学位論文題名

A Study on Discharge Properties of Gas Mixtures
for Plasma Display Panels

(プラズマディスプレイパネル用混合ガスの放電特性に関する研究)

学位論文内容の要旨

放電発光を利用した電子デバイスであるプラズマディスプレイパネル (plasma display panel: PDP) は、薄型軽量化が容易であり、広視野角、長寿命といった特徴も有するため、大型電子広告板や大画面テレビジョンモニタへの応用が急速に進められている。PDP は主にガラス板、電極、蛍光体、混合希ガスおよび駆動回路で構成されている。微細加工により、 $100\ \mu\text{m}$ 程度の微小放電セルがガラス板上に数百万個以上形成されており、それらのセルが PDP 表示面の画素として働く。電圧印加により、セル中の混合希ガス (一般には Xe/Ne または Xe/He ガスを使用) で放電が生じ、Xe 発光種 (共鳴原子 $\text{Xe}(1s_{4,2})$ および励起分子 Xe_2^*) が発生する。その発光種から放射される紫外光は蛍光体を介して三原色の可視光に変換される。なお、各セルの放電は時分割で制御されるため、PDP では多階調による鮮明な画像表示を可能にしている。

このように、最先端技術が駆使された PDP は、ディスプレイとして数々の優れた特徴を有しているが、従来のディスプレイに比べて発光効率が低く ($1\text{--}2\ \text{lm/W}$)、駆動電圧が高い ($200\ \text{V}$ 程度) といった問題点がある。今後の大幅な市場拡大のためには、これらの改善が急務である。これまで PDP の性能向上のために、駆動方式および電極構造の改良や新蛍光塗料の開発などが行なわれてきた。一方、実験やシミュレーションにより PDP の放電状態を調査し、改善策を検討する試みも多くなされている。

本研究は、PDP に用いる混合ガスの放電基礎特性を把握することを目的とし、多準位系の励起種反応を考慮したボルツマン方程式解法を新たに開発してガス組成、混合比 K 、ガス圧 p_0 、電子数密度 n_e 、換算電界 E/p_0 といった広範囲の放電条件に対する放電基礎特性の包括的な解析を行なった。まず、現在、PDP 用混合ガスとして用いられている Xe/Ne および Xe/He に対して放電諸量を計算し、実験値との比較から本モデルの妥当性を検討した。また、紫外光放射効率 η や放電開始電圧 V_g を算出して、各放電条件に対する依存性を調査した。次に両 PDP ガスへの Ar や Kr 添加による η や V_g の変化をペニング電離や励起移行などのエネルギー移行過程を考慮して解析した。また、エキシマレーザ等で実績のあるハロゲン-希ガス混合による希ガスハライドエキシマ ArF^* 、 KrF^* および XeCl^* からの発光量の比較を行い、PDP の新たな放電ガスとしての可能性を検証した。

