資 料

蛍光ランプの先端技術 無電極蛍光ランプの技術動向[†]

正会員 四 宮 雅 樹*

1. はじめに

放電容器の中に電極を持たず、外部からの誘導電界によって容器内部に放電を形成する無電極放電の現象は少なくとも1884年、Hittorf¹⁾のころには知られており、1927年にはFoulke²⁾がこれを用いた放電ランプを提案している。

無電極蛍光ランプもこの無電極放電を利用したもので、典型的にはアルゴン、クリプトンなどの希ガスと水銀蒸気の混合気体を放電させ、水銀より放射される紫外線を容器内面に塗布した蛍光体により可視光線に変換して利用する。すなわち放電を形成する手段が違っただけで、発光の原理は通常の蛍光ランプと異ならない。通常の蛍光ランプは動作中電極物質が消耗し、やがて不点に至るが無電極蛍光ランプではこのようなことはないで原理的に長寿命が期待される。このほかに発光部のコンパクト性、瞬時点灯などの特長がある。しかしながら電気ノイズ対策、点灯回路の効率などで大きさ、コストには問題があり、近年実用化には至ったものの、いまだ発展途上の光源と言えよう。

無電極放電ランプ全般のレビューは1993年のWharmby³⁾、同じ年の東方ら⁴⁾のものがある。1947年、Babat⁵⁾は無電極放電に関する彼の広範囲な実験にもとづいた報告をしており、この分野での古典的存在となった。無電極蛍光ランプの研究経緯については1994年の四宮ら⁶⁾がひととおり触れている。そのほか高圧放電を中心としたものに1993年の井上⁷⁾、少し古いが1974年のEckert⁸⁾によるレビューがある。

2. 実用の無電極蛍光ランプ

最初に実用化された無電極蛍光ランプ(図1)は1990年に発売された、 $\phi 35\sim 45\text{mm}$ の略球形のランプの外周に3ターンのコイルが巻かれており、13.56MHzの高周波電流が流される。高周波を発生する点灯回路はランプと一体的に配置され、ランプおよびコイルは電磁遮蔽のため金属網で包まれている^{6),9),10),22)}。

翌年オランダより無電極蛍光ランプ(図2)が発売された。ランプの外観は $\phi 110\text{mm}$ 程度の略球形だが中央に円筒上の凹みを設け、ここに棒状のフェライトコアに巻かれたコイルを取めている。点灯回路はランプとは別に金属の箱

図1 無電極蛍光ランプの例1

図2 無電極蛍光ランプの例2¹¹⁾

に収められ、約40cmのケーブルでランプ部分と接続される¹¹⁾。

これらの無電極蛍光ランプはいずれも専用の照明器具に組み込まれて使用される。しかし欧州で発売された無電極蛍光ランプ(図3)は約 $\phi 80\text{mm}$ のレフ電球に似た形状でエジソン形口金を持ち、そのままレフ電球と差し替えて使うことができる。このために単独でのノイズ対策、小型の点灯回路が必要であった。レフ電球に似た形状はノイズ対策のためでもあって、反射板の部分にノイズ対策が施されている。寿命はそれまでの無電極ランプのように長くはな

図3 無電極蛍光ランプの例3¹²⁾

[†] Trends of the Electroderess Fluorescent Lamps

* Masaki Sinomiya 松下電工株式会社光源開発研究室

1 万時間と一般の蛍光ランプ並みである¹²⁾。
実用の 3 つの無電極蛍光ランプの比較表を表 1 に掲げる。

表 1 実用の無電極蛍光ランプ一覧
Comercially Available Electrodeless Fluorescent Lamps

	例 1	例 2	例 3
外形	φ 126×L185	ランプ φ 105×L173 点灯回路 130×130×45	φ 82×L127
使用形態	器具組込み形	ランプ部、回路部に別れ、器具組込み形	レフ電球と差し替え可
入力電力 (W)	27	85	23
光束 (lm)	1,000	6,000	1,100
寿命 (時間)	40,000	60,000	10,000
光束維持率 (%)	50	70	70
調光	可	不可	不可
動作周波数 (MHz)	13.65	2.65	2.5
ノイズ対策	単体で対策	照明器具で対策	単体で対策

