Ne と Ar 中の Paschen 極小における電子スオームの挙動

非会員 竹 林 辰 将 (千葉工業大学)

正 員 福 山 達 也 (千葉工業大学)

正 員 伊 藤 晴 雄 (千葉工業大学)

Behavior of Electron Swarm in the Paschen Minimum with Ne and Ar.

Tatsuyuki Takebayashi, Non-member, Tatsuya Fukuyama, Member, Haruo Itoh, Member (Chiba Institute of Technology)

Behavior of the electron swarm at the starting condition of the self-sustaining discharge depending on p_0d is investigated in Ne and Ar by using a Monte Carlo Simulation (MCS). The calculations are performed under the E/p_0 and p_0d conditions including the Paschen minimum which was obtained from the experiment by Penning and Addink. From the result it is found that the energy non-equilibrium region spread over almost the gap space in particular near the Paschen minimum. So we proposed the improved description for the formula of Townsend's self-sustaining condition. The calculated results allows that the starting conditions of the self-sustained discharge in Ne and Ar would be applicable to the Engel's theory.

キーワード : Paschen 極小, エネルギー非平衡, 火花条件, 2 次電子放出係数, 電離能, MCS

1. ま え が き

低ガス圧力, 平等電界ギャップの陰極から光電子放出により初期電子を与えながら電極間電圧を変化したときの電離電流は, 電離係数 α/p_0 と二次電子放出係数 γ を用いた Townsend の電流成長式⁽¹⁾により記述される。

電極間電圧を徐々に上昇すれば, 電流は増加し, 初期電流に比べ十分に大きくなると, 自統放電, あるいは火花放電が観測される。このとき Townsend の火花条件⁽¹⁾が成立し, その電極間電圧を自統放電開始電圧または火花電圧 V_s と呼んでいる。この火花電圧はガス圧力 p_0 と電極間距離 d の積の関数となり, p_0d に対して V 字状の Paschen 曲線を描くことも既によく知られたことである。これが Paschen の法則である。Paschen 曲線の最小値, 即ち最小火花電圧 $(Vs)_{min}$ は, その気体が絶縁体から導体になる最低電圧を意味し, 放電工学, 高電圧工学上重要な数値である。

この Paschen 極小がどのような条件の下で成立するかについては, 古くからの説^{(2)~(4)}があるが, 今回は電子スオームの MCS 結果と比較しながら, Paschen 極小における電子スオームの状態について検討した。

その結果, Ne と Ar 中の Paschen 極小は, Engel⁽²⁾ がまとめたように電離能が最大となる E/p_0 付近において観測されることが確認できた。しかし, Paschen 極小付近の自統放電開始電圧の下での電子スオームは, 放電空間の広い範囲にわたって電子エネルギーの平衡状態にはなっていないこと

が見出された。自統放電開始電圧の測定値から Townsend の火花条件式を用いて二次電子放出係数を決定することがしばしば行われるが, Paschen 極小付近の p_0d 条件では既に述べたようにエネルギー非平衡域であることを考慮しなければならず, この取り扱いを無視すると正しい二次電子放出係数を求めることができなくなる。このような問題についてプラズマディスプレイパネル (PDP) セル中の 2 次電子放出係数⁽⁵⁾の決定法を例にとり議論した。

2. MCS の方法と Paschen 曲線

MCS は, 層状発光⁽⁶⁾⁽⁷⁾や電子透過率⁽⁸⁾, エネルギー緩和過程⁽⁹⁾の研究で用いた手法と同じである。SST サンプリングによって Ne については 10000 個, Ar については 1000 個の電子について計算した。その放出エネルギー分布はいずれも 0~0.1eV 間で均一な分布として与え, 電子は陰極中心から放出した。電子放出角度は陰極面の前方向に等方な分布で与えた。陰極, 陽極表面での電子反射率は 0 とした。用いた Ne の電子衝突断面積は Hayashi のセット⁽¹⁰⁾, Ar の電子衝突断面積は Nakamura らのセット⁽¹¹⁾である。SST サンプリングによって各種電子輸送係数を求めた。本論文では Ne と Ar 中の Paschen 曲線は Penning and Addink の実験値⁽¹²⁾を用いた。これを図 1 に示した。

