

氏 名	石 神 敏 彦
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学位記番号	論工博第3351号
学位授与の日付	平成10年5月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当
学位論文題目	HIDランプの封入物の発光と反応に関する研究

(主査)

論文調査委員 教授 橘 邦英 教授 藤田茂夫 教授 藤本 孝

論 文 内 容 の 要 旨

高圧気体放電で発光するHIDランプ (High Intensity Discharge Lamp) は、高効率、高演色性、かつコンパクトであることから、種々の屋外照明のみならず屋内照明や自動車用ヘッドランプ、液晶プロジェクタ用バックライトなどにも使用されるようになってきている。しかし、HIDランプは電球や蛍光灯などの光源に比べると、まだ実用上で多くの問題が残されている。HIDランプの光学特性は主に封入物の発光特性に依存しており、初期特性の向上 (高効率化、高演色性化) には封入物の発光の研究が重要となる。またHIDランプの寿命特性の安定にはランプ内の化学反応の制御が必要である。本論文は、このような必要性からHIDランプの封入物の発光と反応に関して実験的、理論的考察によって高性能化をはかってきた一連の研究成果をまとめたもので、6章により構成されている。

第1章では、本研究の工学的立脚点ならびに本研究の必要性を明らかにすると共に、HIDランプの封入物の発光と反応に関する過去の研究の流れについて展望し、本研究の方向づけを行っている。

第2章では、高圧ナトリウムランプの発光スペクトルの検討から放電の基礎パラメータを吟味し、エネルギーバランス式を用いた高圧ナトリウムアーク放電の特性モデルを構築して、広いランプパラメータ領域で実ランプのアーク温度などの特性と良い一致が得られるような実用的モデルへと発展させている。

第3章では、高圧ナトリウムランプの発光特性の駆動回路依存性を実験的に、また理論的に検討している。まず、実験的には発光強度の時間変化のデータを用いてアーク温度の時間変化を求める方法を確立している。この方法で得られたアーク温度分布の点灯状態による相違から、パルス点灯における発光線の増減の原因、発光変化に好適なパルス条件、パルス点灯の電気特性など、ランプの特性に関する重要な事項が明確にされている。次に、この点灯方式によるランプの特性への影響についての理論化を行っている。すなわち前章で確立したモデルを拡張して、アーク温度分布や発光強度の時間変化の計算を可能にしている。この計算方法を高圧ナトリウムランプのパルス点灯に適用すると、スペクトル変化や相関色温度の変化などの実験結果と対応のよい結果が得られることを示している。特に450nm近傍の連続発光のパルス点灯での増大については、NaHg分子発光とするアプローチを発展させて実験結果と良く一致する結果が得られている。

第4章では、今後のHIDランプの主流となるメタルハライドランプについて種々の検討を行っている。まず、高演色性メタルハライドランプの性能向上について、625nmに発光する二原子分子CaBrを利用することにより、従来のSnハライド系の分子発光型高演色ランプをさらに改善できることを見出し、平均演色評価数Raが99以上で適度な色温度と比較的高い効率を持つ超高演色性メタルハライドランプを実現している。高効率タイプのSc-Na系のメタルハライドランプについては、最冷部温度規制法により4種のNaI/ScI₃封入比のSc-Naメタルハライドランプの発光特性を実験的に解析し、Sc, Na, Hgの各発光強度の関係、高温部分でのSc発光の飽和、全光束の変化の様子などの基礎的なデータを得ている。このような基礎データを実ランプに適用することで400Wタイプで100lm/Wの高効率メタルハライドランプを実現している。また、第2章で得られた特性モデルをSc-Naメタルハライドランプに応用して最冷部規制法の実験ランプの分光特性 (Ra, 相関色

温度)を評価し、分光特性の最冷部温度依存性などの傾向が実験と一致することを確認している。一方、アーク長の大きい大電力のランプを垂直点灯する場合に軸方向に封入物の偏在という現象が起こるが、この効果は希ガスによる対流速度の増大とその結果である軸方向の封入物の偏在の緩和によって低減できることを理論解析によって示し、希ガスの圧力と原子量が大きくなるほど効率が向上することを見出している。

