

論文の内容の要旨

論文題目 放電現象レーザ応用計測の高度化

氏名 松本 洋和

放電メカニズムの解明は、絶縁技術、産業応用等の観点からその重要性は非常に高い。放電メカニズムの解明には放電空間中の物理量の定量的な情報が求められるが、従来の測定手法では必ずしも十分な計測が行えておらず、その手法の開発が必要である。本研究では、放電現象において、重要な役割を果たす電界及び荷電粒子（電子、イオン）を対象とし、放電計測において空間分解能や時間分解能に優れ、放電空間に与える擾乱が小さいレーザを用いた手法に着目し、その計測手法の高度化を目的としている。

第1章では、本研究の背景である放電現象計測技術、電界及び電子密度のレーザ応用計測技術の現状及び本研究の目的について述べている。

第2章では、ポッケルス効果を用いた電圧・電界センサにおいて、広周波数帯域での計測を行う際に問題となる圧電振動による振動成分の抑制手法について述べている。ポッケルス結晶内部においてポッケルス効果、逆圧電効果、圧電振動に起因する複屈折についてそれぞれ定式的に論じた後、ポッケルス結晶の形状工夫による振動成分の抑制技術について説明している。

圧電振動の周波数は、ポッケルス結晶の断面の大きさで決まるため、その断面の大きさを連続的に変化させることで、圧電振動の周波数成分を分散させることができ、ポッケルスセンサ出力において観測される振動成分の抑制ができる。本研究ではテーパをつけることで断面の大きさが連続的に変化するポッケルス結晶を作成した。テーパをつけた結晶及び従来の柱上のポッケルス結晶について、圧電振動に起因する振動成分の計測を行い、振幅及び周波数について解析を行った。

テーパ状の結晶における振動成分は、従来のポッケルスセンサと比較すると振幅が30%まで抑制が可能であり、測定の際には40%まで減少した。その結果、圧電振動による振動成分はバックグラウンドノイズの約2倍まで抑制が可能であった。振動の周波数解析では、計算通りの周波数領域に振動成分を分散させることが可能であることが確認できた。また、電極系を含めたポッケルス結晶内部の電界計算結果、及び印加電圧のフーリエ解析結果を用い、ポッケルス結晶の近似モデルを考案し、圧電振動の周波数分布の予測を行った。測定結果と比較すると、測定結果が特定の周波数で強いスペクトルで強く観測されたのに対して、計算結果で得られたスペクトルは連続的な値であったが、測定結果の極大値は計算結果で得られた波形と同様の傾向であった。このことから、電界計算を用いた圧電振動の周波数成分の予測を行い圧電振動の周波数応答を均一な波形にする工夫をすることで振動成分を更に抑制することが可能となる。

第3章では、空間電荷存在下におけるレーザ光の偏波間位相差の測定について述べている。中性分子気体中では、レーザ光の偏波間位相差は電界の自乗に比例して変化し(カー効果)、これを用いて電界の計測が可能である。一方、空間電荷存在下において、その偏波間位相差は一桁以上大きな変化となり、これによる空間電荷存在下における電界測定、或いは、空間電荷密度計測の可能性を示唆する結果が得られていた。本研究では、空間電荷が偏波間位相差に及ぼす影響をより正確に計測するため、入射光の強度の変動の影響を除去するシステムの考案を行った。

気体中の偏波間位相差は非常に小さく光学的変調手法を導入した高S/N測定装置を用いて行う。この変調周波数の倍波成分は偏波間位相差に対する感度が変調周波数成分と比較すると非常に小さいため、倍波成分を用いて光の強度変化を計測し、変調周波数成分から光強度変化の影響を除去するシステムを考案した。ポッケルスセンサによって、意図的に

光強度変化を与えた状態においてカー効果による偏波間位相の測定を行った。倍波成分を用いて光強度変化を除去した結果、10%以下の測定のばらつきで偏波間位相の抽出が可能であった。また、その結果はポッケルスセンサによる光強度変化がない場合で計測したカー効果による偏波間位相と良く一致した結果であった。

