

# 論 文

## 解析にエリアモデルを用いた Spindt 型 Mo FEA の電子放出特性

羅 永春<sup>†</sup> 磯田 淳平<sup>†</sup> 柴田 幹<sup>†</sup> 岡田 裕之<sup>†</sup>  
女川 博義<sup>†</sup>

## Emission Characteristics of Spindt-Type Mo FEA Using Area Model of Analysis

Yong-Chun LUO<sup>†</sup>, Junpei ISODA<sup>†</sup>, Miki SHIBATA<sup>†</sup>, Hiroyuki OKADA<sup>†</sup>,  
and Hiroyoshi ONNAGAWA<sup>†</sup>

あらまし 作製した Spindt 型 Mo FEA デバイスの電子放出特性と計算した結果との比較を行った。ここで、我々はデバイス構造に基づいたモデルの解析に用いるチップのエリアモデルを提案し、更に計算精度を高める広義的な因子  $\psi$  を定義することにより妥当な計算結果を得た。また実験データに基づくファウラー-ノルドハイム式による各種特性のシミュレーションを行った。モデルに従って計算した結果は、素子の SEM 観察に基づく実験結果とよい一致が見られ、これに基づきより微細な尖鋭度を有するデバイスのチップ径が推定できた。

キーワード フィールドエミッタアレー、電界放出、エリアモデル、チップ半径、シミュレーション

### 1. まえがき

フラットディスプレイ応用を中心にフィールドエミッタアレー (FEA) の研究が進んでいる [1]~[4]。なかでも電界放出エミッタのチップ (Tip) 形状などと電子放出特性に対する検討が盛んに行われている [5]~[10]。今回、我々は実際のデバイス特性とデバイス構造に基づく軸対称性のモデルの解析に用いるチップのエリアモデルを提案し、更に計算精度を高める広義的な因子  $\psi$  を定義することにより妥当な計算結果を得た。また、作製した Spindt 型 モリブデン (Mo) FEA デバイスの実験データに基づくファウラー-ノルドハイム (F-N) 式による各種特性のシミュレーションを行った。電子放出特性は FEA デバイスのパラメータの中で、特にチップ曲率半径に敏感に依存することがわかった。モデルに従って計算した結果は、素子の SEM 観察に基づく実験結果とよい一致が見られ、これに基づきより微細な尖鋭度を有するデバイスのチップ径が推定できた。更に、Spindt 型 Mo FEA を作製し、電子放出特性の測定を行ったので報告する。

### 2. モデルと計算方法

図 1 に示すように、デバイス構造に基づいた真空中での軸対称性をもつモデルを考える。 $r$  軸はコーンの中心から水平方向へ、 $z$  軸はコーンの基板中心から垂直方向にアノード電極方向にとる円柱座標を考える。ゲートからアノードまでの距離を  $H_a$ 、ゲート穴の半径を  $R_g$ 、ゲート電極の高さを  $H_g$ 、ゲート電極膜厚を  $W_g$ 、エミッタ尖端部のチップ曲率半径を  $R_e$ 、エミッタコーンの高さを  $H_e$ 、コーンの断面半角を  $\alpha$ 、アノード電位を  $V_a$ 、ゲート電位を  $V_g$ 、エミッタ電位を  $V_e$  に設定する。

エミッタからの電流密度  $J_{FN}$  ( $A/cm^2$ ) は次の F-N 式により決める [11][12]。

$$J_{FN} = A \frac{E^2}{\phi t^2(y)} \exp \left[ B \nu(y) \frac{\phi^{3/2}}{E} \right] \quad (1)$$

$$E = \beta V_g + \gamma V_a \quad (2)$$

ここで、 $E$  は電子放出面での電界強度であり、エミッタ電位を基準にして、ゲート電圧、アノード電圧やデバイスの構造による幾何学的な定数  $\beta$  と  $\gamma$  を用いて、近似的に式(2)で与えられる。Mo の仕事関数  $\phi$  は

<sup>†</sup> 富山大学大学院工学研究科、富山市  
Faculty of Engineering, Toyama University, 3190 Gofuku,  
Toyama-shi, 930-8555 Japan

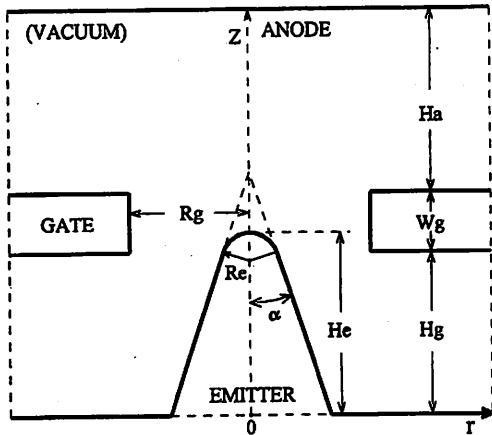


図1 計算に用いたデバイス形状のモデル  
Fig. 1 The device configuration model for calculation.

