

大口径紫外線光源の開発

小山孝一郎・鈴木勝久*・河島信樹・提井信力**
中村良治・島津雄滋***・伊藤宏之***・中村克夫***

(1988年12月26日受理)

Development of a large EUV source

By

K. -I. Oyama, K. SUZUKI, N. KAWASHIMA, S. TEII, Y. NAKAMURA,
Y. SHIMAZU, H. ITOH and K. NAKAMURA

Abstract: An EUV plasma source has been developed. A total of 48 small EUV lamps were put together to give a radiation diameter of 30 cm. The intensity of the EUV is nearly 10 times the solar intensity at hydrogen Lyman- α at a distance of 30 cm from the source. The source can emit EUV radiation either continuously or in pulses.

概 要

照射口径 36 cm を持つ紫外線光源を開発した。本装置の照射面から 30 cm 離れた場所での波長 1216 Å の紫外線強度は、この波長における太陽光源強度の約 10 倍である。光源は DC 点灯できると共にパルスにも点灯できる。

1. 紫外線光源開発の目的

従来紫外線光源として私達がよく利用するのは浜松ホトニクス社製重水素ランプである。この重水素ランプには MgF_2 の窓を張り付けてあり、波長 1000 Å 以上の光を放射できる[4]。このランプの MgF_2 面より 30 cm 離れたところでは太陽から出る水素ライマン α 線(地球軌道付近で約 $0.4 \mu\text{W}/\text{cm}^2$) より強い強度の紫外光を得る事ができる。しかしなが

* 横浜国立大学

** 武蔵工業大学

*** 浜松フォトニクス

ら放射口径は 30 cm 離れた場所でわずかに直径約 20 mm であり、私達はスペースステーションの利用など宇宙空間での人類の活動が急速に拡がるに従い、大きな紫外線光源が必要になるとの予測に立ち、とりあえず直径約 40 cm の照射面積を持つ紫外線光源を開発する事にした。また将来の本紫外線光源の利用は別にして本紫外線光源を使って近い将来行なう事のできる室内実験には以下のようなものがある。

1. 電離層下部 E 領域における熱エネルギー収支に関する基礎的な実験[1]
2. 太陽光に照射された人工衛星壁面から出た二次電子雲の振舞い[2][3][4][5][6]
3. 電離圏 D 層の種々の化学反応実験[7]
4. 原始惑星形成時における塵の帯電がその凝集に及ぼす効果[8]
5. 光化学スモッグ等のように汚染大気に及ぼす紫外線の影響
6. 低密度、低温度プラズマの基礎実験

例えば上記の目的 6 については、本紫外線光源を用いて 10 eV 以下の電離電圧を持つガスを用いる事により、シース内での中性ガスと電子との衝突を考慮する必要のある collision dominant 領域のプロブ理論のための理想的なプラズマを作る事ができる。

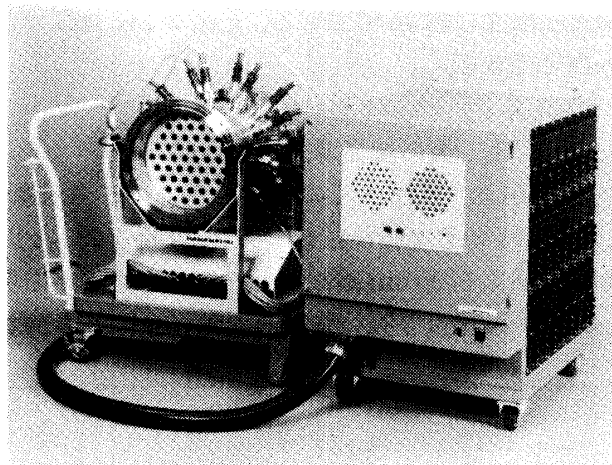
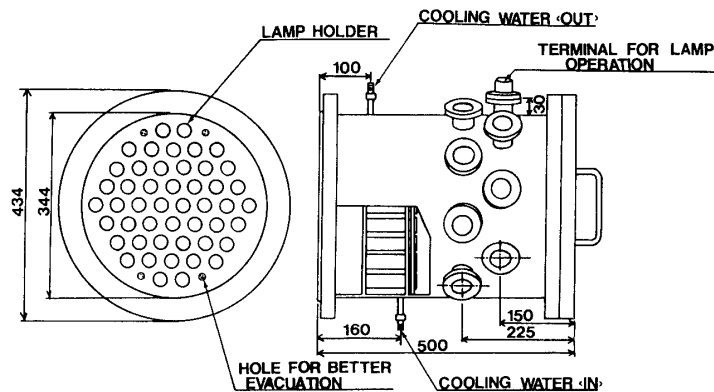