図1 Paschen 曲線および $E/p_0 - p_0d$ 曲線
Fig. 1. Paschen curves and $E/p_0 - p_0d$ curves

3. 自続放電開始条件下での MCS の結果と考察

〈3・1〉 自続放電開始電圧 図1は Ne と Ar 中の Paschen 曲線 ($\triangle$, $\circ$ 印) とそれに対応する $E/p_0 - p_0d$ 曲線 ($\blacktriangle$, $\bullet$ 印) である。このような E/p_0 と p_0d 条件で MCS を行った結果を比較しながら検討する。同図中、一点鎖線と破線は、Ne と Ar における Paschen 極小を与える p_0d を表しており、それぞれ 3.0 及び 1.0 Torr·cm である。

〈3・2〉 電子エネルギー分布の空間的变化 図2(a)~(c) は Ne 中の電子エネルギー分布の空間的变化を $p_0d = 1.45, 3, 10$ Torr·cm の順に示した。

陰極 ($x = 0$) と陽極 ($x = 1$ cm) の近くには非平衡領域が存在しており、Paschen 極小 (p_0d)_{min} = 3 Torr·cm では陰極表面から 0.55 cm 付近まで、即ち、放電空間の半分以上を占めていることを確認できる。しかし、この非平衡領域の大きさは p_0d の増加とともに減少している。

図2 Ne 中の電子エネルギーの空間的变化
Fig. 2. Spatial variations of electron energy distribution in Ne.

図3 Ar 中の電子エネルギーの空間的变化
Fig. 3. Spatial variations of electron energy distribution in Ar.

図3(a)~(c)はAr中の電子エネルギー分布の空間的变化を $p_0d=0.58, 1, 3$ Torr·cmの順に示した。Paschen 極小(p_0d)_{min}=1 Torr·cmにおける電子エネルギー分布の空間変化は図3(b)に示した。同図でも陰極と陽極表面付近に非平衡領域が確認でき、その範囲は陰極からほぼ0.50cmまで続いている。

(3・3) 衝突種類別の衝突回数と電子エネルギー損失

図4はNe, 図5はArについて衝突種類ごとの初期電子1個あたりの電極間における衝突回数とそれらの衝突による電子エネルギー損失量を p_0d について表示した結果である。

これらは弾性衝突 q_m と、Neは7つの電子励起 $q_{e1} \sim q_{e7}$ 、そしてArは6つの電子励起 $q_{e1} \sim q_{e6}$ に分類されている。それらの和をNe, Arとも q_e として表示した。電子励起のうち準安定励起準位はNe, Arとも q_{e1} と q_{e3} である。更に電離衝突 q_i についても表示してある。全ての衝突による全衝突回数と全エネルギー損失量をtotalで示した。これらの記号は文献(9)中の励起準位等に対応している。

衝突回数を見ると、全衝突回数の殆どを弾性衝突 q_m が占めている。続いて全励起 q_e 、電離 q_i の順であるが、Ne, Arに関しては電離と励起の衝突回数はNeでは2Torr·cmに近い値で、Arでは1Torr·cmを少し越えた値でそれぞれ

等しくなり、これより高 E/p_0 側では励起衝突の発生回数が電離のそれを上回るようになる。Neの電離の発生回数が p_0d に関わらずほぼ一定であるのが特徴的である。

