

博士学位論文審査要旨

2007年 8月 28日

論文題目 : 蛍光放電灯のプラズマ計測とその応用

学位申請者 : 五島 成夫

審査委員 :

主査 : 工学研究科 教授 和田 元

副査 : 工学研究科 教授 石原 好之

副査 : 工学研究科 教授 佐々木 和可緒

要 旨 :

蛍光放電灯は発光効率の良い照明器具として、広く身の回りに用いられている。実際の蛍光灯の安定な点弧・発光動作は、高度な複合技術の上に成立しており、現在の蛍光放電灯照明装置は、ほぼ全ての技術面での最適化が完成したものと言える。応用範囲もさらに広げられ、高い演色性を実現するために発光色の異なる蛍光放電灯を複数本用いて混色を行い、目的とする色温度と明るさでの照明を実現する器具も用いられるようになった。学位申請者は混色型蛍光放電灯照明器具の演色性を研究する中で、蛍光放電灯の端部発光が器具の調光運転性能に影響を与えることを見出し、詳細な研究を開始することから、本論文に詳述した研究全体の着想を得ている。

以上の経緯を述べた後、第1章ではR（赤）G（緑）B（青）蛍光放電管を用いた混色型照明器具に生じる“色ずれ”効果の詳細を明らかにしている。この中で、定格から外れた運転条件で蛍光灯放電管を運転した際に、陽光柱端部に発光強度分布の顕著な変化が観測されることを紹介し、この原因となるプラズマ-電極表面相互作用の研究を行うことにより、蛍光灯の応用技術に新たな可能性を開き得るとの議論を展開している。

第2章では1章で述べたプラズマ-電極表面相互作用の変化が、運転時間とともに生じる電極劣化で生じると予想されることから、これを確認するための連続運転試験を行った結果について述べている。実験には2万時間を超える測定時間を費やした試料もあり、これまでに報告されていない蛍光灯の劣化特性が紹介されている。また、短時間で性能評価を行うための加速試験法についても2章で提案しており、次の3章でも短期点消灯運転を行うことにより、加速試験が可能であることを示している。

第4章では独特の発想により開発した、商用殺菌灯低圧水銀放電管の電極仕事関数測定

法について述べている。プラズマが存在しない状態で光電効果を用いて計測した結果、仕事関数はこれまでの予想値 1.8 eV に比べてはるかに高い 3 eV 程度の値となることを明らかにしている。さらにマイクロ波放電を用いて放電管内にプラズマを励起し、プラズマが存在する状態で電極光電仕事関数を測定した結果、仕事関数の最低値が 2.4 eV 程度であることを確認している。

続く 5 章では蛍光放電灯に用いた計測手法を、同じ放電管光源である高輝度放電灯に適用し、蛍光灯の場合と同様に劣化特性を調査可能であることを明らかにしている。6 章では再び蛍光灯の電極劣化に戻り、放電管から電極を取り出して詳細な観測を行い、寿命末期の電極劣化モデルの提案を行っている。さらに 7 章において、本研究で開発したプラズマ測定法、放電管電極劣化加速法、仕事関数測定法について再検討を行い、6 章の結果をもとにした蛍光灯放電管の寿命予測法の実現可能性について議論している。

以上述べたように本論文は、蛍光放電灯に関する電気物理を基礎から明らかにし、これまでの実験データと比較して、格段に高い信頼性を有する結果にもとづいた議論を展開している。さらに用いたプラズマ計測手法が蛍光放電灯以外の光源に対しても有効であることを実証し、さらなる付加価値を有する光源開発への提案も行っている。

よって本論文は博士（工学）（同志社大学）の学位論文として十分な価値を有するものと認められる。

学力確認結果の要旨

2007年8月28日

論文題目 : 蛍光放電灯のプラズマ計測とその応用

学位申請者 : 五島 成夫

審査委員 :