図 1 ランプハウス部(上)と紫外線光発生装置の全体図(下)

2. 紫外線光源

紫外線光源は図1に示したように高真空フランジと冷却の為の二重壁を持った真空気密のランプハウスと48本の重水素ランプからなる。重水素ランプは図2に示したように、外形 $20\text{ mm}\phi$ の頭部窓型（浜松フォトニクス社製 L 2581）である。窓には 115 cm 以上の真空紫外線で高い透過特性を持つ特別に選択した MgF_2 を用いている。 MgF_2 は単結晶で肉厚 1 mm 、外径 20 mm のもので、円筒ガラスバルブにフリットガラスで接着してある。ランプ単体の消費電力は約 30 W で総消費電力はおよそ 1.4 kW に達する。ランプは発熱が大きく真空中で点灯するとガラスバルブ壁温度は約 300°C になる。そのためランプハウスはランプ冷却のため48本の二重壁の円筒ケースの内部に 10 l/分 の冷却水を循環させ、個々のランプを伝導冷却する構造としている。

紫外線光源装置の構成を図3に示す。ランプとこれを駆動するための3本の電源ライン

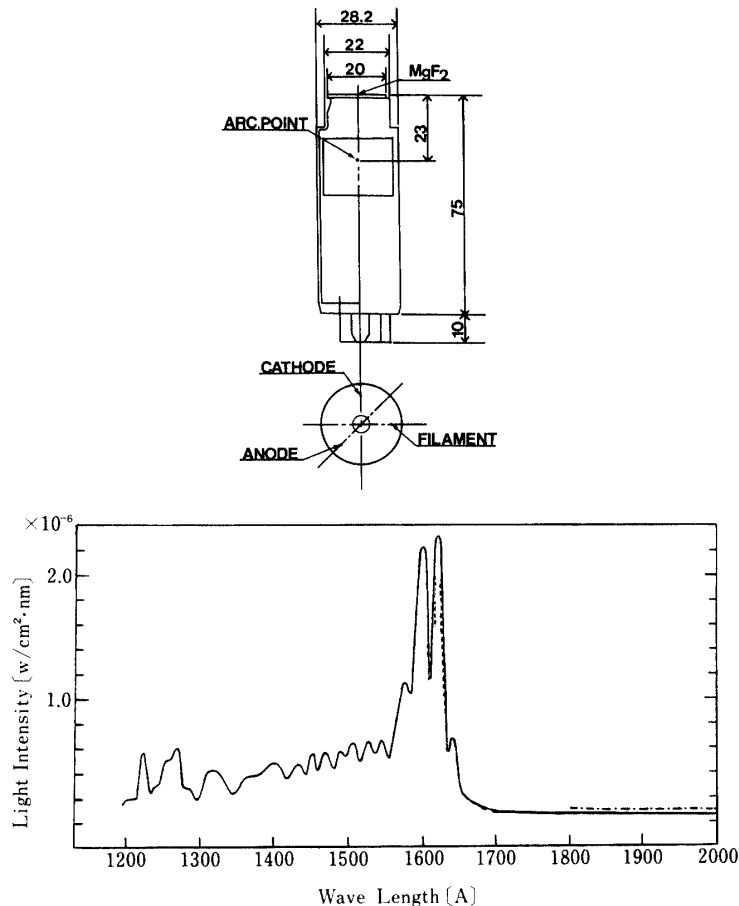


図2 紫外線光源重水素ランプの形状(上)と重水素ランプの MgF_2 窓より 30 cm 離れた場所での分光特性(東京天文台山口氏の助けによって得られたもの)。 $1,800\sim 2,000\text{ Å}$ での一点鎖線は宇宙研で得たもの。

