励起レベルが低く相対強度は強い。

従って、管内壁に種々の蛍光体を塗布することにより発光色は多様化する。

図 5 の CIE 色度図に発光色変化の様子を示す。光を取り出さない側の外部電極にはアルミ箔を用い、光を取り出す側に電極が必要な場合には透明な ITO 膜を使用している。蛍光体を使用しないクリアー放電管では赤色は殆どネオンのスペクトルのみであり、発光色は良い。青色は水銀の可視光を利用するためあまり鮮やかではない。一方、青色蛍光体を塗布した場合には、青色は鮮やかであるが、赤色発光は蛍光体の青色が混ざるためあまり鮮やかとは言えない。

次にこの外部電極放電の電気的特性であるが、放電電流と輝度との関係は図 4 のように、周波数に殆ど関係なく電流に対してほぼ直線的に増大する。

ところが、印加電圧との関係は図 5 のように周波数によって大きく変わる。これは図 2 の等価回路から予測されることで、直列に静電容量が入った回路となるため周波数が大きくなるにつれて静電容量部の電圧降下が小さくなり、放電管に掛かる電圧が大きくなることによるものである。

引用文献

- (1) 菅井秀郎「プラズマエレクトロニクス」, オーム社, 2000
- (2) 藤野, 竜子「外部電極を用いた放電発光色の制御」, 電学誌, vol.118-A, No.1, PP.34-40, 1998

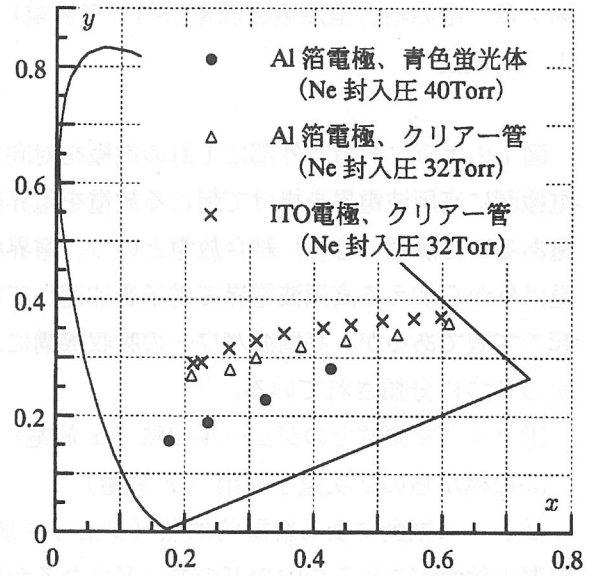


図 3 発光色の変化 (CIE 色度図)

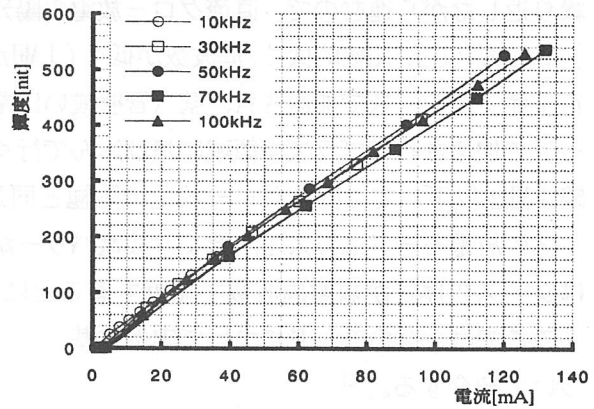


図 4 放電電流の輝度の寄与

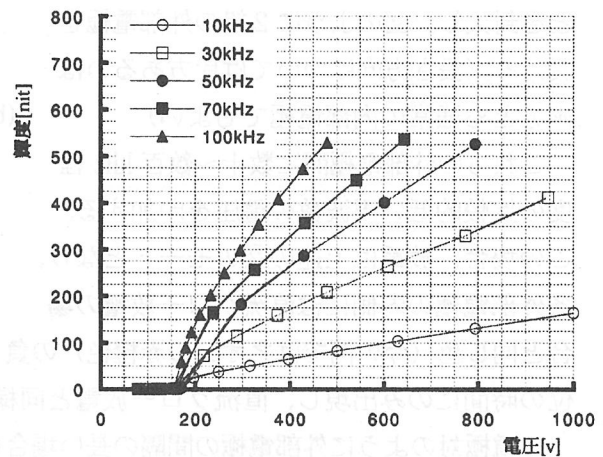


図 5 印加電圧の輝度への影響

40型以上と大型の自発光型テレビとして一般に普及し始めたプラズマディスプレイ(PDP)は気体放電を利用したディスプレイである。それぞれ赤、緑、青に光る蛍光体を塗布した大きさが1mm程度の小さな放電部3つ1組で1画素とし、それを多数配置することでディスプレイとする。例えばVGA(640×480画素)の場合、約92万個の放電が必要となる。PDPは放電空間と電極の位置関係から、電極が空間に接しているDC型と、誘電体により分離され無電極放電の範疇にあてはまるAC型とに分けられる。現在市場に広がっているPDPはAC型であり、研究開発も主にAC型に対して行われている。PDPの特徴は、大型であること、10cm程度と薄いこと、希ガス放電を利用するため外部温度依存性がないこと等があげられる。またAC型の場合、無電極放電を利用するため長寿命であることもあげられる。本節ではAC型PDPについて述べる。

### 1.2.1 構造

図1は一般的な3電極面放電AC型PDPの構造である。前面ガラス基板には透明な走査電極、表示電極を配置する。表示発光放電はこの2電極間で発生する。なお透明電極の低導電性を補うためバス電極を併用する。これらの電極を誘電体層で覆い、さらにその上に保護層を形成する。構造上、保護層は透明である必要があり、またAC型PDPの実質的な電極となるため、低駆動電圧化に対して高い2次電子放出係数を持つことが望まれる。これらを満たすものとして、現在はMgOが利用されている<sup>[1]</sup>。背面ガラス基板には信号電極を走査、表示電極と直交するように配置し、その上を誘電体で覆う。走査、表示電極と信号電極が交差する領域が一つの放電部となり、1/3画素(サブピクセル)を形成する。42型VGA表示パネルの場合、サブピクセルピッチは横方向0.36mm、縦方向1.08mmである。蛍光体は底面部および隔壁に塗布する。隔壁は各発光色を分離する役目を持ち、また蛍光体塗布面積増加による高輝度・高効率化にも効果的である。図1の場合、垂直方向の隔壁に仕切がない構造となっているが、最近では発光特性をより向上させるために垂直方向にも隔壁を設ける構造が採用されつつある<sup>[2]</sup>。前面ガラス基板と背面ガラス基板を約0.1mmの間隔で接着し、放電空間内に希ガスを封入する。なお、発光特性の温度依存性が強い水銀放電は利用できない。放電で発生した紫外線による蛍光体発光を利用するため、高輝度を得るためには紫外線放射強度が強いこと、またディスプレイの色純度の点から放電そのものからの可視光放射強度の小さいことが必要である。これらを満たすガスとしてPDPではXeが利用される。さらに低電圧化や長寿命化のためにNeを加え、Ne+Xe(2-5%)混合ガスとし、圧力500Torr程度に封入する。

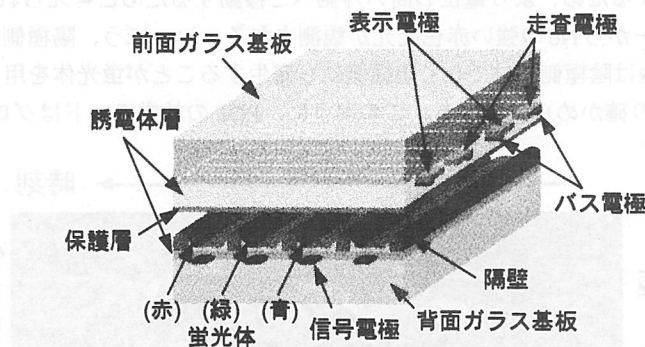


図1 AC型PDPの構造

### 1.2.2 放電セルの基本動作

図2は点灯状態にある放電セルの走査・表示電極間印加電圧、壁電圧、および放電電流波形である。電極が誘電体および保護層で覆われているため、放電で形成された電子やイオンは電極近傍の保護層表面に蓄積する。この蓄積電荷を壁電荷という。壁電荷により誘起される電圧が壁電圧であり、外部から印加している電圧を打ち消すように形成される。したがって、実際に放電空間に印加される電圧(実効電極間電圧)は、走査・表

示電極間印加電圧と壁電圧の差となる。1つの電圧パルスに注目すると、放電が成長するにつれ壁電圧が大きくなるため、実効電極間電圧はしだいに小さくなる。これに伴い放電も弱くなり、やがて停止する。このため放電電流波形は図のような形状となる。一般に放電電流の幅は200-300nsである。電圧パルスが終了したあとも壁電圧はそのまま残留する。次の電圧パルスは極性が逆となり、壁電圧の極性と等しくなる。走査、表示電極に印加する電圧の大きさを  $V_s$ 、壁電圧の大きさを  $V_w$  とすると、電圧パルス印加時には、 $V_s + V_w$  の電圧が電極間に加わることとなる。したがって、 $V_s$  が放電開始電圧より低くても、 $V_s + V_w$  が放電開始電圧より大きければ放電を維持することができる。この原理を利用すると、PDP全体に放電開始電圧より低い維持電圧を常に加えておき、点灯させたい放電セルのみに、一度だけ放電開始電圧よりも高い電圧パルスを加えれば、放電セルは維持電圧パルスが印加されている限り放電が継続する。このように、一旦放電を開始した放電セルは放電し続け、非放電セルはそのまま非点灯であるといったように、放電セルがその状態を維持することをメモリ動作という。放電を停止させるには、幅の狭い、あるいは電圧の低い電圧パルスを印加し、壁電荷を打ち消すような弱い放電を起こす。

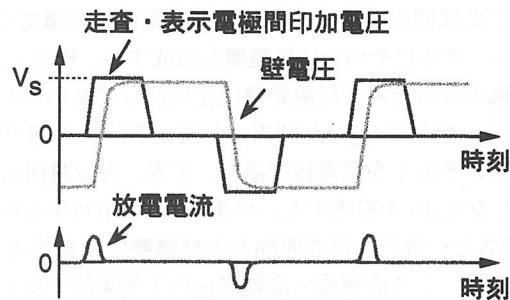


図2 走査・表示電極間印加電圧、壁電圧、および放電電流

図3は、顕微鏡に取り付けた高速度CCDカメラを用いて、放電セルから放射される可視から赤外の範囲(300-900nm)の発光を観測した結果である。放電セルは42インチVGA型のものと同寸法で、上側が陰極、下側が陽極となる期間の放電進展を示している。発光は両電極の対向部で始まる。陰極上には時間と共に放電セル中心から遠ざかるように移動する負グローが形成される。これは、誘電体表面上に壁電荷が蓄積するとその場所における電位が減少するため、より電位の高い外側へと移動するためと考えられている。Ne-Xe混合ガスを利用した場合、負グローからNeの強い赤色発光が観測される。いっぽう、陽極側には固定した縞状の発光が観測される。なお紫外線は陰極側だけでなく陽極側にも発生することが蛍光体を用いた間接的観測<sup>[3]</sup>および紫外線の直接観測<sup>[4]</sup>により確かめられている。このように、PDPの放電モードはグロー放電である。

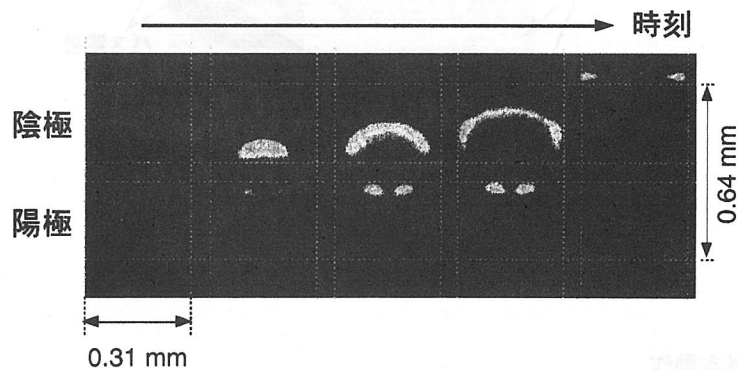


図3 高速度CCDカメラを用いて観測した1放電セルの放電進展

### 1.2.3 画像表示駆動方式

PDPで画像を表示する際には一般に、(1)各放電セルへの点灯・非点灯情報の書き込み(2)表示放電の維持(3)情報の消去および全セルの初期化の3つを行う。CRTでは、30keV程度に加速された電子で蛍光体を励起しているのに対し、PDPは8eV程度の紫外線励起であるため1電圧パルスあたりの発光強度は非常に弱い。これを補うために単位時間当たりの発光時間を増やす表示放電の維持が必要で、その方法として1.2.2に述べたメモリ動作を利用する。

点灯・非点灯情報の書き込みの際に、それぞれのセルからコントロール電極を引き出すと非常に多くの電極が必要となるが、1.2.1で説明したように、電極を縦・横マトリクス状に組み、それぞれの交点に放電セルを配置すると、コントロールに必要な電極数は水平ライン数と垂直ライン数の和となり大きく低減することができる。まず第1走査電極に電圧を加え、点灯したい放電セルの信号電極にも電圧を加えると、その交点の放電セルで放電が発生する。この方法では水平方向1ライン分の放電セルを同時に制御できる。第1走査電極の点灯が終わった後、走査パルスを第2走査電極、第3走査電極…と移動し、それぞれの走査パルスに同期した電圧を信号電極に加える。これらの放電で形成された壁電荷は次に維持電圧が印加されるまで残っているため、次からのメモリ動作が可能となる。以上の動作を行う1つの方式がアドレス・表示分離駆動方式<sup>[5]</sup>である。

PDPではCRTのように電流変調による階調表示ができない。これは、紫外線の自己吸収現象および励起崩壊現象により電流に対し紫外線の放射強度が飽和してしまい、蛍光体の発光強度も飽和するためである。基本的に点灯・非点灯の2値しか利用できない。そこで、単位時間当たりの発光回数により輝度を変えるパルス数変調方式を利用する。例えば、8ビット256階調表示する場合、1TVフィールドを8つのサブフィールドに分け、それぞれのサブフィールドに含まれるパルス数の比を1:2:4:8:16:32:64:128とする。これらのサブフィールドの組み合わせにより256階調表示する。

### 1.2.4 現状と課題

現在対角32インチから61インチのものが市販されている。特筆すべきは対角60インチクラスという大型のものが、日本および韓国の各PDPメーカー数社から研究発表もしくは販売されていることである。最も多く市場に出ている対角42インチを例にあげると、重さ(表示部+駆動回路)は20kg程度で薄さは10cm以下である。視野角は160度以上と広く、階調数、発光色数ともに十分である。しかし、CRTを用いたテレビに比べると画質および消費電力などまだ不十分な点も多い。

画質の良し悪しを決める要因の一つは輝度である。特にテレビ表示に用いる場合、高輝度であることが望ましい。発光デューティ(1TVフィールドに占める表示発光期間の割合)を高くすることで高輝度を得ることができる。これには、情報の書き込みや初期化にかかる時間を減らし、表示発光期間を長くする方法が有効である。また、発光周期を短くする方法もある。ただし、この際に紫外線放射強度が電流の増加および駆動周波数の増加に対して飽和することに注意せねばならない。これはPDPがXe共鳴線を主に利用しており、共鳴線には自己吸収・励起崩壊過程が発生するためである。これに対し最近ではXe混合比を高くし、自己吸収現象を伴わないXe分子線を利用することも検討されている<sup>[6,7]</sup>。

画質に対する最も重要な要素はコントラストである。1.2.3で述べたようにセルに情報を書き込む際や全セルの初期化の際にも放電を起こしている。このため輝度レベル0でもわずかな放電発光があり、いわゆる黒浮きの一要因となっている。NDフィルタを用いたり、初期化放電回数を減らすなどして、改善を行っている。なお、NDフィルタを使うと表示放電発光も減衰してしまうので、より輝度を高くしなければならない。塗布する蛍光体は白色であるため、周囲光の映り込みによりコントラスト低下も発生する。これに対しては、水平ライン間にブラックストライプを使用したり、映り込み防止のフィルタ等を利用する。

以上のように高コントラストを得るにしても高輝度化が必要である。消費電力の点で、高輝度化は放電の高発光効率化とともに行う必要がある。現在、開発当初の発光効率の目標値であった2lm/Wの達成が目前となっているが、現在のように大型化がすすみ、さらなる高解像度化を行うには5lm/Wが必要といわれている。

### 参考文献

- [1] H. Uchiike, N. Nakayama, and M. Ohsawa : "Secondary Electron Emission Characteristics of Dielectric Materials

- in Plasma Display Panel", Int. Electron Devices Mtg.(IEDM) Tech. Digest, pp.191-194, 1973
- [2] T. Komaki, H. Taniguchi, K. Amemiya: High Luminance AC-PDPs with Waffle-Structured Barrier Ribs, Proc. IDW'99, pp.587-590, 1999.
- [3] K. Amemiya, M. Nozu, Y. Torisaki, M. Uchidoi, T. Nishio, M. Tamura: Luminance Observed above the Anode Electrode in Co-Planar Structure AC-PDP, Proc. 15th Int. Display Res. Conf., pp.965-966, 1995.
- [4] 澤、他: 超高速ゲートカメラによる ac 型プラズマディスプレイの真空紫外線の発光仮定の観察, 信学技法, EID97-90, 1010, 1998
- [5] K. Yoshikawa, Y Kanazawa, M. Wakitani, T. Shinoda, A.Ohtsuka: A Full Color AC Plasma Display with 256 Gray Scale, Proc. 12th Int. Display Res. Conf., pp.605-609, 1992.
- [6] G. Oversluizen, S. de Zwart, S. van Heusden, T. Dekker: Improvement of Luminance and Luminous Efficacy Based on the Investigation of Xe Concentration and Sustain Voltage in PDPs, Proc. of Sixth International Display Workshops, IDW'99, pp.591-594, 1999
- [7] T. Yoshioka, A. Miyakoshi, A. Okigawa, E. Mizobata, K. Toki : A High Luminance and High Luminous Efficiency AC-PDP Using High Xe-Content Gas Mixtures, Proc. of Seventh International Display Workshops, IDW'00, pp.611-614 , 2000

### 1.3 線光源、面光源

吉岡正樹（ウシオ電機）

電界結合型無電極放電を利用した光源は、古くから研究されてきているが、1990年代に入り、電界結合型無電極放電の一例である誘電体バリア放電（以下 DBD）として、急速にその開発、実用化が進められてきた。この背景にはいくつかの要因があるが、一つには、1988年に Eliasson と Kogelschatz らが、それまでオゾナイザで広く利用されていた DBD をエキシマ発光に適用し、それまでエキシマ発光が報告されていたほとんどの希ガス、希ガス・ハライド系のガスについて、そのエキシマ発光を確認したこと<sup>1) 2)</sup>、また環境への影響の大きい有害物質、水銀の使用量の削減と代替光源の要望が高まり始めたことが上げられる。この節では、この DBD を利用した線光源、面光源について、その特長とこれまでの応用例について紹介し、今後期待される応用分野、残された課題についてふれる。

線光源、面光源に限らず DBD に最も多く利用されるガスはキセノン (Xe) である。その理由は、キセノンガスが不活性で無毒であり、DBD により励起状態の分子つまりエキシマを効率よく生成し、200 nm 以下の真空紫外の波長域に強いキセノンエキシマ発光 (172 nm) が得られることによる。図 1 にキセノンエキシマ発光のスペクトルの一例を示す。172 nm にピークを有し、その半値全幅は、おおよそ 14 nm である。キセノンの場合は、この 172 nm 以外には 800 - 1000 nm 付近にキセノン励起原子から下準位への遷移の線スペクトルが観測される以外は、可視域にわずかに発光するのみである。水銀を利用した蛍光ランプでは、点灯とともにランプが加熱され徐々に光量が増加するが、キセノンエキシマ発光は放電開始と同時に瞬時に安定な放射が得られ、この特長も以下の応用例で活かされている。

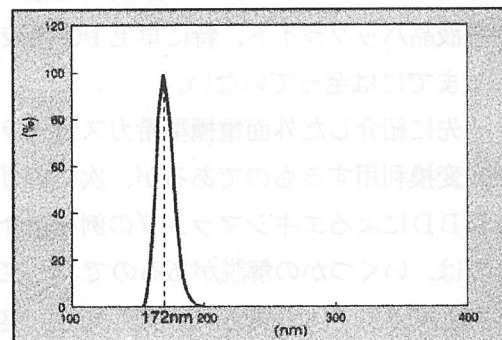


図 1 キセノンエキシマの発光スペクトル例

線光源の一例である従来の希ガス蛍光ランプは、これまで内部に電極を設け、キセノンガスを低圧で封入したタイプが一般的であった。しかし、移動縞(moving striation)や蛍光体を励起発光させるキセノンの共鳴線 147 nm の放電生成および利用の効率が低いことから一部のスキャナーや FAX 用途としての普及にとどまった。1991年に藤岡らにより発表された外面電極型希ガス蛍光ランプは、キセノンガスを利用した蛍光ランプとしては、先述した希ガス蛍光ランプの欠点を最初に解決した線光源であり<sup>3)</sup>、この外面電極型希ガス蛍光ランプは、その後 DBD によるキセノンエキシマを利用した光源であることが確認されている<sup>4)</sup>。この外面電極型希ガス蛍光ランプは、現在、デジタル複写