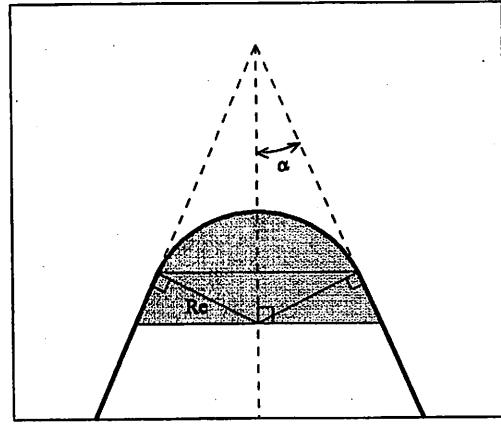


図2 チップのエリアモデル  
Fig. 2 The area-model of the tip.

$4.35\text{eV}$ ,  $A = 1.5414 \times 10^{-6}$ ,  $B = -6.8308 \times 10^7$ ,  $y = 3.7947 \times 10^{-4}E^{1/2}/\phi$ ,  $t^2(y) = 1.1$ ,  $\nu(y) = 0.95 - y^2$  である。

エミッタ尖端部の電界強度は、ゲートとアノードとの電界成分のベクトル的合成である。

$$\vec{E} = \vec{E}_g + \vec{E}_a \quad (3)$$

まず、ゲート電位を零にしたアノードとエミッタの電位差による電界強度  $E_a$  を求める。本実験と計算では  $Ha=100\mu\text{m}$  の設定により、 $Ha \gg |He-(Hg+Wg)|$  の条件を満たす。ここで、 $E_a$  を次式で近似する。

$$E_a = (Va - Ve)/Ha \quad (4)$$

次に、アノード電位を零にしたゲートとエミッタの電位差による電界強度  $E_g$  を求める。電子放出の電流計算では1個のチップ面積を図2に示すエリアモデルで求めることにする。電流密度  $J_{FN}$  は均一にモデルの表面、すなわちチップ上の球冠及び円錐台の周辺からトンネル効果により飛び出すと考える。その面積  $\Phi$  は次式で表される。

$$\Phi = \pi[2 + \sin(\alpha)\tan^2(\alpha)]Re^2 \quad (5)$$

コーン半角を  $\alpha=0$  度にすると、 $\Phi$  は半球面積  $2\pi Re^2$  になり、 $\alpha=45$  度にすると、 $\Phi$  は  $2.71\pi Re^2$  になる。作製したデバイスのコーン形状に対するSEM観察によると、チップの面形状は平滑状態ではないことがわかった。すなわち、式(5)より大きな面積になりかねない。この増加を数値的に  $\kappa^2\Phi(\kappa \geq 1)$  で表すことにする

と、式(5)により

$$\Phi^* = \kappa^2 \{\pi[2 + \sin(\alpha)\tan^2(\alpha)]Re^2\} \quad (6)$$

が得られる。

もし空間電荷効果が加われば、チップでの電界強度が弱くなり、電子放出に影響を与える。この影響因子を  $\sigma(\sigma \leq 1$ 、空間電荷効果の影響がない場合には  $\sigma = 1$ ) とする。

以上の両方を含める広義的な因子  $\psi$  を導入し、 $\psi = \sigma\kappa^2$  とすると、式(6)は次式のようになる。

$$\Phi^* = \psi\Phi \quad (7)$$

式(7)によると、 $\sigma=1$  の場合には、 $\kappa$  値はモデルの面積計算にかかるサイズの倍率に当てはまる。

エミッタ尖端部を球状と仮定し、ゲート電位により誘導された半球面での電荷 ( $Q$ ) を均一に図2のエリアモデルの表面(表面面積  $\Phi^*$ )に分布することにする。したがって、モデルの電荷密度は  $\rho = Q/\Phi^*$  になる。ガウスの定理に基づき、ゲートとエミッタの電位差によるエミッタ尖端部の電界強度成分  $E_g (= \rho/\epsilon_0)$  を次の式で近似する。

$$E_g = \frac{2Rg}{\psi(Rg - Re)Re[2 + \sin(\alpha)\tan^2(\alpha)]} \times (Vg - Ve) \quad (8)$$