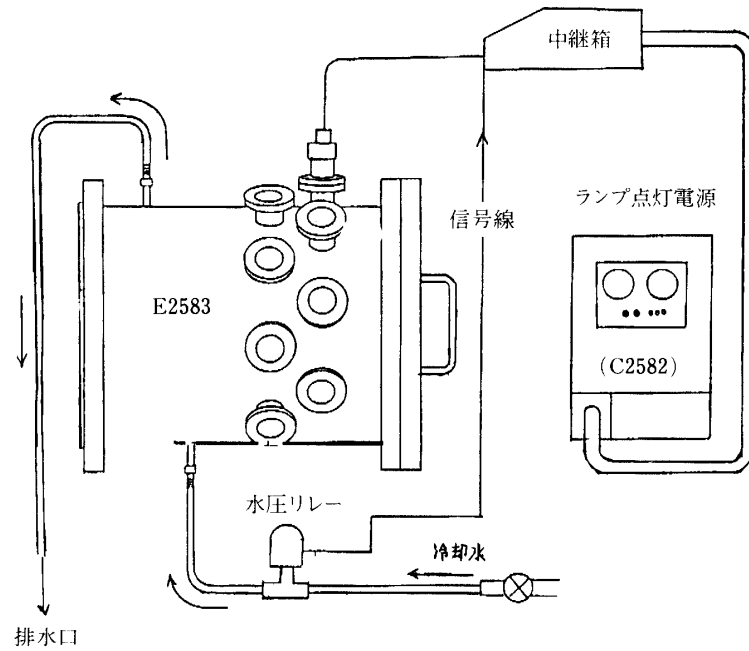


図3 紫外線光源装置の構成

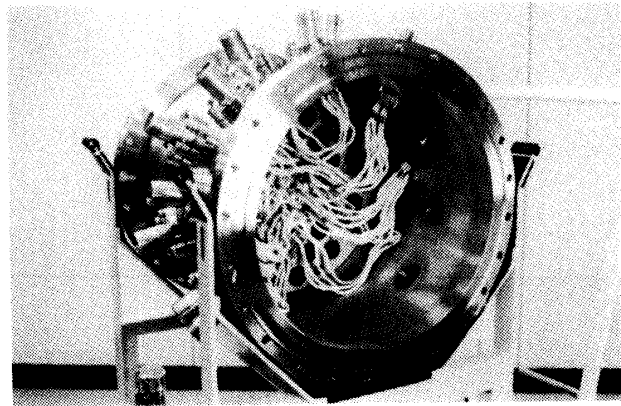


図4 図1に示した重水素ランプ48本を装着するランプハウスの内部、手前よりランプを押し込む。ランプを押し込み、ランプ用ソケットを差し込んだ後、350φコーンフラットフランジで蓋をする。

は専用のソケットでつなぎランプとソケットの着脱を容易にしている。重水素ランプへの電力供給はこの円筒チェンバーに取り付けられた真空用コネクターによってなされる。円筒チェンバー内のランプ用リード線、及びソケット等はすべて200°Cまでのベーク温度に耐えられるが、実際は円筒チェンバーに取り付けられた真空用コネクターの耐熱温度150°Cでベーク温度の上限が決まっている(図4)。点灯したいランプ及びランプの数はプ

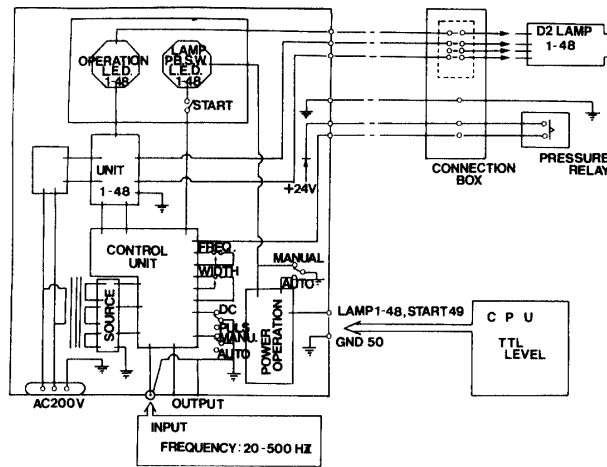


図5 紫外光発生装置の制御系統図

ツッシュボタンにより自由に選択できる。また個々のランプの放電電流をモニターしているので、ランプの良否を知る事ができる。ランプは定常点灯はもちろん内部発振器によって20~500 Hzの周波数によりパルスの点灯できる。点灯時間間隔は可変である。また外部信号に同期してもランプを点灯できる(図5)。ランプの光強度の空間分布の一例を図6に示す。波長1216 Åにおける紫外線強度は重水素ランプの窓面より30 cm離れた個所で太陽光におけるライマンα線強度の約10倍である。しかし、現在の装置は熱伝導冷却が不十分でランプ寿命を短くしているので今後この部分の改良が必要である。