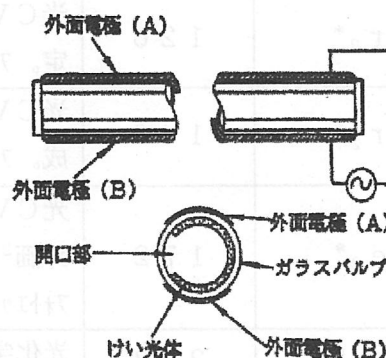


図 2 外面電極型希ガス蛍光ランプの一例<sup>3)</sup>

機、スキャナー等のイメージ読み取り用光源、車載用 LCD のバックライト等に広く利用されている。この外面電極型希ガス蛍光ランプの一例を図2に示す。円筒状のガラス管の内面に蛍光体が塗布され、キセノンガスが封入され、ガラス管の外面にアルミテープ、銀ペースト印刷等により、一对の帯状電極が配設されている。蛍光体は、モノクロイメージの原稿照明の場合には、緑色蛍光体のみを塗布する 경우가多く、カラーイメージの場合は、赤、緑、青それぞれの蛍光体を適宜混合塗布する。蛍光体の選択としては、代表例とし赤色に(Y,Gd,Eu)BO<sub>3</sub>、緑色に、LaPO<sub>4</sub>:Ce,Tb、青色に、(Ba,Eu)MgAl<sub>10</sub>O<sub>17</sub>等が上げられるが、目的とする蛍光体の励起スペクトルが172nm付近に適切な強度を有すること、選択した蛍光体の残光特性が使用目的に適切か等を確認する必要がある。電源は、約2000V、40kHz程度の正弦波で駆動する回路が一般的である。最近、高速デジタルカラー複写機の原稿照明用に高い照度の白色発光を得るために赤、緑、青の蛍光体の改良、さらなるエキシマ生成効率の改善の目的から間欠的な放電を得るための電圧波形を印加するドライバも製品化されている。

DBDを可視光の面光源として利用する場合には、様々な構造が提案されている<sup>5,6)</sup>。現在商品化されているものは、水銀使用を厳しく制限している車載用、世界的な使用量が多いPC用各液晶バックライト、特に卓上PC用液晶モニターなどであるが現在までのところ広く普及するまでには至っていない。

先に紹介した外面電極型希ガス蛍光ランプや面光源は、キセノンエキシマ光を蛍光体で可視光変換利用するものであるが、次に各ガスのエキシマ光そのものを利用する線光源の例としてDBDによるエキシマランプの例を紹介する。DBDを利用したエキシマランプの構造については、いくつかの解説があるので<sup>7,8)</sup>、ここでは、エキシマランプの応用例についてふれる。エキシマランプより得られる紫外光は、実用上単色光として扱うことが出来、波長に応じて特有の用途がある。現在市販されている各種エキシマランプの実用例を表1に示す。現在、最も多く産業用途で使用されているのは172nm光を放射するキセノンエキシマランプであり、特に液晶ディスプレイ製造工程のドライ洗浄として標準的に使われるようになっている。

表1 各種エキシマランプと応用例

エキシマの形態	発光中心波長 (nm)	応用例
Ar <sub>2</sub> *	126	光CVD。有機物合成過程の研究。真空中の水分量の測定。フォトリソ。
Kr <sub>2</sub> *	146	光CVD。蛍光体特性評価。アルコキッドからのSiO <sub>2</sub> の形成。フォトリソ。
Xe <sub>2</sub> *	172	光CVD。酸化膜生成。VUV/O <sub>3</sub> 洗浄。蛍光体特性評価 <sup>2)</sup> 。真空中における脱ガス。ガス(NO <sub>x</sub> ,H <sub>2</sub> O等)分解。フォトリソ。表面改質。
KrCl*	222	光化学、UVキュア、水処理、殺菌。
XeCl*	308	光化学、UVキュア。

紫外光を使ったドライ洗浄は、紫外光の持つ光エネルギーで有機物を分解し、また同時に生成する活性酸素で分解した有機物を酸化揮発洗浄するものである。特にキセノンエキシマを利用した場合には、172 nm光の大気中での吸収係数は $15\text{cm}^{-1}$ 程度あり、しかも172 nmのフォトンのエネルギーは直接酸素分子を分解して活性酸素原子( $^1\text{D}$ )を生成できることから、局所的に高い密度の活性酸素を生成でき、従来の低圧水銀ランプの10倍程度の洗浄スピードを実現することができる。図3に大面積エキシマ光照射装置の一例を示す。

これまでに述べてきた通り、DBDを利用した光源は、1990年代に開発商品化され、急速にその応用が拡大している。特に水銀レス化の動きから、厳密な意味での電界結合型無電極放電とは異なるもののバックライト用の希ガス細管蛍光ランプとして、新しい構造の提案<sup>9)</sup>、また面光源についても効率の改善が報告<sup>10)</sup>されており、今後の製品化で液晶バックライトの水銀レス化が急速に進むものと思われる。

最後に、電界結合型無電極放電の線光源、面光源について解決すべき課題を述べる。希ガスエキシマの中で最も変換効率が高いキセノンで40%程度と考えられているが、60%以上の可能性を示唆する報告もある<sup>11)</sup>。しかし、172 nm光を直接利用する場合の実用的な効率は、石英ガラスの透過率、光利用率等からその実効率は10~20%にとどまっている。この効率の向上、照度アップが更なる応用の拡がりのポイントとなる。このためには、ランプ材料並びにランプに最適な駆動方式の開発が不可欠である。

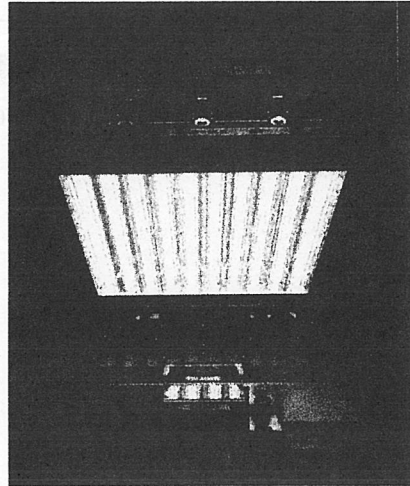


図3 610 mm×690 mm大面積Xeエキシマ照射装置

#### 参考・引用文献

- 1) B.Eliasson and U.Kogelschatz: "UV Excimer Radiation from Dielectric-Barrier Discharges," Appl.Phys.B,46(1988) 299-303
- 2) B.Eliasson and U.Kogelschatz: "Modeling and Applications of Silent Discharge Plasmas," IEEE Trans. Plasma Sci., 19(1991)309-323
- 3) 藤岡誠一郎、田村敏、近田勉: 53外面電極型希ガス蛍光ランプの諸特性、平成3年度照明学会全国大会(1991)
- 4) 吉岡正樹、溝尻貴文: 希ガス蛍光ランプ内のVUV光の変換効率の見積もり、第11回還瀬戸内光源研究会(1999)
- 5) T.Urakabe, S.Harada, T.Saikatsu and M.Karino: A Flat Fluorescent Lamp with Xe Dielectric Barrier Discharges, 44:L, The 7<sup>th</sup> International Symposium on the Science & Technology of Light Sources (1995)
- 6) M. Ilmer, R. Lecheler, H. Schweizer, M. Seibold, 37.1: Hg-free Flat Panel Light Source PLANON, SID 2000

- 7) 松野博光、五十嵐龍志：“誘電体バリア放電を利用したエキシマランプ”，光技術コ  
ンタクト，**32**，(1994) 96-103
- 8) 五十嵐達志：“誘電体バリア放電エキシマランプの原理と応用”，レーザー研究，**2**  
**3**，(1995) 1051-1055
- 9) Hidehiko Noguchi and Hidetoshi Yano, 37.2: A Mercury-Free Cold Cathode  
Fluorescent Lamp for LCD Backlighting, SID2000
- 10) 長内久崇、池田完、志賀智一、御子柴茂生、品田真一：12. 水銀レス高出力平面蛍  
光ランプの開発、平成13年度照明学会全国大会(2001)
- 11) F.Vollkommer and L.Hitzschke: Dielectric Barrier Discharge, IL07, The 8<sup>th</sup>  
International Symposium on the Science & Technology of Light Sources(1998)

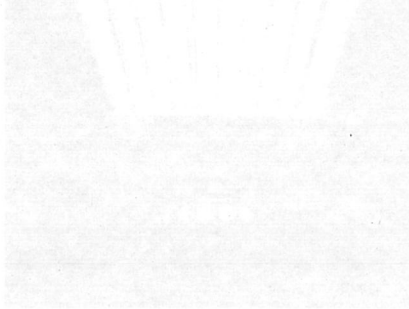


図1 水銀レス高出力平面蛍光ランプの構造

## 1. 4 化学反応用光源分野

木下忍(岩崎電気)

光化学反応については、光化学第一法則、第二法則を理解することから始まる。基本的なことなので再確認の意味で紹介する。光化学第一法則は提唱者の名前をとって Grotthus-Draper の法則とも呼ばれ「入射した光のうち吸収された光だけが反応を起こし得る。」ということで、詳細には「分子が光エネルギーを吸収し、励起状態（エネルギーの高い活性化状態）になることによって光化学反応は起こる。」との内容である。つまり、光エネルギーは短波長になるほど高くなるが、いくら高いエネルギーの光を照射しても光を吸収してくれなければ反応は起こるものではない。

次に第二法則は、光等量則でアインシュタインの法則と呼ばれ「光の吸収は光量子を単位として行われ、1個の分子が1個の光量子を吸収し、それによって1個の分子が反応する。」というものであるが、光量子を吸収した分子が100%の確率で反応するのではなく、分子の一部だけが反応するのである。この反応確率を量子収率や量子収量と言ひ、光化学では重要な数値である。

我々の身の回りでは以上説明した光化学反応を利用して多くの応用を行っている。表1に光放射の区分と代表的な応用例を示した。この中でUV-Bの1部からUV-Cおよびそれ以下の波長の紫外放射は、太陽光がオゾン層で吸収されるために地上では自然に得ることはできなく、人工光源に頼らざるを得ない。また、工業的に光を利用するには大きなエネルギーが必要であり、この光源が使用されている。この光源は図1の様に分類され、有電極、無電極とも工業的に応用されているので、その応用例を紹介する。

表1 紫外線の主な用途

効果名	対象波長 (nm)	適用光源	用途分野	
オゾン生成	150 ~ 200	短波長殺菌ランプ、石英水銀灯	脱臭、水処理	
陰イオン生成	150 ~ 200	イオンランプ	空気清浄	
殺菌作用	240 ~ 300	殺菌ランプ	空気殺菌、水殺菌、表面殺菌	
生体への有害作用	200 ~ 340	殺菌ランプ、アーク溶接、ガス溶接、カーボンアークランプ、健康線用けい光ランプ	日本よび皮膚に対する曬傷防護	
紅斑作用	250 ~ 330	医療用紫外線ランプ、キセノン短アークランプ、太陽光	光線過敏症診断	
ビタミンD生成	260 ~ 300	健康線用けい光ランプ、キセノン短アークランプ	食品、飼料などへのビタミンD添加、くる病の予防	
色素沈着	330 ~ 400	ブラックライトけい光ランプ ブラックライト水銀ランプ	尋常性色素の治療	
一般 光化学 作用	光分解	340 ~ 460	複写用けい光ランプ、複写機水銀ランプ	ジアゾ複写
	光重合	250 ~ 400	高圧水銀ランプ、キセノン短アークランプ、超高圧水銀ランプ、メタルハライドランプ	印刷製版、塗料硬化、インキの乾燥
	光崩壊	300 ~ 750	光化学用水銀ランプ、カーボンアークランプ、キセノン短アークランプ、太陽光	耐光性試験、屋外曝露試験
	光合成	340 ~ 700	紫外線けい光ランプ、高圧水銀ランプ	化学物質の合成

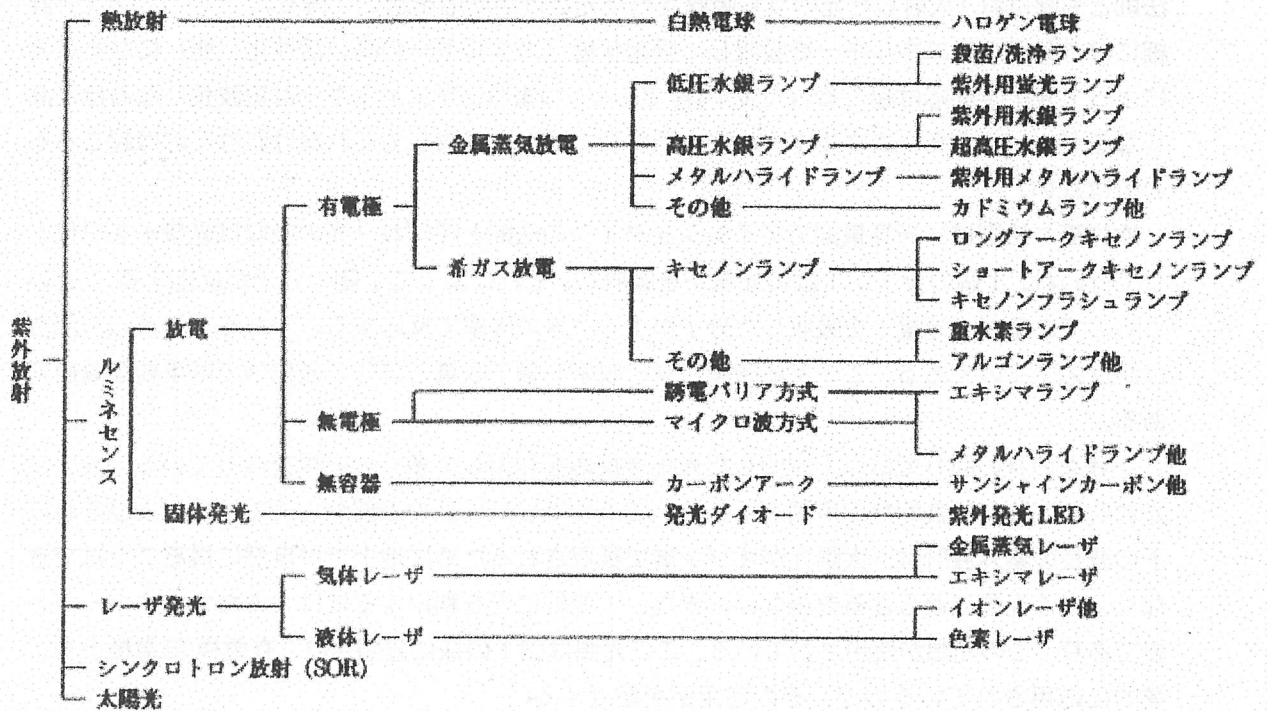


図1 紫外放射光源の分類

#### 1. 4. 1 殺菌への利用

UVの殺菌作用は、1901年に太陽線に含まれるUVから確認したといわれている。それから1世紀が経過した現在、Vを発生させるランプにより、広範囲の野でこの殺菌が有効に利用されている。

日本では、1950年代に入り、UV菌ランプ（低圧水銀ランプ）を理髪店のV消毒器に装備することが厚生省により務付けされた。それをきっかけに、非常低コストで手軽に殺菌が実施できることから、一般にこのUV殺菌ランプが普及いった。身近な所では新幹線のトイレを見ると青白く光っているUV殺菌ランプを見ることができる。

このUVによる殺菌の機構については、古くから研究されていて報告<sup>1)~4)</sup>も多いが、未だ解

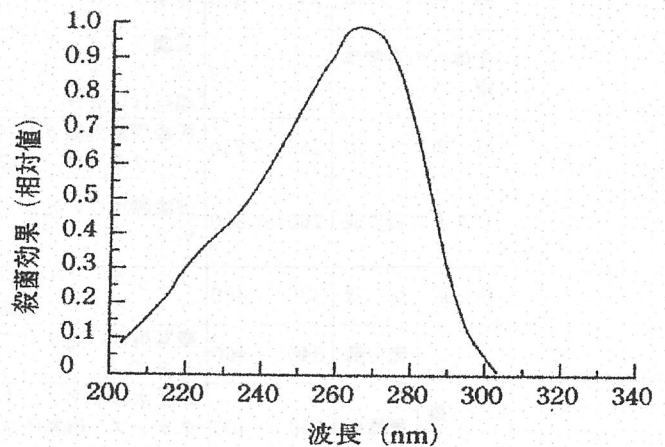


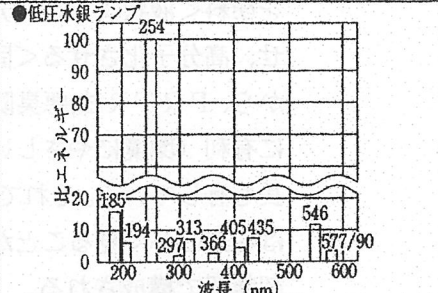
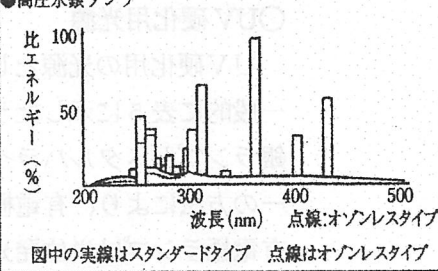
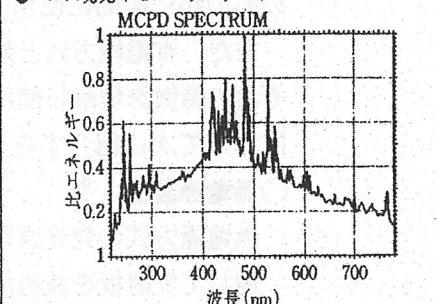
図2 殺菌作用の分光特性

明されていない部分も多くある。紙面の都合上詳細な説明は参考文献等で確認いただきたいが、簡単にいうとUVが微生物の細胞（特に核）に照射されることで、細胞内で光化学反応が起こり、細胞分裂ができなくなってしまうのである。UVと言っても波長の範囲があり、このUVの波長と殺菌作用との関係を図2<sup>5)</sup>に示した。図から分かるとおりUV-Cの領域（100nm～280nm）のUVが殺菌作用を示し、特に260nm付近のUVが最大に作用する。

## 2.2 光源について

一般的に殺菌用のランプとして、前述したとおり殺菌作用の大きい260nm付近（正確には253.7nmの輝線）のUVを発光する（表2参照）低圧水銀ランプが使用されている。また、この253.7nmは殺菌効果が高いことから殺菌線と呼ばれている。しかし、殺菌作用のUVは領域を持っていることや表2のとおりランプの種類も多くあることから、最近では、低圧水銀ランプ以外のランプでも用途により有効な場合も出てきている。

表2. 各種光源と特徴

ランプ名	特徴	分光特性/例
低圧水銀ランプ	254nmを主波長として発光していることから殺菌ランプとも呼ばれている。低圧ということから入力(W)の限度があり、4W~1KW程度のランプとなる。つまり、殺菌に作用する放射照度も限度がある。また、高Wになればランプ長が長くなる。	●低圧水銀ランプ 
高圧水銀ランプ	365nmを主波長とし、254nm, 303nm, 313nmのUVを効率よく発光する。低圧水銀ランプより、入力電力(W)から殺菌に作用するUVへの変換効率が悪い(1/5~1/10程度)ただし、入力(W)が多くとれ、30KW程度のももあるので、放射照度が多くとれる。しかし、温度も高温となるので注意が必要。	●高圧水銀ランプ 
パルス発光キセノンランプ	UV領域からIR(赤外)領域まで連続発光。半値幅が100μ秒位でパルスで発光するので瞬間的に低圧水銀ランプの1,000倍以上の放射照度となる。パルス発光であるので基材温度上昇も少ない(ただし、多くの回数照射は温度上昇)。一回に多くの放射照度を得る場合は、電極等に負荷がかかるのでランプ寿命に注意が必要。	●パルス発光キセノンランプ 

また、無電極方式の低圧水銀ランプも2000年頃から下水の消毒用として登場した。本ランプは長寿命で50,000時間となっている。

## 2.3 各種菌UV感受性

UVは殺菌に関して菌種に関係なく全てに対して有効であるが、その必要量は、菌種（大きさ、形状ほか）や環境などで大きく違ってくる。そこで、代表的な微生物に対して99.9%殺菌するのに必要なUV照射量を表3<sup>6)~8)</sup>に紹介する。

また、UV照射による菌類の生存率は、一般的に次式で表される。

$$S = P/P_0 = e^{-Et/Q}$$

ただしS：菌類の生残率

P<sub>0</sub>：UV照射前の菌数

P：UV照射後の菌数

E：有効なUV照度 (mW/cm<sup>2</sup>)

t：照射時間 (秒)

Q：生残率Sを1/e = 36.8%にするのに必要なUV照射線量

#### 1. 4. 2 硬化（樹脂の重合）への利用

UV硬化処理技術は、オリゴマー、モノマー、フォトイニシエータ（光重合開始剤）、顔料などを塗料〈液状〉とし、光（UV）を照射することでラジカル反応やカチオン反応などを起こさせ、高分子化させる〈固体〉技術のことをいう。この処理は無溶剤で樹脂の硬化ができることから、PRTR法、悪臭防止法およびISO14000等の環境に関する規制や管理に対して非常に有利（環境にやさしい）であり、更に迅速な処理、高度な製品品質、省エネルギーなどの特長も有している。それで、本技術により加工された商品は、表4に紹介した応用例のとおり我々は身近に多く見ることができる。この処理を行うUV硬化装置はランプ、照射器、電源および冷却装置で構成される。