3. 放電形式

Babat は無電極放電の放電形態を次の 3 つに分類した⁵⁾。
(1) E 放電…外部電極と管壁を介した静電結合により放電電流が流れるもの。
(2) H 放電…外部コイルの作る磁力線による電磁誘導電界により放電電流が流れるもの。
(3) マイクロ波放電…電源周波数の波長と放電容器の大きさが近接したもので E 放電、H 放電の区別が判然としなくなる。

Wharmby はこの他に表面波放電を立てているが³⁾、繁雑になるのでここではマイクロ波放電の一変形としておく。このほかヘリコン波と呼ぶものはマイクロ波放電あるいは H 放電の変形であったりする。

E 放電と H 放電の違いは放電電流が前者では放電容器壁面を介して流れるのに対して、後者は壁面と並行に電流が流れることにあると Babat は強調する。E 放電は絶縁物電極による放電とも言えるので、無電極放電は狭義には H 放電を指す。

E 放電を用いた光源としては 10kPa 程度のキセノンを封入し、内面に蛍光体を塗布した棒状のランプの外壁に 2 条の金属箔を張りつけ、数十 kHz、数 kV のパルスで駆動する外面電極形希ガス蛍光ランプ¹³⁾が OA 機器の原稿読み取り用光源として実用化されている。また同様の原理で平板光源が提案されている¹⁴⁾。これらはいずれも 10kPa 程度のキセノンをを用いており、水銀を用いた蛍光ランプと比べると発光効率是非常に低い。100Pa 程度の希ガスと水銀の系で E 放電の特性はいくつか報告されているが^{15),16)}、外面電極に対向する部分のシースにおいて大きな電圧降下が生じ、かつ電力消費する^{17),18)}。これは効率の低下とともに、蛍

光体表面の黒化ないし劣化が問題となる。これを軽減するには動作周波数を高くするか、ガスの封入圧を高くすることである。

現在実用の無電極蛍光ランプはいずれも H 放電の形態を採る。通常の蛍光ランプでは電極降下電圧がほぼ一定であり、相対的に陽光柱の電圧配分を大きく取るために放電路は長いほうが良い。H 放電では放電路は始点終点の無いリング状だから、その長さは必要無く、コンパクト化に適している。

誘導電界は放電を維持するだけの大きさがなくてはならず、このため動作周波数は高く選ばれる。エバーライトでは 13.56MHz を、他の 2 つはフェライトコアを用いて動作周波数をやや低く、2.6MHz 付近を用いている。フェライトコアはランプの中央に収められるのでその温度上昇が問題で、これを解決するため QL ではコア中央に熱を外部に引き出すための棒を用意した。

4. 電気ノイズ対策

無電極放電ランプでは基本的にコイル周辺に誘導電界を起こしてランプを放電させているので、これがランプ外部に放射されないような対策が不可欠となる。もっとも簡単な方法は金属網によるもので、十分な電磁遮蔽を得ながら光学的な開口は 85% 程度を得ることは容易である⁶⁾。酸化錫、ITO などの透明導電被膜は表面抵抗が大きく、補助的な役割にしかない。静電的シールドは比較的抵抗の大きなものでも可能だが³⁾、コイルからの磁力線を遮蔽するには抵抗の小さなものでショートリングを形成するのが効果的である。エバーライトで用いられている金属網はこの役目をし、QL にあっては例えば器具の反射鏡がこの役目をする。Genura ではこのショートリングをランプに密接して備えている。金属網はそれだけ大型化し、ショートリングは横方向への配光を制限するので、この問題は十分に解決されたとは言えない。

