

フィールドエミッタアレイを用いた電子デバイスにおける空間電荷効果

後藤 康仁[†] 安友 佳樹[†] 辻 博司[†]

[†] 京都大学大学院工学研究科電子工学専攻

E-mail: [†]{ygotoh,tsuji}@kuee.kyoto-u.ac.jp, ^{††}yasutomo.yoshiki.74u@st.kyoto-u.ac.jp

あらまし 加速電圧 V_a でフィールドエミッタアレイから引き出された電子ビームのもつ軸方向の空間電荷制限電流を数値計算により求めた。一次元の Poisson 方程式を数値的に解き、電子ビームの初期エネルギーが 50 eV と 100 eV の場合、電極間隔が 5 mm と 10 mm の場合、コレクタ電極の電位が 0 V から 1000 V までの範囲で、コレクタに到達する電流量を求めた。得られた結果をこれまでの実験結果と比較し、空間電荷の影響について検証した。

キーワード フィールドエミッタアレイ, 電子デバイス, 空間電荷効果

Space charge effect in electronic device with field emitter array

Yasuhito GOTOH[†], Yoshiki YASUTOMO[†], and Hiroshi TSUJI[†]

[†] Department of Electronic Science and Engineering, Kyoto University

E-mail: [†]{ygotoh,tsuji}@kuee.kyoto-u.ac.jp, ^{††}yasutomo.yoshiki.74u@st.kyoto-u.ac.jp

Abstract Numerical study on the space charge limited current for the electron beam extracted from field emitter array with the energy of V_a . The one dimensional Poisson equation was solved numerically, under the following conditions: initial electron energies of 50 eV and 100 eV, the gap between the electrodes of 5 mm and 10 mm, and the collector voltage between 0 V and 1000 V. The maximum collector current was estimated. With the obtained results, the experimental results obtained so far were examined whether the space charge effect affected the performance of the device.

Key words field emitter array, electron device, space charge effect

1. はじめに

熱陰極をもつ真空管においては、陰極付近の電子密度が高くなり、空間電荷効果によって引き出し得る電流量が制限される。この電流量はいわゆる Child-Langmuir の式 [1], [2] で表されることはよく知られている。実際の陰極では、熱電子の持つ初速度に分布があり、この効果を取り入れた計算もなされている [3]。一方で、電界放出の式は、Fowler と Nordheim に最初に導かれた [4] が、その後すぐに空間電荷効果について報告されている [5]。これらはいずれも、陰極表面付近における電子密度が放出電流に与える影響について調べたものである。

熱陰極における空間電荷効果は、ある一定の引き出し条件 (引き出し電圧と引き出し距離) に対して、電流の上限を与えるものである。このように、空間電荷は電流を制限するという面があるけれども、この効果をうまく利用すると、陰極から放出される電子電流を安定化することができる [6]。

通常、電界放出により電子放出させる場合、陰極表面には強い電界が印加されており、空間電荷効果が見られるところまで電界を印加することは難しい。熱陰極以上に雑音の多い電界放出

陰極からの電子電流を空間電荷効果を用いて安定化することは、難しいと考えられてきた。

しかしながら、筆者らは、大電流低速電子ビームを形成するためのフィールドエミッタアレイ (FEA) 開発 [7] の途上で、10,000 チップの Si-FEA から 9 mA 程度の電流を引き出した場合、コレクタ電極の電圧が 200 V 程度の場合にはコレクタに到達する電流が 5 mA 程度で飽和することを明らかとした。この原因として、ゲートを出た後に電子ビーム自身が形成する負の電位が考えられる。荷電粒子ビームは自らの持つ電荷により、ビーム内部に電位を形成する。これをビームポテンシャルと呼んでいる。FEA の場合全電流が 10 mA 近くあっても、一つのエミッタからの電流は 1 μ A 程度 (10,000-tip の場合) であり、エミッタとゲートの電極間隔も 1 μ m 程度の大きさで電子ビーム内部に形成される電位はあまり高くない。しかしながらこれらのビームがゲート電極を通過すると、全電流は極めて大きくなり、かつ、周辺に電位を固定する電極がないため、電子ビーム中心付近の電位は大きく下がることになる。