式(3)、(4)及び(8)により

$$E = \frac{2Rg}{\psi(Rg - Re)Re[2 + \sin(\alpha)\tan^2(\alpha)]} \times (Vg - Ve) + \frac{1}{Ha}(Va - Ve) \quad (9)$$

が得られる。

$Ve=0$  のとき、式(2)と比べると

$$\beta = \frac{2Rg}{\psi(Rg - Re)Re[2 + \sin(\alpha)\tan^2(\alpha)]} \quad (10)$$

$$\gamma = \frac{1}{Ha} \quad (11)$$

デバイスアレーの電界放出電流  $I$  は、式(1)と式(7)及びエミッタコーンの数  $N_{tip}$  を乗じる式(12)で表す。

$$I = N_{tip}\Phi^*J_{FN} \quad (12)$$

したがって、 $Ve=0$  のときの式(9)により次の式(13)、式(7)と式(5)により次の式(14)、式(12)と式(1)により次の式(15)が得られ、式(15)により F-N プロットの縦軸の計算式は次の式(16)で求める。

$$E = \frac{2Rg}{\psi(Rg - Re)Re[2 + \sin(\alpha)\tan^2(\alpha)]} Vg + \frac{1}{Ha} Va \quad (13)$$

$$\Phi^* = \psi\{\pi[2 + \sin(\alpha)\tan^2(\alpha)]Re^2\} \quad (14)$$

$$I = N_{tip}\Phi^*A \frac{E^2}{\phi t^2(y)} \exp\left[B\nu(y)\frac{\phi^{3/2}}{E}\right] \quad (15)$$

$$\log(I/Vg^2)$$

$$= \log N_{tip} + \log \Phi^* - \log(Vg^2) + \log\left\{A \frac{E^2}{\phi t^2(y)} \exp\left[B\nu(y)\frac{\phi^{3/2}}{E}\right]\right\} \quad (16)$$

以上の式(13)～(16)の中で、チップ半径  $Re$  と因子  $\psi$  だけが未知のパラメータである場合には、FEA デバイスの測定値(F-N プロット)とのフィッティングにより因子  $\psi$  値と  $Re$  値を算出する。

### 3. 計算結果と考察

以上の解析モデルに基づいて、式(13)～(16)により算出された  $\psi$  値と  $Re$  値を用いて、電子放出特性の計算を行った。用いたパラメータには、実際に作製し、測定した Spindt 型 Mo FEA デバイス A の実験データを適用した。

電子放出特性はゲート電圧、ゲート半径、コーンの形成角度、コーン材料の仕事関数及びエミッタ尖端部

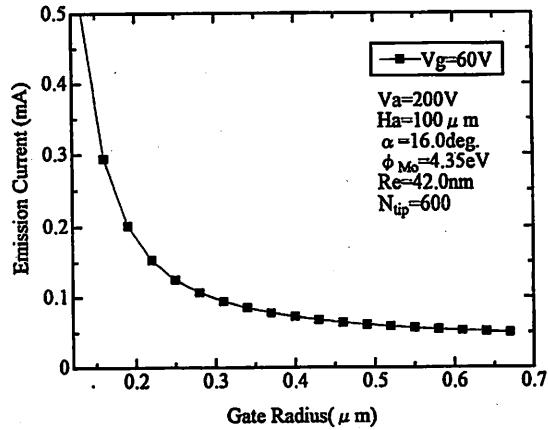


図 3 放出電流とゲート半径  $Rg$  の関係  
Fig. 3 The emission current versus gate radius  $Rg$ .

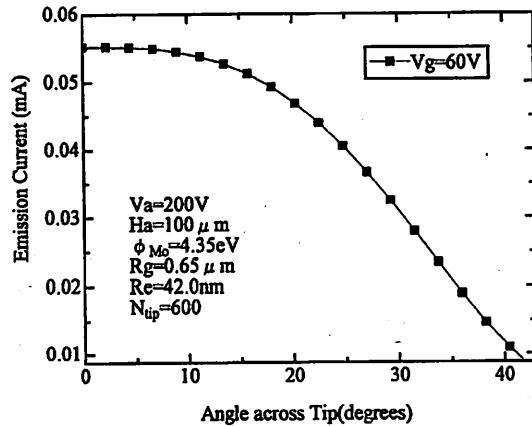


図 4 放出電流と半角  $\alpha$  の関係  
Fig. 4 The emission current versus half-angle  $\alpha$ .

