UDC 621. 315. 618. 3. 015. 532

論文

59-A20

N₂ ガス直流グロー放電のダブル負グロー形成と気体加熱

正員 西 嶋 喜代人 (福岡大)

正員 美 山 和 範 (福岡大)

正員 常 安 暢 (福岡大)

1. ま え が き

管壁効果のない直流グロー放電⁽¹⁾は、高出力気体レーザーへの応用⁽²⁾と気中絶縁破壊で発生するストリーマやリーダの放電機構⁽³⁾⁽⁴⁾と関連した放電物理の基礎的研究課題として興味をもたれる。特に、放電電流が上昇するとグローからアークへの移行によるレーザー発振の停止や過渡グロー放電⁽⁵⁾と定常放電⁽⁶⁾⁽⁷⁾での拡散陽光柱から線条陽光柱への移行が起こることがよく知られている。これらの放電相の転移は、放電チャンネルの気体加熱と密接に関連すると考えられる。

ところで、タウンゼント放電から正規グロー放電への連続移行の研究⁽⁸⁾は、放電ギャップに直列高抵抗を接続して、その負グローの移行と陽光柱の形成過程を明らかにしている。この正規グロー放電への移行は空間電荷効果⁽⁸⁾⁽⁹⁾の観点から説明が加えられているが、電流成長に伴う放電モードの変化に与える気体加熱の効果も十分に検討する必要がある。

本論文では、ギャップの長さ 1 cm で、気体圧力が 1~70 Torr の範囲の N₂ ガスの直流グロー放電について、放電ギャップとの直列抵抗を 2.5~100 MΩ の範囲で変化させ、10⁻³~4 mA の放電電流域の放電モードと気体加熱を調べている。その結果、電圧-電流 (V-I) 特性の負こう配の領域で、特性の不連続に対応してグロー放電モードの遷移が起こり、この遷移直後に転移後の負グローの周辺部に転移前の負グローをもつダブル負グローの形成が認められた。更に、この遷移前後では陰極電流密度と気体温度の急激な上昇が起こることを見いだした。

2. 実験の装置と方法

図1は実験装置の概略で、高圧直流電源、放電管、放射スペクトル検出系および電圧、電流検出器を示す。ここで、放電管と直列に接続した抵抗 R_s は、2.5, 10, 20, 100 MΩ の4種類である。放電管は内径 60^φ mm の石英ガラス管内に、直径 50 mm のステンレス鋼平板をギャップの長さ 1 cm で2枚対向させた平行平板電極配置としたものである。

供試気体は、市販されているボンベ入り N₂ ガス(公称値: 99.999%)で、放電管を約 5×10⁻⁶ Torr まで排気した後、ボンベより液体窒素トラップを通して設定圧力まで導入した。気体圧力 P (20°C 換算値, Torr) の測定は 2 m の油マンオメータを用いた。

放射スペクトル強度分布の測定では、放電からの放射光を XYZ メカニカルスタンドに取付けた石英レンズ L₁ と L₂ で集光し、分光器 SPM (島津製, GE-170, 逆分散: 4.8 Å/mm, ブレイズ波長: 5,000 Å)

図1 実験装置

Fig. 1. Schematic diagram of discharge tube and measuring apparatus.

Double Negative Glow Formation and Gas Heating of DC-Glow Discharge in N₂ Gas. By Kiyoto Nishijima, Member, Kazunori Miyama, Member & Itaru Tsuneyasu, Member (Faculty of Engineering, Fukuoka University).