主査 : 工学研究科 教授 和田 元

副査 : 工学研究科 教授 石原 好之

副査 : 工学研究科 教授 佐々木 和可緒

要 旨 :

本論文提出者は、1989年本学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程(前期)を修了後、直ちに松下電工株式会社に入社した。入社当初から照明装置の研究開発に従事し、研究を進展させるために1997年4月より本学大学院工学研究科電気工学専攻(後期)に社会人学生として入学した。各年度において優れた業績を挙げ、2003年3月に単位取得退学した後も、高機能照明装置の研究を継続し、研究成果の発表を行ってきた。

本論文の主たる内容は照明学会誌、Light Sourcesなどに掲載されすでに十分な評価を受けている。

2007年7月28日午後3時30分より約2時間にわたり、提出論文に関する学術講演会(博士論文公聴会)が開かれ、種々の質疑討論が行われたが、提出者の説明により、十分な理解が得られた。さらに講演会終了後、審査委員により論文に関係する諸問題に関する口頭試問を実施した結果、本人の十分な学力を確認することができた。また、英語、ドイツ語に関しても十分な学力を有することが確認された。

以上のことから、本学位申請者の専門分野、および語学に関する学力は十分なものであると認める。

博士學位論文要旨

論文題目： 蛍光放電灯のプラズマ計測とその応用

氏名： 五島 成夫

要旨：

本論文は蛍光放電灯の劣化モードを解明するために開発したプラズマ計測法の基礎物理と、その応用についてまとめたもので7章から構成される。第1章の序論では蛍光灯の歴史や現状技術について概説した後、RGBの蛍光灯を組み合わせる個別に調光し、色温度を連続的に変化させる照明システムの研究成果について述べた。この研究に残された課題である、理論値と実測値とで色ずれが発生する原因は、放電灯の低電圧運転時の陽光柱長の減少ではないかとの着想を得、この考察が本論文の主題である蛍光灯放電現象の基礎電気物理解明研究のきっかけとなっていることを述べた。

第2章では蛍光灯プラズマと放電管電極との相互作用に関わる基本物理について述べた後、実際に蛍光灯の連続運転を行ない、ランプの劣化特性について評価を行なった結果について述べた。評価においては蛍光灯の放電電力の増加により劣化を加速する手法の検討、明るさセンサを用いた蛍光灯の劣化計測技術の開発、画像処理によるランプ全体の発光強度特性変化計測技術の開発を行なった。これらの計測技術を用いて長期連続加速試験を行ない、ランプ劣化特性の評価を行なった。その結果、蛍光灯は点灯を続けることで蛍光灯プラズマの陽光柱長は短くなること、放電管端部の空冷に加えてフィラメント電流を分流することにより妥当な加速試験を実現できることを示した。また端部、中央部における光強度計測により得られる発光強度比の測定により、放電灯の劣化度評価に十分な情報が得られることを明らかにした。さらに連続試験において、実験開始から3,000時間までの間で一時的に端部光量が上昇するという特徴的な変化があることを明らかにした。

第3章では蛍光灯劣化の加速手法として、短期点灯・消灯を繰り返して電極に瞬時高電圧を定期的に引加し、電極に発生する負荷に対する調査を行なった。その結果、点灯・消灯試験により、蛍光灯寿命末期症状を短時間で実現できる可能性があることを明らかにした。試験結果から、中央部については特に顕著な変化はみられない状態で、端部に顕著な光束減少がみられる場合が観測された。また、端部劣化は通常片側に観測され、寿命末期を迎えた蛍光灯フィラメントのエミッター損耗も、片側でのみ顕著に観測されることを確認した。しかし点滅により加速においても、蛍光灯が寿命末期を迎えるには数ヶ月程度を必要とすることも明らかにした。