3. 紫外線光源を使った実験

本紫外線光源を使ってNOガスの電離を行なった。またN₂, O₂混合ガスプラズマ中でのN₂の役割を調べている。図7に示すようにチェンバーの一方端に紫外線光源を装着したスペースチェンバーは直径約60 cm, 長さ140 cmの円筒型チェンバー材料はステンレスティールである(ステンレスティールの仕事関数は4.4 eV)。チェンバーのもう一方の端には後方拡散型プラズマ源を装着した。

3.1 NOガスの電離

上記のスペースチェンバーの中央付近にプローブ表面からの二次電子電流の影響を避けるため直径60 mmの円板プローブをその面が紫外線光に平行になるようにセットした後チェンバー内のNOガス圧を 2×10^{-4} Torrから 8×10^{-4} Torrと変化させ、チェンバー内の電子密度の中性ガス依存性及びランプ数の依存性をみた(図8)。円板プローブにより得られた電圧、電流特性から電子電流を取り出してこれを片対数プロットすると図8に示されるようにプローブ電流3桁に亘る直線が得られる。活性ガスNOによる電極汚染は電子温度の算出に影響を与えるほど深刻ではない。三桁の電流範囲に亘って直線性を有している事はエネルギーの高い領域にまでマクスウェル分布した電子が生成されている証拠であ