##### ○UV硬化用光源

UV硬化用の光源としては、光重合開始剤の光吸収特性とマッチさせることが重要である。一般的に表5に示したランプが、それぞれ特徴を活かして使用されている。この中でも高圧水銀ランプとメタルハライドランプが多く使用され、そのランプ発光の為に加える外部エネルギーの方法により、有電極と無電極のランプがある。それぞれのランプ形状例を図3に示した。有電極ランプは単位発光長当たりの入力電力（W）で表し、80W/cm~280W/cmの負荷のものが一般的に使用されている。

また、有電極方式と無電極方式の装置比較を表6に示した。この点灯方式に於いても、それぞれの特徴を理解し使用する必要がある。有電極装置は一般に知られているので、無電極装置について次に紹介する。

##### ○無電極装置<sup>9)</sup>

無電極方式の発光原理は、図4に示したマグネトロンから発生するマイクロ波を、導波管を通して反射板を兼ねたキャビティ内の先に紹介したランプに吸収させる。同時に点火用ランプから光子（フォトン）をランプに送ると、ランプ内の発光物質が励起され発光するのである。

#### 1. 4. 3 水処理への利用

水処理といっても範囲は非常に広く、先に紹介した殺菌や有害有機物の処理などがあげられ

表 各種の微生物を死滅させるのに必要な殺菌線量

菌 種	殺菌 線 量	培地上の菌を99.9%殺すのに 必要な照射量 (mW・sec/cm <sup>2</sup> )
<i>Protium Fulvum</i> Hsu.	赤 色 菌	3.8
<i>Shigella sonnei</i>	赤 痢 菌 (赤痢菌)	4.3
<i>Shigella Flexneriana</i>	赤 痢 菌 (赤痢菌)	4.4
<i>Ehrlichia typhosa</i>	チ フ ス 菌	4.5
<i>Eubacterium coli commune</i>	大 腸 菌	5.4
<i>Vibrio cholerae-Cholera</i>	コレラ菌	5.5
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	緑 膿 菌	10.5
<i>S. typhimurium</i>	サルモネラ菌	15.2
<i>Streptococcus hemolyticus (Group A-C)</i>	溶血連鎖球菌 (A群)	7.5
<i>Staphylococcus albus</i>	白色ブドウ球菌	9.1
<i>Staphylococcus aureus</i>	黄色ブドウ球菌	9.3
<i>Streptococcus hemolyticus (Group D, C&amp;D)</i>	溶血連鎖球菌 (D群)	10.6
<i>Streptococcus faecalis R.</i>	糞 球 菌	14.9
<i>Mycobacterium tuberculosis</i>	結 核 菌	10.0
<i>Bac. naziensis (var.)</i>	馬 肉 毒 菌	16.0
<i>Bac. naziensis (var.) (Spore)</i>	馬 肉 毒 菌 (芽胞)	21.1
<i>Bac. subtilis Suisamura</i>	結 晶 菌	21.6
<i>Bac. subtilis Suisamura (Spore)</i>	結 晶 菌 (芽胞)	33.3
<i>Bakers Yeast</i>	パン 酵 母	8.8
<i>Saccharomyces aliphanicus</i>	ブドウ酒酵母	13.2
<i>Saccharomyces cerevisiae var. Hansenii</i>	ビール酵母	18.9
<i>Saccharomyces Saka</i>	日本酒酵母	19.6
<i>Zygo-Saccharomyces Barberi</i>	生薑通ロウ	21.1
<i>Wella exanola</i>	ワイリア菌	37.8
<i>Pilchis niyagi</i>	ビビア菌	38.4
種 類	菌 子 の 色	主な培養場所
<i>Coprae lactic</i>	白色	クリーム、バター
<i>Mucor racemosus</i>	灰色	肉
<i>Penicillium roqueforti</i>	青	チーズ
<i>Penicillium erofianum</i>	ブルー	リンゴ、果物
<i>Penicillium digitatum</i>	ブルー	レモン
<i>Aspergillus glaucus</i>	黄緑	土、穀物、乾草
<i>Aspergillus flavus</i>	黄緑	土、穀物
<i>Aspergillus niger</i>	黒	食品
<i>Rhizopus nigricans</i>	黒	食品、腐敗
<i>Paecilomyces-Pedicularis</i>		
<i>Bacteriophage (E. Coli)</i>		
<i>Influenza</i>	インフルエンザ	
<i>Infectious Hepatitis</i>		
<i>Tobacco mosaic</i>	タバコモザイク	
<i>Chlamydia salivaria (Algae)</i>		
<i>Nematode eggs</i>		
<i>Paramecium</i>		

参考文献] 1. JES Lighting Handbook 2nd Ed. 18-21  
2. 河端俊治, 原田常雄: 「殺菌灯による水の消毒」照明学会誌56(3): 89から96, 1952

表 4 UV硬化システムの用途

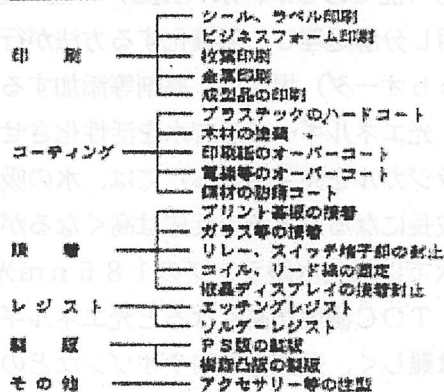


表4 UV硬化システムの用途

印刷	シール、ラベル印刷 ビジネスフォーム印刷 収票印刷 金属印刷 成型品の印刷
コーティング	プラスチックのハードコート 木材の塗料、 印刷版のオーバーコート 電線等のオーバーコート 基材の防錆コート プリント基板の接着 ガラス等の接着
接着	リレー、スイッチ端子部の封止 コイル、リード線の固定 液晶ディスプレイの接着封止
レジスト	エッチングレジスト ソルダーレジスト
製版	FS版の製版 樹膠凸版の製版
その他	アケサザリ等の塗料

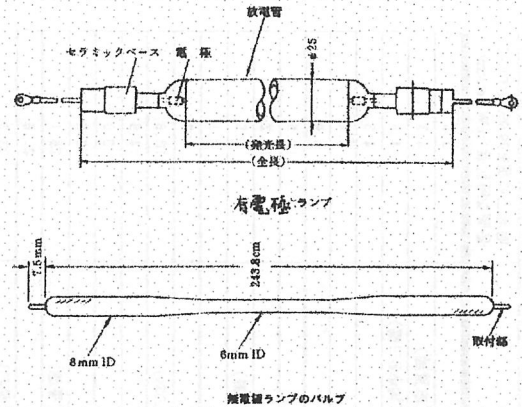


図3 有電極・無電極のランプ形状例

表6 有電極式と無電極式の比較

	無電極方式	有電極方式
出力安定所要時間	短い(秒単位)	長い(分単位)
紫外線発光効率	高い(≒37%)	低い(≒17%)
赤外線放射量	少ない(≒17%)	多い(≒55%)
発光波長選択範囲	4種類	3種類
波長域経時変化	なし	あり

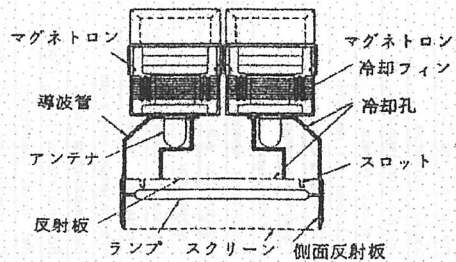


図4 無電極装置(240 W/cm)の断面図例

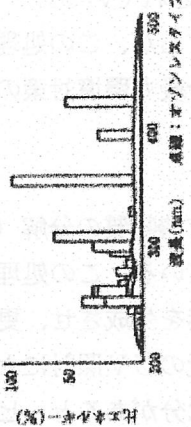
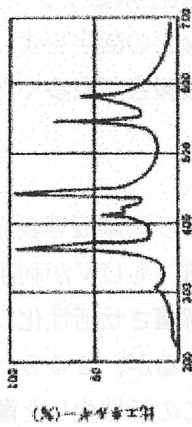
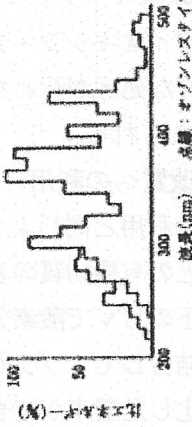
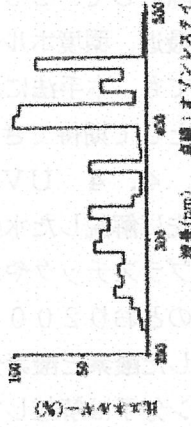
る。ここでは、半導体等で利用される純水中のTOC（全有機物炭素量）濃度の低減や有害有機物処理に関しても光化学反応の利用がされているので紹介をする。

### ○純水中のTOC低減

半導体の洗浄用に純水が使用されるが、その水中のTOC濃度と製品の歩留まりとに相関があり、本濃度管理は非常に重要な因子となっている。近年は、膜技術の進歩によりTOC濃度の低減も可能であるが、水（H<sub>2</sub>O）に近い低分子のアルコール等は膜では分離できないので光を利用し分解処理し、無機化する方法が行われている。この純水中のTOC濃度が非常に低い（ppbオーダー）場合は、薬剤等添加することでも、その数字は大幅に上昇してしまうこともあり、光エネルギーのみで水を活性化させてTOC濃度低減をおこなう。特に水を活性化させる（ラジカルを発生させる）には、水の吸収特性から200nm以下の波長の光が有効であり、短波長になるほどその反応は高くなるが、逆に水中での光りの届く距離も短くなることから、現状では低圧水銀ランプの185nm光を利用してその処理は行われている。

また、TOC濃度が高くなると光エネルギーのみの処理では非常に時間がかかるなど、実用するには難しく、過酸化水素やオゾンなどの酸化剤と併用してTOC濃度低減することが図られている。過酸化水素は300nm以下、オゾンは260nm付近の光を吸収して、水中では

表5、ランプの種類

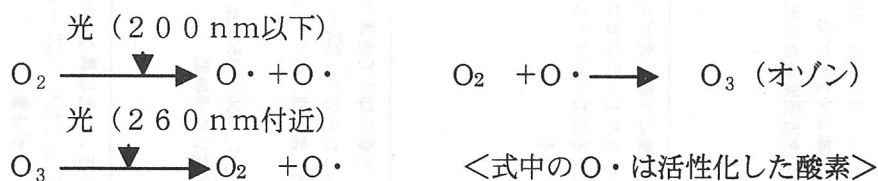
ランプ名	特 徴	分 光 特 性
高圧水銀ランプ	<p>石英ガラス製の発光管の中に高純度の水銀(Hg)と少量の希ガスが封入されたもので、365 nm を主波長とし、254 nm, 308 nm, 313 nm の紫外線を効率よく放射する他のランプよりも短波長紫外線の出力が高いのが特徴</p>	<p>●高圧水銀ランプ</p>  <p>図中の実線はスタンダードタイプ、点線はエノンレスタイプ</p>
超高圧水銀ランプ	<p>高圧水銀ランプと同様に水銀と希ガスが封入(ガス圧約1気圧)されているがガス圧が10気圧以上で作動させるのでスペクトルが線ではなく連続スペクトルとなる。</p>	 <p>●超高圧水銀ランプ</p>
メタルハライドランプ	<p>発光管の中に、水銀に加えて金属をハロゲン化物の形で封入したもので、200～450 nm まで広範囲にわたり紫外線スペクトルを放射している。 水銀ランプに比べ、300～450 nm の長波長紫外線の出力が高いのが特徴</p>	<p>●メタルハライドランプ</p>  <p>図中の実線はスタンダードタイプ、点線はエノンレスタイプ</p>
ハイパワーメタルハライドランプ	<p>メタルハライドランプとは異なった金属ハロゲン化物を封入しており、400～450 nm の出力が特に高いのが特徴</p>	<p>●ハイパワーメタルハライドランプ</p>  <p>図中の実線はスタンダードタイプ、点線はエノンレスタイプ</p>

ヒドロキシラジカル (OH·) という反応性の高いラジカルが発生し、光エネルギーと共に有機物をアタックして分解させる方法で、促進酸化方法 (AOP) とよばれている。それに合う光源として、254 nm 輝線スペクトル発光の低圧水銀ランプが使用されている。

最近、環境ホルモン・ダイオキシン・PCBなどの活字をよく目にするが、この処理方法としても、本手法により良好な処理が行われたとの報告が数多くある。今後も環境対策の処理手法として期待できると考えられる。

#### 1. 4. 4 UV洗浄・改質への利用

先に解説した水処理への利用と同じように、ガラス基板等表面上の有機物質の分解 (洗浄) やプラスチックやゴムなどの有機物質の表面改質にもUVが利用されている。この処理は、次式のとおり200 nm以下のUVで酸素分子を解離させ活性化した酸素を生成させ、更に活性化した酸素と酸素分子が結合してオゾンが生成するが、260 nm付近のUV照射により、オゾン分子は解離して活性化した酸素ができる。この活性化した酸素 (水分があると、ヒドロキシラジカル生成) とUVのエネルギーにより有機物質を無機化したり改質することが行われている。



本技術は、液晶用のガラス基板の洗浄から接着強度のアップや塗装の基材との密着性アップなど多くの分野に利用されている。

この光源として、185 nmと254 nmの両波長を発光する低圧水銀ランプが使用されているが、無電極タイプの172 nm光を発光するキセノンエキシマランプが液晶のガラス基板の洗浄等に利用されるケースが多くなっている。

#### <参考文献>

- 1) 武部 啓 : DNA 修復, 東京大学出版会, 1~19 (1983)
- 2) 山口 彦之 : 放射線と生物, 啓学出版, 51~140 (1981)
- 3) 江上信雄 : 生き物と放射線, 東京大学出版会, 104~113 (1986)
- 4) 芝崎勲 : 防菌防黴 14, 251~260 (1986)
- 5) 照明学会 : ライティングハンドブック, オーム社 (1987)
- 6) IES Lighting Handbook 2nd Ed. 18-21
- 7) 河端俊治, 原田常雄 : 照明学会誌 36 (3), 89~96 (1952)
- 8) 河本康太郎 : New Food Industry 18 (7), 17~23 (1976)
- 9) 瀬尾直行 : ラドテック研究会 第9回UV/E B表面加工入門講座 (1999)

## 第2章 磁界結合形無電極放電の現状

### 2.1 概説

四宮雅樹 (松下電工)

Babatは無電極放電をその結合方式から(1)電界結合形あるいは「E放電」、(2)磁界結合形あるいは「H放電」、(3)マイクロ波放電の3つに分類したが、一般照明用途として実用化されている無電極放電ランプのほとんどは磁界結合形である。電界結合形と比較して効率よく大きな電力を投入できることがその理由である。電界結合形では電流が管壁を通過するが、このときシース電圧で電力消費が起こる。このために電界結合形は大電力に適さない。逆にマイクロ波はその発振に使われるマグネトロンが出力1kW程度以上のものしかなく、用途が限られている。

光源以外に目を向けると、無電極放電の生成法としては上記分類の3つとも使われている。そのうち磁界結合形は電界結合形の場合のシースにおける高エネルギーが避けられること、波長の長い周波数を使うことでマイクロ波に比べると比較的均一な放電を広い領域に形成できる特徴が好まれている。

磁界結合形の無電極放電は放電空間の外に置かれたコイルを1次巻線とし、放電空間内に生起する環状の放電路を2次巻線とするトランスを介して電力の伝達をしていると考えられるが、その形状や使用周波数には多くのバリエーションがある。磁界結合形を含めた無電極放電ランプの概説は以下に掲げる参考文献に詳しい。

#### (参考文献)

- (1) Babat.G.I.: JIEE.Part3, 94, pp.24-37 (1947)
- (2) Eckert,H.V.: High Temperature Science, 6, pp.99-134 (1974)
- (3) Wharmby,D.O.: IEE Proc.-A, 140-6,pp. 465-473 (1993)
- (4) 東方眞, 四宮雅樹: 照学誌, 77-5, pp.238-243 (1993)
- (5) 井上昭浩: 照学誌, 77-12, pp.754-757 (1993)
- (6) 四宮雅樹: 照学誌, 79-12, pp.744-747 (1995)
- (7) 井上昭浩: 照学誌, 81-7, pp.554-557 (1997)
- (8) 四宮雅樹: 照学誌, 82-6, pp.394-397 (1998)

## 2.2. 一般照明用光源分野—3つの無電極蛍光ランプを中心に

野本佳孝 (ニッポ電機)

現在、一般照明用光源分野で実用化されている誘導結合型無電極放電ランプは、3種類の無電極蛍光ランプがある。

松下電工のエバーライト<sup>(1)</sup>はランプと点灯回路が器具一体化し、電磁波漏えい対策を施している。空芯、外巻きコイルのタイプに分類され、下図のように球形発光管にコイルが巻かれている。

ランプタイプは9, 23, 64Wの低～中出力で、寿命60000h (64Wのみ)。

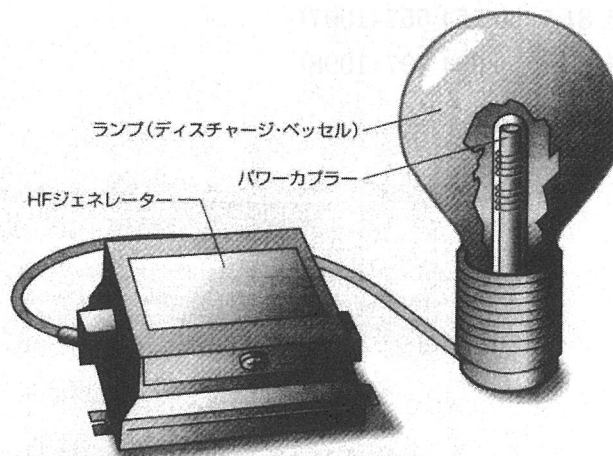
5光色のカラーバリエーションを特徴とし、街路灯、トンネル灯、ガーデンライト、ダウンライト、壁面演出用照明、橋梁用照明に器具化され、設置されている。



フィリップスのQLランプシステム<sup>(2)</sup>は、ランプと点灯回路を40cm程度のケーブルで接続されている。有芯、内巻きコイルのタイプに分類され、下図のように電球形発光管の凹部にコイルが巻かれた棒状のフェライトコアが挿入されている。

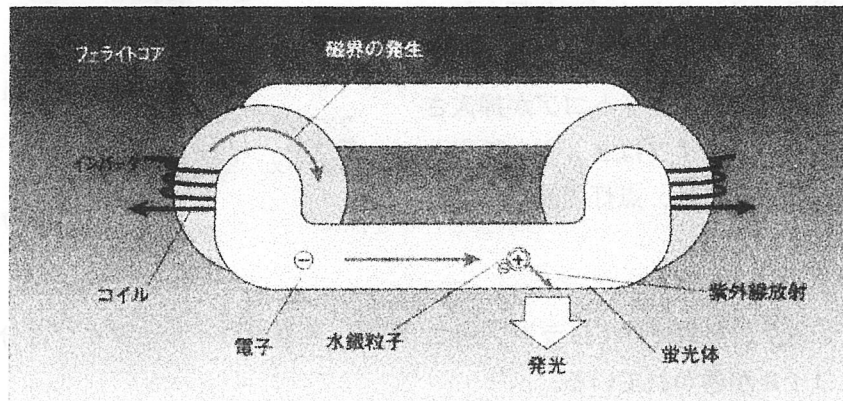
ランプタイプは55, 85, 165Wの中～高出力、寿命60000h。

豊富なランプバリエーションを特徴とし、街路灯、看板用照明、高所やメンテが困難な工業用照明に器具化され、設置されている。



三菱電機オスラムのエンデュラ<sup>®</sup>は、ランプと点灯回路を30cm程度のケーブルで接続されている。有芯、外巻きコイルのタイプに分類され、下図のように口の字ループ発光管にコイルが巻かれたリング状のトロイダルコアが2箇所設けられている。

ランプタイプは100W、150Wの高出力、寿命60000h。  
最大配線長15mを特徴とし、街路灯、トンネル用照明、高所照明に設置されている。



以上3種類の実用化されている無電極蛍光ランプは長寿命が最大の特徴ではあるが、高価であるため、メンテナンス重視の市場が現状の主なニーズとなっている。

その他に、高効率、高演色性、フリッカレス、瞬時点灯、点滅・調光、始動性、温度特性、耐振動性に優れているが、周辺材料における耐用年数の確保、電磁波漏えい対策、そして電安法による50W以上のノイズ規制によって、騒音レベルと雑音端子電圧レベルを申告しなければならないこと等を考慮して利用しなければならない。

\*1 エバーライト50(64W)の定格寿命。

無電極 蛍光ランプ システム	松下電工 エバーライト 器具一体	フィリップス QLランプシステム	三菱電機オスラム エンデュラ
定格寿命	60000h*1	60000h	60000h
入力電力	9, 23, 64W	55, 85, 165W	100, 150W
光出力	低～中出力	中～高出力	高出力
ランプ大きさ	-	140, 180, 210mm	139×313, 414mm
ランプ管径	φ35, 45, 110mm	φ85, 111, 131mm	φ54mm
点灯周波数	13.56MHz	2.65MHz	250kHz
効率	71.1lm/W*2	72.7lm/W*3	80lm/W*4
発光色	EW, EL, EB, EG, ER	EW, EWW, EL	EW, EL
Ra	80	80以上	80
使用温度	-20～40℃	-30～52℃	-25～50℃

