初期エネルギー分布を変えた場合のPDPセル内の電子スオームの挙動

正員 福山 達也 (千葉工業大学)

正員 伊藤 晴雄 (千葉工業大学)

Electron Swarm Behavior in a PDP Cell Dependent
on the Initial Energy Distribution of Electrons

Tatsuya Fukuyama, Member, Haruo Itoh, Member (Chiba Institute of Technology)

This paper describes the influence of initial energy distribution of the electron emitted from the cathode on the behavior of the electron swarm in a PDP cell. Spatial and temporal distributions of the electron transport coefficients are obtained with two types of the initial energy distribution of electrons at the cathode. The results for the electron transport coefficients in the equilibrium region almost agree, but large differences are found in the nonequilibrium region, particularly near the cathode. If the initial energy of emitted electron from the cathode is large, the transmitted electron through gas is decreased due to the increase of the back scattering and on the contrast the multiplication factor of the collisional ionization is increased.

キーワード : PDP, 電子スオーム, 電子エネルギー分布, 電子輸送係数, モンテカルロシミュレーション

1. ま え が き

著者らはプラズマディスプレイパネル (PDP) セル中の空間電荷に支配された電界下におけるモンテカルロシミュレーション (MCS) を行ない, セル中の電子スオームの挙動を調べてきた⁽¹⁾. そこでは電極間に周期的な電圧を印加している中から, 4つの時刻における電界分布の下で MCS を行い, このような計算を行う際に用いられる LFA (local field approximation) の妥当性について検討した. その結果, 特に電界の空間変化が大きい方から小さい方に変化する場合には, LFA は成立していないと判断できる結果を得たことを報告した⁽²⁾. そこでの計算は, 陰極から放出される電子の初期エネルギー分布は, 全て 0~0.1 eV の間で等確率に与えて計算したが, 実際には電子衝突により He と Xe の準安定励起粒子やそれらの正イオン He^+ , Xe^+ が生成され, これらが陰極に入射して 2 次電子放出作用を起こすことになる. 従って, 電子は 0.1 eV よりはるかに高いエネルギーで陰極より放出されることが十分に予想される.

本論文はこのような現象を取り入れた計算をするために, He^+ や Xe^+ がニッケル (Ni) 陰極に入射したときに放出されるであろう二次電子の放出エネルギー分布を新たに与えて, これを初期電子のエネルギー分布として用いることにした. この分布は Hagstrum⁽³⁾ が実験により確かめた He^+ や Xe^+ をタングステン (以下 W) 電極に入射したときに

放出される 2 次電子のエネルギー分布を参考にし, このような電子の初期エネルギー分布の違いが PDP セル内の電子スオームにどのような影響を与えるか検討した. 今回は, とりあえず電界分布は一様な場合について計算した中から興味深い結果について報告する.

2. MCS の計算

〈2・1〉 MCS の計算方法 MCS は層状発光の研究⁽⁴⁾⁽⁵⁾ に用いたコードと基本的に同じである. データ収集は時間規準の PT (Pulsed Townsend), ならびに位置規準の SST (Steady State Townsend) の両サンプリング法を用いて, 電子スオームの挙動を空間的, 時間的に観測した. ガスは He/Xe 混合ガス (10% Xe) である. He, Xe の電子衝突断面積は林⁽⁶⁾ がまとめたセットを用いた. 電極間距離は 0.02 cm, ガス圧力は 300 Torr, 電圧は PDP セル中で放電が開始した直後の 170 (V) において比較することにした. これは 0 °C における換算電界 $E/p_0 = 28.33 \text{ (V/cm} \cdot \text{Torr)}$ にあたり, この一様電界の下で計算した. SST サンプリング法を用いた計算では初期電子を陰極より 10^4 個放出し, 陽極または陰極に達するまで計算した. PT サンプリング法を用いた計算では, 初期電子を陰極より 1×10^6 個放出し, 電子の追跡時間を 20, 200 ps の 2 通りについて行なった.