西嶋喜代人: 正員, 福岡大学工学部

美山和範: 正員, 福岡大学工学部研究科 [現在, 九州電力(株)]

常安 暢: 正員, 福岡大学工学部

で分光した。この L_1 , L_2 の集光系は、放電軸方向と径方向に対してパルスモータ駆動によって走査できるものである。分光したスペクトル強度は、移動式2チャンネル光電測光装置（ホトマル：1P28）で電気信号に変換し、直流増幅器AMPを通して増幅した後、ペンレコーダRCで記録した。また、放電発光形態（放電モード）は放電管の測方より静止カメラにて撮影した。なお、放電電流が0.1~4mAの範囲で、放電発光の径方向広がり（直径）は管直径に比べて約1/6以下で極めて小さい。

3. 気体温度と振動温度の導出法

N_2 ガスを含む気体放電のプラズマ加熱は、 N_2^+ の1st Negative Band (0,0) と N_2 の2nd Positive Bands (0,0), (0,1), (0,2) の回転スペクトル強度分布より導出される回転温度⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾ T_r ($\approx$ 熱平衡を仮定して気体温度 $T_g \approx T_r$) と N_2 の2nd Positive Band の(0,2) 系列の帯頭の回転スペクトル強度分布による振動温度 T_v ⁽¹²⁾ によって検討されている。しかしながら、 N_2 , N_2^+ の各バンドの回転スペクトル⁽¹³⁾ は、波長間隔0.2~0.3Åで多数発生することと、スペクトル広がりも加わり、その波長分解が実測上極めて困難となる。本研究では、より精密な T_g と T_v の実測のために、次のような改良を加えて適用した。

気体温度の導出には、スペクトル広がりを装置関数で仮定し、計算機による回転スペクトル強度分布の

シミュレーションより実測値の補正を行なう方法がPhillips氏⁽¹¹⁾によって提案された。この方法は、Hartmann氏ら⁽¹⁴⁾の指摘した回転スペクトルの3重項が考慮されていない。そこで、 N_2 の2nd Positive Band (0,2) の回転スペクトル強度分布に関して、実測した装置関数と3重項を考慮したより精密なシミュレーション⁽¹⁵⁾から、測定値の補正を行なっている。

図2は T_g の導出に用いた N_2 の2nd Positive Band (0,2) と N_2^+ の1st Negative Band (0,0) は回転スペクトル強度分布の実測値である。ここで、 T_g は $\ln I_{2PB}/S_{J'-J''}(J'+1)$ と $\ln I_{1NB}/S_{J'-J''}(J'+1)$ の直線の傾きより導出される。この図から、上位回転単位 J' の異なるスペクトルの半値幅は約0.25Å以下であり、R枝の3重項〔(a)図〕が分離されることが認められる。この結果から、 N_2 の2nd Positive Band (0,2) からの実測値は、スペクトル広がりのない回転強度分布より導出した T_g より約2%低い値を与え、補正を必要とするが、 N_2^+ の1st Negative Band (0,0) では補正の必要がないことが判明した。

一方、振動温度の導出⁽¹⁶⁾はBleekrode氏⁽¹²⁾の方法に原則として従うが、実測を容易にするために、 N_2 の2nd Positive Band (0,2) 系列の上位振動単位 v' の異なる二つのバンドの回転スペクトル強度分布のピーク値の比より求めている。この方法⁽¹⁷⁾によれば、各振動単位と対応するスペクトル強度の測定が容易になることと、スペクトル広がりや回転温度 T_r

図2 負グローから放射される N_2 と N_2^+ の回転スペクトルの典型的な強度分布

Fig. 2. Typical measured distributions in N_2 and N_2^+ rotational band spectra emitted from the negative glow.

図3 各回転スペクトル強度のピーク値の比と振動温度との関係に与える回転温度の効果

Fig. 3. Effects of rotational temperatures on the relations between peak-value ratio of the intensity distribution with each rotational spectrum bands and vibrational temperatures.