本論文は6つの章からなり、以下のように構成されている。

第1章は序論であり、本研究の背景、目的、構成について述べている。

第2章では、放電プラズマ中電子群の挙動記述の基礎となるボルツマン方程式について詳述し、実際の数値計算に用いるための展開式の導出を行なっている。また、本研究で考

慮した励起種間反応に関する追加項やボルツマン方程式から導出される放電諸量についても記述した。

第3章では、現行PDPで用いられているXe/NeおよびXe/Heにおける放電基礎特性の解析を行なった。まず、諸混合比における典型的な放電諸量（電離係数、励起係数、ドリフト速度）を計算し、実験結果との比較により本研究で構築した多準位系モデルの妥当性を検討した。また、放電諸量の n_e 依存性からPDP駆動時における高 n_e ($> 10^{10} \text{ cm}^{-3}$)状態では、累積電離やペニング電離による低エネルギーの二次電子注入が顕著になるため、それらの反応が放電諸量に大きな変化を与えることが確認された。次に、PDP放電面保護膜であるMgOへの実効二次電子放出係数と本解析より得た電離係数を用いて V_g を計算した結果、両混合ともXe混合比 $K_{Xe} = 0.01$ のときに V_g が最小値を取ることがわかった。なお、Xe/Heの V_g と比較するとXe/Neの V_g がより低くなることが示された。紫外光放射特性に関して、Xe($1s_{4,2}$)およびXe $_2^*$ からの紫外線放射レート $(AM)_r$ および $(AM)_{\text{exm}}$ は入力電力 P_e 一定のもとで、ある E/p_0 でピークを持ち、 K_{Xe} の増加にしたがってそのピークは高 E/p_0 側へシフトした。このとき、Xe * （励起原子Xe($1s$))とXeの三体衝突によりXe $_2^*$ の生成が促進されるため、 $(AM)_{\text{exm}}$ が増加することが示された。また、 p_0 の増加とともに η は増加するが、 $p_0 = 600 \text{ Torr}$ になると η の増加は飽和することがわかった。一方、 P_e を増加させると $E/p_0 < 10 \text{ Vcm}^{-1}\text{Torr}^{-1}$ でXe/Neの η が大きく減少するがXe/Heではほとんど変化がなかった。なお、本解析条件下ではXe/Neの η がXe/Heの場合を上回っており、PDPにおいてXe/Neの使用が優位であることが示唆された。

第4章では、Xe/NeおよびXe/HeにArまたはKrを添加し、その混合比を変化させたときの発光および放電特性への影響を調べた。Xe/Ar/Neの η はAr混合比 K_{Ar} の増加とともに低 E/p_0 で減少したが、Xe/Ar/Heでは運動量変換によるエネルギー損失が減少するため、 η は著しく増加した。高 E/p_0 ではArまたはKrの添加によって励起移行によるXe * の生成量が増加し、 $K_{Xe} = 0.05$ におけるXe/Neに対してAr添加で最大5.8倍、Krで7.7倍にまで達した。さらにXe $^* - \text{Xe} - \text{Ar}$ またはXe $^* - \text{Xe} - \text{Kr}$ 間の三体衝突によるXe $_2^*$ の生成レートはXe $^* - \text{Xe} - \text{Ne}$ 間の衝突レートよりも大きいため、Xe * 励起レートの増加との相乗効果により η は大幅に増加した。また、Xe/Neに対してArの添加は η を減少させることなく、Neからの600 nm帯可視光を効果的に低減できるため、コントラストの向上にも有効であることがわかった。一方、Arの二次電子放出係数はHeやNeの場合に比べて小さいため、両混合ガスとも V_g は増加した。

第5章では、PDPの新しい発光源としてエキシマレーザでの利用実績のあるArF * 、KrF * およびXeCl * を対象に加え、ハロゲン-希ガス混合(Ar/F $_2$ /Ne、Kr/F $_2$ /NeおよびXe/Cl $_2$ /Ne)における放電特性の解析を行なった。Ar、KrおよびXeの混合比 K_X を固定し、F $_2$ およびCl $_2$ の混合比 K_Y を変化させると $K_Y = 10^{-3}$ で希ガスハライドエキシマからの紫外線放射レートが最大となることがわかった。Xe/Cl $_2$ /NeではXe($1s_{4,2}$)およびXe $_2^*$ に加えてXeCl * から発光もあるため、総紫外光放射レートは $E/p_0 < 10 \text{ Vcm}^{-1}\text{Torr}^{-1}$ でXe/Neの場合を上回った。一方、Ar/F $_2$ /NeおよびKr/F $_2$ /Neにおいて $K_Y < 10^{-3}$ ではNeからの電離が促進され、Xe/Neの場合と比べて V_g の大幅な低下が見られた。そのため、これらの混合ガスの使用が放電条件によってはPDPの性能向上に効果的であることが示された。

第6章は結論であり、本研究で得られた結果を総括している。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 酒 井 洋 輔
副 査 教 授 長 谷 川 英 機
副 査 教 授 雨 宮 好 仁
副 査 助 教 授 菅 原 広 剛

学 位 論 文 題 名

A Study on Discharge Properties of Gas Mixtures for Plasma Display Panels

(プラズマディスプレイパネル用混合ガスの放電特性に関する研究)