〈2・2〉 電子の初期エネルギー分布 図 1 に今回用いた電子の初期エネルギー分布を示す. 左側の目盛りは He^+

により放出された電子のエネルギー分布 $F(\epsilon)_{He}$ であり、右側のそれは Xe^+ により放出された電子のエネルギー分布 $F(\epsilon)_{Xe}$ を表している。2つの分布はそれぞれ規格化して表示してある。

図1 Xe^+ と He^+ により放出される電子の初期エネルギー分布 $F(\epsilon)$

Fig. 1. Initial energy distribution of emitted electron by Xe^+ and He^+

これは Hagstrum⁽³⁾ が実験により W 陰極に He^+ と Xe^+ を入射したときの 2 次電子のエネルギー分布の測定値を参考にしてまとめたものである。放出電子のエネルギーの最大値 ϵ_{max} は入射するイオンのポテンシャルエネルギー ϵ_i と陰極の仕事関数 ϕ を用いて

$$\epsilon_{max} = \epsilon_i - 2\phi \dots\dots\dots (1)$$

により与えた⁽³⁾。

放出電子の 0 から ϵ_{max} 間のエネルギー分布は実験値が見当たらなかったため、Ni 陰極において測定された 0～ ϵ_{max} 間の分布が、W 陰極の場合の 0～ ϵ_{max} 間においてもそのまま成り立つと仮定して与えた。言い換えると、W 陰極の場合の 0～ ϵ_{max} 間の分布は、Ni 陰極における 0～ ϵ_{max} 間で相似な形状を持つとして計算に用いた。ここで放出される電子エネルギーの最大値は He^+ により放出される場合であり 14.28eV である。図中 ϕ は Ni の仕事関数 (5.15eV)、 ϵ_i は He と Xe の電離電圧である。

He^+ と Xe^+ が放出する 2 次電子の割合は、流体モデルのシミュレーション⁽¹⁾ の結果を参考にして、それらを 0.57:0.43 とした。また、 He^+ と Xe^+ 以外の粒子による 2 次電子放出は相対的に少なかったという結果に従い、それらは無視した。

このような分布で初期電子を放出した場合と、前回の計算で採用したように 0～0.1eV 間で等確率な初期エネルギー分布で電子放出した場合の電子スオームの挙動について比較検討した。

3. 計算結果

〈3・1〉 SST 解析による比較 ① 電子エネルギー分布の空間変化 図 2 は 2通りの初期エネルギー分布で電子を放出した場合の電子エネルギー分布の空間変化である。同図 (a) は電子の初期エネルギーが 0～0.1eV で等確率な分布で放出した場合 (以後、[0～0.1eV] と記す) の、同図 (b) は図 1 のような He^+ と Xe^+ が放出する電子のエネルギー分布を初期エネルギー分布とした場合 (以後、[0～14eV] と記す) の結果である。

図2 電子エネルギー分布の空間変化

Fig. 2. Spatial variations of electron energy distribution

陰極近傍を除けば、両者はほぼ一致している。陰極近傍における分布の大きな違いに注目すると、[0～0.1eV] で与えた (a) では、電子エネルギー分布は陰極近傍でエネルギー幅が狭く、高いピークをもつ形状となる。これは放出された電子が 0～0.1eV の狭いエネルギー幅をもちながら加速されることによる。次に、[0～14eV] で与えた (b) を見ると、陰極近傍における電子エネルギー分布は図 1 の He^+ と Xe^+ による分布を 0.57 と 0.43 の割合で重ね合わせた形であり、ピークは [0～0.1eV] よりも低く、高エネルギー側に幅広く伸びた形状となる。このためエネルギー分布が一定となるまでの距離は (a) では 0.008cm (b) では 0.006cm と、後者が若干短くなっている。

② 各種電子輸送係数 図 3 には Xe の各種電子衝突周波数、電子数分布、以下電子の He と Xe との弾性衝突数、Xe の電離衝突数、Xe 1s₄ への励起数、Xe の全励起数そして、電子の平均エネルギーと電界方向移動速度、などの空間変化を上から順に示してある。