第5章では、寿命特性を改善するため、封入物と電極、また封入物と発光管材料との反応の現象を実験的に解析するとともに、熱平衡論による熱力学計算を行い、理論的な説明を行っている。まず、高圧ナトリウムランプでは長期点灯中に封入されているNaが消失し、その結果Naアマルガムの組成比が変化してランプ電圧が上昇することを実験に証明している。また放射化分析によって、反応したNaは管端に多く分布していることを明らかにしている。熱平衡論によるNaとアルミナの反応の解析では生成物が β -アルミナとアルミン酸ソーダとなる反応が可能であり、両反応とも低温部側が有利であるため、管端部にそれらが生成することが示唆される。しかし、 β -アルミナの方が反応温度領域が広いので、高温部では β -アルミナのみが確認されると推論している。このような解析は実験結果とよく対応している。また、Sc-Naメタルハライドランプで生成される酸化スカンジウムとスカンジウムシリケートは、気相の ScI_3 が石英と反応したものであることが示されている。一方、メタルハライドランプの封入物と電極の反応による電極の浸食や発光管の黒化の問題について、 SnI_2 封入ランプにおけるWの輸送現象を熱平衡論から解析し、酸素がWの輸送(黒化物の浄化など)に大きく寄与していることを明らかにしている。また、 FeI_2 封入ランプの電極先端の熔融は、高温部での気相のFeの分圧がその温度のFeの蒸気圧より大きいため、過剰のFeが電極に付着して低融点のFe-W合金を作ることが原因であることを示している。電極中に ThO_2 を含む場合には、 ScI_3 と反応して ThI_4 となって気相へ放出されたThがWの輸送に影響して、発光管の黒化が進むことが示されている。以上のような理論解析によって反応のメカニズムが明らかになり、長寿命化への具体的方策の足がかりが得られている。

第6章は結論で、本研究で得られた成果を総括し、今後の展望を述べている。

論文審査の結果の要旨

金属ハロゲン化物を封入した高輝度放電ランプ(HIDランプ)は種々の屋外照明用のみならず、店舗用や自動車用などにも使用されるようになってきている。しかし、効率や演色性、寿命などの点で実用上の問題が多く残されている。本論文は、HIDランプの効率や演色性に関わる発光スペクトル特性、並びに寿命に関わる封入物の管壁や電極との反応について、理論的なモデルによるシミュレーションと実験の比較による考察から、それらの問題を解決する方策を考究した一連の研究をとりまとめたもので、得られた主な成果は以下の通りである。

1. HIDランプの中で最も基本的な高圧ナトリウムランプについて、エネルギーバランス式に基づいた理論的モデルを構築した。そのモデルでは、アーク温度分布や電位傾度、さらにプラズマ中の原子の励起準位密度分布や発光スペクトル分布を順次求めることができ、封入ガスの圧力、封入化合物の量、放電管の寸法を与えることで、電気的特性や発光特性のシミュレーションが可能になった。
2. 上記のモデルを時間依存特性を計算できるように発展させて、ランプをパルス駆動した場合において計算で求めた諸特性を実験データと比較したところ、パルス点灯では定常放電に比べて通電時のアーク温度が上昇するため、励起エネルギーの高い準位からの発光線の強度が増加し、スペクトル分布が変化するという機構が明らかになった。また、低い周波数でデューティ比を小さく、放電維持電流を小さくしたときに、その効果が大きくなることを示した。
3. 各種のメタルハライドを封入したランプ中の原子、分子やイオンの空間分布やその対流による影響を調べ、封入物による輝度や分光放射特性の変化を解析することによって、Snハライド系のランプでのCaBr分子発光の利用による演色性の改善や、Sc-Na-Hg系での高輝度化の理由についての理論的な説明が得られた。
4. 熱化学平衡の基礎理論に基づいて、封入物と管壁や電極材料との反応を解析し、Naのアルミナとの反応による消失機構やScの石英管との反応のみならず、タングステン電極の浸食やそれによる管壁の黒化に関するWの輸送現象を説明して、輝度の低下や寿命の低減に与えている影響を分析した。

以上要するに、本論文ではHIDランプの研究開発に有効な理論モデルを構築し、実験との比較によってその妥当性を評価するとともに、効率や演色性の向上、長寿命化などの実用上の重要な課題に対して、具体的な機構の解明に基づいて解決の

方策を示しており、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成10年3月24日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。