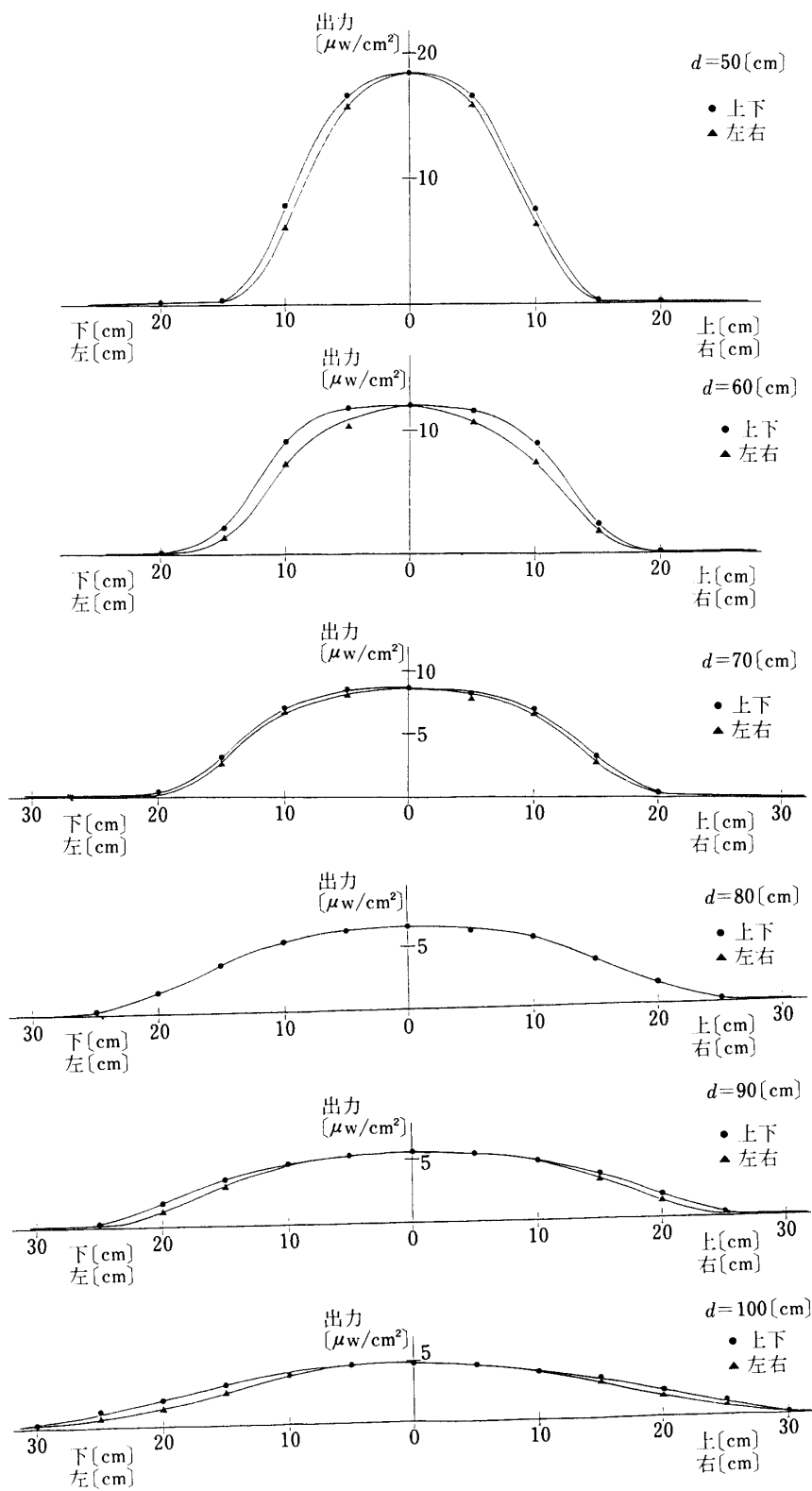


図6 ランプを16本装着した時の紫外光の空間強度分布, d は MgF_2 窓からの距離

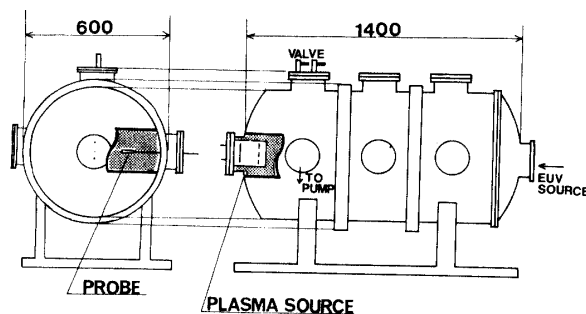


図7 実験に使用したスペースチャンバーの配置図

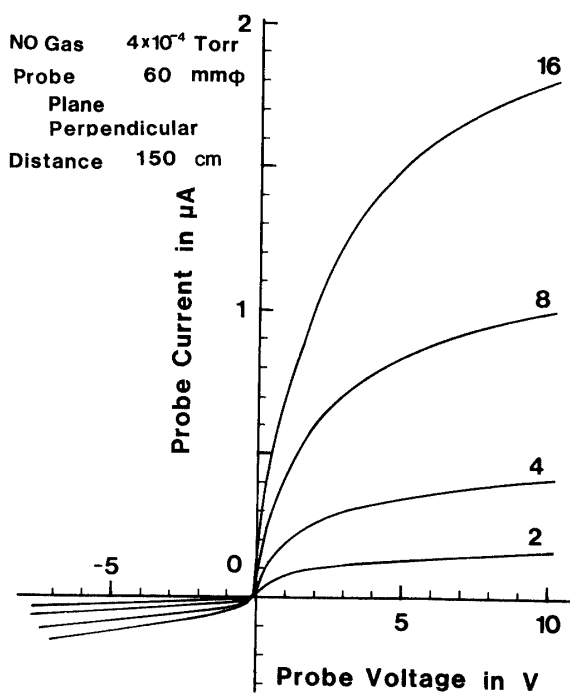


図8 重水素ランプ点灯により生成された、NO ガスプラズマ中で
のプローブの電圧電流特性

り、この NO プラズマは今後理想的な波動実験等を行なえるプラズマとして期待できよう。

ステンレスティールに太陽光が照射された時の二次電子電流は $20 \mu\text{A}/\text{m}^2$ と見積もられており、またステンレス表面近くの電子密度は約 $70 \text{ コ}/\text{cm}^3$ [3] であるが、これが長さ 80 cm、直径 60 cm を持つ円筒チャンバー内に均一に満たされるとして、壁面での損失を無視すると、二次電子は数 $\text{コ}/\text{cm}^3$ のオーダーになる。実際図 9 に見られるようにチャンバー内の電子密度は $10^4 \text{ コ}/\text{cc}$ のオーダーであるので、セミログプロットしたプローブの電流電圧特