\*2 エバーライト50(64W)による効率。

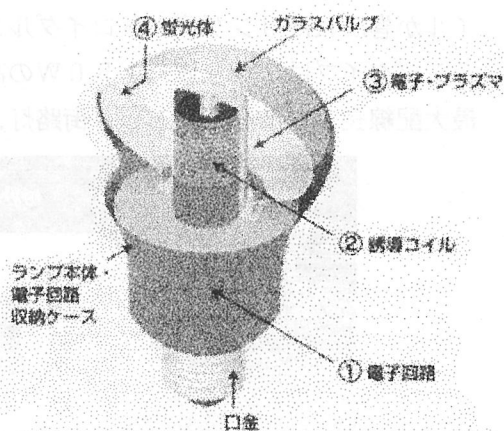
\*3 QL165Wによる効率。

\*4 エンデュラ150(150W)による効率。

その他、実用化されていないが、無電極蛍光ランプ1種類と無電極HIDランプ1種類がある。

日立GEライティングのGenura<sup>(4)</sup>は、ランプと点灯回路を一体化にした電球形無電極蛍光ランプとなっている。

有芯、内巻きコイルのタイプに分類され、右図のように電球形発光管の凹部にコイルが巻かれた棒状のフェライトコアが挿入されている。ランプタイプは23Wの低出力、寿命15000h、点灯周波数2.5MHz。



東芝ライテックの無電極HIDランプ<sup>(5)</sup>は、空芯、外巻きコイルのタイプに分類され、球形発光管にコイルが巻かれている。

ランプタイプは400W、180lm/Wの高効率タイプと300W、60000hの長寿命タイプ、点灯周波数13.56MHz。

#### 参考文献

- (1) 松下電工(株) EVER LIGHT 商品カタログ(2001)
- (2) 日本フィリップス(株) QLランプシステム商品カタログ(2001)
- (3) 三菱電機オスラム(株) ライティング・フェア-2001出展商品カタログ(2001)
- (4) (株)日立GEライティング ライティング・フェア-2001出展商品カタログ(2001)
- (5) 上村ほか：誘導結合型無電極メタルハライドランプの特性向上，照学誌，84-5，pp.312-321(2000)

### 2.3.1 はじめに

無電極放電ランプは従来の白熱ランプのフィラメントや放電ランプの電極の代わりに誘導-磁場を介したエネルギーの伝導とガス放電の組み合わせにより発光するものである。ランプ寿命に影響を与えるフィラメントや電極そのものが無いので長寿命を実現している。また、効率や演色性なども今後さらに向上する可能性を秘めており、次世代のランプとして発展が期待されている。

無電極放電ランプは90年代初めごろ製品化され市場に出始めたが、技術的、法的制約条件が多く従来の光源を使用した照明器具に比べ経済性、実用性に優れた照明器具の製品化が困難であった。しかし、ランプメーカーの技術革新やバリエーションの増加、法規制の整備などがあり、照明器具として経済性、実用性に優れたものが製品化出来るようになって来た。今回、無電極放電ランプを一般用照明光源として照明器具に適用する場合の検討を行った。

### 2.3.2 無電極放電ランプの原理

無電極放電ランプは白熱灯や現在見られる従来型のガス放電ランプと根本的に異なった技術を基礎としている。白熱灯の発光フィラメントや従来の放電ランプに用いられている電極の代わりに、発光は誘導-磁場を介したエネルギー伝導とガス放電を組み合わせで行う。

基本的原理は電気変圧器(図1)と同じである。一次コイル中の交流電流( $I_p$ )によって、これに対応する交流磁場がコアと周辺空間に発生する。つぎにこの磁場が二次コイル中に同じ周波数の電流( $I_s$ )を誘導する。交流周波数が高いほどシステム全体の効率が高くなり、よりコンパクトにすることが可能になる。

例えばA社製の無電極放電ランプでは、変圧器の一次コイルに相当するエネルギー源はランプの誘導コイルで、このコイルは高周波電子部品から供給される。二次コイルに相当するのはランプ内の低圧ガスと金属蒸気である。(図2)誘導電流が有ると金属蒸気中の荷電粒子が加速する。これらの粒子が衝突して、金属蒸気原子が励起されてイオン化し、これらの原子から放出された自由電子のエネルギー・レベルが高く不安定になる。これらの励起された電子は、安定した低エネルギー状態になるときに紫外線を照射する。これがランプバルブ内側の蛍光コーティングに照射されると可視光線を発生する。

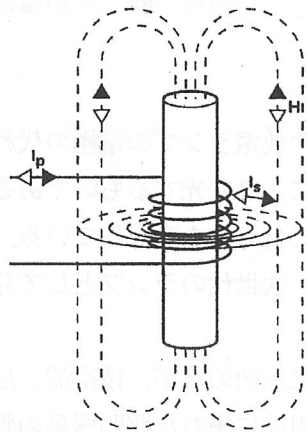


図1. 無電極放電ランプの原理1

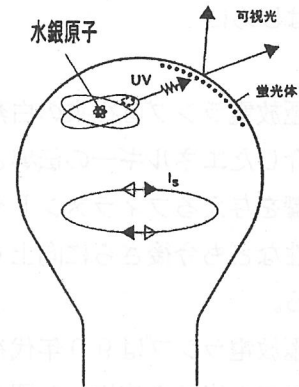


図2. 無電極放電ランプの原理2

### 2.3.3 無電極放電ランプの特徴

#### 1) 長寿命

前述のとおり、無電極放電ランプの最大の特徴は長寿命である。市場に有るものでは公称寿命6000時間のもも有り、単純計算で1日8時間点灯すると仮定すれば約20年間ランプは球切れを起さないことになる。一般照明用途ではまずランプ交換という行為が無くなり、これら作業のメンテナンス費用の抑制が出来る。さらに廃棄するランプの数も減少するので、省資源にもなり、環境負荷物質である廃棄水銀量の減少にもつながる。また道路や街路に使用した場合、ランプ切れによる照度不足の可能性が少なくなるので安全性も向上する。

#### 2) 高効率

市販されている無電極放電ランプのシステムとしてのエネルギー消費効率は約70～80 Lm/Wであり、

他の光源と比較すると高効率な光源に分類される。研究室レベルではさらに効率の良いものが実現されており、今後の発展が期待される。高効率の光源を使用することは、ユーザーにおいては電気代の節約によるランニングコストの低減につながり、社会的な観点からは、省エネルギーによるCO<sub>2</sub>排出量の低減、地球温暖化防止に貢献出来る。

#### 3) 点滅に強い

白熱灯のフィラメントや放電灯の電極は始動時の消耗が激しく、点滅を繰り返すと寿命が著しく低下する。無電極放電ランプは点灯するときに消耗する部分が無いので、点滅による寿命への影響が無い。

#### 4) 演色性が良い

平均演色評価数Raが80以上であり、演色性が良い。演色性が良いと物や人の顔が違和感なく自然に見ることが出来るので、視環境の改善になる。

#### 5) その他の特徴

以上の特徴の他に

- ・即時再点灯が可能

- ・高周波発振のためランプにちらつきが無い。
- ・電極が無いので振動に対して強い。

等が挙げられる。また表1に各種光源との比較表を表す。

表1. 各種光源との比較表

光源	入力電力 (W)	ランプ光束 (Lm)	効率 (Lm/W)	寿命 (時間)	平均演色評価 数 R a
白熱電球	100	1520	15.2	1000	100
ハロゲンランプ	100	1500	15.0	1500	100
蛍光ランプ	44	3000	68.2	12000	61
Hf 蛍光ランプ	49	4500	91.8	12000	88
高圧水銀ランプ	265	12700	47.9	12000	40
高圧Naランプ	200	19000	95.0	12000	25
無電極放電ランプ	165	12000	72.7	60000	80以上

注) 入力電力は点灯回路の損失を含む。(入力電圧200V)

### 2.3.4 照明器具設計時の留意点

#### 1) 器具の耐用年数

無電極放電ランプの最大の特徴は60000時間という寿命である。1日8時間点灯の場合には約20年、1日12時間点灯の場合には約14年もの間、ランプは寿命を迎えることは無い。しかし、ランプが寿命を迎えるよりも早期に照明器具が絶縁性能の劣化や構成部品の機械的な損傷、腐食等により寿命を迎えては無電極放電ランプの特徴を生かすことが出来ない。一般に照明器具の寿命は8年～10年、耐用年数は15年(社団法人 照明器具工業会「照明器具リニューアルのおすすめ」より)であるが、15年程度の耐久性を持つ設計が望ましい。そのためには使用環境を良く把握し、材料、構造の吟味が必要である。特に電線など絶縁材料の熱、紫外線による劣化、屋外で使用されるものについては防水パッキンの劣化、筐体や取り付け部の腐食に注意が必要である。

#### 2) ノイズ対策

無電極放電ランプは高周波点灯しているため、妨害波による他の機器への影響が懸念される。国内では幾つか法律による規制がある。まず電波法によってランプシステムでの漏洩電界強度が規制されている。(表2) 従来、出力50Wを超える無電極放電ランプ照明器具を設置する場合は、設置場所ごとに総務省(旧郵政省)の許可を得なければならなかった。しかし1999年7月に電波法が改正され、あらかじめ型式認可を受けたランプシステムを使用した照明器具については設置場所ごとの申請が不要になった。このことによって設置する際の手間や手続きが不要になり、通常の照明器具と同じように販売できるようになった。ランプシステムで型式認可を受けたランプを使用するので、照明器具側で漏洩電界強度に対する対策を施す必要も無くなった。

表2. 電波法—施行規則第45条第3号

周波数	200kHz～300kHz 2. 2MHz～3MHz、13.56MHz (±) 6.78kHz
高周波出力	200W以下
漏洩電界強度	基本波 (200kHz～300kHz) 300μV/m以下 中域波 30μV/m以下 その他帯域 (2. 2MHz～3MHzも含む) 100μV/m以下

次に照明器具として電気用品安全法によって雑音電力と雑音端子電圧が規制されている。(表3、表4) これらは照明器具側での対策が必要であり、ノイズの発振元であるランプや点灯回路近傍のアースを確実に取ることが必要である。高周波のノイズは照明器具の表面に伝播するので面でアースを取れば効果が有る。

表3. 電気用品安全法—雑音電力の許容値

周波数範囲 (MHz)	雑音電力 (dB)
30以上300以下	55

表4. 雑音端子電圧の許容値 (50Ω/50μH・V形擬似電源回路網による方法)

周波数範囲 (MHz)	雑音電力 (dB)
0.5265以上5以下	55
5を超え30以下	60

### 2.3.5 実用例

照明器具の実用例として街路灯、歩道灯、足元灯、トンネル灯などがある。(写真1に街路灯、写真2にトンネル灯を表す。) また、長寿命という特徴を最大限に生かしたものとして大型橋のライトアップ器具などが有る。

現在、照明器具として実用されたものが少しずつ市場に出始めたが、コストなどの面から既存光源の置き換えはまだ難しく、最初はメンテナンスが困難でコストのかかる場所を中心に市場が広がって行くと思われる。



図1. 街路灯の実用例

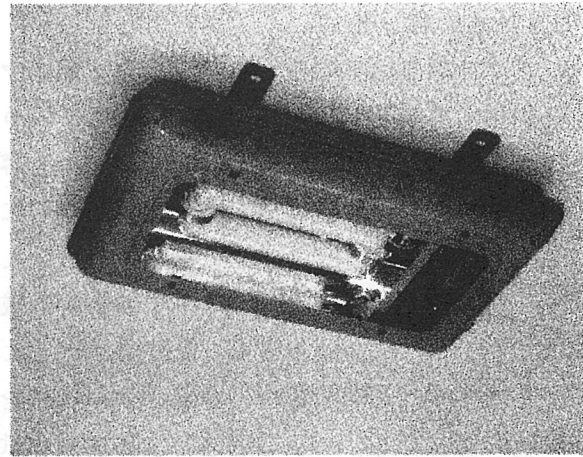


図2. トンネル灯の実用例

### 2.3.6 今後の課題～無電極放電ランプに期待すること～

#### 1) 光源の小型化

光源が小型になれば、器具形状も小さく出来るので材料費を低減することが出来る。また、発光部が小さければ反射板による配光制御が容易になり、器具効率の良い照明器具が実現出来る。

#### 2) 形状

電球形だけでなく、直管形や環形、コンパクト形の蛍光ランプなど他の従来光源と類似の形状が揃えば、器具意匠設計時の自由度が広がり既存照明器具の置き換えがスムーズに行えると思われる。

#### 3) コスト

無電極放電ランプが市場へ浸透するためには、既存照明器具との経済比較で勝ることが必要であり、ランプシステムのさらなるコストダウンが望まれる。

#### 4) 光出力

市販されている無電極放電ランプの光束は12000 Lmまでである。道路灯や街路灯では20000 Lm～30000 Lmの水銀ランプや高圧ナトリウムランプが多く使用されており、光出力の大きなものが出来れば、これらの市場への参入が可能になる。

#### 5) 効率

無電極放電ランプの効率は70～80 Lm/W程度で高効率の部類に入るが、高圧ナトリウムランプやHf 蛍光灯に比べると劣る。CO<sub>2</sub> 排出による地球温暖化防止の観点からも、照明の省エネ化への社会的ニーズは大きく、今後更なる効率の向上が望まれる。

### 2.3.7 さいごに

既存光源は技術的に成熟期に入っており、飛躍的な技術革新は期待出来ない。無電極放電ランプはあらゆる面においても向上していく可能性を秘めており、一般用照明光源として今後の技術革新に期待する。

## 2.4 イオン源分野

松岡 守 (三重大学)

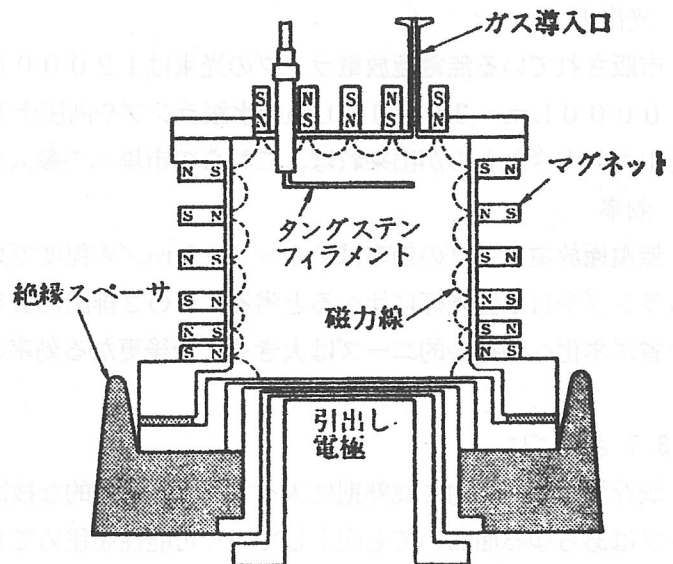
イオン源には気中放電を利用するプラズマ・イオン源と、金属表面と原子間の相互作用を利用する表面効果イオン源がある。このうちプラズマ・イオン源のプラズマ発生の手段は当初は熱電子を放出するフィラメントと容器壁との間の直流放電によるものが主体であったが、次のような理由で高周波放電が現に利用、あるいは利用されつつある。

- 1) 化学的に活性な物質も取り扱えること
- 2) イオンビーム中の不純物を低減できること
- 3) 信頼性が高く、長寿命であること

1) は例えば直流放電なら金属電極に損傷を与えたり、あるいは絶縁膜を形成するような物質の場合でも、ガラス窓越しに高周波を供給し、イオンビームを得ることが可能であることが挙げられる。2) は電極の蒸発、損傷に基づく不純物発生が無電極放電ではなくなることによる。3) はどの分野でも望ましい事であるが、特に核融合炉向けのイオン源ではイオン源が放射環境下に置かれるためにフィラメント交換が容易ではなくなるという運用上の問題から高周波イオン源の開発が進められている。

高周波型イオン源にも電界結合型、磁界結合型、ヘリコン波及びマイクロ波イオン源がある。このうち磁界結合型は、静磁界がない状態で高密度、大面積、低不純物のプラズマが発生可能で、こうした特性が利用上大きな意味を持つイオン源に利用されつつある。

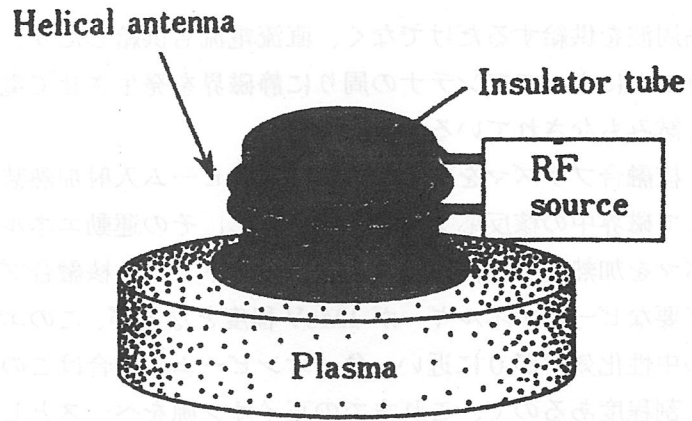
直流放電に基づくイオン源も多種多様である。図1はその一種である多極磁界型イオン源である<sup>1)</sup>。放電容器の周りにはカスプ磁界を形成する磁石が取り付けられており、一様で高密度のプラズマが効率よく大きな領域に形成される。イオンビームは引き出し電極に開けられた多数の穴から引き出される。磁界結合型イオン源の場合は図1のフィラメントを取り去り、代わりに高周波アンテナを取り付ける。図2は取り付けられるアンテナの種類を3種の型に分類して示したものである<sup>2)</sup>。(a)は円筒状に巻いたヘリカルアンテナ、(b)は平面上に巻いたスパイラルアンテナで、いずれも真空容器の外側に設置し、絶縁窓を介してプラズマと結合させるものである。(c)はプラズマの内部に挿入するタイプのアンテナである。(a)の場合、コイル内部のプラズマ発生部からその下方の広い領域に広がる静磁界を発生させてその磁力線に沿ってプラズマを広げる場合もある。(b)は大面積のイオン源を得るためにはプラズマの体積が大きい必要はなく、シート状のプラズマで充



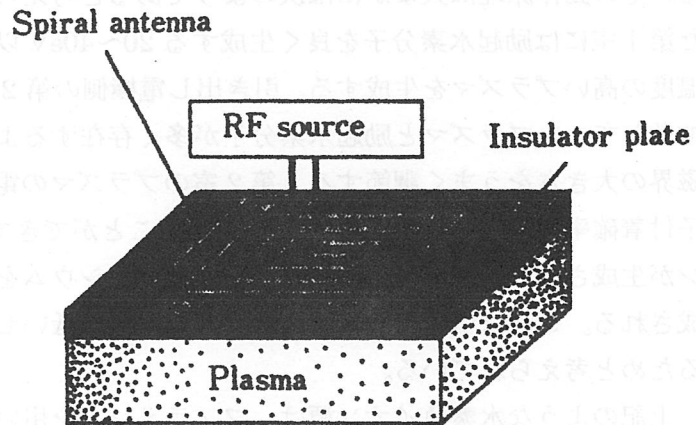
分であるという発想から生まれたものである。(c)はアンテナとプラズマとの結合が最も強く高密度プラズマを得るのに都合が良い。

磁界結合型プラズマの場合、高周波パワーを徐々に上げてゆくとあるところでプラズマ密度が不連続に高くなる「密度ジャンプ」がしばしば観測される。密度ジャンプは場合によっては一桁近くになることもある。この密度ジャンプはイオン源の制御性を損なうものであるが、(c)の結合の強いアンテナの場合は密度ジャンプが起こりにくくなり、また起こった場合も密度ジャンプの幅が低減されることが、理論的にも実験的にも確かめられている<sup>3)</sup>。

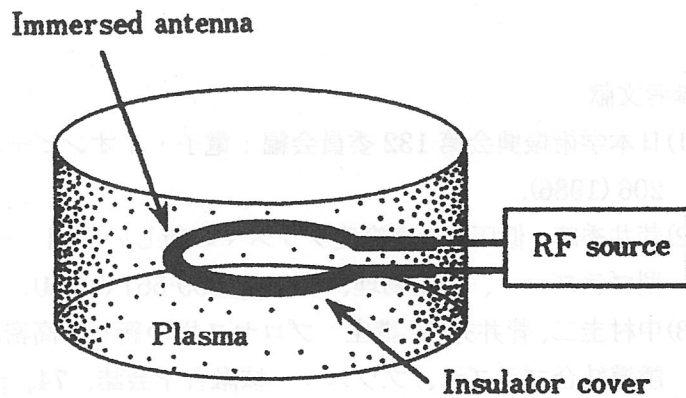
(c)のようにプラズマの内部にアンテナを挿入するタイプの場合、高周波によってアンテナ付近の電子が加速されてアンテナに吸収されるためにプラズマ電位が高周波パワーと共に高くなる。このためにアンテナとプラズマとの間で局所放電が起こるようになる。この局所放電は不純物源になると共に、アンテナに損傷を与え、その寿命を縮める。これを防ぐためにアンテナを絶縁皮膜で覆う方法もとられているが、高周波パワーが大きい場合は絶縁皮膜も壊してしまう。そこで、アンテナに



(a)ヘリカルアンテナ



(b)スパイラルアンテナ



(c)挿入タイプのアンテナ

図2 磁界結合型の基本型<sup>2)</sup>

高周波を供給するだけでなく、直流電流も供給したり、あるいはアンテナに磁石を埋め込むことによってアンテナの周りに静磁界を発生させて電子がアンテナに吸収されるのを防ぐ試みもなされている。

核融合プラズマを加熱する中性粒子ビーム入射加熱装置は、水素イオンビームを中性化して磁界中の核反応プラズマに入射し、その運動エネルギーを熱化させることによりプラズマを加熱する装置である。ターゲットとなる核融合プラズマの長大化に伴い実用炉では必要なビームエネルギーが 1MeV 程度となるが、このエネルギー領域では正イオンビームの中性化効率が 0 に近い。負イオンビームの場合はこのエネルギー領域でも中性化効率が 6 割程度あるので、これまでの正イオン源をベースとしたものから負イオンをベースとした装置へと方式が移行しつつある。水素負イオン源も数種があるが、中性粒子ビーム入射加熱装置用に用いられつつある主な方式は、図 1 の多極磁界型イオン源のプラズマ生成部の引き出し電極付近に静磁界をかけてプラズマ生成部を磁氣的に 2 室に分離したものである。その動作原理は大まかには次のようであると考えられている。引き出し電極から離れた第 1 室には励起水素分子を良く生成する 20~40eV 以上の電子を含むように比較的電子温度の高いプラズマを生成する。引き出し電極側の第 2 室には第 1 室から磁界を横切って拡散してきたプラズマと励起水素分子が多く存在するようになる。ここで 2 室を分離する磁界の大きさをうまく調節すると第 2 室のプラズマの電子温度を、励起水素分子の解離電子付着確率の最も高い 1eV 程度に低くすることができて、全体として効率よく水素負イオンが生成される。さらにプラズマ生成部内にセシウムを添加すると水素負イオンが多く生成される。これは引き出し電極面上で仕事関数の低いセシウムが水素原子に電子を供給するためと考えられている。

上記のような水素負イオン源は、フィラメントを用いた直流放電によるものについてはすでに実用化されている。一方、高周波放電を用いると第 2 室の電子温度が直流放電の場合ほど低くならず、負イオンの生成効率があまり良くないとの報告がある。これを含め、水素負イオン源への高周波放電の適用、改良は今後委ねられている。

#### 参考文献

- (1) 日本学術振興会第 132 委員会編：電子・イオンビームハンドブック第 2 版、日刊工業、206 (1986).
- (2) 菅井秀郎：低圧力・高密度プラズマの新しい展開 — ECR、ヘリコン波および誘導結合型プラズマ —、応用物理、63、pp.559-567 (1994).
- (3) 中村圭二、菅井秀郎：講座 プロセス用の新しい高密度プラズマの生成と診断 III 3. 誘導結合プラズマ、プラズマ・核融合学会誌、74、pp.155-159 (1998).