($\equiv T_v$) の補正を系統的に行なうことができる。図3は、 $T_r=300, 500$ K とした場合の各バンドのピーク値の比と T_v との関係を示した計算機による校正曲線の一例を示す。この図から、(2,4) と (3,5) バンドのピーク値の比 $I_{2p}(2,4)/I_{2p}(3,5)$ が他のものに比べて、 T_v に対して広い範囲で変化することがわかる。従って、 T_v の実測は前述の方法で T_r を実測し、この $T_r \equiv T_v$ を用いて校正曲線を導出して、N₂ の 2nd Positive Band (2,4) と (3,5) のピーク値の比の実測値と校正曲線上の値の対応より行なった。なお、 T_r と T_v の値は負グローの径方向に対する平均値を与える。

4. 実験結果と検討

〈4.1〉 電圧-電流特性と放電モード変化 放電ギャップと直列に高抵抗を接続すると、定常タウンゼント放電から正規グロー放電への移行域の放電を安定に出現させることができる⁽⁸⁾。この接続する抵抗 R_s (MΩ) の値は、 $V-I$ 特性の負こう配の領域で、放電チャンネルの等価抵抗 $R(=V/I$ の値) より大きくすることが望ましいが、 R の値が気体の種類、気体圧力、電極配置および放電電流により異なる。従って、本研究では R_s の値を 2.5, 10, 20, 100 MΩ の 4 種類に選

図4 $V-I$ 特性と気体圧力、直列抵抗との関係
Fig. 4. $V-I$ characteristics of gas discharge in the 0.001~4 mA current region at different gas pressures and series-resistances.

び、 $V-I$ 特性が安定に測定できる領域 (V と I の変動率 $\pm 0.5\%$ 以内) について検討している。

図4は $P=10, 40$ Torr で R_s の値をパラメータとした $V-I$ 特性を示す。0.005~0.018 mA の領域での V の急激な減少がタウンゼント放電からグロー放電への移行を示す。ところで、 $P \leq 5$ Torr では V のこのような明確な減少は認められず、連続的なグロー放電への移行が観測される。このグロー放電への移行後、 I の増加に伴って $V-I$ 特性は負のこう配を示すが、0.7~1.2 mA の I 領域で、再び特性の不連続が現われる。この不連続が明確に出現する気体圧力は 10 Torr 以上の高い値であり、不連続による電圧の減少が $P=10$ Torr で 20~30 V、 $P=70$ Torr で 250 V 程度と P の増大によって増加する。この不連続の発生は、 R の値が $R_s=2.5$ MΩ 以下で起こることから、放電のプラズマ状態の変化によると推測され、著者らの知る限りにおいて以前に報告されていない。

図5は $P=40$ Torr で、図4の $V-I$ 特性の各電流値に対応 (各信号が一致するもの) する放電発光形態 (モード) を示したものである。この電流成長に対する放電モード (ただし、ギャップ中以外の発光は電極での反射によるもの) の変化は、各気体圧力ともほぼ同じであるが、同一電流値での発光の径方向への広がり P の増大に伴って減少する傾向をもつ。この放電モード変化と $V-I$ 特性との関係から次のことがわかる。

(1) ④の電流では定常タウンゼント放電である。

(2) ⑤~⑩の電流範囲ではグロー放電である。このグロー放電は、 I の増大と共に負グロー NG と陽光柱 PC の径方向への広がり減少し、PC の発光が青白色である。

(3) ⑤~⑩の電流範囲では NG が放電軸上で厚

図5 電流成長に伴う放電モード変化
Fig. 5. Variations of discharge mode as a function of discharge current.

く中心部の強い発光と、薄く周辺部の弱い発光とからなるダブル負グローのグロー放電である。

(4) ⑥～⑧の電流範囲ではダブル負グローが消失し、(2)項とは異なるグロー放電となる。このグロー放電は、 I の増加と共にNGの径方向への広がりが増大し、そのPCの発光が暗赤色である。更に、陽極グローAGが明りように認められるようになる。

以上のことから、 $V-I$ 特性の不連続の発生はグロー放電モード遷移を伴うことが判明した。

〈4.2〉ダブル負グローの形成 気体圧力を変えた図4、図5と同様な結果より、ダブル負グローは $V-I$ 特性の不連続な転移直後の0.8～1.3 mAの狭い電流範囲で安定に存在することがわかる。ここでは、NGの径方向のスペクトル強度分布の実測から、ダブル負グローの形成過程を述べる。

図6は $P=50$ TorrでのNGの径方向スペクトル強度分布 I_r/I_0 を I をパラメータとして示したものである。この測定では、入力スリット幅を0.04 mm

図6 負グロー中での径方向のスペクトル強度分布

Fig. 6. Radial intensity distributions in each band spectra emitted from the negative glow with the growth of discharge current.