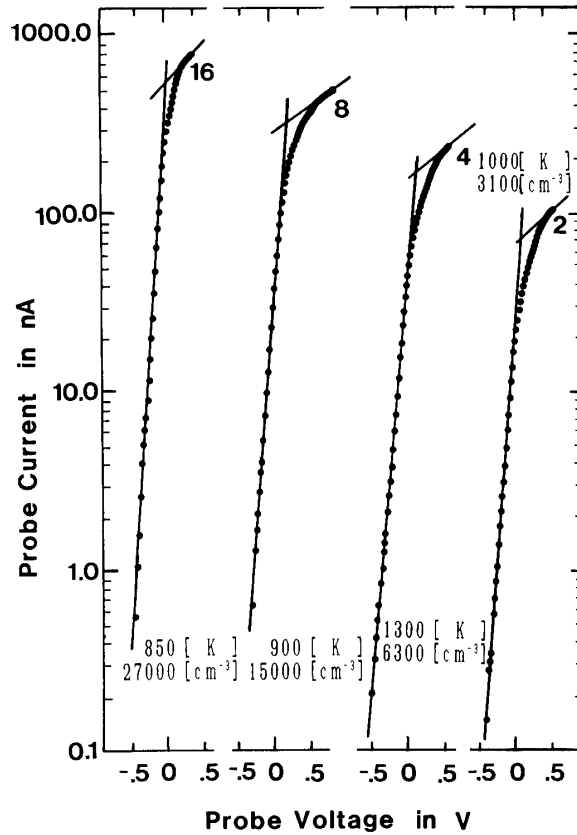


図9 図8より得た電子電流の電圧電流特性の対数プロット

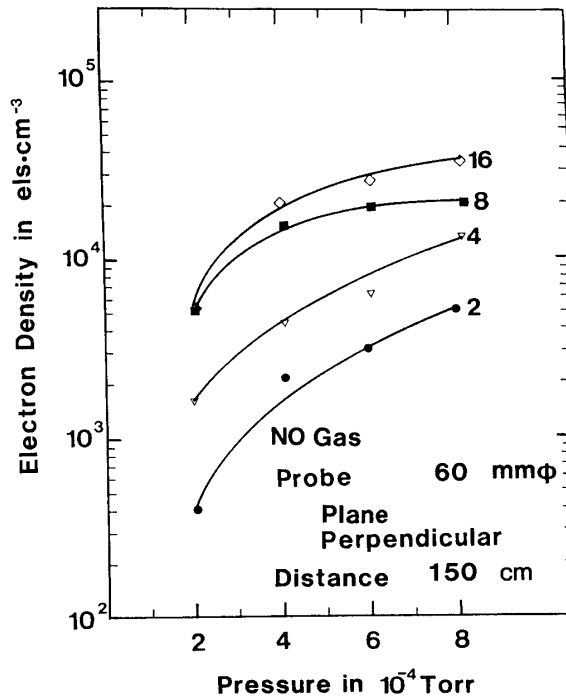


図10 チェンバー内 NO ガス圧に対するプラズマ密度の一例, 図中のパラメータはランプの本数

性には壁からの二次電子の影響は見られないようである。図10には横軸に封入NOガス圧、縦軸にチェンバー内の電子密度を点灯したランプ数をパラメータとしてプロットした。本チェンバーを使用した時に得られるNOガスプラズマの最大密度は 3×10^4 コ/ccであり、封入したNOガス圧を 8×10^{-4} Torr以上にしても電子密度は顕著には増えなかった。

3.2 N₂, O₂混合ガスプラズマにおける紫外線の影響

この実験は下部E層の高度100km付近で電子加熱に関して起こっていると思われる化学反応を模擬する試みで、現在行なわれているものである。即ち、



$$K \sim 4.5 \times 10^{-10} \text{cm}^3/\text{sec}$$



$$K \sim 5 \times 10^{-11} \text{cm}^3/\text{sec} (v \leq 7)$$



$$K \sim 3.2 \times 10^{-11} \text{cm}^3/\text{sec}$$

の反応によって電子が振動励起された窒素分子 N₂* よりエネルギーを得、熱的電子が加熱されるかを調べる。この実験のため図11のような概念で実験装置をセットした。即ちNOガスの電離を行なったと同じようにチェンバーの端に後方拡散型プラズマをもう一方の端に紫外線光源を配置した。まず拡散型プラズマ源により低い電子温度のプラズマを生成する。このようにして生成されているプラズマに紫外線をあてると酸素分子はシューマンランゲ帯の紫外線により(1)の反応によってO(¹D)とO(³P)に解離される。窒素分子はこのようにして生成されたO(¹D)と作用して、振動励起状態のN₂*になる。後方拡散型プラズ