この負の電位を形成する機構には、軸方向の空間電荷効果と径方向の空間電荷効果がある。前者は主として電流密度の制限

となり、後者はビームの発散の原因となる。我々が実験的に得た FEA の特性は、電流が制限されるということから、主として軸方向の空間電荷効果と考えることができる。これまで、十分に加速された電子ビームに対する空間電荷効果に関する検討はあまりなされていなかった。本稿では、100 eV 程度に加速された電子ビームがその後の電極間で形成する空間電位の計算を行い、コレクタに到達できる最大電流を数値計算により求めた。以下ではその結果について報告する。

2. 大きな初速度を持つ電子ビームの一次元空間電荷効果

2.1 計算のモデル

図 1 に示すような、間隔が d の平行平板電極を考える。陰極の位置を $z = 0$ とし、陽極の位置を $z = d$ とする。電子は陰極から電圧 V_a により加速されて陰極から放出されるものとする。計算上は、エミッタ電位を 0 と仮定、すなわちゲート電位を V_a 、コレクタ電位を V_c とした。このようなモデルが成り立つ具体的な例は、FEA を用いた三極素子のゲート電極とコレクタ電極の間などである。放出電子はエネルギー分布を持つと考えられるが、加速電圧 V_a により得るエネルギー eV_a と比較して無視できるものとして単色の電子ビームと考える。

一次元の Poisson 方程式は次のように表すことができる。

$$\frac{d^2V}{dz^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_0}, \quad (1)$$

ここで、 V は電極間の電位、 ρ は空間電荷密度、 ϵ_0 は真空の誘電率である。空間電荷密度 ρ は、電子電流密度の絶対値を J 、電子ビームの速度を v とすると、

$$\rho = -\frac{J}{v} = \left(\frac{m}{2e}\right)^{3/2} J V^{-1/2} \quad (2)$$

と表すことができる。ここで m 、 e はそれぞれ電子の質量と電荷である。結果的に

$$\frac{d^2V}{dz^2} = \frac{J}{\epsilon_0} \left(\frac{m}{2e}\right)^{1/2} V^{-1/2} \quad (3)$$

を解けばよいことがわかる。これは通常、空間電荷制限電流の式を求める際に使う式と同じであるが、以下で示すように境界条件が異なる。

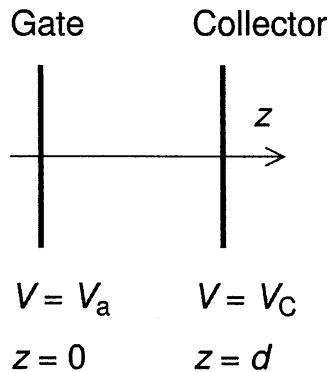


図 1 一次元空間電荷効果を考えるモデル
Fig. 1 Model considering one dimensional space charge effect

この微分方程式を解く境界条件は、 $z = 0$ で $V = V_a$ 、 $z = d$ で $V = V_c$ 、ある $z = z_m (0 < z_m < d)$ で、 $V = 0$ である。この計算を解析的に行うことは難しい。このため、ここでは微分方程式を数値的に解くことにした。

2.2 具体的な解法

数値的に Poisson 方程式を解くために、電極間を適当な数の格子点で分割する。陰極から第 i 番目の格子点の電圧を V_i とすると、Poisson 方程式を以下のように差分式で表すことができる。

$$V_i = \frac{V_{i-1} + V_{i+1}}{2} - \frac{J}{\epsilon_0} \left(\frac{m}{2e}\right)^{1/2} \frac{(\Delta z)^2}{2} (V_i + V_a)^{-1/2} \quad (4)$$

平行平板電界を初期値として、以下の手順で Poisson 方程式の解を求めた。条件として、電子ビームの電流密度 J と加速電圧 V_a 、電極間隔 d とコレクタ V_c を与えた。電極間の空間の各点における右辺の値を計算し、左辺の値との差 ΔV を求めた。その差の 0.95~0.99 倍の値を V_i に加えて電位の値を修正するという操作を繰り返した。空間電位が 0 V よりも小さくなった場合は、与えた電流密度は空間電荷制限電流密度より大きいと判断し、電流密度を小さな値として、改めて計算を行った。計算は最大で 5×10^6 回の反復を行った。