左側の図は [0～0.1eV] の、右側の図は [0～14eV] の分布で初期エネルギーを与えた場合の結果である。

図3 Xeの各種電子衝突周波数，電子数分布，He，Xe弾性衝突，Xe電離衝突数，Xe($1s_4$)全励起衝突数，電子エネルギー，電界方向移動速度，Xe全励起衝突数の空間変化

Fig.3. Spatial variations of electron collision rates, number of electron, number of elastic collision, number of ionization collision, number of excitation collision, electron mean energy, and electron drift velocity

陰極近傍を除いたエネルギー平衡領域における電子輸送係数を比較すると、両者はほとんど一致している。しかし、各種衝突発生空間変化を比較すると、[0~14eV]の結果は[0~0.1eV]に比べ、すべての種類の電子衝突が減少している。

③ 電子の陰極、陽極への吸収数 表1は陰極から放出された電子の両電極への吸収数と電離増倍率をまとめたものである。特に陰極に吸収された電子数を比較すると、bの[0~14eV]の場合はaの[0~0.1eV]の場合より7倍も多くの電子が後方散乱により陰極に戻されているのが特徴的である。

表1 電子の電極への吸収数、電離増倍率

Table 1. Electron absorption number to the electrode and ionization multiplication factor

	a:[0~0.1eV]	b:[0~14eV]	(b/a)
陰極吸収数	850	5980	7.035
陽極吸収数	210006	100210	0.477
電離増倍率	22.95	24.93	1.086

表2 各種衝突数の積算値の比較

Table 2. Comparison of the integrated value of various collision number

衝突回数	a:[0~0.1eV]	b:[0~14eV]	(b/a)
弾性衝突 He	66115114	31441771	0.476
Xe	24885332	11839819	0.476
励起衝突 He	17927	8222	0.459
Xe	521514	247843	0.475
Xe 1s ₄	65956	31134	0.472
電離衝突 He	1788	879	0.492
Xe	199068	95311	0.479
全衝突回数	91806699	43664979	0.476

④ 電離増倍率 陰極に吸収されずに、後方散乱効果を逃れた電子は、ガス中に注入され電離増倍をしながら、陽極に吸収される。陽極吸収数とガス中に注入された電子数即ち、陰極放出数から陰極への吸収数を引いた値との比が電極間の電離増倍率となり、これも表1にまとめている。電離増倍率は[0~0.1eV]より[0~14eV]の方が1.086倍すなわち約1割大きくなっている。このように電子の初期エネルギー分布の違いは、エネルギーが大きいほどガス中への電子注入数が減少するが、入った後の電子1個当りの電離増倍率は大きくなることを見出すことができた。この増加分は図中の ν_i 曲線で説明できる。[0~14eV]の場合、陰極前面から電離発生を観測しているが、[0~0.1eV]では $x=0.0015\text{cm}$ 付近より電離が発生している。 ν_i 曲線の描く面積の比が1.086を与えることになる。

⑤ 各種衝突回数の比較 放電空間中の電子の各種衝突

回数値を表2に示した。bの[0~14eV]における衝突回数と、aの[0~0.1eV]における衝突回数の比(b/a)も表示してある。全衝突回数の比は0.476であるが、これらの内訳は衝突頻度の大きい弾性衝突ではHe, Xeとも0.476で全衝突の場合と同じである、しかし、励起衝突ではHe, 0.459, Xe, 0.475, Xe 1s₄, 0.472といずれも僅かに小さく、これに対して電離衝突数ではHe, Xeとも0.492と0.479と大きくなった。電子の初期エネルギーを大きくすると以上のように電子衝突の内訳が変化することがわかる。これらは、弾性衝突回数に比べて圧倒的にサンプル数が少なかった上での議論であるが、その発生確率が試行回数、この場合は初期電子数であるが、この値に依存することは本質的にはあり得ないものと著者らは考える。発生確率の小さい電離や励起について詳細な情報を収集しようとするれば、更に多くの電子について計算しなければならなくなるのは当然のことである。