電子エネルギー損失量に注目する。これは今見た衝突回数に、それぞれの衝突に伴う損失エネルギーを掛算することになるので p_0d に対する依存性はほぼ保たれている。したがってNe, Ar いずれもPaschen 極小に近い p_0d (Ne:2.3Torr·cm, Ar:1.5Torr·cm)を境界とし、これより低い p_0d では電離衝突に費やされるエネルギーが励起のそれより大きくなる。又、Neの電離に費やされたエネルギーは p_0d に対しほぼ平坦である。このとき、1個の電子が電極間を横切る間の電離発生数の平均数を求めてみると約13と一定であった。これに対してArの電離に費やされたエネルギーは p_0d に対して緩やかな上昇を示し、Neの電離を除いたすべての種類の衝突によるエネルギー損失が p_0d に対して右上がりの変化をしている。このように今回用いた電子衝突断面積セットに基づいて衝突の種類別に衝突回数やエネルギー損失量を知ることができた。これらの結果よりPaschen 極小より低い p_0d 側では電離衝突、逆に高 p_0d 側では励起衝突により電子からNeとAr原子へのエネルギー移行が行われていることが読み取れる。Paschen 極小付近の p_0d では電離と励起によるNeとArへの電子衝突によるエネルギー注入量がほぼ等しくなっていることも理解で

図4 Neの電子衝突回数と電子エネルギー損失量

Fig. 4. Number of collision and energy loss of electron in Ne.

図5 Arの電子衝突回数と電子エネルギー損失量

Fig. 5. Number of collision and energy loss of electron in Ar.

図6 電離衝突の空間分布

Fig. 6. Spatial distribution of ionization collision rate.

図7 移動速度の空間分布

Fig. 7. Spatial distribution of electron drift velocity.

図8 衝突電離係数の空間分布

Fig. 8. Spatial distribution of ionization coefficient.

きた。このことは、用いた断面積による小さな違いはあるかもしれないが、Townsendの自統条件式が α と γ を含んだ形で記述され、その背景としてNeやArの前者は電離、後者は励起による衝突を通じて自統条件成立に寄与できる状態にあることを衝突過程から裏付けた結果であると考えられる。 γ については、 γ_i だけでなく準安定励起分子や光子による γ_m, γ_p もこの中に当然含まれる。

〈3・4〉 電離衝突率と電子移動速度、電離係数 図1のNe, ArのPaschen曲線上の p_0d と E/p_0 条件においてMCSにより計算した結果をSSTサンプリングし、陰極からの距離 x について電離衝突率 ν_i 、電子移動速度 V_d をプロットした。そしてこの両者から電離係数 α/p_0 を求めた。

ここでは、近年盛んに研究が行われているプラズマディスプレイパネル(PDP)セル中の放電状態がPaschen極小に近い条件であることに注目して、この電極間距離 $d = 0.02\text{cm}$ を想定し、計算した。NeとArの結果の中から、Neについて3次元表示して図6～図8に、これらから決定した2次電子放出係数 γ を図9にそれぞれ示してある。パラメータは E/p_0 である。図6の ν_i 、図7の V_d は共に陰極、陽極の近くの電子エネルギー非平衡域で大きく変化している。これらから ν_i/V_d 即ち α/p_0 を求めたのが図8である。高 p_0d 言い換えると低 E/p_0 である程広い x の範囲にわたりエネルギー平衡した変動のない α/p_0 が得られている。この値がMCSにより求めた α/p_0 となるが、この値については後の図10に示して議論する。

〈3・5〉 自統条件式と二次電子放出係数 図8に示した $\alpha/p_0 - x$ 曲線の陽極に近い部分で一定の値をとる α/p_0 をその E/p_0 における値として読みとり、Townsendの自統条件式

$$\alpha d = \ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) \quad \dots\dots\dots (1)$$

により二次電子放出係数 γ を決定した。(1)式の左辺は1個の電子が電極間で発生する電離衝突の平均回数であり、これはエネルギー平衡している下では $(\alpha/p_0) \cdot (p_0d)$ で表される。 α/p_0 を図の平坦な値から読み取り、(1)式の左辺 αd を満たす γ を決めプロットすると図9の△印になる。Neは $p_0d=10\text{Torr}\cdot\text{cm}$ 付近にピークを持ち、その後減少する変化をしている。これに対して同じ方法で求めたArは p_0 に対して単調に減少する曲線を描いている。陰極材質は鉄である。

一方、電子のエネルギー非平衡を考慮すると、電極間を飛行し終わった1個の電子による電離衝突発生数は x に依存するものとなり、(1)式の αd の代わりに次式で表現される。

$$\int_0^d \alpha(x) dx = \ln \left(1 + \frac{1}{\gamma'} \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

この左辺の値はMCSで計算されているから γ' は容易に求まり、この γ' も図9中に○印でプロットした。Ne, Arいずれにおいても γ' の方が大きくなり、エネルギー非平衡の

図9 二次電子放出係数 γ , γ' と相対誤差
Fig. 9. Secondary electron emission coefficient and relative error between them.