### 第3章 マイクロ波放電の現状

#### 3.1 概説

神藤正士(静岡大学)

マイクロ波放電は、RF 放電と同様に無電極で放電が可能のために長寿命で高効率の光源の開発に適した放電が得られる。しかし光源に適した放電は、一般に動作条件が放電開始と維持に困難な場合が多く、また、放電装置からのマイクロ波漏洩が問題となる。

マイクロ波放電の基礎研究には長い歴史があり、多くの優れた研究業績が公表<sup>1)</sup>されている。放電物理の観点から、S. C. Brown 等は、空洞共振器を用いた放電装置によりマイクロ波放電開始の精密な計測を行い、理論値と良い一致を見ている。電子サイクロトロン共鳴 (ECR) を利用する低気圧マイクロ波放電に関しては、核融合研究の分野で膨大な研究<sup>2)</sup>が行われている。この研究成果をベースとして、 $10^{-5}$  Torr 台で低気圧高密度プラズマが得られる ECR プラズマがプロセッシング用プラズマ源として開発され、半導体製造の分野で広く利用されている。しかし、マイクロ波放電を光源に利用する研究は少なく、光源に適したマイクロ波放電の生成法は未だ確立されているとは思われない。

周知のようにマイクロ波放電は封入ガス圧と外部磁界の有無により、その様相を大きく変える。光源への応用を考えたとき、ガス圧は大気圧近くの高圧かもしくは  $10^{-3}$  Torr 以下の低圧であることが望まれる。低気圧下では電子の平均自由行程が長く、プラズマ中の電子は中性粒子とほとんど衝突することが無いため、電子がマイクロ波から獲得したエネルギーをマイクロ波の一周期で平均すると零に近い値であり、エネルギーの吸収は少ない。このため外部磁界により電子サイクロトロン共鳴を利用することによりマイクロ波により電子を加速すると同時に実効的な電子の衝突周波数を増大させて放電の維持を行っている。ECR プラズマは  $10^{-5}$  Torr 台の低気圧で高密度プラズマを生成できることであり、外部磁界がプラズマの拡散損失を低減できる効果もあるので、プラズマプロセッシング用プラズマ源に広く利用されている。高気圧では、電子の衝突周波数が高くサイクロトロン運動の一周期に多くの衝突が繰り返されてエネルギーを失うために、電子サイクロトロン共鳴のエネルギー輸送効果は著しく阻害される。この結果、高気圧プラズマでは磁界に対して大きな効果を期待できない。

無磁界でのマイクロ波放電に関しては、電子の衝突周波数  $\nu_{en}$  がマイクロ波周波数  $\omega$  に等しいときに放電が生じやすいことが知られている<sup>1), 3)</sup>。このとき放電開始の電界強度は最低でおおよそ数  $100$  V/cm である。アルゴンの場合、 $\nu_{en} \sim \omega$  の条件を満たすガス圧は、 $1 \sim 10$  Torr である。皮肉なことに、ランプ効率の観点からはこの圧力は不具合である。高気圧マイクロ波放電に関しては、従来から空洞共振器やパラボラアンテナを利用した方法<sup>4)</sup>が利用されてきた。これは共振器内部<sup>5), 6)</sup>やパラボラアンテナの焦点部にマイクロ波電力を局所的に集中させることによって放電開始に必要な電界強度を得ている。2.45 GHz マイクロ波を用いた場合、この方法での放電装置はサイズが大きくなり、光源としての利用範囲が限られたものとなる。

最近になって、マイクロ波の表面波モードを利用して、無磁界の条件で効率の良いマイクロ波放電を発生させる研究が報告<sup>7)</sup>されている。 $10$  mTorr から  $200$  mTorr の Xe ガスを用いて、内径 22mm、外径 25mm、長さ 1.6m のパイレックスガラス管に 5mm の間隔を持たせて設置された銅リングに 4.2 MHz の電磁波を印加することにより表面波を励起している。1

0 0 mTorr～2 0 0 mTorr の圧力での UVU 光(1 4 7 nm)の効率 (1 4 7 nm の光出力/電磁波入力) は数1 0 %に達しており、効率の良い光源としての可能性を秘めている。同様のデータは、マイクロ波に対しても得られるものと思われる。

無磁界でマイクロ波放電を発生させるには、スロットアンテナを励起子とする表面波励起プラズマが適している。これは、マイクロ波電力が、スロットアンテナ付近に集中し、放電を容易にすることに起因する。最近我々は、表面波プラズマにより大気圧から1 0 mTorr までの広い圧力範囲にわたって安定な放電を維持する実験を行い、有望な結果<sup>8)</sup>を得ている。2. 4 5 GHz マグネトロンからのマイクロ波を同軸モードに変換した後、その先端部にスリットをきって表面波励起子とする。直径5 5 mm、高さ1 0 0 mm の石英放電管の底部から中心軸に沿って長さ6 8 mm、直径1 3 mm の石英管を放電管内部に凹型に取り付け、その内部に上記の励起子を挿入し、放電管内部から表面波プラズマを励起する。表面波プラズマは、遮断密度以上の高密度プラズマが生成されるため、マイクロ波電力の漏洩の無い放電を維持することができる。これはマイクロ波が高密度プラズマによって遮断されるからである。放電管のサイズを直径1 0 mmまで小型化すると、放電に必要なマイクロ波電力は1 0 Wまで落とすことができる。発光効率の評価に関しては今後の研究課題であるが、マイクロ波表面波プラズマにより高効率の光源を実現できる可能性が高い。

#### 参考文献

- 1) S.C.Brown:"*Basic Data of Plasma Physics*", MIT Press, Cambridge,Mass., (1959), "*Introduction to electrical discharges in gases*",Wiley, New York (1996)
- 2) F.F.Chen:"*Introduction to plasma physics*", Plenum Press, New York and London (1974) p.67
- 3) A.D.MaxDonald:"*Microwave Breakdown in Gases*",John Wiley & Sons Inc.
- 4) C.M.Ferreira and M.Moisan:"*Microwave Discharges Fundamentals and Applications*",Nato ASI Series, Plenum Press, New York and London (1993) p.427
- 5) S.Offermanns:"Electrodeless high-pressure microwave discharges", J.Appl.Phys. **67** (1990) 115
- 6) B.Weber, and R. Scholl:"A new kind of light-generation mechanism : Incandescent radiation from clusters", J.Appl.Phys., **74** (1993) 607.
- 7) N.M.Gibson, U.Kortshagen, and J.E.Lawler:"Investigation of the 147 nm radiative efficiency of Xe surface wave discharge", J.Appl.Phys. **81** (1997) 1087.
- 8) T.Nakamura,M.Shido, A.Etoh, M.Kando, and H.Matsuo:"Application of microwave surface wave discharge to the electrodeless discharge lamps", 16th ESCAMPIG-5th ICRP,(July 14-18, 2002, Grenoble, France)

## 3.2 イオン源分野

### 3.2.1. インチ対応 UHF プラズマ源

寒川誠二(東北大学)

Fig. 1 に 12 インチ対応 UHF プラズマ源を示す。<sup>(1)-(6)</sup>周波数として 500MHz を用い、バンドパスフィルターを応用したスポークアンテナにより磁場を用いず、30cm 径以上の大口径プラズマを均一 ( $\pm 5\%$ ) に低電子温度 (1-2eV) で高密度 ( $10^{11}\text{cm}^{-3}$  以上) に生成できる事が分かっている。<sup>(2)</sup> 30cm 径以上で均一で高密度なプラズマが生成されており、スポークアンテナによるプラズマ生成は大口径化に十分対応できることを示している。この時、塩素プラズマ密度を  $8 \times 10^{10}\text{cm}^{-3}$  一定とした場合の各プラズマ源における電子温度を検討し、UHF プラズマは同じ密度を得るのに従来プラズマ(ICP および UHF) に対して低電子温度で実現できることが分かった。

Fig. 2 に  $\text{C}_4\text{F}_8$  ガスプラズマの発光スペクトルを示す。 $10^{11}\text{cm}^{-3}$  以上の高密度プラズマでありながら、UHF プラズマでは  $\text{CF}_2$  の発光強度の強い低解離プラズマであることを示している。一方、誘導結合プラズマでは  $\text{CF}_2$  の発光強度が殆どなく逆に相対値として F 原子の発光強度が強くなっていることから解離反応は強く進んでいることを示している。UHF プラズマは低圧で高密度プラズマ生成と低解離を同時に実現できることから、ゲート電極エッチング、Si トレンチエッチング、酸化膜エッチングにおけるマイクロローディングや選択性の改善には有効であると言える。

### 3.2.2. UHF プラズマによるエッチング特性

上述した UHF プラズマを特徴付ける特性をまとめると (1) 低解離高密度プラズマである、(2) イオン化率の圧力依存性が少ない、ということが挙げられる。これらの特徴は実際のエッチングにおける高精度化に対しても大きな寄与をする。

Fig. 3 に UHF プラズマおよび通常の ICP (13.56MHz) における塩素解離度のパワー依存性を示す。ソースパワー 1kW で両プラズマ源とも電子密度は  $1 \times 10^{11}\text{cm}^{-3}$  である。この時、UHF プラズマでは解離度 30% 程度であるが ICP では 70% 程度になっており、UHF プラズマでは高密度プラズマであるにもかかわらず、圧倒的に解離度が抑制されていることを示している。これは既に述べたように UHF プラズマにおいては電子エネルギー分布が非マックスウエル分布であることに対応していると考えられる。

塩素プラズマにおける解離度はアルミ電極エッチング中のサイドエッチング、ゲートポリシリコン電極エッチングにおけるドーパント依存性などに大きな影響を与える。Fig. 4 は塩素の解離度とアルミ電極エッチング時のサイドエッチング量を示している。この結果から Cl は  $\text{Cl}_2$  に比べアルミとの吸着反応性が高くサイドエッチング量を大きくする事が分かる。UHF プラズマでは解離度が低く抑えられているので塩素ガスのみでも異方性エッチングが実現できることを示している。また、最近 P 型と N 型ゲート電極を同時に形成するデュアルゲートエッチングが必要不可欠になっているが、ポリシリコンに対するドーパントによるエッチング速度依存性も塩素プラズマの解離度に大きく依存する事が分かってきた。Fig. 5 に UHF プ

ラズマと ICP におけるポリシリコンエッチング速度のドーパント依存性を示す。ICP ではドーパント依存性が大きく、特に N 型ゲートポリシリコンのエッチング速度が速くなっている。この現象は昔から良く知られた現象であり、吸着した塩素原子がポリシリコン内に多量に存在する電子により電場拡散するため、シリコン表面に塩素の厚い吸着層を形成することとなる。その結果、吸着反応速度が速くなり、N 型ポリシリコンではエッチング速度が速くなると考えられている。UHF プラズマでそのドーパント依存性が抑制されるのは解離度が低く吸着反応が激しい Cl 原子が少なく吸着反応が抑制されるためである。つまり、Cl<sub>2</sub> は Cl に比べて吸着しにくく、また、電場拡散しにくいいため吸着反応が抑えられると考えられる。

一方、イオン化率の圧力依存性が少ないという特徴はエッチング特性のマージンを大きくするために有効である。Fig. 6 に塩素ガスのみを用いて UHF プラズマおよび ICP によりポリシリコンおよび酸化膜をエッチングした結果を示す。圧力以外は全ての条件を一定としてエッチングを行った。特徴的なことは、UHF プラズマでは酸化膜に対して 50 以上の選択性が確保される圧力範囲は 20mTorr 以下と広いことが分かる。一方、ICP では UHF とは全く異なり、酸化膜に対して 50 以上の選択比を得られる圧力範囲は 3mTorr 以下であった。ポリシリコンのエッチング速度は基板に入射するイオン密度、イオンエネルギー、中性粒子密度に依存するが、酸化膜のエッチングはイオンエネルギーに主に依存する。つまり、基板に入射するイオン電流の変化を反映して基板への入射イオンエネルギーが変化する。そのため、これらのエッチング特性依存性は UHF では 20mTorr 以下の広い範囲で低イオンエネルギーが維持されているが、ICP では 3mTorr 以下でないと低イオンエネルギーが実現されていないことを意味している。基板バイアスパワーを一定にしてあるため、この条件下でイオンエネルギーを決定するのは基板に入射するイオン電流であると考えられる。つまり、UHF では広い圧力範囲で高イオン電流密度を維持できるが、ICP では低圧力条件下のみで高イオン電流が実現できることを示唆している。UHF および ICP 塩素プラズマにおけるイオン電流を測定した結果と完全に対応しており、UHF プラズマでは高選択エッチングのプロセスウインドウが ICP に比べて広いことが分かった。これは、UHF プラズマの電子エネルギー分布が圧力に依存しにくいことによると考えられる。

同様の効果は酸化膜エッチングにおいても確認されている。微細コンタクトホールのエッチングにおいて選択性、高速性、マイクロローディングフリーを同時に実現するためには、数 mTorr 台の圧力で高密度プラズマを生成しながら CF<sub>2</sub> ラジカルを多量に生成する低解離プラズマが必要である。Fig. 7 に UHF プラズマと誘導結合プラズマにおける Si に対する SiO<sub>2</sub> エッチングの選択性の圧力依存性を示す。<sup>(6)</sup> 誘導結合プラズマでは圧力が低下するに連れて選択性が劣化するが、UHF プラズマでは低圧でも選択性が維持されている。これは UHF プラズマが低圧領域でも低電子温度が維持されているため相対的に CF<sub>2</sub> ラジカルが多いことに対応する。

このように UHF プラズマでは 0.1 μm レベルの高精度ゲート電極、コンタクトホ

ールエッチングを実現できている。

### 3. 2. 3. まとめ

UHF プラズマと 13.56MHz との比較からエッチングプラズマにおける電子エネルギー分布の影響について述べてきた。プラズマプロセスにとって気相でできる活性種を如何にして制御するかが鍵であるが、そのためには電子温度だけでなく電子エネルギー分布を精度よく制御する必要があることを示した。特に UHF-VHF 帯の周波数を用いたプラズマは、電子エネルギー分布が非マックスウエル分布になっており高密度低解離プラズマが実現でき、また、電子エネルギー分布の圧力依存性が少ないという特性を持っている。今後の高精度エッチングプロセスでは高密度低解離プラズマが必要不可欠であり、さらにはガス構造と電子エネルギー分布を組み合わせた活性種の選択生成が重要となるであろう。

### 3. 2. 4. 参考文献

- (1)S.Samukawa, Y.Nakagawa, T.Tsukada, H.Ueyama and K.Shinohara, Appl. Phys. Lett., 67 (1995)1414.
- (2)S.Samukawa, Y.Nakagawa, T.Tsukada, H.Ueyama and K.Shinohara, Jpn. J. Appl. Phys., 34(1995)6805.
- (3)S.Samukawa and T.Nakano, J. Vac. Sci. Technol., A14(1996)1002.
- (4)S.Samukawa, H.Ohtake and T.Tsukada, J. Vac. Sci. Technol., A14(1996)3004.
- (5)S.Samukawa and T.Tsukada, Jpn. J. Appl.,36(1997)L1354.
- (6)T.Tsukada, H.Nogami, Y.Nakagawa, E.Wani and S.Samukawa, Thin Solid Films, 341(1999)84.