のチップ半径に左右された。シミュレーション結果は図 3～図 6 に示す。

図 3 に、ゲート電圧を 60V とし、電流とゲート半径の関係の計算結果を示す。図 4 は、異なるコーンの半角に対する電流変化である。デバイス構造に最も近い  $Rg=0.5\mu m$  当りでは、ゲート半径の大小やコーンの形成角度による電流変化は少なかった。

異なる仕事関数による電流変化の状況を図 5 に示す。通常の仕事関数 3.0～4.5eV 当りでは大きな変化はないが、仕事関数  $\phi$  の値が小さいほど良い電流特性が期待できる。

チップ半径の変化による電流計算値は、図 6 に示すように、大幅に変化することがわかった。

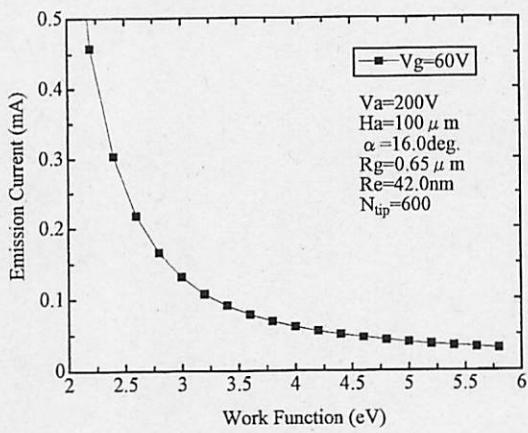


図5 放出電流と仕事関数  $\phi$  の関係  
Fig. 5 The emission current versus work function  $\phi$ .

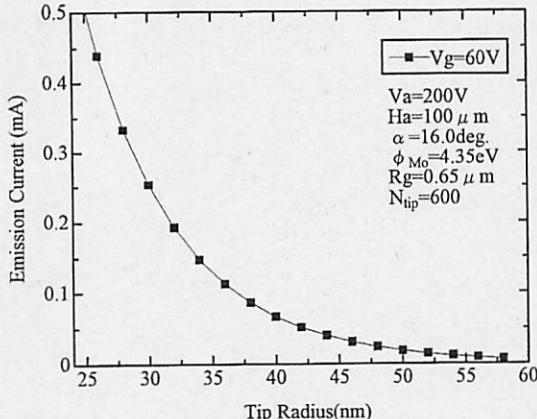


図6 放出電流とチップ半径  $Re$  の関係  
Fig. 6 The emission current versus tip radius  $Re$ .

表1 FEA デバイスのパラメータ  
Table 1 Parameters of FEA devices.

Device	Rg ( $\mu$ m)	$\alpha$ (degrees)	Ntip
A	0.65	16.0	600
B	0.65	14.0	7000

#### 4. 実験と比較

今回、2種類のSpindt型Mo FEAデバイスを作製した。表1に作製したデバイスの詳細を表す。

図7に作製したFEAデバイスの断面SEM写真を示す。両者ともゲート半径は0.65μmと観察され、デバイスAのコーンの半角は16.0度、Bの半角は14.0度と見積もられた。

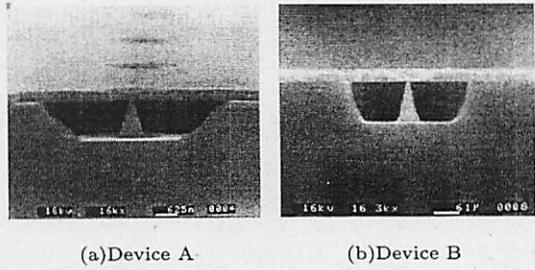


図7 デバイスの断面 SEM 写真  
Fig. 7 Cross sectional view of the devices.