放電発光を利用したプラズマディスプレイパネル (PDP) は、薄型軽量化が容易、広視野角、長寿命等の特徴も有するため、大型表示装置としての開発が進められてきた。PDPの発光部は、ガラス板上に形成された大きさ $100\mu\text{m}$ 程度の数百万個以上から成る微小放電セルで構成されている。セルに電圧が印加されるとセル中のガス (現在、Xe/Ne や Xe/He 混合ガスが使用) がプラズマ化し、Xe 励起種 (共鳴 $\text{Xe}(1s_{4,2})$ およびエキシマ Xe_2^*) が生成、それらから放射される紫外光が蛍光体を励起し三原色の可視光に変換される。しかし、現在の PDP には従来のディスプレイに比べて発光効率が低く ($1 - 2 \text{ lm/W}$)、放電開始電圧 V_g が高い (200 V 程度) といった問題点がある。発光効率が低い主因は放電励起による紫外線の生成エネルギー効率が 5% 程度と低いことにある。

本研究は、最大の紫外線生成エネルギー効率を与える最適ガスの選択を目的とし、ガス組成、その混合割合、 0°C におけるガス圧 p_0 、電子数密度、換算電界 E/p_0 等の放電条件に対して放電諸特性を系統的に解析・検討し、PDPの性能向上に対し新知見をまとめたものである。

本論文は6章からなり、以下のように構成されている。

第1章は序論であり、本研究の背景、目的、構成について述べている。

第2章では、放電プラズマ中電子群の挙動を記述する、励起種間のエネルギー移行反応を考慮したボルツマン方程式解法について詳述し、実際の数値計算に用いるための展開形を示した。

第3章では、現在PDPで用いられているXe/NeおよびXe/Heにおける放電基礎特性を解析した。まず、ガス諸混合割合対し電子の電離係数、励起係数、ドリフト速度を計算し、それらと実験データを比較することにより本研究で構築した多準位系モデルの妥当性を検討した。PDP駆動時に対応する電子密度 ($> 10^{10} \text{ cm}^{-3}$) では、累積電離やペニング電離による低エネルギー二次電子注入が顕著になり、両電離過程が放電諸量に大きく影響することを確認した。また、電極面を覆うMgO膜の実効二次電子放出係数を解析し、両混合ガスともにXe混合比が 0.01 付近で V_g が最小になることを示した。本解析条件下ではXe/NeがXe/Heの場合よりXe($1s_{4,2}$)およびXe $_2^*$ の生成効率が高くPDP動作に優れていることを示した。

第4章では、Xe/NeおよびXe/HeにArまたはKrを添加し、その混合割合を変化させ、発光および放電特性への影響を調べた。Xe/Ar/Neの紫外線生成効率はAr混合割合の増加とともに低 E/p_0 で減少したが、Xe/Ar/Heでは生成効率が著しく増加した。高 E/p_0 ではAr（またはKr）の添加により励起Ar（Kr）からの励起移行によるXe^{*}の生成量が増加し、Xe混合割合が0.05付近で、Xe/NeにArを添加した場合、最大5.8倍、Krで7.7倍に達した。さらにXe^{*}-Xe-ArまたはXe^{*}-Xe-Kr間の三体衝突によるXe₂^{*}の生成により紫外線生成効率は大幅に増加した。Xe/Neに対しては、Neからの600 nm帯可視光発光を抑制し、コントラストの向上にも有効であることを示した。

第5章では、PDPの新しい発光源としてArF^{*}、KrF^{*}およびXeCl^{*}を取り上げ、Ar/F₂/Ne、Kr/F₂/NeおよびXe/Cl₂/Ne混合ガスにおける放電特性の解析を行なった。その結果、F₂およびCl₂の混合割合が10⁻³で紫外線生成レートが最大となること、Xe/Cl₂/NeではXe(1s_{4,2})およびXe₂^{*}に加えてXeCl^{*}からの発光も現れ、紫外線生成効率は $E/p_0 < 10 \text{ Vcm}^{-1}\text{Torr}^{-1}$ でXe/Neの場合を上回ること、等放電条件の選び方によっては発光効率向上に寄与することを示した。

第6章は結論であり、本研究で得られた成果をまとめると同時に将来への展望を述べている。

これを要するに、著者はプラズマディスプレイ技術の基礎となる混合希ガス放電の諸特性、特に紫外線生成効率と放電開始電圧を体系的に解析し、放電セル設計に対し多くの知見を与えたものであり、放電工学および低温プラズマ工学の進歩に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。