電子銃解析コードEGN2を用いた電界放出電子ビームのシミュレーション

正員 浅野 啓行 (三菱電機)
 正員 菊永 敏之 (三菱電機)
 非会員 森川 和敏 (三菱電機)

Simulations of a field emission electron beam with an electron gun analysis program EGN2

Hiroyuki Asano, Member(Mitsubishi Electric Corp.), Toshiyuki Kikunaga, Member(Mitsubishi Electric Corp.),
 Kazutoshi Morikawa, Non-member(Mitsubishi Electric Corp.)

We simulated emission currents and electron beam trajectories from a micron size field emitter which consists of an emitter electrode and a gate electrode using the electron gun analysis program EGN2. The parameters such as a height, a half angle and a curvature radius of an emitter electrode influence the emission current significantly. The results of our calculations suggest that the largest emission current occurs when the emitter electrode is as high as the upper surface of the gate electrode and the smaller the half angle is, the larger emission current we have. We also carried out simulations of an electron beam from a field emitter with a focus electrode to reduce a divergence angle of an electron beam. Taking into consideration the existence of a bump at the tip of the emitter electrode, there is a good agreement between calculated and experimental results of the emission current vs. the focus electrode voltage characteristics.

キーワード：真空マイクロエレクトロニクス，電界放出微小冷陰極，シミュレーション，電子ビーム，

1. はじめに

半導体の微細加工技術を用いて，微小な電界放出冷陰極（以後これを冷陰極と呼ぶ。）を作製し，これを電子源とするデバイスの実現を目指した真空マイクロエレクトロニクスが新しい研究分野として注目されている。

冷陰極はこの分野におけるキーパーツであり，エミッタ電極先端の曲率半径は数10nm以下となるように作製される。電子は，電極先端付近の非常に強い電界（ $>10^7$ V/cm）による電界放出によって取り出され，100 V程度のゲート電圧で電子を取り出すことができること，冷陰極の高集積化により100 A/cm²以上の電流密度が期待できることなど様々な利点を持っている。⁽¹⁾

本冷陰極の形状には，大別して縦型と横型の2種類がある。縦型は一般に図1に示すような形状をしており，エミッタ電極は円錐形や四角錐形をしている。エミッタの作製には，蒸着やRIE(Reactive Ion Etching)などの技術が利用される。

図1の冷陰極は1976年にSpindt氏らが発表したものである。冷陰極からは，エミッタ・ゲート間電圧200 Vで約3.2 μ Aのエミッション電流が得られた。放出電子の電流電圧特性であるFowler-Nordheimプロットから，電流は電界放出によるものであることが確認された。また，7000時間にわたって安定に動作した。⁽²⁾

Fowler-Nordheimの式を次に示す。

$$j = \frac{e^3}{8\pi h} \frac{E^2}{\phi^2 t^2(y)} \exp \left[- \left(\frac{4(2m)^{1/2} \phi^{3/2}}{3\hbar e E} v(y) \right) \right] \quad (1)$$

ここで， e は電子の電荷， m は電子の質量， h はプランク定数， $\hbar = h/2\pi$ ， E は電界強度， ϕ はエミッタ電極材料の仕事関数である。 $t^2(y)$ および $v(y)$ （ここで $y = (eE/4\pi\epsilon_0)^{1/2} / \phi$ ， ϕ_0 は温度および電界強度0の時の仕事関数， ϵ_0 は真空の誘電率）は鏡像力を考慮した補正項であり， $t^2(y) = 1.1$ ， $v(y) = 0.95 - y^2$ とすることでよい近似が得られる。⁽³⁾ これより，式(1)は次のようになる。

$$j = 1.5 \times 10^{-6} \frac{E^2}{\phi} \exp \left(\frac{10.4}{\phi^{1/2}} \right) \times \exp(-6.44 \times 10^7 \phi^{3/2} / E) \quad (2)$$

この式からわかるように，電流密度はエミッタ電極材料の仕事関数やエミッタ電極先端付近の電界強度に大きく左右される。

本冷陰極を利用するにあたっては，その用途によって，できるだけ低電圧で大電流を取り出したい場合や，電子ビーム発散角をできるだけ小さくしたい場合などが考えられる。それぞれの用途に応じた最適形状の設計には，計算機シミュレーションが有効であるが，現在までのところ，この分野でのシミュレーションに関する文献例は必ずしも多くない。米国スタンフォード大学のHerrmannsfeldt氏らは，同氏の開発した電子銃解析コードEGN2に改良を加えて，電子源に比して極めて微小な領域からの電界放出による電子の軌道および放出電流を計算できるようにし，エミッション電流を求めている。⁽⁴⁾ しかし，素子形状の変化によりエミッション電流がどのように変化するかといったことについての系統的な議論がなされておらず，素子形状設計のために十分な指針を与えるものとはなっていない。また，Mobley氏らやChang氏らは，ゲート電極の上にもう1段の

図1 Spindt氏らの縦型冷陰極
Fig.1. Vertical type field emitter by Spindt et al.