空間電位がちょうど 0 V になる条件を求めるためには、計算時間を要するため、今回はできるだけ低い正の電位となる電流密度を空間電荷制限電流密度とした。

2.3 計算条件

$\Delta z = 0.01$ mm として、電極間隔 5 mm の場合と、10 mm の場合について計算を行った。エミッタ・ゲート間の加速電圧 $V_a = 50$ V および 100 V の場合について計算を行った。計算を行うに先立って、初速度 0 ($V_a = 0$) の場合に Child-Langmuir の式で求められる空間電荷制限電流 J_0 の値において、正しい電位分布 $V \propto z^{4/3}$ をほぼ再現することを確認した。

3. 計算結果

空間電位の計算例を図 2 に示す。計算条件は、 $V_a = 100$ V、 $V_c = 300$ V、 $d = 5$ mm、 $J = 1900$ A m⁻² である。横軸は電極間の位置であり、縦軸が電位を表す。図から明らかなように、電位はいったん低下し、再び増加している。あとわずかに J が増加すると、電位の谷は 0 V をよぎり、これ以上の電子電流を得ることはできなくなる。

空間電荷制限電流を求めた結果を表 1 に示す。表の上段はいわゆる通常の空間電荷制限電流密度であり、Child-Langmuir の式を用いて計算した。下の段が今回の計算結果となる。実際の実験データとの比較がしやすいよう、空間電荷制限電流が 2 mm×2 mm の面積でどの程度の電流になるかも掲載した。表の結果を図 3 に示す。破線と点線はそれぞれ $d = 5$ mm および $d = 10$ mm の時の Child-Langmuir の式の値を表す。●は $V_a = 100$ V、 $d = 5$ mm の結果を、■は $V_a = 50$ V、 $d = 5$ mm の結果を、○は $V_a = 100$ V、 $d = 10$ mm の結果を示す。

表 1 および図 3 からわかる通り、低い電圧で加速する場合、初速があると大きな電流を引き出すことができる。例えば、200 V 程度の加速では、5 倍程度の電流が得られることになる。1000 V

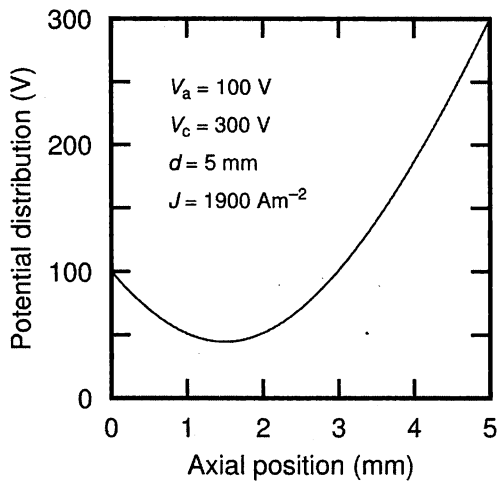


図 2 計算した電位分布の例
Fig. 2 Typical example of the pential distribution

程度の加速を行うと、100 eV の予備加速では高々 2 倍程度の電流が得られる程度であり、初速度の効果はあまり高くなってくる。

また、100 eV の初速度を持っていても、1000 V 程度に加速する場合には、電極間隔 $d = 10$ mm では、 $d = 5$ mm のいわゆる空間電荷制限電流よりも低い電流しか得られないこともわかる。このように、電極が離れた場所にあると、電子ビーム内のポテンシャルが低下する。図 3 から、空間電荷制限電流は、コレクタ電圧 V_c に対して一次関数となっているように見える。

4. 考 察

4.1 従来の実験結果との比較

はじめに述べた、FEA からの放出電流は、電子の加速電圧約 110 V 程度のとき 5.1 mA 程度で飽和した。電極間隔は約 5 mm である。コレクタ電圧は 200 V であるが、このときはゲートを接地していたため、今回の計算結果と比較するとすれば、コレクタ電圧 $V_c = 300$ V のところを参照するべきである。計算から飽和電流は約 7 mA と比較的近い値である。

また、これまで筆者らは FEA とコレクタからなる三極素子、真空トランジスタを開発してきた [8]。真空トランジスタは三極でありながら、従来の五極管特性を持っている。しかしながら、五極管と比較して肩特性が良くなかった。この一つの原因として、電子ビームの持つ大きな発散角が考えられ、その対策として、コレクタ形状を工夫した新しい真空トランジスタの提案も行った [9]。しかしながら、今回の結果をみると、50 V 程度で引き出された電子の制限電流が長さ 5 mm の無電界空間で約 1 mA となっており、空間電荷効果の影響も出ているとも考えられる。