これら通信に対する対策を行っている前提のもとでは人体に対する電磁輻射の安全性については問題ない。

5. 点灯回路

5.1 高周波電源

この周波数帯での電源を効率良く作り出すことは大きな課題となっている。効率が低いということはそれだけ電源部が熱を発生するというので、小型化の大きい障害ともなる。Genura では点灯回路を小型化し、ランプの口金付近に収めることができたが、このランプの寿命は 1 万時間でしかなく、その理由に点灯回路に無理がかかっていることが想像できる。

実用の 13.56MHz での高周波電源の効率は 70% 程度しかない⁶⁾。2.6MHz 帯で成功している D 級回路¹⁹⁾をこの周波数でも適用する方向の研究がされている^{20),21)}。この周波数帯での電力増幅はかつては真空管によるものであった。最近 MOS-FET が主力となっているが、これに対応す

る設計理論はまだ十分に確立していないように思える。

5.2 整合回路

コイルと高周波電源との間には整合回路を必要とする。この理由を高周波電源の都合から考えると、回路側から点灯中のコイルを見たインピーダンスは極めて強い誘導性だからこのままでは無効電力が大きくなり、これを何らかの形で打ち消してやりたい。またプラズマの立場からは放電開始のために高電圧が供給され、放電開始後は電流が安定されなければならない。このためにはプラズマから電源側を見たとき高インピーダンスでなければならない。プラズマを含めたコイルの等価回路が知られば始動時と点灯時の2つの状態を考慮してこれらの要請を満たす整合回路の設計は困難ではない²³⁾。

図4 無電極放電ランプの等価回路²⁶⁾

An Equivalent Circuit Model of an Electrodeless Lamp

6. ランプ設計

ランプ設計の多くは一般の蛍光ランプと同じだが、高負荷下で長時間光束を維持することが望まれる^{24),25)}。

希ガス圧力の選定にあたって、通常の蛍光ランプでは電極物質の消耗速度を押さえるためにその下限が決まってくる。無電極蛍光ランプでも希ガス圧力が低いと光束の減退が大きくなる²⁶⁾。これは壁面でのシース電位が関係するものと思われるが、光束減退には多くの要因が係わっており、定量的に希ガス圧力の下限を定めるほどには分かっていない。

無電極蛍光ランプにおいてプラズマの電界強度が高いとこれを駆動する磁界も大きくならねばならない。このことはコイルあるいはコアの損失が増大することにつながる²⁷⁾。したがってコイル損失を含めた効率ではプラズマ自身の発光効率にこの効果が重なって現れる。バッファガスとしてアルゴンの代わりにクリプトンを用いるとプラズマの電界強度は低下する傾向にあるから、ガス種選択においてこのことも加味される^{28),29)}。

7. 計測とモデリング

無電極放電ランプではやっかいなことにランプ電圧、ランプ電流に相当するものが直接には測れない。主にコイルの端子から電圧と電流を測定し、等価回路を求めるアプローチが取られる^{23),30),31)}。測定用に環状のランプを作り、ログスキーコイルをセンサーとしてランプ電流を測定した例もある¹²⁾。プローブを挿入してプラズマ諸元を測定する方法も取られるが^{32),33)}、電源の高周波の混入に注意を要

する。透明なランプを用いて発光を観測したり³³⁾、レーザを用いる非接触の方法^{34),35)}はその点有利である。

H放電は電極降下や陰極グローなどが無いだけ単純とも言える。実用の諸元では電源の1周期の間電子温度もプラズマ密度も時間的変動がなく、直流放電の陽光柱に似た特性を持つと考えられる³⁶⁾。シミュレーションのためにはマックスウェルの電磁方程式とプラズマの方程式を空間的に解かねばならない。Listerらは無限長の円筒モデルで径方向の1次元でこれを数値的に解いた³⁷⁾。最近 Benoy らが緯度方向も加えた2次元で解いている³⁸⁾。現実のコイルの形状を考えると電界は必ずしも周方向に均一ではないから、いずれはその影響を考慮した3次元空間での解析が行われるであろう。しかし電子エネルギー分布形状などの扱いに課題は残る。

