

学位論文題名

探針法によるヘリウムグロー放電陽光柱の
電子エネルギー分布関数測定法に関する研究

学位論文内容の要旨

気体プラズマに関する研究は、1922年頃から Langmuir らによって始められ、その後多くの研究者によって進められてきた。一方、プラズマは今日、放電灯をはじめ、ガスレーザやプラズマプロセッシング、公害物質の除去など重要な産業的応用分野を持っている。

本研究で対象としているヘリウムグロー放電プラズマにおいては、気体を構成する電気的に中性な原子・分子、等しい数密度の電子および正イオンである荷電粒子、そして励起原子・分子から放出される光子から成り立っている。したがって、プラズマの性質を把握するためには、これらの粒子の数密度と速度分布を知ることが必要である。ことに、産業応用において重要な励起原子・分子は主としてプラズマ中における電子衝突によって生成されるため、電子の速度分布関数あるいはエネルギー分布関数を、正確に決定することはとりわけ重要である。本研究は、プラズマ中の電子エネルギー分布を、探針法によって実験的に決定する方法に関するものである。より具体的には、上述のような応用に用いられているグロー放電陽光柱プラズマにおける電子エネルギー分布測定法の問題点を明らかにし、その対応策についての検討を行うものである。

電子エネルギー分布は、Druyvesteyn の探針原理に基づいた変調高周波法および第2高調波法などの方法によって測定される。しかし電子エネルギー分布の測定においては、次に示す原因による誤差が問題となる。①、高周波信号を使用する際に生ずる、陽光柱プラズマのインピーダンスによる低エネルギー部分での測定値の歪み。②、測定回路系などから発生する雑音による、測定精度の劣化。③、印加する交流信号振幅の大きさによる測定精度の劣化。④、雑音などのプラズマ中の振動が、測定値におよぼす影響。⑤、有限な長さの探針を用いるために生ずる、低エネルギー部分での測定値の歪み。⑥、探針からの二次電子放出による影響など、他の原因が測定値におよぼす影響。

本研究は、①から⑤に示す原因による誤差が、電子エネルギー分布の測定におよぼす影響について検討して、探針法による電子エネルギー分布の測定精度の向上を図るものである。本論文は7章で構成され、各章の概要は以下のとおりである。

第1章は序論で、電子エネルギー分布の測定法、およびグロー放電陽光柱に関する理論的解析法の概略と、得られた成果について示している。

第2章では、電子エネルギー分布関数の理論的計算法について概説し、さらに、Druyvesteynの探針原理に基づく電子エネルギー分布の測定法について概説している。また、第

2 高調波法および変調高周波法による電子エネルギー分布の測定を比較し、各測定法の問題点について検討している。

第3章では、電子エネルギー分布の歪みの原因となるグロー放電陽光柱プラズマのインピーダンスの測定法、並びにその測定結果を示している。ここでは、陽極と探針間のインピーダンス測定値の周波数軌跡からインピーダンス等価回路を求め、同回路を用いて陽光柱プラズマのインピーダンス、探針シース部のインピーダンスおよび測定回路系に含まれる漂遊容量などを決定し、高周波信号を用いた電子エネルギー分布のインピーダンス補正法について検討している。また、シースキャパシタンスの計算結果を用いて空間電位の推定を行って、シース部の等価回路について検討し、本論文の対象とした中気圧グロー放電陽光柱においては、プラズマ固有抵抗に相当する一定な抵抗を、シース抵抗とシース容量の並列回路に直列に接続してシース部の等価回路を表したほうが、シース部の性質を矛盾なく説明できることを示している。

第4章では、電子エネルギー分布の測定法として新しく提案した、アドミタンス法の測定原理とその測定回路、および測定結果を示している。さらに、アドミタンス法と第2高調波法および変調高周波法による電子エネルギー分布の測定値を比較して、他の測定法に比べた場合のアドミタンス法の利点について明らかにしている。

第5章では、各測定法によって測定した電子エネルギー分布、および理論的に求められる電子エネルギー分布のそれぞれの分布から計算される、電子のスオームパラメータについての比較検討を行っている。電子エネルギー分布測定値から求められる平均エネルギー、平均自由行程、拡散係数、ドリフト速度および移動度など、全てのエネルギー範囲にわたる電子エネルギー分布全体を用いて求められるパラメータについては良い一致を示す。しかし、電子エネルギー分布測定値の高いエネルギー部分から計算される電離係数は、Chaninらの電離係数の実測値に比べて大きい値を示す。これは、測定した電子エネルギー分布の、高い電子エネルギー部分における測定精度が不十分であることを意味するが、測定精度の良いアドミタンス法による電子エネルギー分布測定値から求めた電離係数は、第2高調波法などの結果よりもChaninらの実測値に近い値となっている。このことは今後さらに電子エネルギー分布の測定精度の向上を図ることによって、低電界のグロー放電陽光柱においては直接測定が困難である電離係数などのパラメータについても、電子エネルギー分布を用いた間接的な測定が可能となることを示唆するものである。