提案した手法を用いて、コロナ放電発生時のレーザ光の偏波間位相の計測を行った。外部電界がない状態で測定では、電界の有無にかかわらず偏波間位相は観測され、外部電界に対する依存性は小さいと言える。接地電流を検出するために、外部電界を印加した状態での測定では、偏波間位相は空間電荷量と正の相関関係があることが確認できた。また、偏波間位相は空間電荷の供給源であるコロナ放電を発生させる電圧に依存することが確認できた。

第4章では、シャックハルトマン型レーザ波面測定法の高度化について述べている。シャックハルトマン型レーザ波面測定法はマイクロレンズアレイを透過したレーザ光が形成する輝点の動きからレーザ光の波面(位相分布)を計測手法であり、放電空間を透過したレーザ光の波面情報から放電内部の電子密度分布を計測することが可能である。

シャックハルトマン型レーザ波面測定法を用いて火花放電の電子密度計測を行った。観測された輝点の動きは、最大でも輝点の検出誤差の数倍であり、輝点移動量を積分して電子密度を算出するシャックハルトマン型レーザ波面測定法では、輝点の検出誤差も積分されるため、放電の影響による輝点移動がノイズに埋もれてしまい、シャックハルトマン型レーザ波面測定法の測定感度の向上が不可欠である。

本研究では、マイクロレンズアレイを共焦点配置し、マイクロレンズアレイの焦点距離を疑似的に延長し、シャックハルトマン型レーザ波面測定法の高感度化する手法を考案した。マイクロレンズアレイを共焦点配置することで、マイクロレンズアレイ透過後のレーザ光は平行光に近くなり、検出器までの距離が延長することが可能となる。また、2枚もマイクロレンズアレイを透過した波面の傾きが、1枚のみの場合と比較すると、2枚のマイクロレンズアレイの焦点距離の比に比例して増加するため、この点からも測定感度の向上が期待できる。

マイクロレンズアレイの焦点距離が20mmのシャックハルトマン型レーザ波面測定法とマイクロレンズアレイの焦点距離が20mmと1mmの場合の高感度化手法について、マイクロレンズアレイと検出面の距離 L を変えた場合の測定感度の向上率を光学設計ソフトにより計算した。 $L=50, 100, 200\text{mm}$ の場合、それぞれ測定感度が47, 96, 190倍と1~2桁向上するという結果が得られた。また、マイクロレンズアレイの位置の誤差について検討では、レンズの製造時に生じる誤差から許容誤差を算出した。許容誤差はマイクロレンズアレイの焦点距離や L によって決まることが、その結果として、測定感度の関数であった。

高感度シャックハルトマン型レーザ波面測定法について、既知の屈折率変化の計測を行い、測定感度の検証を行った。高感度化手法は従来のシャックハルトマン型レーザ波面測定法と比較して一桁測定感度が向上していたが、理論及びシミュレーション結果と比較すると一桁小さい結果であった。これは、焦点距離の延長の効果は得られているが、焦点距離の比による測定感度の向上効果が得られていなかったためと考えられる。

提案する手法を用いて放電の計測を行った。放電開始直後における輝点移動は非常に小さく放電領域においても、輝点の検出誤差(数 μm)に埋もれる程度であったがアーク放電に移行した後、放電領域で40 μm と大きな輝点移動が観測された。この変化は主に中性分子による輝点移動をとらえたものである。2波長計測により電子密度の抽出を行ったが、十分なS/N比では電子密度分布は得られなかった。

第5章では、本論文の結論として、まとめと今後の展望について述べている。

本研究では、放電現象において最も重要な物理量となる電界及び荷電粒子のレーザ応用計測技術の高度化を行い、従来技術と比較して、S/N比の向上、測定感度の向上が可能となり、本論文の成果は今後の放電メカニズムの解明において重要な役割を果たすであろう。