

(論文内容の要旨)

本論文は、マイクロプラズマの持つ特性、すなわち高電子密度に起因した明るい発光現象、ならびに高いプラズマ周波数に起因するマイクロ波領域での誘電性の変化を応用し、発光・電磁波制御デバイスの設計・実験的検討・理論的考察を行って、得られた研究成果を取り纏めたものであり、全5章よりなっている。

第1章では、ミリメートル以下のサイズをもつマイクロプラズマについて、まず、その幅広い応用への可能性を概観しながら本研究の背景について述べた後、マイクロプラズマの生成法や一般的な特性を、プラズマのパラメータやサイズ、放電特性の観点から俯瞰的に説明している。また、本論文でのマイクロプラズマ生成には主にシリコン基板上に形成した放電セルを使用しており、その応用への有用性を指摘している。さらに、マイクロプラズマのアレイ状構造の機能性について触れ、発光デバイスへの応用とメタマテリアルの概念を通じた電磁波制御デバイスへの応用について、それらの学術及び実用的意義を述べ、第2章以降の具体的な研究内容の動機付けを行っている。

第2章では、ディスプレイや高解像度を持つ光デバイスへの応用に関して、放電発光セルの新規2次元構造を提案し、その実験検討ならびに数値計算による機構解明を行った。電極構造として、金属薄膜／絶縁薄膜／シリコン基板の積層構造に対して、2次元の電極パターンとして、100 μm 角程度の絶縁膜露出部を電子ビーム描画法により作製した。そして、両極性のパルス電圧をシリコン基板と金属薄膜の間に印加して、絶縁膜露出部を中心に誘電体バリア放電によりマイクロプラズマを生成した。このとき、内側の絶縁膜上に浮遊電極を形成し、その効果による発光強度の変化を実験的に調べた。その結果、1つの浮遊電極の場合も、2×2のアレイ状浮遊電極の場合も、そのパターン上での大幅な発光強度の増加を観測した。また、浮遊電極があることにより、放電電圧パルス印加時に、発光開始タイミングが早くなることがわかった。この機構を解明するため、2次元断面上での放電プラズマの時空間分布を流体モデルによって計算機シミュレーションした。その結果、浮遊電極上の蓄積電荷量は、浮遊電極が無い場合に絶縁膜上に蓄積する量に比べて多量になっており、この蓄積電荷量の違いに起因する電界増強が発光を促進することが明らかになった。すなわち、外部からの電圧印加等を行うことなく、浮遊電極を設置するだけで発光強度を増強することが可能であることがわかった。

第3章では、上記と同様の浮遊電極を設けたセルを用い、電極パターンサイズとガス圧力を変化させた時に生じる、放電モードの遷移現象について調べた。第2章では、放電開始電圧に対するパッシュン曲線の最小値から右側の比較的高圧力状態での検討結果を示したが、ここではガス圧力をより低圧側に变化させたところ、放電モードの遷移現象を観測した。遷移領域の高圧側では、通常の誘電体バリア放電と同様に、瞬時カソード上で負グローに起因する強い発光領域が生じるため、パルス電圧の極性が変化するたびに発光領域が浮遊電極上と周囲の金属薄膜電極上で移り変わる。それに対し、圧力を低圧側に变化

させたところ、パッシェン曲線の最小値付近で放電モードの遷移が発生し、パルス電圧の極性に関わらず、発光領域は放電空間の中央の浮遊電極上にとどまりほとんど変化しなかった。また、浮遊電極が無い場合も同様の遷移現象が見られたが、発光強度は浮遊電極があることで大きく促進された。マイクロプラズマ化することで、従来のプラズマ生成に比べて発光領域はそれだけ小さくできるが、光源の更なる微小化・点光源化のためにこの現象は有望である。この遷移機構を理論的に考察したところ、放電電極の空間非対称性と、低圧力化による放電経路の伸長が原因となり、電圧極性に関わらず、放電空間中央部で主要なプラズマ生成が行われていることがわかった。

第4章においては、金属メッシュを誘電体で被覆し2枚を重ね合わせた放電電極構造を用いて、そこに入射する電磁波が示す異常透過現象のプラズマによる変調を実験的に観測し、さらにこの現象を利用した電磁波の動的制御デバイスの実現への可能性を検討した。一般に、金属メッシュとして2次元の周期的な開口を有する金属板は、「疑似表面プラズモン」という一種の表面波の伝搬により、ある特定の周波数で入射波がほぼ100%透過する異常透過現象を示すことが知られている。これはメタマテリアル構造の一例といえるが、この開口の中にマイクロプラズマを生成することで孔内での誘電率が変化し、異常透過の周波数が変化すると予想された。実験としては、金属メッシュ構造の孔内にプラズマ周波数が数10 GHzに対応するようなマイクロプラズマを生成し、ミリ波領域の電磁波を入射して測定したところ、透過波と反射波に数10%もの増減が観測された。この現象を解析するため、プラズマの有無による分散関係の変化を理論的に導出し、孔内でのマイクロプラズマの生成により巨視的誘電率が動的に制御できていることを実証した。

第5章は総括であり、マイクロプラズマの集積化構造を利用した発光デバイスと電磁波制御デバイスについて、本研究で得られた成果を取り纏め、それらの将来展望について述べている。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、ミリメートル以下のサイズの“マイクロプラズマ”が持つ特性、すなわち高電子密度に起因した明るい発光現象、ならびに高いプラズマ周波数に起因するマイクロ波領域での誘電性の変化を応用し、発光・電磁波制御デバイスの設計・実験的検討・理論的考察を行って、得られた研究成果をまとめたものであり、主な研究成果は以下の通りである。

1. ディスプレイや高解像度を持つ光デバイスへの応用に関して、放電発光セルの新規2次元構造を提案した。それは金属薄膜／絶縁薄膜／シリコン基板の積層構造に100 μm 角程度の電極パターンを作り、内側の絶縁膜上に浮遊電極を形成したものであり、その浮遊電極の効果による発光強度の大幅な増加を実験的に観測した。この機構解明を進めるため、放電の時間発展を計算機シミュレーションし、浮遊電極上の蓄積電荷に起因する電界が発光を促進することを明らかにした。
2. 上記と同様の浮遊電極を設けたセルを用い、セルサイズと圧力を変化させたところ、放電モードの遷移現象を確認した。通常誘電体バリア放電では印加電圧の極性に応じて発光場所が変わるが、この構造の場合には放電開始電圧の最小値付近に対応する圧力条件で、印加電圧の極性に関わらず、放電空間の中央にある浮遊電極上のみで強く発光するモードが発現した。これは、光源の更なる微小化の方向で有望な現象であり、その遷移機構を理論的に考察した。
3. 金属メッシュを誘電体で被覆し2枚を重ね合わせた放電電極構造を用いて、その構造に入射する電磁波の異常透過現象を実験的に観測した。さらに、それを利用した電磁波の動的制御デバイスの実現への可能性を検討した。具体的には、金属メッシュ構造の孔内にプラズマ周波数が数10 GHzになるようなマイクロプラズマを生成し、入射するミリ波の透過・反射成分を測定する一方で、プラズマの有無による分散関係の理論解析と比較することによって、孔内でのマイクロプラズマの生成により巨視的誘電率が動的に制御できていることを検証した。

以上内容を総括すると、本論文では、集積型微小放電セルの設計・作製と生成したマイクロプラズマの制御を通して、新規の発光デバイスと電磁波制御デバイスの概念を提案し、実験データと理論解析の比較によってその実証と機構解明を行っており、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21年3月25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。