第4章においては、非破壊的な電極劣化評価に関する研究を行なった成果を纏めた。第2、3章で得た結果から電極の劣化が蛍光灯全体の劣化を決定する要因であることを示唆することから、特に電極からの電子放出に重要な影響を与えられと考えられる仕事関数を光電効果による測定する手法を開発し、その手法を用いて20W殺菌灯の消灯時の仕事関数を測定した。その結果仕事関数は3.1~3.4 eVと一般に言われている酸化陰極の値よりも大きい、タングステン仕事関数の値である4.5 eVよりは小さいことを示した。また、放電を行なうと仕事関数は高くなること、放電管が古くなると仕事関数は低くなるが、エミッターの劣化により電極の電子放出効率率は1/3程度まで落ちること、古い放電管では電極近傍に均一な発光が得られることを明らかにした。

以上の結果はプラズマを消弧した状態で得たものである。プラズマが存在しない状態で測定した仕事関数と、プラズマが存在する状態での仕事関数が異なる可能性があるため、無電極放電によってプラズマを維持し、その上でプラズマが近傍に存在する状態での仕事関数を、光電効果に

よって測定するための実験装置を設計・製作した。この装置を用いて、20 W 殺菌灯内にマイクロ波でランプを点灯させた際の、酸化陰極表面の仕事関数を測定したところ、得られた仕事関数の値が2.28~2.31 eV となることを明らかにした。

第5章では蛍光灯研究で得られた知見を他の光源へ展開することを考え、HID ランプの劣化評価に活用する研究を行ない、蛍光灯と同様の評価手法がHID ランプへも活用可能であることを確認した。試験結果として、HID ランプの光束低下を確認し、また短期点灯・消灯を繰り返すことにより光束低下を速めることができ、HID ランプの加速試験の手法として有効であることを確認した。さらに点灯時間の経過に伴い、蛍光灯同様に管壁の黒化現象が生じることを確認した。さらに詳細な分光測定を行い、この黒化原因物質が炭素およびタングステンである可能性が高いことを明らかにした。またアルミナ透光率の測定から、劣化によって底部の透光性が減少することを示した。さらにデジタルカメラで撮影したHID ランプ写真から発光強度を数値化し、この結果から得られる発光強度分布比は、光束低下特性に強く相関していることを確認した。従って管の発光強度分布を計測することにより、管劣化の定量的指標が得られる可能性があることを示した。分光測定によるAl 輝線の変化から、光束低下の原因として発光管表面に $3\text{Dy}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{Al}_2\text{O}_3$ ガーネットが析出している可能性があることも、併せて明らかにした。

第6章では実際にランプ寿命を迎えたランプを開封し、その電極の状態を解析した。その結果、ランプの点灯サイクル（連続点灯、短期点灯・消灯）によって、フィラメント寿命末期の損耗の様相が異なることを明らかにした。すなわち、連続点灯ではフィラメントが徐々に損耗するのに対し、短期点灯・消灯ではエミッターが飛散し、寿命末期に過電流が流れ、このことによって、フィラメントが断線して寿命を迎えるモデルが妥当であることが分った。実際のランプはこれらどちらかの単一モードで劣化することは少なく、双方が合わさった形で劣化し、先行したモードで寿命を迎えるものと考えられる。

第7章では本論文全体の総括を行ない、本研究で確立したプラズマ光源計測技術の概要とそれから今後の活用・展望について述べた。まず、本研究において確立した光源計測技術についてはそれらの得失をまとめ、評価のために開発した光源劣化加速手法について、本研究の範囲内で判明している限界について纏めた。特に本論文で行なった明るさセンサ、画像解析による蛍光灯の発光分布計測技術の確認により、実際の光源の付加価値を高めうる可能性について議論した。さらにランプ寿命末期の放電管プラズマ挙動を明確にし、サンプル数を増加することによって、より精度のよい解析を行なっていくことが寿命予測機能を有した光源開発のために必要との提案を行なった。また本研究の継続により、蛍光灯内におけるプラズマの解析、電極の劣化機構解明研究が進展するものと期待し、更には放電灯以外の光源劣化特性の解明研究が発展するものと考え、可能な研究テーマの提案を行なった。