(径方向) $\times 0.05$ mm (放電軸方向)として、 N_2 の2nd Positive Band (0,0)と N_2^+ の1st Negative Band (0,0)の回転分布のピーク値の強度を径方向に走査している。各バンドのピーク値は放電軸上の最大値 I_0 で規格化し、アーベル変換した結果である。この図から、転移後のNG (1.5 mAの分布)は、転移前のNG (0.5と0.7 mAの分布)に比べて径方向の広がり約1/3に収縮し、先鋭な分布となることがわかる。一方、ダブル負グロー (1.0 mAの分布)は転移後の分布に近いが、 $r=0.5$ mmより外側で弱い強度の広い範囲を含む二重の分布からなる。また、1st Negative Band (0,0)のスペクトル強度は、2nd Positive Bandに比べてNGの中心部に強く現われる。以上のことから、ダブル負グローは転移前のNGが周辺部に弱い発光として残り、そして転移後のNGの強い発光が中心部に存在することによって形成されることが考えられる。

〈4.3〉放電モード遷移と気体加熱 グロー放電の維持機構に対して陰極付近の放電空間が極めて重要な作用をもつことから、放電モード遷移に関して陰極電流密度とNG中の気体加熱の点から検討を加える。

図7は、グロー放電モード変化と陰極電流密度 J_n (mA/cm²)との関係を示したものである。ここで、NGの N_2 の2nd Positive Band (0,0)のスペクトル強度が放電中心軸上の値の5%まで降下する範囲での発光面積に対応する陰極面積に一樣な電流が流れることを仮定する。この J_n は全電流 I をNGの発光面積で割って導出した平均値である。この図から、グロー放電モードの遷移 (破線部)に対応して、6～12 mA/

図 7 グロー放電モード変化に伴う
陰極電流密度

Fig. 7. Cathode current density with
glow mode transition.

図 8 負グロー中の気体温度

Fig. 8. Gas temperatures in the negative
glow as a function of discharge current.

cm² から 60~120 mA/cm² の J_n の急激な上昇が認められる。また、同一の I の値では、 J_n の値が P の増大と共に増加する傾向をもつ。

図 8, 図 9 は、図 7 の J_n の変化に対応する NG 中での気体温度 T_g (K) と振動温度 T_v (K) を各々示したものである。これらの図から、グロー放電モード遷移後 T_g が約 550 K 以上となり、 T_v が約 1,000 K 以上となることがわかる。ところで、1st Negative Band (0,0) より導出した T_g が、2nd Positive Band (0,2) より導出した T_g より、転移後約 100~300 K 高くなる。この原因は、図 6 より明らかなように、放電中心軸から 1st Negative Band (0,0) の急激な減

図 9 負グロー中の振動温度

Fig. 9. Vibrational temperatures of the
negative glow as a function of discharge
current.

少が起ることから、NG のより中心部の温度であることと、軸方向に対する強度が最大となる測定点がより陰極側であることによる⁽¹⁸⁾。

以上の J_n , T_g および T_v の実測結果より、グロー放電モードの遷移は、 J_n の急上昇と共に以前希ガスについて報告⁽⁶⁾されているような気体加熱によって起こることが判明した。

5. ま と め

平等電界ギャップ中での N₂ ガス 直流 グロー放電を、放電ギャップと直列に高抵抗を接続することによって、電圧-電流特性の負こう配の領域で安定に発生し、そのグロー放電モードと気体加熱について検討した。その結果を要約すると次のようになる。