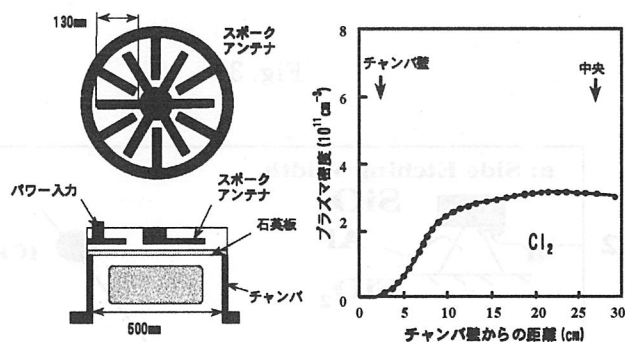


Fig. 1

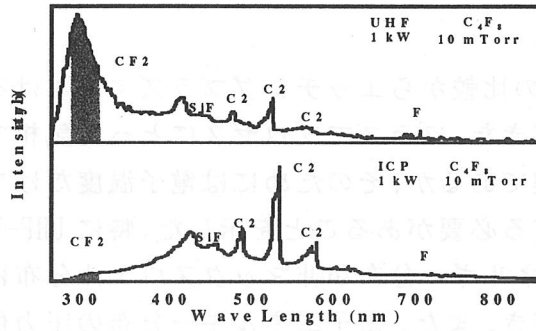


Fig. 2

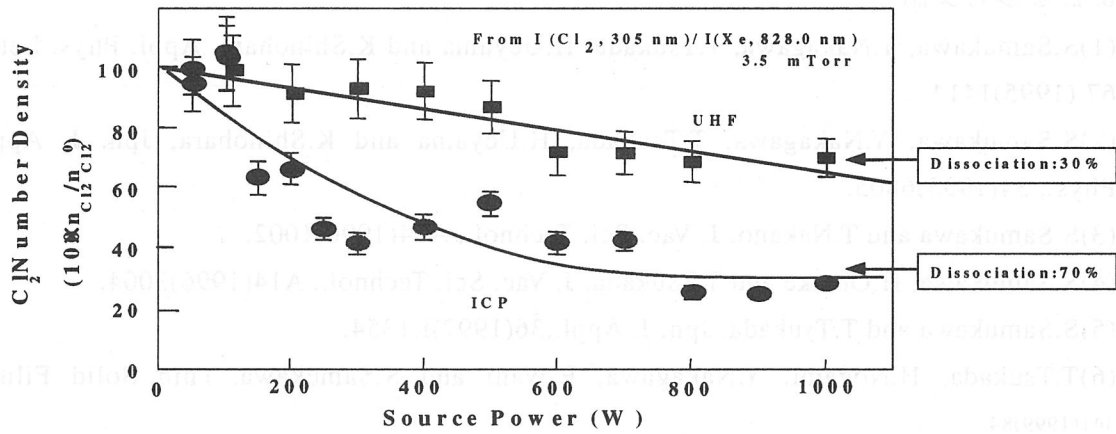


Fig. 3

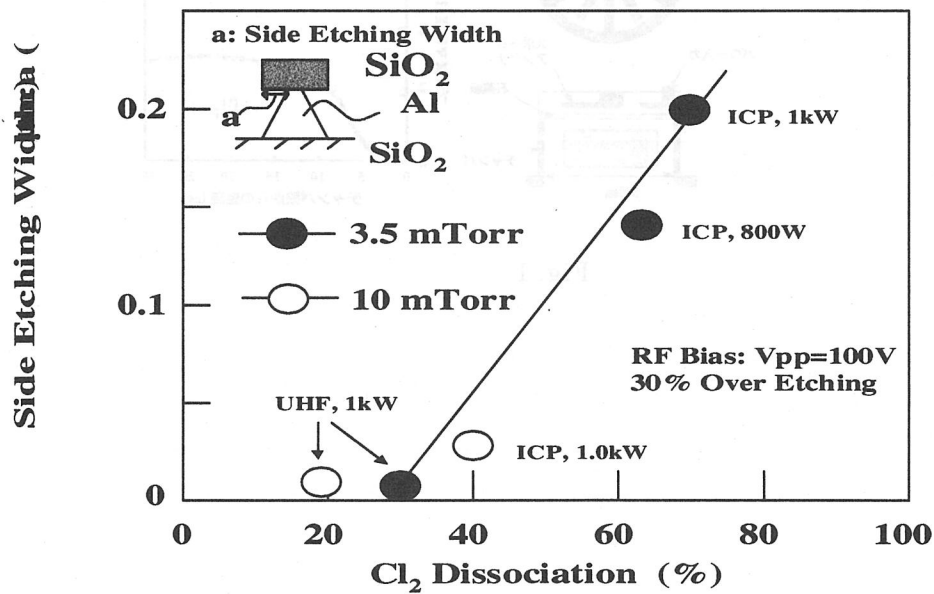


Fig. 4

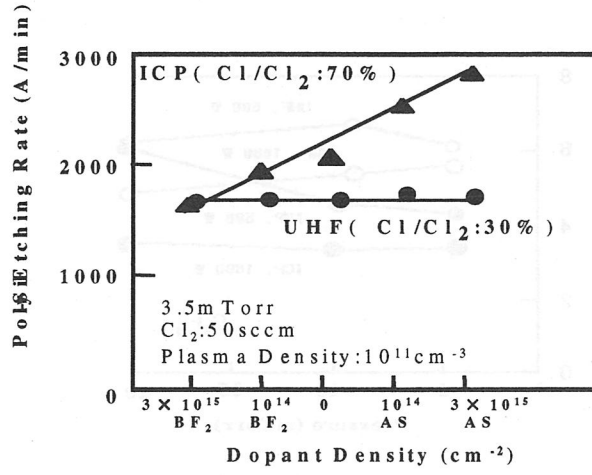


Fig. 5

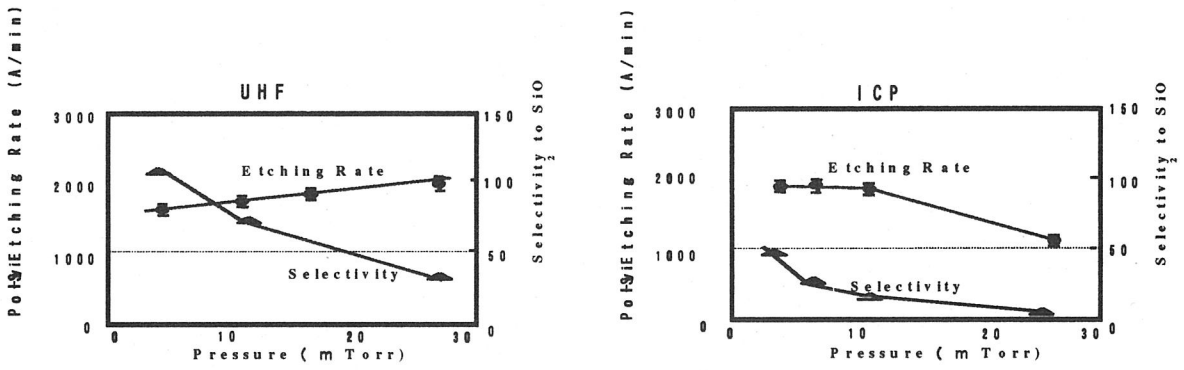


Fig. 6

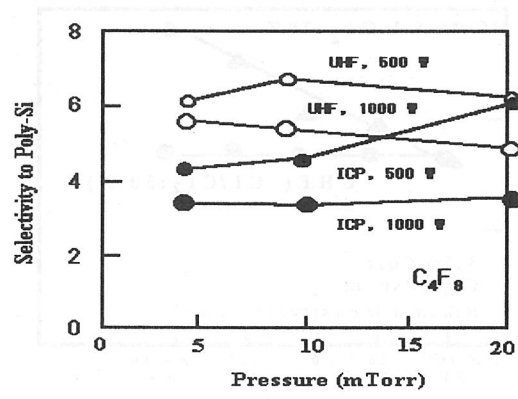


Fig. 7

## 1. はじめに

環境はじめ生体や半導体などの先端技術分野では、物質の中などに含まれている極微量( $10^{-12}\text{g/g}$  -  $10^{-15}\text{g/g}$ : part per trillion; ppt - part per quadrillion; ppq) の元素を分析する質量分析(MS)や原子発光分析(AES)が不可欠になっている<sup>1)</sup>。

これまで、高周波(27 MHz など)電力を用いた大気圧アルゴンプラズマを分析試料の励起・イオン化源とする Ar ICP-AES や Ar ICP MS が用いられてきた<sup>1)</sup>。とくに、Ar ICP-MS は高感度で多元素同時分析のできる特徴がある。しかしながら、この Ar ICP-MS は、Ar に起因した Ar( $m/e = 40$ )はじめ ArArH(75), Ar<sub>2</sub>(80)などの多数の妨害イオンを発生し、上記分野で重要な Ca(40), As(75), Se(80)などとスペクトル干渉を引き起こすとともにハロゲン元素(F など)などイオン化電圧の高い非金属元素は検出できないなどの問題がある<sup>1)</sup>。

このため、窒素(N<sub>2</sub>)やヘリウム(He)ガスを用いることが検討されているが、高周波電力を用いたとき、分析に適したドーナツ状のプラズマを大気圧で安定に効率良く生成することができない<sup>1)</sup>。

これらの問題を解決する方法として、マイクロ波電力(2.45 GHz, ~ 1 kW)を用いることが研究・開発されている。ここでは、主なマイクロ波プラズマソースとこの中で最も優れた特性を有する Okamoto cavity<sup>2)</sup>によって生成した分析に最適なドーナツ状の大気圧マイクロ波(2.45 GHz)誘導ヘリウムプラズマ(He-MIP)の物理的な特性、さらにその発光分光分析特性について簡潔に述べる<sup>3)4)</sup>。なお、この cavity を用いると、N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, Air および Ar のプラズマも生成でき、先に述べたスペクトル干渉の問題も解決できた<sup>5)</sup>。

## 2. 主な大気圧マイクロ波プラズマソース

Fig.1 にこれまでに発表された主な分析用マイクロ波プラズマソースを示す。(1)は TM<sub>010</sub> モードの Beenakker cavity<sup>6)</sup>、(2)は容量結合の CMP(capacitively coupled microwave plasma<sup>7)</sup>、(3)は MPT(microwave plasma torch<sup>8)</sup> および(4)は表面波モードの Okamoto cavity<sup>2)</sup>である。(1)から(3)の方法では、径方向の電界強度分布が中心で最大になることから、高感度化に不可欠なドーナツ状のプラズマを生成することができなく、さらに、供給できる電力も構造上最大 500 W 程度に制限され、溶液試料を直接分析できないなどの問題がある。

これらの問題を解決する方法として、(4)の cavity が研究開発された。これは、扁平導波管(5 - 10 mm x 109.2 mm)の中心部に円錐状の内導体と円筒状の外導体の先端に設けた front plate からなるモード変換器と二重管構造の放電管(トーチ)で構成されている。このように構成すると、内導体の先端と front plate との間(3 - 8 mm)に表面波が励起され、電界分布は中心部が周辺部より弱くなってドーナツ状のプラズマの生成が容易になるとともに、大電力(1 kW 以上)も供給でき、溶液試料の直接高感度分析ができるようになった<sup>2)3)</sup>。

## 3. プラズマの特性

Table 1 に Okamoto cavity を用いて生成した He-MIP の電子密度と励起温度を他方式の MIP と ICP のそれらと比較して示す<sup>4)</sup>。ここで、電子密度は HB(486.1nm)線の Stark 幅から、

励起温度は Fe I の発光強度の Boltzmann plot から求めたものである。

#### 4. 発光分析特性

He, Ar および N<sub>2</sub>-MIP に、イオン化電圧が高く環境関係などで重要な水溶液中の Cl 元素の検出の可能性を検討するために、NaCl の水溶液(1000 ppm)を超音波ネブライザーで霧化して導入した。その結果、He-MIP でのみ信号を検出することができた<sup>3)</sup>。Table 2 はハロゲン元素の検出限界をいろいろなプラズマについて比較して示す<sup>9)</sup>。

#### 参考文献

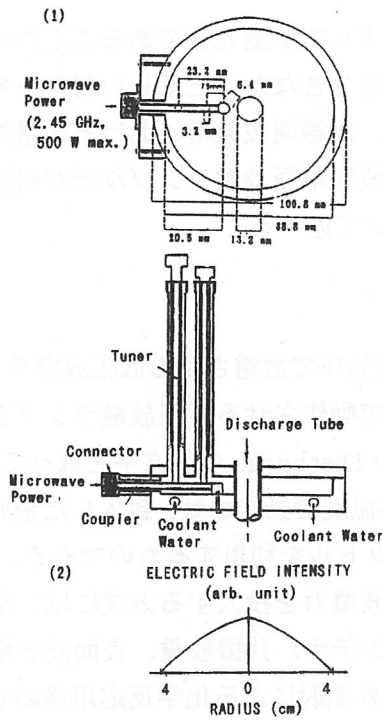
- (1). Ed.A.Montaser: Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (Wiley-VLH, New York, 1998) .
- (2). Y. Okamoto: Anal. Sci. 7, 283 (1991).
- (3). Y. Okamoto: Jpn. J. Appl. Phys. 38, L338 (1999).
- (4). F. Yamada and Y. Okamoto: Appl. Spectrosc. 55, 114 (2001).
- (5). Y. Okamoto: J. Anal. At. Spectrom. 9 (1994) 745.
- (6). K. G. Michlewicz, J. J. Urhand and J. W. Carnahan: Spectrochem. Acta, 40B, 493 (1985).
- (7). B. M. Patel, E. Heithmar and J. D. Winefordner: Anal. Chem. 59, 2374 (1987).
- (8). Q. Jin, C. Zhu, M. W. Borer and G. M. Hieftze: Spectrochem. Acta 46B, 417 (1991).
- (9). S. Wake, H. Murohashi and Y. Okamoto: Proc. XXV Inter. Conf. on Phenomena in Ionized Gases, 21P79, 319 (2001).

**Table 1. Comparison of the electron density and the excitation temperature (Fe)<sup>4)</sup>.**

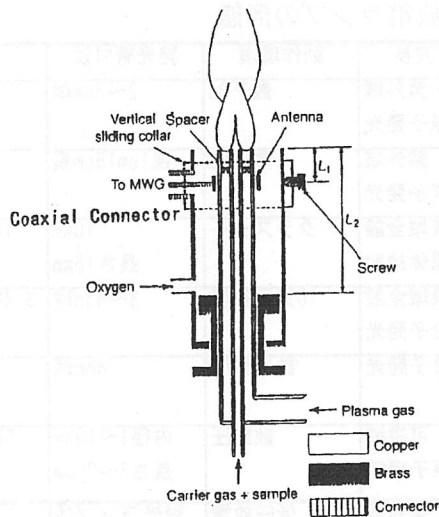
	Okamoto	Kip-MIP	CMP	ICP
Electron density (x 10 <sup>14</sup> /cm <sup>3</sup> )	2.3	9.4	4	1.2
Excitation temperature (K)	5000	4600	3400	4300
Power (watt)	600	1600	700	800
Gas flow rate (l/min)				
Plasma gas	13.5	24	10	7
Carrier gas	0.7	1	0.9	1

**Table 2. Comparison of F, Cl, Br detection limits (ppm)<sup>9)</sup>.**

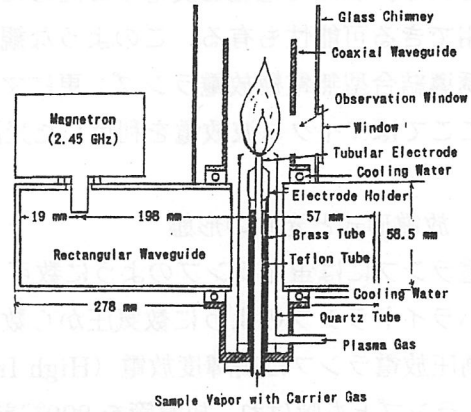
Element	Wavelength	He-MIP			He-ICP
		Okamoto	Beenekker	Kip-MIP	
F (I)	685.6	0.15	4		
Cl(II)	479.5	0.1	0.4	2	
Cl(I)	725.7				13
Br(II)	478.5	0.2	3		
Br (I)	734.9				18



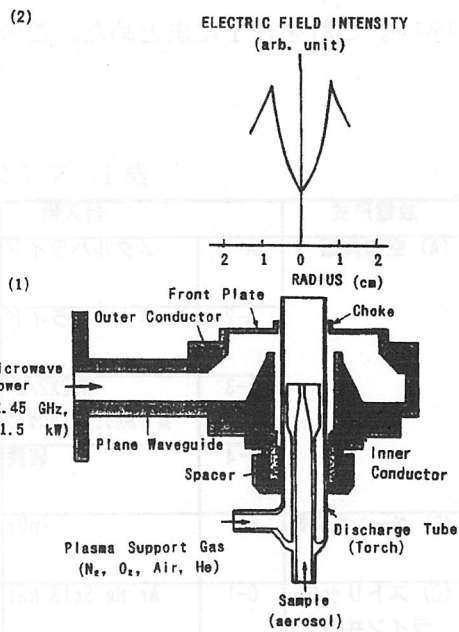
(1) modified Beenakker cavity<sup>6)</sup>



(3) MPT with oxygen-sheathing<sup>8)</sup>



(2) CMP torch<sup>7)</sup>



(4) Okamoto cavity<sup>2)</sup>

Fig.1. Typical microwave-induced plasma sources; (1) modified Beenakker cavity<sup>6)</sup>, (2) CMP torch<sup>7)</sup>, (3) MPT with oxygen-sheathing<sup>8)</sup> and (4) Okamoto cavity<sup>2)</sup>.

## 3.4.1 マイクロ波放電光源

電極を使用しない無電極放電ランプは、放電路すべてが陽光柱であることから高効率期待される。加えて電極と反応するために従来使用できなかった新しい材料を発光物として使用できる可能性も有る。このような観点から、無線周波数帯における容量結合型あるいは誘導結合型無電極放電ランプ、更にマイクロ波無電極放電ランプなどが研究されている。ここではマイクロ波放電を利用した光源について述べる。

## 3.4.2 放電形式と光源の形態

放電ランプには蛍光ランプのように数百 Pa の低気圧で放電させる低圧放電ランプと、メタルハライドランプのように数気圧から数十気圧で動作させる高圧放電ランプとがある。特に高圧放電ランプは高輝度放電 (High Intensity Discharge の頭文字を取って HID と称する) ランプとも呼ばれ、放電管を 800℃前後の高温度で動作させ、封入した金属原子や化合物分子を蒸発・気化し、その原子や分子のスペクトルを利用するものである。

このような低圧および高圧の放電管にマイクロ波電力を投入する方式には、空洞共振器放電、ベーン型共振放電、ストリップライン (アンテナ) 共振放電、表面波放電の 4 種がある<sup>1)3,7-9)</sup>。これを表 1 にまとめた。この表には紫外照射による化学反应用途のものも掲げた。

表 1. マイクロ波放電ランプの形態

放電形式	封入物		発光波長	動作環境	発光管寸法	効率他
(A) 空洞共振	A-1	メタルハライド	可視・紫外域 原子発光	数千Pa	2~3cm球	約130lm/W
	A-2	メタルハライド	紫外域 原子発光	数千Pa	径1cm15cm長	20%
	A-3	W02X2/MX M:フッ素、X:ハロゲン	可視域全般 黒体放射	クラスター	10mm 長さ16mm	100Wで62lm/W
	A-4	硫黄	可視域全般 分子発光	10気圧程度	3~4cm球	3.4kWで120lm/W
(B) ベーン型共振	B-1	InBr	分子発光	数十気圧	4mm球	70lm/W
(C) ストリップ ライン共振	C-1	Ar, Hg, ScI <sub>3</sub> , NaI	可視域 原子輝線	数気圧	内径1~10mm 長さ3~20mm	50Wで100lm/W
(D) 表面波	D-1	Ar-Hg	紫外域	低圧放電 Ar圧数百Pa	蛍光ランプ並	約50lm/W

## (A) 空洞共振器放電ランプ

従来の HID ランプで電極を取り去っただけの形態がこのタイプの無電極 HID ランプである。反射鏡を兼ねた空洞共振器内に直径 3cm 程度の球形発光管を設置した場合の構成例を図 1<sup>1)</sup>に、長さ 15cm 程度の管状発光管を設置した場合の構成例を図 2<sup>2)</sup>に示す。反射鏡を兼ねた空洞共振器を設置し、その内部で放電発光させるものである。電界集中による放電

管の局部的温度上昇を防止するために、発光管をモータ駆動回転すると共に強制冷却をする場合も有る。

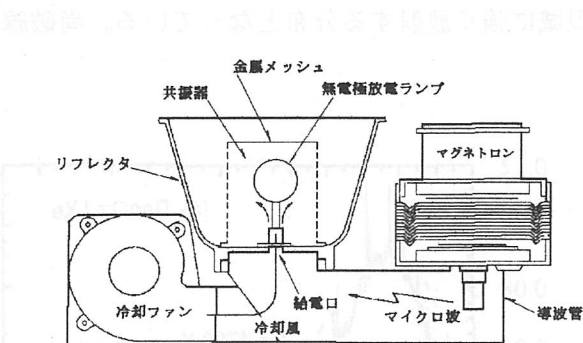


図 1. 球形状マイクロ波放電 HID ランプシステム<sup>1)</sup>

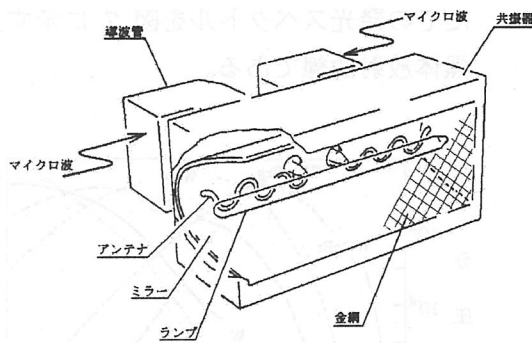


図 2. 長管マイクロ波 HID ランプシステム<sup>3)</sup>

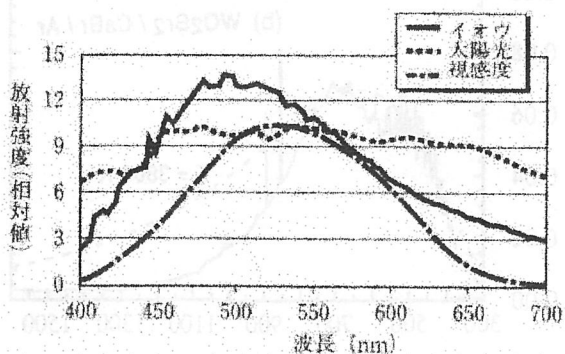


図 3. 硫黄分子発光の分光分布

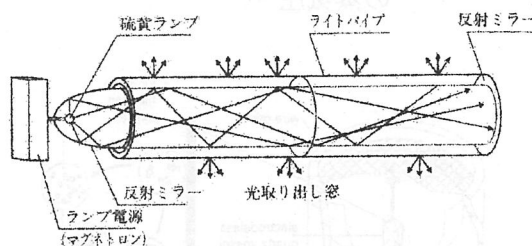


図 4. 硫黄ランプライトパイプシステム

一般照明用としては希土類金属ハロゲン化物やナトリウム沃化物を混合封入したタイプが検討されているが、発光金属原子と石英容器の反応による短寿命のために、実用化されていない。一般照明用途としては、水銀を用いることなく、硫黄を封入、蒸気化し 10 気圧前後で動作させ、硫黄の分子発光を利用したタイプが実用化されている<sup>4)</sup>。硫黄の分子発光は図 3 に示すように、人間の可視域 (図には視感度として示してある) に連続スペクトルを放射することから高い効率が得られる。そのシステム構成・形態は図 1 に近い。この反射鏡空洞共振器から取り出した光をプラスチック製の光パイプガイドで広い面積を照明するタイプが開発実用化されている。その構成概念を図 4 に示す。

従来のメタルハライドランプは、ハロゲン化金属のアーク中での解離・発光、そして管壁近くでの再結合による金属蒸気圧低減による石英との反応防止といういわゆるハロゲンサイクルを利用している。近年はアーク中心で金属蒸気を過飽和状態にし、直径数 10nm の金属クラスターを形成、その表面に定在する可視域波長以下の電磁波を放射させるクラスターランプが研究されている。タングステンオキシハライドの解離分子とその分圧を図 5 に

示し、クラスターランプの原理的構成図を図 6 に示す<sup>4)</sup>。タングステンバルクの蒸気圧よりも解離タングステンの蒸気圧が高い領域でクラスターを形成できる可能性が生じてくる。またその発光スペクトルを図 7 に示す。可視域に強く放射する分布となっている。尚破線は黒体放射曲線である。