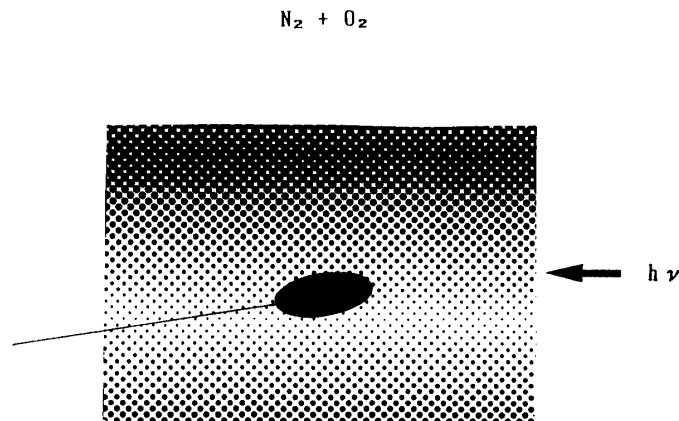


図11 N₂* + e_{slow} → N₂ + e_{high} の反応を見る目的で行なわれた実験の概念図

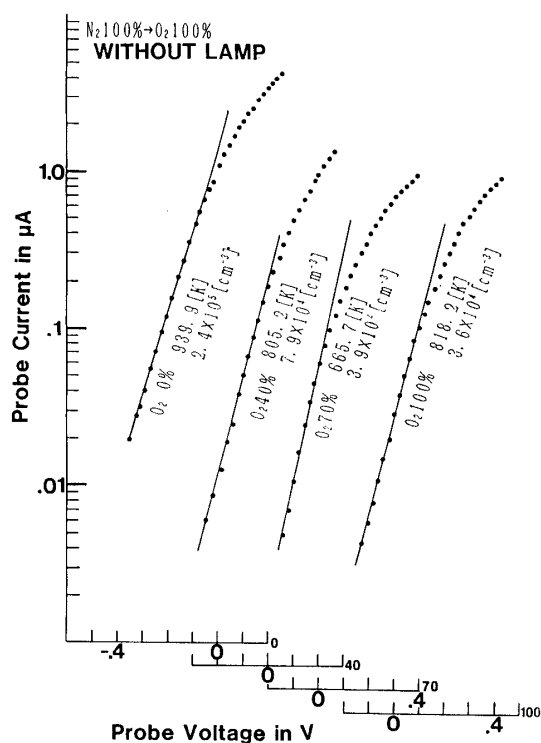


図12 紫外線を照射しない時に O_2/N_2 を増加させた時の電子電流の片対数特性

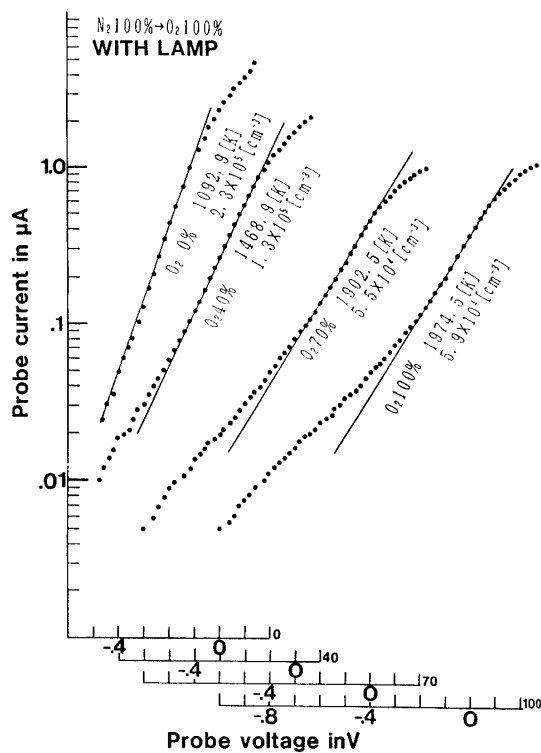


図13 図11のプラズマに紫外光を照射した時の電子電流の片対数特性

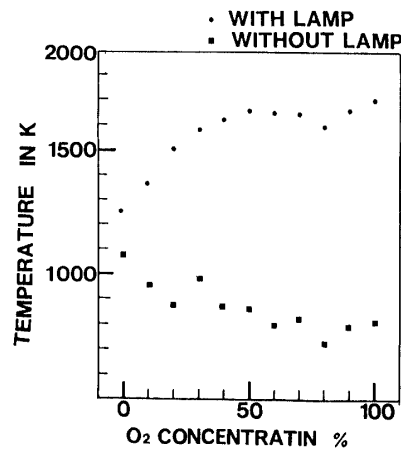


図 14 O₂濃度を变化した時の N₂-O₂混合ガスプラズマの紫外光の電子温度，電子密度に及ぼす影響

マ源により生成された熱電子は N₂ よりエネルギーを得るであろう。N₂* の影響を見るためには最初作られたプラズマ中の電子温度は N₂* の振動温度より低くないといけない。後方拡散型プラズマ源はヒータ電圧，グリッド電圧を適当に調整することにより数百度の電子温度を持つプラズマを作る事ができる。実際はまず N₂ ガスのみにてプローブの電圧電流特性を取り，次に徐々に O₂ を増やした。この場合チェンバー内部の全ガス圧は一定にする。図 12 に示すように後方拡散型プラズマ源のみでは N₂ ガスに O₂ ガスを混入し，この割合を増やしていっても電圧電流特性には顕著な変化はない。ところが重水素ランプを点灯してこの混合ガスプラズマに紫外線を照射すると図 13 のように O₂ の増加と共に高いエネルギー領域で片対数プロットした電子電流特性からのずれが目立ち始める。この場合 N₂ と O₂ とのガス圧比を変える毎に，電子密度がほぼ一定となるようにプラズマ源の放電電圧を調整しているので，現象を定量的に議論することは困難であるが図 12 と図 13 に示されたプローブ特性の差は明らかに重水素ランプの点灯によるものと結論する事ができよう。ランプ点灯時に N₂ がチェンバー内を 100% 充たしている時には高いエネルギーの成分は見られず，O₂ を混入して初めて電子温度が上昇すると共に空間電圧より約 0.3 V 離れた付近から高いエネルギー成分が見られている。即ち，定性的には上述した(1)(2)及び(3)の反応が起こっているように見られる。図 14 に示すように Lamp off 時に O₂ を増やしていくと電子温度が減るのは，O₂ による冷却効果が働き始めていると解釈できよう。しかしながら O₂ を 100% にしてもランプ点灯時に電子温度が高くなるのは，N₂* によって熱電子が加熱されているとする仮定と反しまだ不明な点が多い。今後窒素分子の振動温度の計測など更なる実験の遂行と，理論的検討が必要であり，現在もこれに関する実験を行ないつつある。

謝 辞