初期エネルギーを2つの分布で与えた結果より全衝突回数の比は、弾性衝突と同じ0.48であり、衝突の種類では電離衝突の比が[0~14eV]の場合に唯一増加している。このことは電子を大きいエネルギーで注入すれば陰極前面のエネルギー非平衡領域内から電子衝突電離が発生し、電離衝突数が増加することを示している。

⑥ 励起と電離発生空間分布 図3では放出エネルギー分布の違いは陰極近傍における励起や電離の発生分布にも変化を与えている様子が確認できる。即ち、[0~14eV]では陰極近くから励起や電離衝突が発生していることを確認できた。

〈3-2〉PT解析による比較

① 電子エネルギーの時間変化 図4に電子エネルギー分布の時間変化を示した。同図(a), (b)は電子の初期エネルギーが[0~0.1eV]、同図(c), (d)は[0~14eV]のそれぞれの結果である。電子の追跡時間Tは(a)と(c)が20ps, (b)と(d)が200psである。エネルギー分布の時間軸はすべての図で手前を時刻0としている。[0~0.1eV]、[0~14eV]の両者とも、陰極を出発した直後の分布は陰極放出時の初期エネルギー分布の形で保たれているが、衝突によりエネルギーが緩和して、エネルギー平衡状態になるまでの時間は[0~0.1eV]は50ps, [0~14eV]では30ps、と後者の方が短くなった。

表3は電子放出後の時刻 $t=20, 200\text{ps}$ における電子スオームの重心位置 x_g を示してある。この表より、[0~0.1eV]の重心位置の方が[0~14eV]のそれよりも陽極寄りに移動していることがわかる。これは後でも述べるが、[0~0.1eV]では、電子はRamsauer極小のエネルギー領域を通過するため、電子の飛行距離が長くなり、電子の前方向速度が大きくなるためである。また、電子が陰極から放出された直後の20psでは両者の差は大きい、時間の経過とともに、特にXeのRamsauer極小を通り抜けた電子は十分衝突するようになり、その差が次第に小さくなっていることも明らかとなった。

表3 電子スオームの重心の位置

Table 3. Center of position of the electron swarm

時刻 T(ps)	重心位置 x_g (cm)		(b/a)
	a:[0~0.1eV]	b:[0~14eV]	
20	0.000423	0.000373	0.882
200	0.003372	0.003358	0.996

② 各種電子輸送係数 図5に電子の平均エネルギー ϵ 、速度空間の電界方向移動速度 w_v 、Xeの電離衝突数、同じく全励起衝突数、同 $1s_4$ への励起衝突数、HeとXeとのそれぞれの弾性衝突数、電子数 N 等の時間変化を示した。図中に付けた記号(a)~(d)は前項①の場合と同様であるが、2枚1組として表してある。

電子を20psまで追跡して計算した結果(a),(c)に注目すると、速度空間の電界方向移動速度 w_v に大きな違いが見られる。(a)では4ps付近に36cm/ μ sのピークをもつ変化であるのに対して、(c)では $t=0$ 直後から50cm/ μ s付近にピーク値を持ち、その後急激に減少している。(a)の w_v がピークを描くのは電子がXeとの弾性衝突のRamsauer極小の0.64eVを通過するため、ここでの衝突数は減少し、従って飛行距離が長くなり、前方向速度が一気に増すことによる。これは、 w_v がピークをとる前の3ps付近で電子とXeとの弾性衝突数が極端に減少しながら $\epsilon=0.64$ eVを通過していることからよく理解できることである。これに対して(c)の場合は、 ϵ は最初から4eV付近から増加し、XeのRamsauer極小をはるかに越えているため、(a)の場合のような w_v のピークは観測されない。