(1) 10 Torr 以上の気体圧力で V - I 特性の負こう配の領域で、 V の急激な減少による不連続が現われる。

(2) この不連続に対応して、グロー放電モードの遷移が起こり、遷移直後に安定なダブル負グローが形成される。

(3) ダブル負グローは、グロー放電モードの遷移前後の NG が軸中心部と周辺部とに同時に現われたもので、0.8~1.3 mA の狭い電流範囲でのみ観測される。

(4) グロー放電モードの遷移は、陰極電流密度の急上昇を伴う気体加熱によって起こる。

最後に、本研究の一部は昭和 57 年度文部省科学研究費補助によって行なったものであり、関係各位に感謝いたします。

(昭和 58 年 5 月 18 日受付, 同 58 年 9 月 16 日再受付)

文 献

- (1) 山本:「器壁効果のない放電陽光柱の理論」, 電気工学論文集, 3, 87 (昭 25-2)
- (2) 土手:「ガスレーザと放電物性」, 電学誌, 99, 27 (昭 54-1)
- (3) E. Marode: "The mechanism of sparkbreakdown in air at atmospheric pressure between a positive point and plane II", *J. Appl. Phys.*, 46, 2016 (1975)
- (4) 西嶋・原・赤崎:「低気圧の窒素と酸素の混合気体中における針対平板ギャップの正極性インパルス破壊過程」, 電学論A, 99, 479 (昭 54-10)
- (5) M. C. Cavenor & J. Meyer: "The development of spark-discharge in hydrogen", *Aust. J. Phys.*, 22, 155 (1969)
- (6) M. Sugawara: "Onset characteristics of the constricted positive column at moderate pressures", *Phys. Lett.*, 25A, 154 (1967)
- (7) V. Yu. Baranov & K. N. Ulyanov: "Constriction of a positive column I", *Soviet Phys. Tech. Phys.*, 14, 176 (1969)
- (8) 藤井・高橋・浅見:「タウンゼント放電から正規グロー放電への連続移行」, 電学論A, 96, 449 (昭 51-10)
- (9) 西嶋・行徳・常安:「N₂ ガス放電の空間電荷効果による負グロー形成過程」, 福岡大学工学集報, 29, 13 (昭 57-9)
- (10) G. Davidson & R. O'Neil: "Optical radiation from nitrogen and air at high pressure excited by energetic electrons", *J. Chem. Phys.*, 41, 3946 (1964)
- (11) D. M. Phillips: "Determination of gas temperature from unresolved bands in the spectrum from a nitrogen discharge" *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 8, 507 (1975)
- (12) R. Bleekrode: "A study of spontaneous emission from CO₂-N₂-He-H₂ laser discharge C³π_u-B³π_g emission bands of N₂", *IEEE J. Quantum Electronics*, QE-5, 57 (1969)
- (13) A. Lofthus & P. H. Krupenie: "The spectrum of molecular nitrogen", *J. Phys. Chem.*, Ref. Data 6, 113 (1977)
- (14) G. Hartmann & P. C. Johnson: "Measurements of relative transition probabilities and the variation of the electronic transition moment for N₂C³π_u-B³π_g second positive system", *J. Phys. B: Atom. Molec. Phys.*, 11, 1597 (1978)
- (15) 西嶋・行徳・常安:「N₂ ガス放電に関する回転温度とバンドスペクトル強度分布との関係」, 福岡大学工学集報, 27, 41 (昭 56-8)
- (16) 小野・松村・堤井:「CO₂ レーザプラズマの基礎特性」, 電気学会プラズマ研資, EP-76-15, 15-1 (昭 57-7)
- (17) 西嶋・美山・常安:「N₂ ガス放電に関する精密な振動温度の導出法」, 福岡大学工学集報, 29, 19 (昭 57-9)
- (18) 西嶋・美山・生澤・常安:「N₂ ガス中の直流グロー放電の陰極近傍におけるスペクトル強度分布」, 昭 57 電気学全大 [2], 86