効果を無視することができないことを明らかにした結果である。

γ と γ' との相対誤差についても●印でプロットした。Paschen 極小付近では γ と γ' との間は 35~40% の差があるが p_0d の増加と共に減少する傾向にある。最近、PDP セル陰極の 2 次電子放出係数 γ を決定することが、今述べたような自続放電開始電圧を測定する方法で行なわれている⁽⁵⁾。しかし Paschen 極小に近い p_0d 条件であれば既に指摘したように電子はエネルギー平衡には達していない、(2) 式を用いた決定法でなければならないことになる。

〈3・6〉 電離能最大を与える条件 図 10 は、図 8 の各 E/p_0 における電離係数 α/p_0 の曲線から平衡値を求め、これを E/p_0 で割った電離能 α/E として E/p_0 に対してプロットした結果である。今回の MCS による Ne, Ar の計算結果を●, ▲でそれぞれ表した。一方 Kruithof and Penning⁽¹³⁾ による実験値を○, △で示した。

図 10 α/E - E/p_0 特性
Fig. 10. α/E vs. E/p_0 characteristics.

表 1 Paschen 極小と α/E 最大を与える E/p_0 (V/Torr·cm)

Table 1. Comparison of the (E/p_0) values.

	Ne	Ar
$(E/p_0)_{min}$	73.2	214.9
Kruithof の実験値	84.2	200.2
MCS の結果による値	86.4	210.5

Engel⁽²⁾ や幾つかの教科書⁽³⁾⁽⁴⁾ では Paschen 極小は電離能が最大となる条件で現れることを述べているが、この点を衝突断面積データから MCS により吟味してみる。その為に図 1 の Paschen 極小における $(E/p_0)_{min}$ と、Kruithof らの測定した電離能が最大となる E/p_0 、今回の MCS による電離能最大の E/p_0 を比較したのが表 1 と図 10 である。

図 10 中の Ne 中では、 $(E/p_0)_{min} = 73.2$ V/cm·Torr にある。これを縦軸に平行に引いた実線で示した。 α/E の最大値は今回の MCS では 86.4 V/cm·Torr、Kruithof らの実験値では 84.2 V/cm·Torr にあり、共に $(E/p_0)_{min}$ より 10% 以上高い値をとる。

Ar 中では $(E/p_0)_{min} = 214.9$ V/cm·Torr にあり、縦軸に平行な実線で示してある。これに対し、 α/E の最大値は MCS では $E/p_0 = 210.5$ V/cm·Torr、又 Kruithof のそれは、 $E/p_0 = 200.2$ V/cm·Torr であり、いずれも $(E/p_0)_{min}$ よりも数% 低い値となった。

しかし、ここで議論した図 10 の Ar や Ne の曲線は鋭いピークを描かないため、その最大値を見極めにくくしている。このような特性は Paschen 極小を与える条件が、既に述べたように他の因子にも影響され易い状態にあることを

物語っていると思われるが⁽¹⁴⁾、これらの結果をまとめると、本論文では Engel の理論は大まかには成立していると判断した。

このように今回の MCS により、電子衝突過程から、自統放電開始現象についていくつかの情報を入手できた。文献(2)中の数値と今回議論した中での値の違いはあるが、古くから唱えられてきた論旨はほぼ確認できたと考えている。

4. ま と め

Ne, Ar 中の自統放電開始電圧に注目して Paschen 極小を含む電子スオームを電子衝突断面積のセットを用いた MCS により検討した。電子スオーム実験による電子輸送係数や自統放電開始電圧測定だけでは得られない次のような情報を入手することができた。