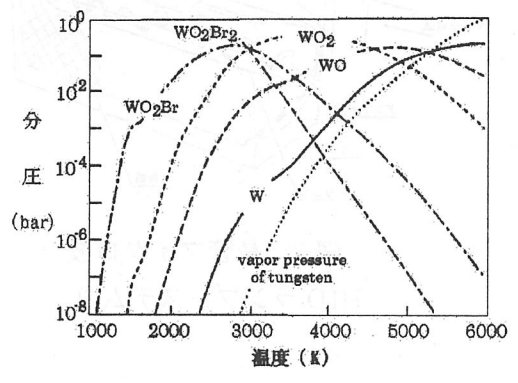


図 5. タングステンオキシハライドの蒸気圧<sup>4)</sup>

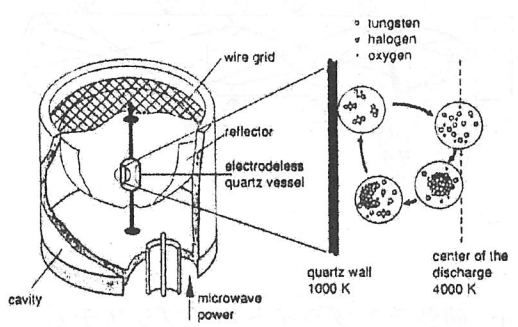


図 6. クラスターランプ構成原理図<sup>4)</sup>

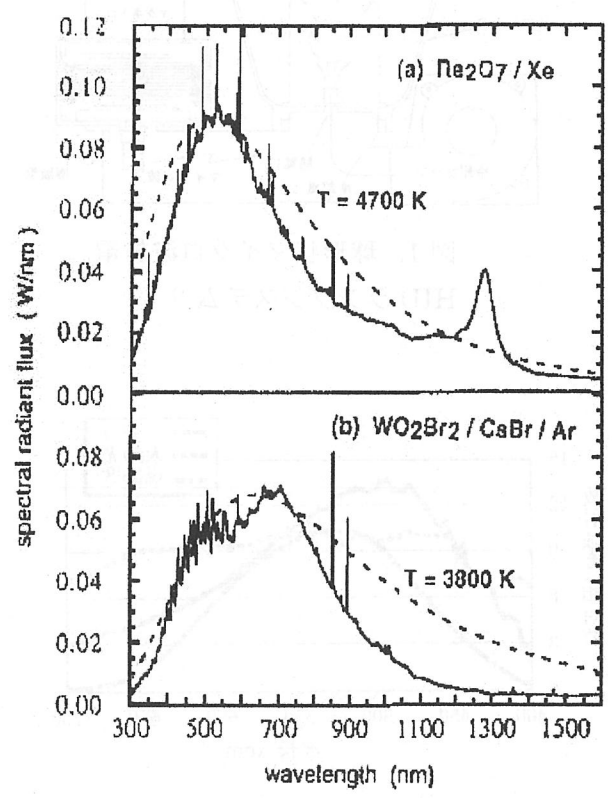


図 7. クラスター分光放射スペクトル<sup>4)</sup>

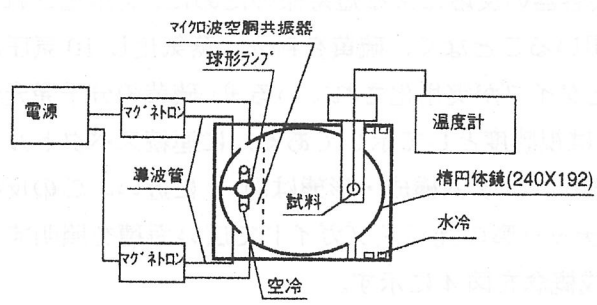


図 8. 球形状無電極 HID イメージ炉<sup>6)</sup>

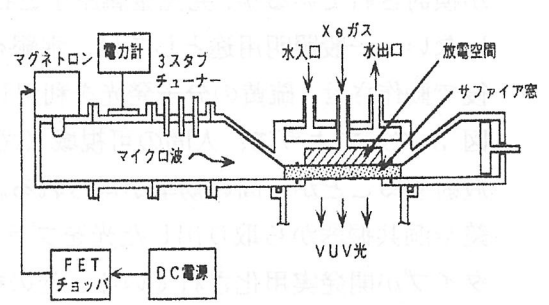


図 9. 平面状紫外放射発生装置<sup>6)</sup>

このような金属のクラスターを用いた新しい概念の光源は、無電極故に可能であること、空洞共振器の TM01 モードによる放電管中心への電界集中構造故に可能であり、誘導結合

型のような、管壁近くに高温領域が形成される放電形式では実現困難である。

図 8 には楕円球ミラーで構成された空洞共振器を用いたイメージ炉の例を示す<sup>2)</sup>。放電発光材料としては赤外放射を多く出すアルカリ金属であるカリウムハロゲン化物が用いられている。特殊なものとしてテーパ管からマイクロ波を円盤状誘電体に給電し、誘電体に接した円盤状放電空間から真空紫外光を放射させる装置例を図 9 に示す<sup>2)</sup>。

### (B) ベイン型共振放電ランプ

光源は点光源に近いほど、光の制御が容易である。そのためにできるだけ光源を小さくすることが望ましい。空洞共振器型放電では共振モードから見て、放電管を小さくすることには制約が多い。そこで共振器内に複数の板を張り出し、その板間の先端に電界を集中させ、小型放電管を構成する方法が検討されている。ベイン型共振器により共振電場寸法を 8cm 程度から 1cm 以下にでき、発光管寸法を 30mm 程度から 3mm 程度に小さくできる。その構成を図 10 に示す<sup>7)</sup>。この例では 8 枚の高さ 10mm、厚さ 2.5mm、長さ 16mm のベインで半径 4mm の電界集中空間を形成し、そこへ外径 6mm、内径 4mm の球形石英放電管を設置し、入力 30W にて点灯した。沃化インジウム 1 mg を Ar ガス 5320Pa とともに封入して、数十気圧にて動作させ効率 70lm/W、平均演色評価数 95、色温度 7600K を得ている。

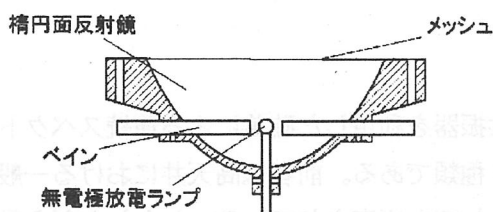


図 10. ベイン型共振器を用いたランプシステム<sup>7)</sup>

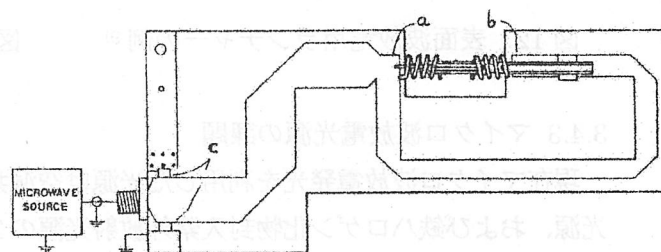


図 11. ストリップライン共振放電ランプシステム<sup>8)</sup>

### (C) ストリップライン共振放電ランプ

さらに小型化を目指したものがストリップライン共振型である。この構成を図 11 に示すが、ストリップ線路による共振回路を構成し、コイル状アンテナ部間の空間に強い電界を作り、内径数 mm、長さ 10mm 前後の放電管を点灯するものである<sup>8)</sup>。システムを小型にするために点灯回路は固体マイクロ波素子を用いているが、現時点での回路効率は 50% を下回っており、またそのコストは実用からはるかにかけ離れた高価なものである。

### (D) 表面波放電ランプ

マイクロ波がプラズマ表面を伝播して電力伝送することを利用した表面波放電ランプが研究されている。これは低圧希ガスのみあるいはさらに水銀を封入した直径数 cm の放電管の一端に、ランチャーと呼ばれるマイクロ波導入器を取り付け放電させるものである<sup>9)</sup>。その構成概念を図 12 に示す。希ガスや水銀の発する紫外線で蛍光体を発光させ、光源とするタイプである。放電が任意形状の管内にほぼ均一に拡散することから平面型ランプなど種々の形状の光源が可能である。Ar と水銀を封入した蛍光ランプタイプで現行蛍光ランプの半分程度の効率が得られているが、効率・価格・ノイズ等課題が多くいまだ研究の域を出ていない。また、水銀に代わりうる発光物を用いた紫外放射光源、あるいは無水銀可視光源などの開発が期待されている。

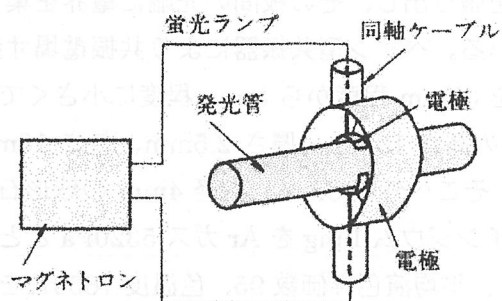


図 12. 表面波放電用ランチャーの例<sup>9)</sup>

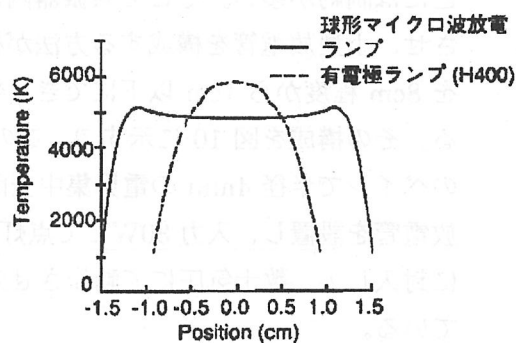


図 13. マイクロ波放電管内温度分布<sup>3)</sup>

### 3.4.3 マイクロ波放電光源の課題

現在マイクロ波放電発光を利用した光源は空洞共振器を利用した硫黄による連続スペクトル光源、および鉄ハロゲン化物封入紫外放射光源の 2 種類である。前者は高天井における一般照明用として用いられており、また植物育成用光源としても研究されている。しかしながら動作圧力が 10 気圧と高くなることから、定格の明るさになるまで数分間を要することと高気圧故に破裂の危険性等の欠点がある。そこで管内圧力の低い無電極放電ランプが望ましい。

ハロゲン化金属とクリプトン、キセノンなどの希ガスを数万 Pa 封入した放電管では、動作圧力は 1 気圧以下であり破裂の危険性は無い。しかしながらプラズマの温度分布は図 13 のように、円筒状有電極放電の場合に比較して、管壁に接近してプラズマ高温部が存在する。それゆえ管内に封入されている金属ハロゲン化物と放電管容器材料である石英とが 800℃乃至 1000℃の高温で反応し、石英の再結晶化による寿命低下をもたらす。

そこで石英の内表面に薄膜を形成し、ハロゲン化金属と石英との直接反応を防止する技術が開発されつつあり、SiC や Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>、AlN 膜が良い保護膜であることが明らかになりつつある。

第 2 の課題は空洞共振器内では電磁界の偏りがあり、それゆえ放電が集中する部分が生じる。円柱形放電管では軸方向に電磁界の周期的強度が加わるため、管壁の周期的な再結晶化が起きる。また電磁界の局所的な集中で、発光管の局部変形も起きることから、発光管をモータードライブ回転するなどの対策を要する。

第3の課題は電磁波の漏れを防止するために電磁シールドを必要とし、この遮光率（或いは逆の言い方をすると開口率）が15%前後と大きく、光ロスが無視できない事である。それ故、空洞共振器から光を如何に効率良く取り出すかが課題の一つである。そのひとつの例が光開口部を有する反射鏡及び電磁シールド構造の器具である。その例を図14に示す<sup>10)</sup>。

第4は、点光源が望ましい事は前述の通りであるが、空洞共振器の形態によっては、波長の制約から10cm前後の寸法を要する場合が多い。これはシステムの小型化に障害となるものである。

第5に、発光管は無電極故に長寿命化できる可能性は大であるが、マグネトロンは真空管であるために電極を有する。従ってシステム全体の寿命を決定するのはマグネトロンの電極寿命となり、この寿命改善が課題である。

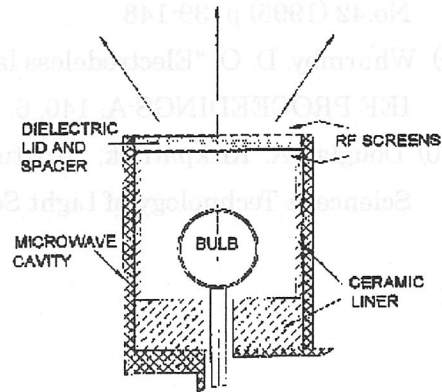


図14. 光開口部を有する空洞共振器

第6の課題として、マイクロ波放電システム全体のコストがある。一般照明用として民生用途に供するためには、システム全体が現在の照明システムと同等以下程度のコストパフォーマンスが必要である。電子レンジ程度の価格で、長寿命のマグネトロンを内蔵した点灯システムが望まれることになる。

以上マイクロ波放電を応用した照明光源について概説した。一部実用化されているものがあるが、本格的な実用化はこれからである。

#### 参考文献

- (1) 児玉仁史 他；「マイクロ波放電光源装置とその応用」  
三菱電機技報、57-2、(1983) p23-26
- (2) 吉澤憲治；「マイクロ波放電による光の発生とその応用」  
照明学会研究会資料 LS-93-22 (1993) p15-19
- (3) 吉澤憲治、滝正和；「マイクロ波放電による UV,VUV 光の発生」  
放電研究 No.137 (1992) p5-13
- (4) Dolan J. T., Ury M. J., Wood C. H.; "A Novel High Efficacy Microwave Powerd Light Sources", The 6<sup>th</sup> International Symposium on the Science & Technology of Light Sources, No.74 (1992) p301-302
- (5) 三塚薫、佐藤博、北村昌良「マイクロ波放電励起エキシマランプ」  
照明学会研究会資料 LS-93-21 (1993) p10-14
- (6) Weber B., Scholl R., "A new kind of light-generation mechanism: Incandescent radiation from clusters" J. Appl. Phys. 74-1 (1993) p607-613

- (7) 保知昌、橋本谷磨志、崎山一幸、竹田守、片瀬幸一；「ベイン型無電極放電ランプの開発」、照明学会 光源物性とその応用研究会資料 LS-00-47 (2000) p25-34
- (8) Lapatovich W. P., "Novel Microwave Powered high-intensity Discharge Lamps", The 7<sup>th</sup> International Symposium on the Science & Technology of Light Sources No.42 (1995) p139-148
- (9) Wharmby, D. O. "Electrodeless lamps for lighting: a review" IEE PROCEEDINGS-A, 140, 6, (1993), p465-473
- (10) Douglas A. Kirkpatrick, "Apature lamps", The 9<sup>th</sup> International Symposium on the Science & Technology of Light Sources, No.109 (2001) p309-318

## 紫外放射応用

## 背景

紫外（UV）エネルギーは、接着剤や樹脂などの硬化や印刷乾燥、ウエハ表面処理等の半導体製造プロセスなど様々な産業分野に利用されている。この分野のUV光源は、露光装置として、生産性の観点から、露光面積が広くかつ均等な光照射や高照度などが求められる。また、経済性から、長寿命であることはもとより、点滅駆動が望ましい。有電極のランプシステムでは、始動時間が非常に長いシャッター機構を必要としたが、無電極の場合わずか数秒の瞬時点灯ができる。マイクロ波無電極放電システムはこれらの要求に合った特長を持ち、他の無電極放電方式に比べて早くから着目され、1970年頃、紫外線応用分野で最初に実用化された。<sup>1)</sup>

## システムの実例

システムの基本的な構成は、マイクロ波加熱システムとほぼ同じであり、マグネトロンとその駆動電源、導波管、マイクロ波空洞（共振器）、放電管、反射鏡、冷却装置などの構成要素から成る。マグネトロンには、連続駆動に弱く、効率が70～80%のため強制冷却が必要であり、システムの小型化が困難である、という課題があるが、パルス電力発生に向けており、立上りが速く点滅駆動に利用しやすい利点がある。課題を考慮しても、マグネトロンを用いた無電極放電ランプシステムは、実用性が高かった。そのシステムの実例を図1～2に示す。

図1<sup>(2)</sup>（マグネトロンと電源供給部、冷却送風部は記載せず）のシステムは、長さ250mm、外径8mmの長尺形状の放電管を用いて線状照射する。このシステムでは2個のマグネトロンを使って3kWのマイクロ波を供給する。長い放電管を効率良く均等に発光させるため、共振器の電磁界はTMモードになるよう設計されている。放電管は、ランプ寿命3000時間の高圧水銀ランプと寿命1000時間のメタルハライドランプのタイプがある。

図2<sup>(3)~(12)</sup>のシステムは、明室プリンタ用光源として開発されたタイプで、外径30mmほどの球状放電管を用いることで点光源に近づけ、配光性、集光性を高めた。さらに、光利用率を高めるため、空洞共振器（マイクロ波空洞）が反射鏡を兼ねる構成になっている。反射鏡一体型共振器は、共振器としての形状に制限を受けるため、高度な設計が必要になる。

図3<sup>(13)</sup>のシステムは、大きな特長が2つある。1つ目は、空洞共振器が円筒型であること。円筒型は、同じマイクロ波の波長に対し、共振器として最小径の電磁界を形成できる。もう1つの特長は、空洞共振器を、導波管との結合部以外、全面を金属メッシュで構成したことである。全面が光を透す共振器で放電管を覆ったようなもので、共振器とは無関係に任意の反射鏡を設置することができる。反射鏡と共振器を別々に設計でき、自由度の高いシステムになる。光の利用率は少し犠牲になるが、いわば図2のシステムの改良型であり、現在の実用的なマイクロ波光源装置としては、1つの到達点ともいえる構成である。

## 課題 五燈管器具(調) 全館刊

この分野では、さらに生産性を高めるため、露光面積の拡大と、露光面の均等性が求められており、UV光源は、大電力化や点光源化が課題である。

無電極放電は、有電極放電に比べて放電管の形状やサイズの自由度は高いが、空洞共振器を用いたマイクロ波放電の場合前述したように、共振電界を形成できる空間に限界があり、約30mm以下の放電管を効率良く励起することは困難である。

また、メッシュで構成される共振器の耐久性や、マグネトロンの寿命など、システムとしての寿命に課題が多い。さらにマグネトロンが電子管デバイスであり、マイクロ波エネルギーへの変換効率が70~80%程度のため、システム全体としての高効率化にも限界がある。

近年、有電極ランプのショートアーク化、大電力化の進展も著しいが、無電極ランプは長寿命な光源システムとして、ランニングコストの点等に可能性を持つため、今後ブレークスルーによる進展を期待したい。ブレークスルー技術としては、マグネトロンに代わる高W高効率の固体マイクロ波発振デバイスや、空洞共振器に代わるマイクロ波エネルギー給電方式などが挙げられる。

## 参考文献

- (1) L. S. Levine : Radiat. Phys. Chem., Vol. 9, p. 819-829 (1977)
- (2) 三塚ほか : 日本無線技報, no. 34, p. 51-55 (1995)
- (3) 児玉ほか : 三菱電機技報, vol. 57 no. 2, p. 23-26 (1983)
- (4) 児玉ほか : 照明学会・光源システム研究会資料 LS-83-9, p. 21-26 (1983)
- (5) 吉沢ほか : 照学全大, p. 51 (1983)
- (6) K. Yoshizawa : J. Illum. Engng. Soc. Vol. 13 no. 2., p. 283-297 (1984)
- (7) 小村ほか : 照明学会・光の発生関連システム研究会資料 LS-84-14, p. 50-58 (1984)
- (8) 馬込ほか : 印刷雑誌, vol. 67, no. 6, p. 11-18 (1984)
- (9) 大貫ほか : 三菱電機技報, vol. 59 no. 9, p. 45-50 (1985)
- (10) 鈴木ほか : 照学全大, p. 36 (1986)
- (11) 吉沢ほか : 照明学会・光の発生関連システム研究会資料 LS-86-5, p. 17-21 (1986)
- (12) 鈴木ほか : 照学全大, p. 37 (1987)
- (13) : Building Design & Construction, June, p. 102 (1998)

## 第4章 高周波発振器の現状

### 4.1 概説

清水恵一（東芝ライテック（株））

本章では、無電極放電ランプに高周波電力を供給するための電源回路を高周波発振器と呼ぶこととする。無電極放電ランプ自体は長寿命や高効率などを特徴としており、このランプにエネルギーを供給する回路に対しては必然的に信頼性や高い効率が求められている。特に電力変換効率は、装置の温度上昇を決定する重要なファクターであり、無電極ランプシステムを実用化するに当たり、信頼性やコストに対して決定的な影響を与えるものである。

高周波発振器は動作周波数帯と取り扱う電力によって様相を異にする。電界結合型のように比較的動作周波数が低い場合は、一般の蛍光ランプを高周波点灯するインバータ回路と大きく異なる点はない。磁界結合型において利用される周波数帯域は、数100kHzから数10MHzであるが、共振形スイッチング電源技術の動作周波数領域を高い方向に拡大することで対応しており、比較的高い効率が得られている。マイクロ波放電の周波数帯においては、移動体通信用のパワーアンプとして半導体化が進行しているが、大電力を必要とする場合はマグネトロンの利用が継続しており、いずれの場合も変換効率は磁界結合型の周波数帯域におけるそれに及んでいない。

## 4.2 磁界結合型無電極放電における高周波発振器技術

原田和郎 (同志社大学)

磁界結合型無電極放電ランプの点灯回路 (高周波発振器) には, MHz 級の高周波スイッチングにおける低損失・低ノイズ動作が求められるため, ソフトスイッチング技術の適用が進んでいる。1990 年に実用化された動作周波数 13.56MHz の「エバーライト」<sup>(1)</sup>の点灯回路には, 当初 C 級増幅器が用いられており, 半導体素子における損失のため効率は 70%程度となっていたが, 現在では零電圧スイッチングを行う 1 石 E 級スイッチング回路が用いられ高効率化が図られている。回路の一例を図 1 に示す<sup>(2)</sup>。調光用補助スイッチを用いて間欠発振による調光可能な回路となっている。また 1991 年に商品化された動作周波数 2.65MHz の「QL Induction Lighting」<sup>(3)</sup>, 1994 年に商品化された動作周波数 2.5MHz の「Genura」<sup>(4)</sup>等の点灯回路に関しては, 2 石の D 級インバータ回路が用いられている。回路の一例を図 2 に示す<sup>(5)</sup>。