4.2 実験式構築に向けて

今回の結果を利用するためには、解析的な表現を得ておく必要がある。これまで軸方向に関する空間電荷効果の式はいずれも $V^{3/2}/d^2$ 依存性を持っていた。図 4 に横軸を $(V_c - V_a)^{3/2}/d^2$ にとった空間電荷制限電流密度を示す。破線は Child-Langmuir

表 1 空間電荷制限電流の計算結果. 右端は、2 mm× 2 mm の電流を求めたもの.

Table 1 Results of the calculation of space charge limited current. The right column shows the current extractable from 2 mm by 2 mm square

電極間隔 d (mm)	ゲート電圧 V_a (V)	コレクタ電圧 V_c (V)	電流密度 J (A m ⁻²)	コレクタ電流 I (mA)
5	0	50	33.0	0.132
		100	93.3	0.373
		200	264.	1.06
		300	485.	1.94
		600	1370.	5.48
		1000	2950.	11.8
10	0	50	8.3	0.033
		100	23.3	0.093
		200	66.0	0.264
		300	121.	0.484
		600	343.	1.37
		1000	738.	2.95
5	50	0	33.	0.132
		50	262.	1.05
		100	455.	1.82
		200	890.	3.56
		300	1355.	5.42
		600	2900.	11.6
5	100	0	93.3	0.373
		50	463.	1.85
		100	725.	2.90
		200	1308.	5.23
		300	1900.	7.6
		600	3825.	15.3
10	100	0	23.3	0.093
		50	115.	0.460
		100	188.	0.75
		200	330.	1.32
		300	500.	2.00
		600	962.	3.85
10	100	1000	1690.	6.76

の式の値を表す。●は $V_a = 100$ V, $d = 5$ mm の結果を、■は $V_a = 50$ V, $d = 5$ mm の結果を、○は $V_a = 100$ V, $d = 10$ mm の結果を示す。ここでは、 $V_c > V_a$ を満足する点のみ記載している。

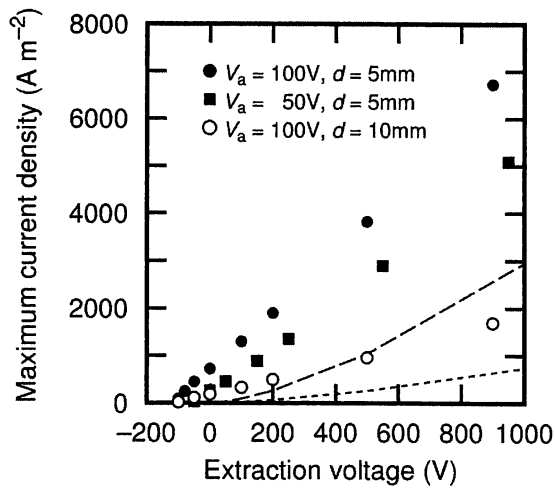


図 3 一次元空間電荷制限電流の計算結果.

Fig. 3 Results of one dimensional space charge limited current.

それぞれの条件で4つのプロットがあり、直線的にも見えるがわずかに下に凸の曲線になっているものと考えられる。この理由は、 V_c が高い領域では、初速度の効果が小さくなり、Child-Langmuirの式の値に近づくものと考えられるためである。今回計算した電圧範囲は、中間的な電圧で、定式化のためにはより低い電圧およびより高い電圧の両方の値が必要であると考えられる。

4.3 空間電荷効果が真空電子デバイスの特性に及ぼす影響

真空トランジスタのような格子制御型の真空電子デバイスでは、電子のエネルギーがかなり低くなると信号の振幅を取りたい。あるいは、真空スイッチのような応用でも電子のエネルギーは極めて低くなる。このとき、空間電荷効果のことを考慮する必要が出てくる。コレクタ電位が0になるところまで交流振幅を持ってこようとするとその時にはエミッタが放出できる電流が有効にコレクタに入らないことになる。筆者らが先に提案した真空トランジスタにおける球面コレクタ[9]を採用すると、面積が広がる分、空間電荷効果の影響は受けにくくなる。この場合、少し粗いが同心球電極間の空間電荷効果として考えればよい。このような場合についての解析はすでに古くからおこなわれている[10]。この点に関しては、別の機会に検討したい。