- (1) 電極間の半分以上が電子エネルギーの非平衡領域となっていることを確かめることができた。
- (2) 従って、従来の Townsend の自統条件式は電子エネルギー非平衡を考慮した形に修正しなければならないことを述べた。
- (3) この自統条件式から二次電子放出係数を決定する場合には、エネルギー平衡にあると仮定した場合と比較して 40% 程度の違いが生まれる可能性がある。しかし、この差は $p_0 d$ が大きくなると減少する。
- (4) Paschen 極小は電離能が最大となる E/p_0 で与えられるという Engel の理論はほぼ成立していることを確かめた。
- (5) Paschen 極小は電子衝突を介して Ne と Ar 原子が電離と励起によりほぼ等量のエネルギーを吸収できる条件で実現していることを観測できた。

断面積データをご提供いただきました気体エレクトロニクス研究所、林 眞博士と慶應義塾大学、中村 義春博士に感謝の意を表します。

(平成 12 年 8 月 8 日受付, 同 12 年 10 月 24 日再受付)

文 献

- (1) 例えば、坂本, 田頭: 新高電圧工学, 朝倉書店 (1974)
- (2) S.Fluggel (ed.): Handbuch der Physik 21, 515, Springer-Verlag (1956)
- (3) 本多: 気体放電現象 p.70, 東京電機大学出版局 (昭 30)
- (4) 武田: 気体放電の基礎, 東京電機大学出版局 (1973)
- (5) G.Auday, Ph.Guillot, J.Galy and H.Brunet: "Secondary emission of MgO surfaces in plasma display panels. Case of Neon and Xenon discharges" XXIV ICPIG Contributed Papers, 4, 340, (Warsaw) 1999
- (6) 福山, 伊藤, 山本, 生田: 「Ne 層状発光の実験とモンテカルロシミュレーション」電学論 116-A, 529~535(1996)
- (7) 福山, 伊藤: 「層状発光の曲がり現象」電学論 118-A, 543~548(1998)
- (8) 田中, 西沢, 伊藤, 生田: 「MCS による N_2 中の電子透過過程の検討」電気学会放電研究 ED-97-87(1997)
- (9) 山梨, 福山, 山本, 伊藤, 生田: 「希ガス中電子エネルギー分布の緩和とその微細構造」電学論, 118-A, 991~996(1998)
- (10) プラズマ材料科学ハンドブック, オーム社 (1992)
- (11) 倉知, 中村: 「Ar 及び Kr 中の電離係数と電子衝突断面積」電気学会放電研究 ED-89-72(1989)

- (12) F.M.Penning and C.C.Addink: "The starting potential of the glow discharge in Neon-Argon mixtures between large parallel plates" Physica 1, 1007-1027(1934)
- (13) A.A.Kruithof and F.M.Penning: "Determination of the Townsend ionization coefficient α for mixtures of Neon and Argon" Physica 4, 430(1937)
- (14) 伊藤, 生田: 「 N_2 ガス中における電離電流 (IV. Townsend 放電の成立機構)」電学論 109-A, 279-286, (1989)

竹 林 辰 将 (非会員) 1976 年 2 月 4 日生。平成 12 年 3 月千葉工業大学大学院工学研究科修士課程修了。同年 4 月株式会社アルプス電気入社。

福 山 達 也 (正員) 1967 年 12 月 9 日生。99 年 3 月, 千葉工業大学大学院工学研究科電気電子工学専攻博士課程修了。現在千葉工業大学助手。博士 (工学)。放電現象, 固体絶縁材料の研究に従事。

伊 藤 晴 雄 (正員) 1945 年 9 月 11 日生。68 年 3 月千葉工業大学電気工学科卒業。68 年 4 月~70 年 3 月理化学研究所勤務。72 年 3 月徳島大学大学院工学研究科修士課程修了。同年 4 月千葉工業大学助手, 現在, 同教授。放電基礎過程の研究に従事。工学博士。日本物理学会, 応用物理学会, 静電気学会会員。