D 級<sup>(6)</sup>および E 級<sup>(7)</sup>のインバータ回路は, 半導体素子の動作点が能動領域である A C 級増幅回路とは異なり, 半導体素子がスイッチとして動作するため, 理想的には素子における損失が発生せず理論上の効率は 100%となる。ただし実際のスイッチング回路においては素子のスイッチング時における電圧・電流には立ち上がり・立ち下がり時間が存在し, 電圧・電流の重なりが生ずるためスイッチング損失が存在する。またスイッチ素子として用いられる MOSFET の端子間には寄生容量が存在し, ここに蓄えられた電荷がターンオン時に失われることによりターンオン損失が発生する。これに対し, 前述の高周波 D 級インバータ回路は, スwitching 周波数を共振周波数より高く設定し, かつ両スイッチがオフとなるデッドタイム期間を適切に設けることにより, 誘導性の共振電流がこの期間にスイッチ素子の寄生容量の充放電を行い, スwitching 端子間電圧がゼロになってからのターンオン, すなわち零電圧スイッチングを実現している。一方, E 級のインバータ回路に関しては電圧が共振波形となるため基本動作自体が零電圧スイッチングを行うものであるが, 共振により電圧ピークが大きくなるため高耐圧の素子を用いる必要があり, 素子のオン抵抗が大きくなるため導通損においては若干不利となる。またこれらの点灯回路は MHz 級の高周波動作であるため MOSFET の駆動電力に関しても重要な問題である。MOSFET は電圧駆動デバイスであり, 駆動の際に必要なのはスイッチング時における素子のゲート容量の充放電エネルギーであるが, 矩形波駆動の場合, 理論上充放電エネルギーの 1/2 が抵抗で損失となるのに対し, ゲート回路にインダクタを挿入し, 共振波形とすることによりこの損失を低減することが可能である<sup>(8)</sup>。実用化されている回路においては, 駆動電力の低減と回路の簡素化のため, 図 2 に示すように出力回路の巻線電圧をスイッチのゲート電圧に帰還する自励型の構成が取られることが多い。

無電極ランプ点灯回路はその構造上, 誘導コイルからの放射ノイズの低減が問題となる。器具を覆う金属メッシュや発光管内面の導電膜等による遮蔽の他, 誘導コイルに逆極性の 2 次巻線を施し, 巻線とヒートパイプ間に存在する寄生容量を介して流れるコモンモード電流を打ち消すことにより放射ノイズの低減を図ることも行われている<sup>(9)</sup>。また 1999 年に実用化された「ENDURA」<sup>(10)</sup>のように, 放射ノイズの低減・回路効率向上等の観点から 250kHz という低い点灯周波数を選択する例もある。

磁界結合型無電極ランプは, 誘導コイルと放電路との結合係数を  $k$ , 放電路の抵抗, すなわちプラズマ抵抗を  $R_p$ , 誘導コイルの巻数を  $n$  とすると,  $n:1$  のトランスに  $R_p$  なる抵抗が接

続された図 3 (a) の等価回路で表され、これを變形して図 3 (b) のように等価的に表すことができる。結合係数が大きくとれないため力率が低く、無効電力が大きくなるため、ランプと回路との間には整合回路を必要とする。実用化に向けて現在研究が進められている誘導結合型無電極 HID ランプの場合、誘導コイルと整合回路（並列キャパシタンス）で構成される共振回路の Q が特に高く、これらの構成部品やランプの特性ばらつき・経時変化によるランプ電力変動が、実用化を図る上での課題の一つとなっている<sup>(10)</sup>。

参 考 文 献

- (1) 四宮雅樹 他：「無電極蛍光ランプ」，照学全大，No. 6 (1990)
- (2) 岡本太志 他：「調光型無電極蛍光ランプシステム」，松下電工技報，9，pp. 13-18 (1999)
- (3) A. Netten, et al. : “The operation principle of the Philips QL lamp system” (1991)
- (4) D. O. Wharmby, et al. : “Low power compact electrodeless lamps”, The 7th International Symposium on the Science & Technology of Light Sources, pp. 27-36 (1995)
- (5) United States Patent 5406177 (1994)
- (6) P. J. Baxandall : “Transistor sine-wave LC oscillators, some general considerations and new developments”, Proc. IEE, Vol. 106, Pt. B, suppl. 16, pp. 748-758 (1959)
- (7) N. O. Sokal, et al. : “Class E – A new class of high-efficiency tuned single-ended switching power amplifiers”, IEEE J. Solid-State Circuits, Vol. SC-10, pp. 168-176 (1975)
- (8) S. A. El-Hamamsy : “Design of High-Efficiency RF Class-D Power Amplifier”, IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 9, No. 3, pp. 297-308 (1994)
- (9) J. W. Shaffer, et al. : “The Development of Low Frequency, High Output Electrodeless Fluorescent Lamps”, Journal of the IES, Vol. 28, pp. 142-148 (1999)
- (10) 井上昭浩 他「ランプ駆動コイル変化の影響を軽減した誘導結合無電極ランプ整合回路設計条件」，照学誌，83，No. 2，pp. 94-100 (1999)

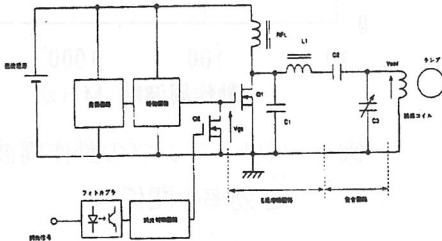


図 1 1 石 E 級インバータ回路<sup>(2)</sup>

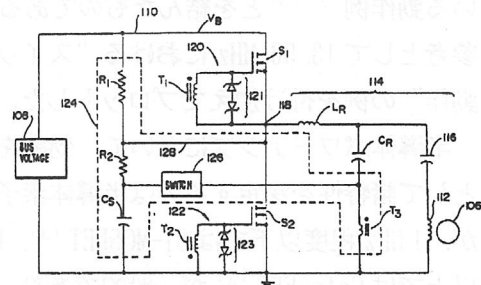


図 2 2 石 D 級インバータ回路<sup>(6)</sup>

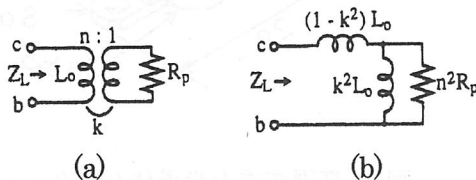


図 3 無電極ランプの等価回路

### 4.3 マイクロ波帯における高周波発振器技術

山本知彦 (株)東芝 清水恵一 (東芝ライテック(株))

10MHz 程度までの周波数帯域における高周波発振器は、4.2 節に示したようにランプに高周波電力を供給することを目的とした研究例があり、90%に及ぶ高い変換効率報告されている。これに対して、数 100MHz を越える動作周波数の発振器において、高周波電力を供給する対象をランプとして検討された例は、筆者の知る範囲では、発表されていないようである。また、高い周波数を取り扱う技術的困難度からも変換効率の低下は免れない。ここでは、マイクロ波帯の代表的な高周波発振器である半導体パワーアンプとマグネトロンの概要のみを紹介することとする。

#### ・半導体パワーアンプの概要

携帯電話の普及にみられるように、移動体通信用として高周波パワーアンプの需要は著しく増加している。基地局用として開発されたものは数 10W 以上の出力が得られ、複数台の出力を合成すれば数 100W の高周波電力を得ることもできるので、無電極ランプ点灯用としても転用可能である。1995 年には 2.45GHz 帯の半導体パワーアンプを利用して無電極ランプを点灯した例が示されている<sup>(1)</sup>。

通信用のパワーアンプは、変調された高周波信号を忠実に増幅して所定の高周波出力を得ることを目的としたものである。従って、B (AB) 級動作を基本とするリニアアンプとして設計されており、理論的に得られる最大効率は  $\pi/4=78.5\%$  である。図 1 は動作周波数と効率の関係について概略を把握するために編集して作成したものである。“リニア動作”と示したカーブは最大理論効率を十分に低い周波数にプロットし 835MHz 及び 1.8GHz における文献に報告されている動作例<sup>(2)</sup><sup>(3)</sup>とを結んだものである。なお、参考として 13.56 MHz における“スイッチング動作”の例を付け加えてプロットした。

半導体パワーアンプにおいて、効率をはじめとして諸特性を決定するのは半導体素子であるが、1 GHz 程度以下では Si-MOSFET<sup>(3)</sup>、1~2GHz 以上では GaAs-FET<sup>(2)</sup> が一般的であり、それぞれ高周波電力増幅専用設計された製品がある。若干効率は低い、高周波電力増幅専用のバイポーラトランジスタも利用されている。パッケージは図 2 に示すように、リードのインダクタンスを最小にするとともに熱抵抗を低く抑えて安定な動作を確保するための構造を採用している。なおこれらの素子は、通信目的の利用を前

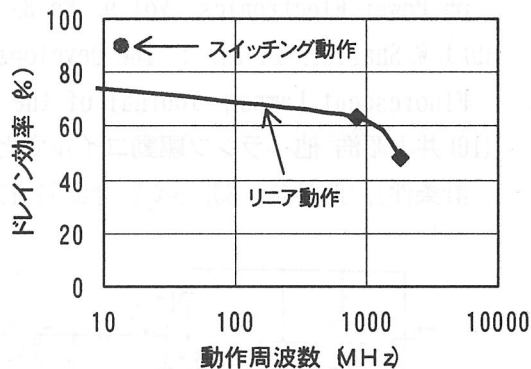


図 1 パワーアンプの動作周波数と効率の関係

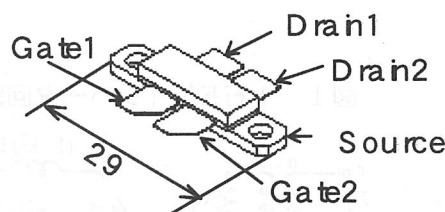


図 2 高周波電力半導体パッケージの例

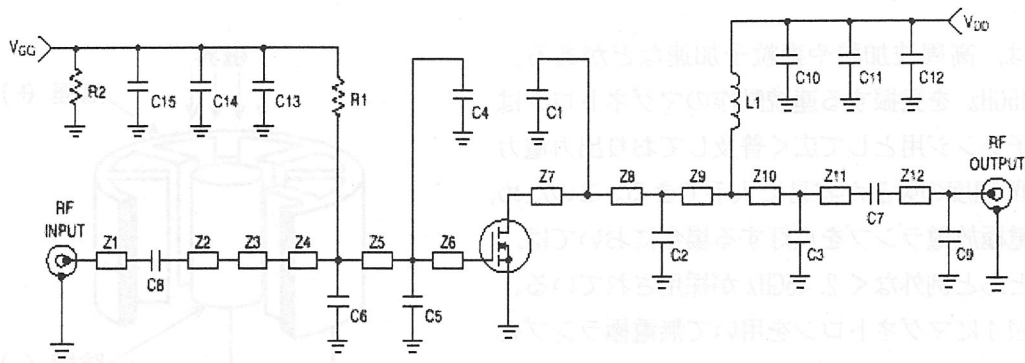


図3 860MHz 高周波パワーアンプの回路例  
Motorola 社 MRF373S のデータシートから引用

提に設計されているので、耐圧は数 10V から 100V を越える程度までである。従って、電子安定器やスイッチング電源のように商用交流を直接整流平滑した電源を用いるラインオペレートは不可能である。従って、無電極点灯システムとして効率を検討する場合は、商用交流から低圧の直流を作るとともに、商用交流側と高周波回路側を分離するための直流電源部の効率も加味する必要がある。

回路方式は、ハーフブリッジ形が用いられることはなく、図3に示すような1石回路、またはこれを2回路組み合わせたダブルエンド形のプッシュプル回路が一般的である。図中の Z で示す素子は、プリント配線で構成されたストリップ線路である。

以上に記したように、現状のマイクロ波帯半導体パワーアンプの特性は、無電極ランプ点灯用として十分なものではないが、GaN や SiC などを用いた高周波パワー半導体の研究・開発が進むことにより、より高効率なものが経済的に見合う価格で供給されることが期待されている。

・マグネトロン概要

マグネトロンは、電子流を制御するのに電界だけでなく磁界の作用も利用した真空管である。数 100MHz 程度の UHF 帯から 100GHz の EHF 帯の領域まで比較的高い効率が得られ、小形で高出力のものが作れることが特徴である。連続動作のものとして、パルス動作に設計されたものがあり、パルス動作はレーダー用の送信管として欠くことができない。連続動作の用途とし

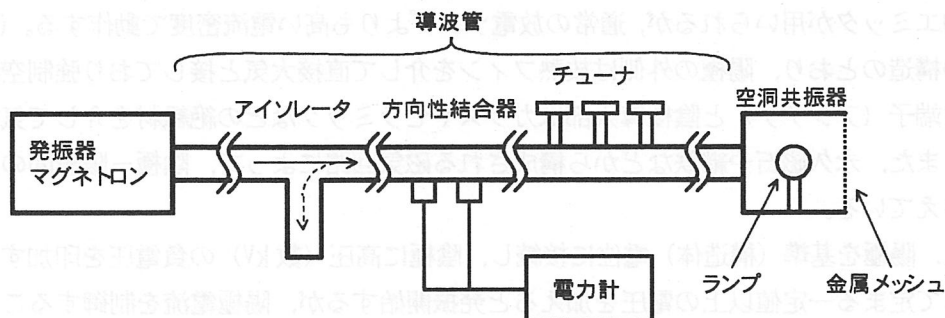


図4 マグネトロンを用いた無電極ランプ点灯試験装置

ては、高周波加熱や素粒子加速などがある。  
2.45GHz を発振する連続動作のマグネトロンは電子レンジ用として広く普及しており出力電力500W 程度の製品が容易に入手できる。このため、無電極放電ランプを点灯する場合においては、ほとんど例外なく 2.45GHz が採用されている。

図4にマグネトロンを用いて無電極ランプを点灯する際の一般的な実験装置の構成を示す。マグネトロンの出力は導波管回路で構成されるアイソレータ、方向性結合器、チューナを経て、空洞共振器内に配置された無電極ランプに供給される。アイソレータは、不整合により負荷側から反射されてくる電力がマグネトロンに帰還されることを防ぎ安定な発振状態を維持するために用いられる。方向性結合器には電力計を接続し、負荷に向かう進行波電力と発振器に向かう反射波電力をモニターする。チューナは可変要素を調整することにより、負荷インピーダンスを整合させる。空洞共振器の一部は金属メッシュとし、光出力を取り出せるように構成される。

このような実験装置では、誘導結合形の点灯回路に比べランプのサイズや電力において適合範囲が広い。また、比較的整合をとりやすく点灯維持が容易であるため封入物の研究などに用いられる例が多い<sup>(4)</sup>。実用化された例としては、比較的古くから産業用の紫外線光源<sup>(5)</sup>として利用されているほか、照明用としての応用<sup>(6)</sup>もある。

図5に一般的なマグネトロンの構造を示す。(a)の電極部の模式的構造に示すとおり、中心軸上の陰極を取り囲むように分割された陽極が配置され、軸方向に静磁界が印加される。分割された陽極は、共振回路を形成して効率よく高周波出力を発振させることに寄与している。陰極は酸化物エミッタが用いられるが、通常の放電ランプよりも高い電流密度で動作する。(b)に示す全体の構造のとおり、陽極の外側は放熱フィンを通じて直接大気と接しており強制空冷される。出力端子(アンテナ)と陰極導入部はガラスやセラミックなどの絶縁材を介して気密封止される。また、永久磁石や継鉄などから構成される磁気回路によって、陰極-陽極間の空隙に磁界を与えている。

構造上、陽極を基準(構造体)電位に接続し、陰極に高圧(数kV)の負電圧を印加する。設計によって定まる一定値以上の電圧を加えると発振開始するが、陽極電流を制御することで高周波出力を可変することが可能である。

2.45GHz において動作するマグネトロンの場合、直流からマイクロ波出力への変換効率は

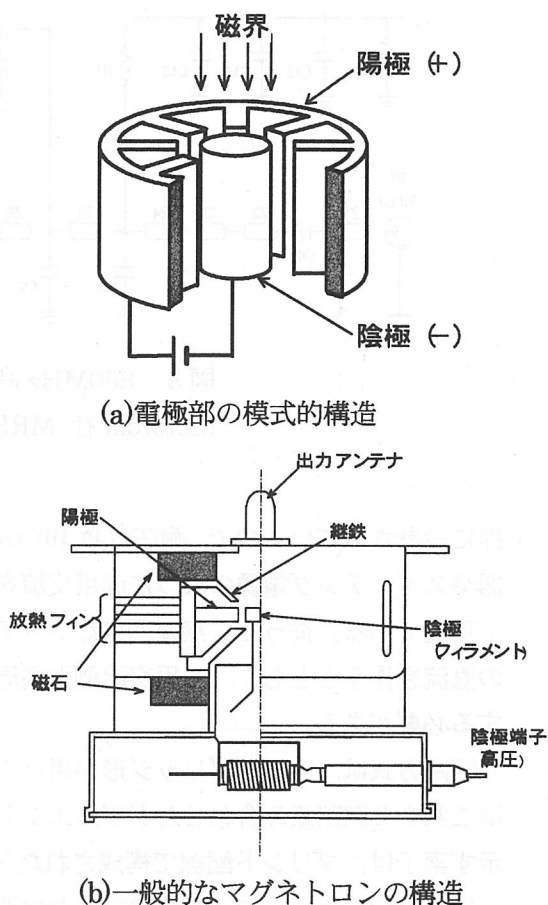


図5 マグネトロンの構造

70%程度である。寿命は、電子レンジで用いられる民生用製品の場合、1000～2000h 程度である。寿命を決定する主な要素は、陰極寿命とヒートサイクルによる真空度不良と言われている。負荷の整合状態が悪く、大きな反射電力が戻る場合は、異常発熱が生じてさらに寿命が短縮する。

#### 参考文献

- (1) Walter P. Lapatovich: Novel microwave powered high intensity discharge lamps, proc. of LS:7, pp. 139-148 (1995)
- (2) 村山雅也, 小田雄二, 黒田博道: L 帯 50W 級電力 GaAs FET, 東芝レビュー, 51-7, pp. 59-62 (1996).
- (3) 野田昇, 村上功治: RF パワーMOS モジュール, 東芝レビュー, 48-12, pp. 871-874 (1993).
- (4) 鈴木 量, 斎藤正人, 渡部勁二: マイクロ波ランプ中のプラズマ温度解析に用いる簡単な計算モデル, 電学論, 118A-1, pp. 28-33 (1998)
- (5) 保知 昌, 堀井 滋, 竹田 守: インジウムハロゲン化物封入マイクロ波無電極HID ランプ, National Tech. Rep., 43-2, pp. 50-56 (1997).
- (6) James T. Dolan, Michael G. Ury and Charles H. Wood: A novel high efficiency microwave powered light source, proc. of LS:6, pp. 301-302 (1992)

「無電極放電システム」研究調査委員会名簿

委員長	川口元一 (三重大学 教育学部)	kawaguti@edu.mie-u.ac.jp
幹事	四宮雅樹(松下電工株式会社 照明R & Dセンター)	mshino@lrg.mew.co.jp
	渡辺良男(神奈川大学電気工学科)	watalab@cc.kanagawa-u.ac.jp
委員	井上昭浩(福井工業高等専門学校 電子情報工学科)	inouea@ei-phi.ei.fukui-nct.ac.jp
	岡本幸雄(東洋大学 工学部 電気電子工学科)	okamoto@eng.toyo.ac.jp
	片瀬浩一(松下電器産業株式会社 照明社)	katase@erl.mec.mei.co.jp
	神藤正士(静岡大学工学部 電気・電子工学科)	temkand@ipc.shizuoka.ac.jp
	久保 寔(京都大学工学研究科 電子物性工学専攻)	mak-kubo@kuee.kyoto-u.ac.jp
	清水恵一(東芝ライテック株式会社 研究所)	shimizuk@yoko.tlt.co.jp
	田邊忠弘(星和電機設計 2 部)	tanabe@seiwa.co.jp
	野本佳孝(ニッポ電機技術第一課)	nomoto-yo@star.dnt.co.jp
	原田和郎(同志社大学 工学部 電子工学科)	kharada@mail.doshisha.ac.jp
	松岡 守 (三重大学 教育学部)	matsuoka@edu.mie-u.ac.jp
	松本 稔(岩崎電気, 応用技術開発部)	rwxcogonet.or.jp
	吉岡正樹 (ウシオ電機株式会社 技術研究所)	YOSHIOMS@mail.usshio.co.jp
	竜子雅俊(明石工業高等専門学校・電気工学科)	ryoko@akashi.ac.jp

協力者

上村幸三 (東芝ライテック株式会社)  
和田成伍 (松下電工株式会社)  
寒川誠二 (東北大学)  
山本 (東芝セミコンダクター社)  
河合 隆 (星和電機)  
木下 忍 (岩崎電気)  
田口常正(山口大学)  
志賀智一(電気通信大学)

## 研究調査委員会報告書の著作権について

本報告書の著作権は（社）照明学会に帰属します。

複写をされる方に

本報告書に掲載された著作物は、政令が指定した図書館で行うコピーサービスや、教育機関で教授者が講義に利用する複写をする場合等、著作権法で認められた例外を除き、著作権者に無断で複写すると違法になります。