8. その他若干の問題

8.1 軸方向電界

H放電では外部コイルの作る磁力線による電磁誘導電界で放電電流が流れるとしたが、コイルの隣接する線間に電位差があり、これにより軸方向にも電界が生じる。図4にこれを考慮した等価回路を示す²⁶⁾。このためH放電の維持機構について異論の出たこともあったが、1929年 MacKinnon³⁹⁾が軸方向電界によるE放電で放電開始し、その後周方向の誘導電界で維持されるH放電に移行すると説明して一応の決着を見た。

H放電に移行後、軸方向電界はプラズマ中では打ち消されていると思われるが、コイルの線間に電位差がなお存在していることは事実であるからE放電も混在していると見なければならない。これがいかなる影響を及ぼしているかは多少の議論を呼ぶ。コイル両端の電位差が大きいと光束低下が大きいことは報告されている²⁶⁾。また Godyak らはH放電のプラズマ中の電子エネルギー分布を測定し、現れた高エネルギーの電子群は軸方向電界に起因すると考察している⁴⁰⁾。E放電開始、H放電移行の条件に関しても議論は残る^{33),36),41)}。

8.2 表皮効果

プラズマ密度が高くなると高周波電磁界がプラズマ内部に浸透しない、いわゆる表皮効果が現れる⁸⁾。四宮は実用のエバーライトに近い諸元では表皮効果はまだ現れないとしたが、彼のデーターでも入力電力を少し大きくすればその影響が現れているから²³⁾、諸元の選び方によっては無視し得ないと思われる。

プラズマの電圧-電流特性は通常いわゆる負特性を示すが、表皮効果が現れ出すと見かけ上の正特性が現れる。Wharmbyが報告した実験結果からも電流が大きくなると図5に示すように、電圧-電流の傾きが負から正に転じるのが見られる¹²⁾。

H放電の安定の理由をEckertはこの正特性に求めた⁸⁾。しかしこれらの実験が負特性領域も記録していることはこの領域でも安定が得られているわけで、表皮効果に

よる正特性がH放電安定化の必要条件ではない。このほかにも表皮効果が電氣的に、あるいは発光効率などにどういふ影響を与えるかは今後の研究課題である。

図5 H放電プラズマの電圧-電流特性の一例¹²⁾
V-I Characteristic of an Inductive Coupled Plasma

9. おわりに

無電極放電の歴史はその発見からすでに100年を越えているが、その実用光源が登場してからまだ5年にしかならない。最初の無電極放電ランプのレビュー記事が本誌に掲載されたのは2年前である。今回それ以降の文献を整理してみるとずいぶん増加していることに気付く。これからも活発化するであろうこの分野における研究が、より良い光源の実現に結実することを願ってやまない。

参 考 文 献

- (1) Hittorf, W.: Ann. Phys. und Chm. N.F., 21, pp.137-139 (1884)
- (2) Flouke, E.: J. IEE, Feb, pp.139-148 (1927)
- (3) Wharmby, D.O.: IEE Proc., A, 140-6, pp.465-473 (1993)
- (4) 東方眞, 四宮雅樹: (無電極ランプの技術動向,) 照学誌, 77-5, pp.238-243 (1993)
- (5) Babat, G.I.: J. of I.E.E. Part 3, 94, pp.27-37 (1947)
- (6) 四宮雅樹, 岡本太志: 松下電工技報, 47, pp.3-7 (1994)
- (7) 井上昭浩: 照学誌, 77-12, pp.754-757 (1993)
- (8) Eckert, H.U.: High Temperature Sci., 6, pp.99-134 (1974)
- (9) 四宮, 小林, 東川, 谷河, 松浦, 明星: 平2照学大全, #6 (1990)
- (10) Shinomiya, M., et al.: J. Illum. Engng. Soc., 20-1, p.44 (1991)
- (11) Schlejen, J.: 6th Int. Sym. on Sci. & Tech. of Light Sources, 76:I (1992)
- (12) Wharmby, D.O. and Hamamsy, S.A.E: 7th Int. Sym. on