重水素ランプ光強度の絶対測定を行なうにあたり，東京天文台山口氏の御指導をいただいた。ここに記して謝意を表す。また，この研究の一部は文部省科学研究費・重点領域研究(1)「太陽系の起源」(No. 63 611007)により行なわれた。

参 考 文 献

- [1] K. -I. Oyama and K. Hirao, Energy gain of supra-thermal electrons from the excited neutral gases, *J. Geomag. Geoelectr.*, **37**, 913-926, 1985.
- [2] B. Feuerbacher and B. Fitton, Experimental investigation of photoemission from satellite surface materials, *J. Appl. Phys.* **43**, 1563-1569
- [3] R. J. L. Grard, Properties of the satellite photoelectron sheath derived from photoemission laboratory measurements, *J. Geophys. Res.* **78**, 2885-2905, 1973.
- [4] G. L. Weissler, Photoionization in gases and photoelectric emission from solids, in *Handbuch der Physik*, BandXXI sect. 2 305-363, *Eletronen-Emission Gasentladungen*, 1, 1956.
- [5] E. C. Whipple, J. M. Warnock and R. H. Winkler, Effect of satellite potential on direct ion density measurements through the plasmopause, *J. Geophys. Res.* **79**, 179-185, 1974.
- [6] R. C. Olsen and C. K. Purvis, Observation of Charging Dynamics, *J. Geophys. Res.*, **88**, 5657-5667, 1983.
- [7] N. Fugono, A simulation experiment of photochemical reactions in the mesosphere, *J. Geomag. Geoelectr.*, **27**, 471-484, 1975.
- [8] E. C. Whipple, T. G. Northrop and D. A. Mendis, The electrostatics of a dusty plasma, *J. Geophys. Res.* **90**, 7405-7413, 1985.