電極を備え、これを集束電極として静電レンズの役割を担わせる構造の冷陰極についてシミュレーションを行い、発散角の小さい電子ビームの軌道計算結果を得た^{(9),(6)}が、エミッション電流の計算結果と実験結果の比較は行われていない。

我々は冷陰極に関するさらに詳細な設計指針を得るために、EGN2(市販版)を用いて、冷陰極形状がエミッション電流に与える影響について詳細に調べた。さらに、集束電極を備えた冷陰極の電子放出特性について、集束電極電圧のエミッション電流に与える影響を調べ、実験結果と比較検討した。

その結果、エミッタ電極の高さがゲート電極の高さと一致するとき最も大きなエミッション電流が得られること、エミッタ電極先端の曲率半径が同一でも電極先端付近の傾斜が急峻なほど大きなエミッション電流が得られることなどが示された。さらに、集束電極を備えた冷陰極のシミュレーションでは、エミッタ電極先端に微小な突起があるとして計算を行った。このような突起はHerrmannsfeldt氏が、集束電極を持たない冷陰極の計算の中で取り上げており、突起を考慮した場合、1つのエミッタ電極から放出される電流値が、実験で得られる値に近くなることを報告している。⁽⁴⁾ 我々は、集束電極を備えた素子について、エミッタ電極先端に同様の突起の存在を仮定し、集束電極電圧がエミッション電流に与える影響を調べた。突起先端から電子が放出されているとし、突起形状を変えてエミッション電流を計算した結果、計算結果と実験結果とがよく一致する突起形状(高さ2nm, 先端曲率半径1nm程度)が得られた。電子放出がエミッタ電極先端部のさらに微小な部分で起こると考えた計算モデルが実験結果をよく説明するということは、電子はエミッタ電極先端部の限られた場所から放出されているとするSpindt氏らの考え⁽²⁾を支持するものである。

2. エミッタ電極先端での電子軌道始点の設定方法

EGN2において、エミッタ電極先端における電子軌道始点の設定は自動的に行われるのではなく、利用者に委ねられている。始点の設定範囲が小さ過ぎる場合は、エミッション電流の計算結果が、本来得られるべき値より小さくなり、また、必要以上に広い範囲に設定した場合、計算時間が長くなる。したがって、電子軌道始点範囲の適切な設定

図2 エミッタ電極先端部付近に設定された電子軌道始点
Fig.2. Starting points of electron trajectories placed near the tip of an emitter electrode.

図3 計算モデル
Fig.3. A simulation model.

表1 作製されたエミッタ電極先端の曲率半径の例⁽⁸⁾
Table 1. Examples of a curvature radius of fabricated emitter electrodes

エミッタ電極先端曲率半径	研究機関
<20nm	富士通
<50nm	Siemens
23nm	双葉電子
40~50nm	ミシガン大学
20nm	新日本製鐵
10nm	NRL

が重要である。ここでは、今回我々が採った設定方法を説明する。

図2はエミッタ電極先端部と電子軌道始点の位置関係を示しており、始点の (R, Z) 座標を (r_s, z_s) とする。それぞれの軌道の持つ電流密度は、エミッタ電極先端から出発したものが最も大きく、先端から離れるにしたがって小さくなる。始点の R 座標値およびエミッタ電極先端の曲率半径をそれぞれ r_s , r として、 $r_s \leq 2r$ の範囲に始点を設定した場合の全エミッション電流値は、 $r_s \leq r$ の範囲に始点を設定したときと同じであったことから、 $r_s \leq r$ の範囲で始点を設定することとする。

今後は、各電極間電圧についてはエミッタ電極の電位を

(a) 電子ビームの軌道計算例

(b) (a)のZ=5 μmにおける電流密度分布

図4 電子ビームのシミュレーション結果の例

Fig.4. An example of electron beam simulation.