- Sci. & Tech. of Light Sources, 2:I (1995)
- (13) 藤岡誠一郎: 平3照学大全, #53, (1991)
- (14) Urakabe, T., et al.: 7th Int. Sym. on Sci. & Tech. of Light Sources, 44:L (1995)
- (15) 水野, 石川, 丸野: 昭53照学大全, #25 (1978)
- (16) Alexandrovich, B.M., et al.: IES Tech. Conf. Preprint, #91 pp.239-255 (1995)
- (17) Beneking, C.: J. Appl. Phys., 68, pp.5435-5446 (1990)
- (18) Beneking, C.: J. Appl. Phys., 68, pp.4461-4474 (1990)
- (19) Neron, L.R. and Qureshi, A.H.: Record of IEEE Power Electronics Specialists Conf., pp.509-514 (1993)
- (20) 細谷, 原田, 石原, 戸高, 岡本: 信学技報, PE93-84, (1994)
- (21) 熊谷, 鈴木, 岡本: 平7照学大全, #37 (1995)
- (22) 中野, 岡本, 水本: 平5照学大全, #20 (1993)
- (23) 四宮雅樹: 照学誌, 78-2, pp.101-106 (1994)
- (24) 東川, 四宮, 藤本, 明星: 第242回蛍光体同学会 (1992)
- (25) Higashikawa, et al.: 2nd Lux Pacifica Lighting Conf., B21-B26 (1993)
- (26) 平尾, 井上, 東: 昭54照学大全, #6 (1979)
- (27) Anderson, J.M.: 3rd Int. Sym. on Sci. & Tech. of Light Sources, No.10 (1983)
- (28) Godyak, V.A., et al.: J. Illum. Eng. Soc. Winter 1994, PP.40-44 (1984)
- (29) Whitney, F.: IEEE Industry Applications Soc. Annual Rep., pp.1988-2002 (1994)
- (30) Piejak, R.B., et al.: Plasma Sources Sci. Tech., 1, p.179 (1992)
- (31) 宮崎浩孝, 渡辺良男: 照学研究会, LS-94-16 (1994)
- (32) Mogi, I., et al.: 7th Int. Sym. on Sci. & Tech. of Light Sources, 12:P (1995)
- (33) Monte, M., et al.: 7th Int. Sym. on Sci. & Tech. of Light Sources, 22:P (1995)
- (34) Michael, J.D.: IEEE Plasma Sci. 95CH35796, 4D05 (1995)
- (35) Jonkers, M., et al.: 7th Int. Sym. on Sci. & Tech. of Light Sources, 3:L (1995)
- (36) 四宮雅樹, 東方眞: 照学研究会, LS-93-23 (1993)
- (37) Lister, G.G. and Cox, M.: Plasma Sources Sci. Technol., 1, 67-73 (1992)
- (38) Benoy, D.A., et al.: 7th Int. Sym. on Sci. & Tech. of Light Sources, 66:P (1995)
- (39) Mackinnon, K.A.: Phill. Mag. S.7.8-52, pp.605-617 (1929)
- (40) Godyak, V.A., et al.: 47th Ann. Gaseous Electronics Conference, DA-6 (1994)
- (41) Kotani, M., et al.: 7th Int. Sym. on Sci. & Tech. of Light Sources, 11:P (1995)

(受付日1995年9月26日)

四宮 雅樹 (正会員)

昭和24年5月2日生まれ。昭和48年3月京都大学工学部電子工学科を卒業。同年4月松下電工株式会社に入社。以来電子式点灯回路の研究を経て無電極蛍光ランプなど新光源及び点灯システムの研究開発に従事。現在同社照明事業グループ光源開発研究室主幹技師。昭和62年～平成2年次世代光源システム研究調査委員。平成4年日本照明賞。平成7年照明学会論文賞。