Xeの全励起衝突数の変化に注目すると、(a)の場合は12ps付近から立ち上がるが、(c)の場合は電子放出直後から励起衝突が発生し、10ps辺りで(a)よりも大きい値で飽和している。Xe $1s_4$ の励起も似た変化をしている。さらに(a)では20ps付近から立ち上がるようにしか観測されなかったXeの電離も盛んに発生している。電子の初速度が大きかった効果がこのような形で現れている。

(b),(d)は電子の200psまで追跡して計算した結果である。平均エネルギー ϵ と、速度空間の電界方向移動速度 w_v は100psにおいて両者とも平衡値に達している。(c)で見られたXeの全励起衝突数が、10ps付近より頭打ちする変化は、(d)でも見られる。しかし、(b)では25ps、(d)ではこれより早い10ps付近から主にXeとの電離衝突が発生し電子数の増倍が観測されている。これに伴ってXeの全励起と $1s_4$ へのそれぞれの励起衝突数は再び増加している。電子数 N の曲線は(d)の方が急増していることもわかる。

4. ま と め

陰極から放出する初期電子のエネルギー分布を変えた場合、PDPセル内の電子スオームがどのような影響を受けるかMCSにより検討した。

図4 電子エネルギー分布の時間変化

Fig.4. Temporal variations of electron energy distribution

- (1)電子エネルギーの空間変化は陰極近傍で異なり、エネルギー平衡距離は[0~14eV]の場合の方が短くなる結果が得られた。
- (2)各種衝突発生数は、[0~14eV]の場合は[0~0.1eV]の場合に比べ、すべての衝突においてその数が減少した。これは、前者の方が後方散乱する電子が7倍も多く、ガス中に注入される電子数が減少したことが原因である。
- (3)しかし後方散乱を逃れた電子が一旦ガス中に入ると、高いエネルギーをもつ[0~14eV]の場合は[0~0.1eV]

図5 電子の平均エネルギー ϵ 、電界方向移動速度 w_v 、Xe 全励起衝突数、

Xe($1s_4$) 励起衝突数、Xe 電離衝突数、He、Xe 弾性衝突数、電子数密度 N の変化

Fig.5. Temporal variation of electron mean energy ϵ , electron drift velocity w_v , number of excitation collision, number of ionization collision, number of elastic collision and number of electron N

と比較して陰極近くの非平衡領域での電離衝突の増加により、全衝突数の中での電離発生割合を増加することに寄与する。今回の条件の下では約 10% 電離増倍率が大きくなることが分かった。

- (4) 電子エネルギー分布が平衡状態に達する時間は $[0 \sim 14 \text{ eV}]$ の場合の方が短かった。(1) の結果と共に、大きいエネルギー損失を伴う衝突が多く発生する程速やかにエネルギー緩和することによって考えられる。
- (5) 電子スオームの重心位置 x_g は、放出直後では $[0 \sim 0.1 \text{ eV}]$ の場合の方が Ramsauer 極小に相当するエネルギー域を通過するため陽極方向へより速く移動している。時間の経過とともにその差は次第に小さくなった。
- (6) 速度空間の電界方向移動速度 w_v は、 $[0 \sim 0.1 \text{ eV}]$ の場合では極大値もつ変化であるのに対して、 $[0 \sim 14 \text{ eV}]$ の場合では $t=0$ より単調に減少した。

衝突断面積データを提供して頂きました気体エレクトロニクス研究所 林 眞博士に感謝の意を表します。

(平成 12 年 8 月 8 日受付, 同 13 年 2 月 5 日再受付)

文 献

- (1) Y. Murakami, J. Koike, H. Murakami and K. Tachibana : Proceedings of the 4th International Display Workshop, 567~570 (1997)
- (2) 福山, 伊藤, 村上, 松崎 : 電学論, 119-A, 286~291 (1999)
- (3) H.D. Hagstrum : Phys. Rev., Vol. 104, 317~318 (1956)
- (4) 福山, 伊藤 : 電学論 118-A, 543~548 (1998)
- (5) 福山, 伊藤, 山本, 生田 : 電学論 116-A, 529~535 (1996)
- (6) プラズマ材料科学ハンドブック, オーム社 (1992)

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。