基準に取り、これに対するゲート電極、アノード電極の電位をそれぞれゲート電圧、アノード電圧と呼ぶことにする。

3. 1段ゲート冷陰極のシミュレーション

3-1. 計算モデル

図3に示すようなモデルを用いて計算した。基板面(図3で斜線で示した部分)からゲート電極の下面までの高さを $0.8\mu\text{m}$ 、ゲート電極厚さを $0.2\mu\text{m}$ 、ゲート電極開口部直径を $1.2\mu\text{m}$ 、エミッタ電極底面の直径を $1\mu\text{m}$ 、エミッタ電極材料の仕事関数を 4.5eV とする。エミッタ電極材料としてはモリブデンやシリコンが一般的であり、これらの材料の仕事関数は 4.0 から 4.5eV 程度である。⁷⁾ 基板面から $5\mu\text{m}$ の高さの位置に平板電極を置き、これをアノード電極とする。エミッタ電極の高さ h 、先端部の半角 θ 、および先端の曲率半径 r をパラメータにとり、これらを変化させたときの1エミッタあたりのエミッション電流、エミッタ電極先端部の電界強度、電子ビームの発散角の変化を求めた。基本となる h 、 θ 、 r の値を、それぞれ $0.9\mu\text{m}$ 、 29° 、 20nm とする。

$h=0.9\mu\text{m}$ のとき、エミッタ電極の高さが、ゲート電極下面からゲート電極厚さの $1/2$ だけ上方の位置の高さに一致する。

$\theta=29^\circ$ は図3でエミッタ電極側面の勾配が、先端部の球面状の部分を除いて一定である場合の値である。

図5 (a)エミッション電流および電界強度、(b)電子ビーム発散角のエミッタ電極高さ依存性

Fig.5.(a)Emission current and electric field,(b)Electron beam divergence angle as a function of the height of an emitter electrode.

図6 (a)エミッション電流および電界強度、(b)電子ビーム発散角のエミッタ電極先端の半角依存性

Fig.6.(a)Emission current and electric field,(b)Electron beam divergence angle as a function of the half angle of an emitter electrode.

r に関して、作製された冷陰極の主な例を表1に示す。これより $r=20\text{nm}$ は妥当である。

電子ビームのシミュレーション結果の例を図4(a)、(b)に示す。図4(a)は電子軌道計算例、(b)は(a)の $Z=5\mu\text{m}$ の位置にアノード電極を設定し、そのアノード電極上でのR軸方向の電流密度分布を示している。

電子ビームの発散角 ϕ を図4を用いて次のように定義する。アノード電極上での電流密度の最高値を J_p (図4(b)では $J_p=1$)とし、電流密度が $J_p/10$ (図4(b)では $J_p/10=0.1$)になる最大のR座標を R_1 とする。エミッタ電極先端からアノード電極までの距離を D として、電子ビームの発散角 ϕ を次式から求める。

$$\phi = \tan^{-1} [R_1/D] \quad (3)$$

3-2. 計算結果

ゲート電圧 100V 、アノード電圧 100.4V として、エミッション電流、エミッタ電極先端部の電界強度、電子ビームの発散角のエミッタ電極形状に対する依存性を調べた。図5(a)、(b)に半角 $\theta=29^\circ$ 、曲率半径 $r=20\text{nm}$ で一定とし、エミッタ電極の高さ h を変化させた場合を、図6(a)、(b)に、高さ $h=0.9\mu\text{m}$ 、曲率半径 $r=20\text{nm}$ で一定と

図7 (a)エミッション電流および電界強度, (b)電子ビーム発散角のエミッタ電極先端曲率半径依存性

Fig.7. (a)Emission current and electric field, (b)Electron beam divergence angle as a function of the curvature radius of an emitter electrode.

し, 半角 θ を変化させた場合を, 図7(a), (b)に, 高さ $h = 0.9 \mu\text{m}$, 半角 $\theta = 29^\circ$ で一定とし, 曲率半径 r を変化させた場合をそれぞれ示す。

図5(a)では, h を $0.7 \mu\text{m}$ から $1.1 \mu\text{m}$ まで $0.1 \mu\text{m}$ おきに変わって計算しているが, エミッション電流, 電界強度は, ともに $h = 1.0 \mu\text{m}$ のときに最大値となっている。ゲート電極上面の高さが $1.0 \mu\text{m}$ であることから, エミッタ電極の高さが, ゲート電極上面の高さに等しいとき, 最大のエミッション電流が得られることがわかる。伊藤氏らはエミッタ電極先端の電界強度は, エミッタ電極の高さがゲート電極上面の高さに等しくなるときに最大になるという計算結果を得ており⁹⁾, 我々が得た結果と一致する。