第6章では、拡散方程式の解として求められる放電電流対電界特性と、実測した同特性を比較して、拡散方程式の解法に使用する電子エネルギー分布測定値から計算される電子スオームパラメータの検証を行っている。その結果、電流対電界特性の計算値と実測値はほぼ一致し、使用したスオームパラメータの妥当性が確認された。

第7章は、本研究で明らかにされた各章に示した結果をまとめた結論である。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 田 頭 博 昭
副 査 教 授 酒 井 洋 輔
副 査 教 授 本 間 利 久
副 査 教 授 長 谷 川 英 機
副 査 教 授 山 崎 初 男
副 査 教 授 西 辻 昭

(室蘭工業大学大学院工学研究科)

学位論文題名

探針法によるヘリウムグロー放電陽光柱の 電子エネルギー分布関数測定法に関する研究

気体放電によって発生される非平衡プラズマ(グロー放電プラズマ)はプラズマ材料プロセス、ガスレーザー、公害物質除去等の分野において活発に産業応用がなされており、最適なプラズマの発生、維持が重要な課題となっている。信頼し得るプラズマ計測手段の開発はこの課題を解決するための基盤をなすものとして位置づけられる。計測物理量としては荷電粒子の密度、温度が重要であるが、それらのエネルギー分布を知ることは、それらの発生、輸送を解く鍵となる因子であるだけにとくに重要である。プラズマの計測には、探針法、レーザーを含む光学的方法、質量分析法、ラジオメータ法等が考えられる。探針法は歴史もあり今日でもなお最もポピュラーな方法の一つであるうえ、荷電粒子とくに電子エネルギー分布を測定し得る方法であることを考えるとその重要さが理解される。しかし絶対測定を行なうためには、プラズマ陽光柱インピーダンスの影響による誤差や、計測回路系から発生する雑音にもとづく、あるいは計測信号によるプラズマの擾乱にもとづく精度の低下、プラズマ振動の影響、探針の有限な寸法による誤差などの問題がある。

本研究は最もポピュラーなプラズマ計測法である探針法によって電子エネルギーを測定するときに遭遇するこれらの問題の解決を、最も簡単な原子ガスであるヘリウム中の非平衡プラズマに例をとって試みたもので、全7章によって構成されている。

第1章は序論で、電子エネルギー分布およびその探針測定の従来の研究とその問題点について概観し、あわせて本研究の主要な課題と本論文の構成を示している。

第2章は本研究の基盤をなす Druyvesteynの電子エネルギー分布測定法について紹介し探針電流の探針電圧に対する2階微分値の測定がその原理であることを明示し、本研究の実験装置も紹介している。本研究で用いられるボルツマン方程式解析法も述べている。

第3章はプラズマ陽光柱のインピーダンスが電子エネルギー分布の探針測定に与える影響を実験的に検討している。陽極と探針間のインピーダンスの周波数軌跡を測定し、インピーダンス等価回路を求め、これから陽光柱、探針シース部、および測定系漂遊の各インピーダンスを決定し高周波信号を用いて電子エネルギー分布を測定する際のインピーダンス補正法を明らかにしている。また本論文が対象とした1 Torr程度のガス圧では、シース

部の等価インピーダンスとしてプラズマ固有抵抗をシース抵抗と容量の並列回路に直列に加えるのが、シースの性質のより矛盾ない説明に役立つことを明らかにしている。

第4章はプローブ法による電子エネルギー分布の測定にたいし著者が新たに提案したアドミタンス法について紹介するとともに、これを用いることによる電子エネルギー分布測定の利点を実験的に明らかにした章で、本論文のハイライトとなっている。Druyvesteynの測定原理では探針電流の2階微分値をとる必要があるが、アドミタンス法では探針電流の1階微分値すなわちアドミタンスを測定し、ついでこの微分を取ることにより探針電流の2階微分値を求めるもので、これによりフィルター不要による測定回路の簡略化、振動等の抑制による信号対雑音比の向上が得られ、応用で重要な非弾性衝突が起こる電子エネルギー分布の裾での測定の分解能を上げることに成功している。

第5章ではボルツマン方程式から得られる電子エネルギー分布から求めた電離係数等のスオームパラメータと、探針測定電子エネルギーから求められるそれらと比較している。電子ドリフト速度等分布の全エネルギー領域を用いて算出されるパラメータは従来の方法および本方法間で違いはないが、電離係数のような高電子エネルギー部の精度が重要になるパラメータでは本論文で見いだされたアドミタンス法による結果を用いることにより、スオーム実験から得られた値とよりよい一致を示すことが明らかにされた。

第6章は実際の放電管の放電電流対電界特性を、探針測定した電子エネルギー分布をもとに計算した電子スオームパラメータを用いて計算して比較している。よい一致が得られ、使用したスオームパラメータの妥当性を通じて測定電子エネルギー分布の妥当性が検証されている。第7章は結論であり、各章の結果を総括している。

これを要するに本論文は現代の産業技術に多くの応用を持つ非平衡放電プラズマ（グロー放電プラズマ）の計測に重要な地位を占める探針法の問題点について明かにし、新しい計測技術を開発してその有用性、有利性を明らかにするなど、これを解決するための多くの知見を与えたもので、放電プラズマ工学と気体エレクトロニクスに貢献するところ大である。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。