いずれにしても、FEAから放出された大電流電子ビームが弱加速空間で空間電荷の影響を受けるということから、従来安定性に不安のあった電界放出陰極からの電子ビーム電流を安定化することができる可能性が示唆された。

5. ま と め

電界放出電子源等から放出される電子ビームの初速度が無視できない場合について、加速しうる電流量の評価を行うために、一次元のPoisson方程式を数値的に解いた。これまでに筆者らが作製・評価したFEAの特性について、得られた結果を基に検討し、空間電荷の影響について考察した。今後は、計算の精度向上と、空間電荷効果の定式化を行う予定である。

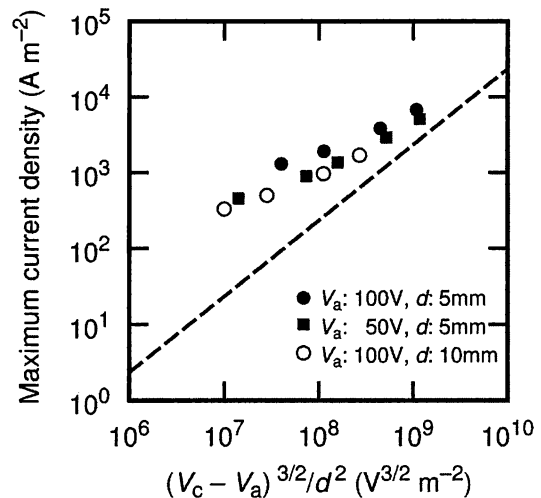


図 4 一次元空間電荷制限電流の $(V_c - V_a)^{3/2}/d^2$ 依存性.

Fig. 4 One dimensional space charge limited currents as a function of $(V_c - V_a)^{3/2}/d^2$.

謝 辞

本稿をまとめるに当たり、Si-FEAからの電子放出特性について興味深い示唆を頂いた、Paul Scherrer 研究所 (スイス) の辻野壮一郎博士に感謝します。

文 献

- [1] C. D. Child, "Discharge from hot CaO", Phys. Rev. **32** (1911) 492-511.
- [2] I. Langmuir, "Effect of space charge and residual gases on thermionic currents in high vacuum", Phys. Rev. **2** (1913) 450-486.
- [3] I. Langmuir, "The effect of space charge and initial velocities on the potential distribution and thermionic current between parallel plate electrodes", Phys. Rev. **21** (1923) 419-435.
- [4] R. H. Fowler and L. Nordheim, "Electron emission in intense electric fields", Proc. Roy. Soc. London A **119** (1928) 173-181.
- [5] T. E. Stern, B. S. Gossling, R. H. Folwer, "Further studies in the emission of electrons from cold metals", Proc. Roy. Soc. London A **124** (1929) 669-723.
- [6] 横尾邦義, 真空ナノエレクトロニクスの基礎-真空電子デバイスの物理 (日本学術振興会真空ナノエレクトロニクス第158委員会, 2007) pp.21-24.
- [7] Y. Gotoh, S. Taguchi, K. Ikeda, T. Kitagawa, J. Ishikawa, H. Tsuji, S. Sakai, "Production of extremely low energy electron beam with silicon-based field emitter arrays and its application to space charge neutralization of low-energy and high-current ion beam", Technical Digest of the 25th International Vacuum Nanoelectronics Conference, IVNC2012, Jeju, Korea (IEEE, Piscataway, 2012) pp.86-87.
- [8] K. Ikeda, W. Ohue, K. Endo, Y. Gotoh, H. Tsuji, "Development of a vacuum transistor using hafnium nitride field emitter array", J. Vac. Sci. Technol. B **29** (2011) 02B116.
- [9] 後藤, 池田, 大上, 辻, 「真空トランジスタのコレクタ形状とコレクタ特性」, 信学技報 **110**, No.249 (2009) pp.51-54.
- [10] I. Langmuir, K. B. Brodgett, "Currents limited by space charge between concentric spheres", Phys. Rev. **24** (1924) 49-59.