同図(b)からは発散角はこの h の範囲では大きな変化はないと言える。

図6(a), (b)は, θ を 29° から 5° おきに小さくしたときのエミッション電流, 電界強度, 発散角を示している。これらはいずれも θ の減少とともに単調に増大し, $\theta = 14^\circ$ のときは, $\theta = 29^\circ$ のときに比べてエミッション電流は2桁近く増大している。エミッタ電極先端の曲率半径が一定の場合でも, 半角が小さくなるとエミッション電流は大きく増大すると同時に, 電子ビームの発散角は大きくなるがわかる。

図7(a), (b)は, 曲率半径 r を 20nm から 5nm おきに小さくしたときのエミッション電流, 電界強度, 発散角の変化を示している。 r が 5nm 減少するとエミッション電流は2桁程度増大しており, r の変化による影響が極めて大きいことがわかる。また, r が小さくなると, 電子ビームの発散角は大きくなるがわかる。

4. 集束電極付き冷陰極のシミュレーション

本冷陰極の電子ビーム源としての応用を考えた場合, 電子ビームの発散を抑えることが重要である。ゲート電極の上に集束電極を備えた構造の冷陰極を用いれば, 電子ビームの発散を抑えることができる。図8は, この構造の冷陰極についての計算例を示しており, 集束電極を用いて電子ビー

図8 集束電極付き冷陰極からの電子ビーム軌道計算例

Fig.8.A simulation example of electron beam trajectories from a field emitter with a focus gate.

(a) 電子顕微鏡写真

(b) エミッション電流の集束電極電圧依存性実験結果

図9 作製した集束電極付き冷陰極およびエミッション特性
Fig.9.A fabricated field emitter with a focus gate electrode and its emission characteristic.

ムを集束可能であることがわかる。ここでは, この構造の冷陰極について, エミッタ電極の形状や仕事関数をパラメータにとり, 集束電極電圧に対するエミッション電流を計算し, 実験結果との一致を試みる。

我々は, 電子技術総合研究所と共同で集束電極を備えた素子を作製し, 集束電極にゲート電極に対して負の電圧を印加して電子ビームを集束させる実験を行った。¹⁰⁾ 実験に用いられた集束電極付き冷陰極の電子顕微鏡写真を図9(a)に示す。これはn形シリコンウエハをRIEでエッチングし, 熱酸化によるエミッタ電極の尖鋭化技術¹¹⁾を利用して作製されたものである。エミッタ電極の先端は, ゲート電極の下面より高く, 上面より低いことがわかる。また, エ

図10 計算モデル
Fig.10.A simulation model

(a)縦軸logスケール (b)縦軸linerスケール(r=20nm)
図11 集束電極付き冷陰極のエミッション電流と集束電極
電圧の関係(点線:実験結果, 実線:計算結果)

Fig.11.The emission current of a field emitter with a focus gate
as a function of the focus gate voltage.(dotted line:an
experimental result,solid lines:calculated results)

ミッタ電極上方から撮影した写真で、エミッタ電極、ゲート電極、集束電極がほぼ同心状に形成されていることを確認した。

この素子において、ゲート電極電圧を70Vで一定とし、集束電極電圧 V_f を80Vから小さくしたときのエミッション電流と V_f の関係を図9(b)に示す。図中の100 Emittersはエミッタ電極が100個ある素子を用いたことを示し、 V_a はアノード電圧、 V_g はゲート電圧を示す。電子ビーム径が小さくなる(図示なし)と同時に、エミッション電流も小さくなっている。これは集束電極電圧を小さくすることによりエミッタ電極表面の電界強度が小さくなったためと考えられる。また、実験結果で集束電極電圧が40V以下のところで dI/dV_f が負になっているところがあるが、このような結果になった理由は現在のところ不明である。

以下では、この形状の冷陰極に関するEGN2を用いたシミュレーション結果について述べるとともに、シミュレーション結果と図9(b)に示した実験結果(ただし、以後の計算結果と実験結果の比較の図では、実験結果のデータはエミッタ電極1個あたりのエミッション電流に換算されている。)との比較について述べる。

4-1. 計算モデル

図10に計算モデルを示す。この形状は図9(a)に示した電子顕微鏡写真をもとにしている。エミッタ電極の高さは

(a) モデル形状

(b)エミッタ電極先端近傍の電子軌道計算例
図12 突起付き冷陰極

Fig.12.Field emitter with a bump.

1.4 μmである。ゲート電極、集束電極の開口部直径はそれぞれ2.0 μm、3.3 μmであり、ゲート電極厚さ、集束電極厚さはともに0.3 μm、2層ある絶縁膜厚さはともに1.2 μmである。エミッタ電極先端の曲率半径は、電子顕微鏡写真から40nm程度と推定した。しかし、実験でエミッション電流の測定に用いられた素子にはエミッタ電極は100個あり、その中にはさらに小さな曲率半径のエミッタ電極がある可能性もあるので、曲率半径として2, 5, 10, 20, 40nmについて計算する。また、シリコンの仕事関数は4.2 eV⁽⁷⁾、ゲート電圧は70Vとする。

4-2. 計算結果

集束電極電圧 V_f を10, 30, 50, 60, 70, 80Vと変化させたときのエミッション電流値の計算結果を図11(a)に示す。図中、点線は実験結果を示している。曲率半径10nmのときの計算結果が実験結果に最も近くなっている。実験結果と計算結果(曲率半径10nm)を、縦軸をリニアに書き直すと図11(b)のようになる。この図に、形状は変えず、シリコンの仕事関数を4.18, 4.16, 4.14eVと変化させて計算した結果をあわせて示す。図11(b)では、計算結果はエミッション電流の絶対値に関して実験結果と同程度の値が得られているものの、 $45 \leq V_f \leq 80V$ の全領域にわたって実験結果によく一致する曲線がなく、計算結果と実験結果とはよく一致しているとはいえない。

図13 エミッタ電極先端に突起の存在を仮定した場合のエミッション電流と集束電極電圧の関係(点線:実験結果, 実線:計算結果, 仕事関数4.2eV)

Fig.13.The emission current of a field emitter with a bump as a function of the focus gate voltage(dotted line: an experimental result,solid lines:calculated results, work function=4.2eV)

エミッタ電極先端の曲率半径および仕事関数を様々に変化させたが、実験結果とよく一致する結果が得られなかった。これまでは、エミッタ電極先端は球面として計算していたが、次に他の形状を考慮することで計算結果と実験結果の一致を試みる。

4-3. エミッタ電極先端に突起の存在を考慮した計算

エミッタ電極先端に、図12(a)に示すような微小な突起が存在するものとして計算を行う。突起の先端部分の電界強度は、エミッタ電極の他の部分より十分大きく、電子の放出はこの部分のみを考慮すればよい。突起先端部近傍での電子の軌道を図12(b)に示す。

エミッタ電極先端の曲率半径を40nmとし、突起のアスペクト比を2, 2.5, 3, 突起の高さ h を1.8, 1.9, 2.0, 2.1nmと変化させる。

それぞれの形状について、集束電極電圧 V_f を10, 30, 50, 60, 70, 80Vと変化させてエミッション電流を計算した。アスペクト比2のときに実験結果と最もよい一致が得られたので、この場合の結果を実験結果とともに図13に示す。

実験結果と比較して、高さ h が2.0nmあるいは1.9nmのときの計算結果が、エミッション電流の絶対値、および集束電極電圧 V_f の変化に対するエミッション電流の変化の割合の両方について、 $45 \leq V_f \leq 80V$ の広い範囲にわたってよく一致している。

突起の高さが2.0nmのときには突起先端曲率半径は1.0 nmとなり、突起の断面内の原子数は10個程度になるため、厳密に電子放出を論じるには一つ一つの原子配置を考慮した理論的解析が必要と思われる。しかし、これまで発表されている実験データは、Fowler-Nordheimプロットに従うものであったと報告されていることから、本論文ではFowler-Nordheimの式を用いてエミッション電流を評価している。

また、実際上はエミッタ電極表面には複数個の微小な突起や凹凸があり、これらから電子が放出されていると考え

られる。EGN2は軸対称2次元プログラムであるため、上記の複数個の微小な突起や凹凸を、エミッタ電極先端に置かれた1個の突起で代表させて計算している。

電子の電界放出に影響を与える要因には、電極表面の電界強度と電極材料の仕事関数とがあり、電極形状は電界強度を決める重要な因子である。

本論文で得られた結果から、仕事関数を変えずに、電極形状を適切に選ぶことによって、エミッション電流の計算結果と実験結果とをよく一致させ得ることがわかった。

5. まとめ

電子銃解析コードEGN2を用いて、電界放出微小冷陰極からの電子放出のシミュレーションを行った。鋭く尖ったエミッタ電極先端からの電界放出による電子の放射に関して検討し、以下の結果を得た。

(1)エミッタ電極とゲート電極からなる冷陰極について、低電圧で大きなエミッション電流を得るには、エミッタ電極の高さをゲート電極の上面の高さに一致する程度にすればよいこと、エミッタ電極の半角および曲率半径は小さいほどよいことがわかった。これにより、エミッタ電極形状設計のためのひとつの指針が得られた。

(2)集束電極を備えた冷陰極において、集束電極電圧のエミッション電流に与える影響を計算し、実験結果と比較した。エミッタ電極先端に微小突起の存在を仮定して計算した場合、計算結果と実験結果とがよく一致する突起形状が得られた。これは、冷陰極において、電子はエミッタ電極先端の全面から放出されているのではなく、限られた場所から放出されているとする考えを支持するものである。

本論文で得られた結果から、仕事関数を変えずに、電極形状を適切に選ぶことによって、エミッション電流の計算結果と実験結果とをよく一致させ得ることがわかった。

集束電極を備えた冷陰極については、今後電子ビーム径やエミッタンスの検討なども必要であると考えられる。

6. 謝辞

集束電極付き素子の作製にあたってご助言をいただき、貴重な測定結果を提供くださった電子技術総合研究所伊藤順司氏、金丸正剛氏に深く感謝いたします。

(平成6年9月5日受付, 平成7年7月3日再受付)

文 献

- (1) 横尾邦義:「真空マイクロエレクトロニクス -新しい真空素子の世界-」,電学誌, 112 巻4号, pp. 257-262, 1992年
- (2) C.A.Spindt,I.Brodie,L.Humphery,and E.R.Westerberg:"Physical properties of thin-film field emission cathodes with molybdenum cones",J.Appl. Phys.,vol.47,pp.5248-5263,1976
- (3) I.Brodie and J.J.Murray:"The Physics of Micro/Nano-Fabrication",Plenum Press, New York,1992
- (4) W.B.Herrmannsfeldt,R.Becker,I.Brodie,A.Rosengreen, and C.A.Spindt:"High-Resolution Simulation of Field Emission",Third International Conference on Charged Particle Beams,Toulouse,France,Apr., 1990
- (5) Richard M.Mobley and J.E.Boers:"Computer Simulation of Micro-Triode Performance",IEEE Trans. on Electron Device,vol.38,No.10,pp.2383-2388, Oct.,1991
- (6) T.H.P. Chang, D.P. Kern and M.A. McCord:"Electron optical performance of a scanning tunneling microscope controlled field emission microlens system",J.Vac.Sci.Technol.B7(6),pp.1855-1861, Nov/Dec,1989
- (7) 物理定数表, 朝倉書店,1986
- (8) Technical Digest 4th Int. Vacuum Microelectronics Conf.(Nagahama, Japan),1991
- (9) J.Itoh and H.Hiroshima:"Fabrication and theoretical study of micronize vertical vacuum triodes", Inst. Phys. Conf. Ser. No.99: Section7, 2nd Int. Conf. on Vac. Microelectron., Bath, 1989
- (10) 森川, 金丸, 伊藤:「電界放射エミッタを利用した高輝度微小電子銃の試作(3)」, 第54回応用物理学会学術講演会講演予稿集27p-Y-1,1993年秋季
- (11) K.Betsui:"Fabrication and characteristics of Si field emitter arrays",Technical Digest 4th Int. Vacuum Microelectronics Conf.(Nagahama,Japan), pp.26-29,1991

浅野 啓行 (正員) 1960年4月2日生まれ。86年3月名古屋大学大学院工学研究科電気電子専攻博士前期課程修了。同年4月三菱電機(株)入社。現在、先端技術総合研究所勤務。高周波発振管の研究開発に従事。プラズマ・核融合学会, 応用物理学会会員。

菊永 敏之 (正員) 1955年4月2日生まれ。83年3月東京工業大学大学院理工学研究科電気・電子工学専攻博士課程修了。工学博士。同年4月三菱電機(株)入社。現在、先端技術総合研究所勤務。プラズマ・核融合関連機器の研究開発に従事。電気学会, 物理学会, プラズマ・核融合学会会員。

森川 和敏 (非会員) 1961年5月1日生まれ。86年3月九州大学大学院工学研究科電気工学専攻博士前期課程修了。同年4月三菱電機(株)入社。現在、先端技術総合研究所勤務。真空マイクロ素子の研究開発に従事。応用物理学会会員。