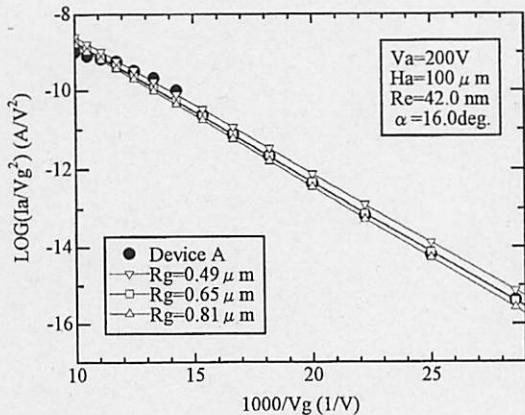


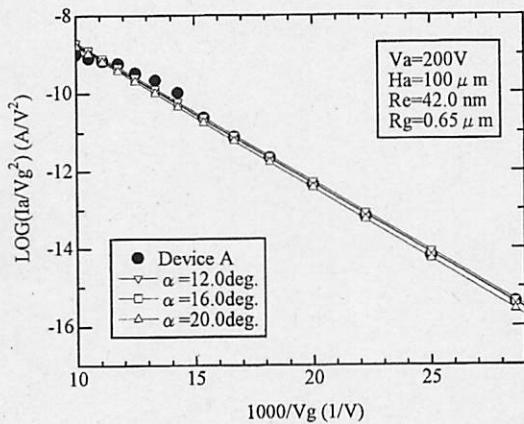
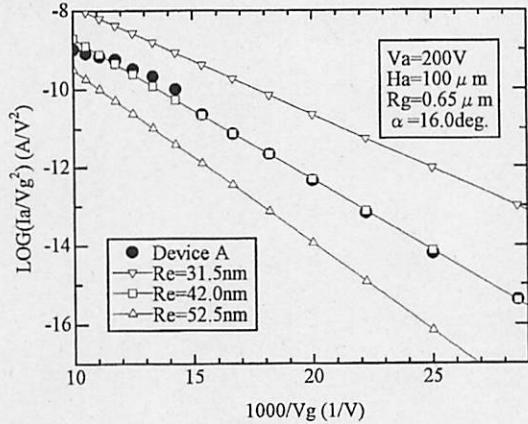
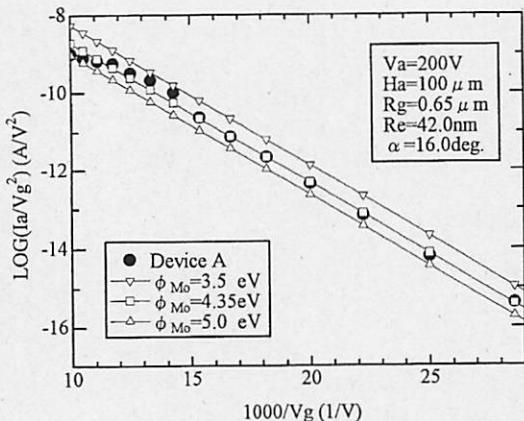
図8 ゲート半径  $Rg$  によるファウラー-ノルドハイムプロットの変化  
Fig. 8 The variation of the Fowler-Nordheim plot varied with gate radius  $Rg$ .

デバイスAの電気的特性の測定結果を図8～図11に示す。

デバイスAの実測値に基づいて、F-Nプロットの計算を行い、実測値との比較を行った。まず、ゲート半径とコーン半角の変化による電流計算値の変化を検討した。図8に示すように、デバイスAの実測値(●印)に基づいて、式(13)、式(14)及び式(16)により、計算のフィッティングを行った。これに基づいて、ゲート半径を±25%程度変えて、F-Nプロットを行った結果、わずかにシフトした。同様に、コーン半角を±25%程度変えた計算結果を図9に示す。エミッタの材料選択上、可能な仕事関数3.5eVで計算した結果(図10)、大きな変化は得られなかった。

一方、チップ半径によるF-Nプロットの変化は図11に示すように、チップ半径の±25%程度(±10.5nm差)の変化でF-Nプロットが大幅に変化する。

モデルに従ってフィッティングを行った結果、デバ

図 9 半角  $\alpha$  によるファウラーー・ノルドハイムプロットの変化Fig. 9 The variation of the Fowler-Nordheim plot varied with half-angle  $\alpha$ .図 11 チップ半径  $Re$  によるファウラーー・ノルドハイムプロットの変化Fig. 11 The variation of the Fowler-Nordheim plot varied with tip radius  $Re$ .図 10 仕事関数  $\phi$  によるファウラーー・ノルドハイムプロットの変化Fig. 10 The variation of the Fowler-Nordheim plot varied with work function  $\phi$ .

イス A のチップ半径  $Re$  は 42nm、因子  $\psi$  は 2.82 と算出された。

デバイス A のコーン尖端部の SEM 写真を図 12 に示す。これより、チップ半径は 40~45nm と見積もられ、本結果は計算値と一致した。

上記の検討から、電子放出特性は各種パラメータの中で、特にチップの曲率半径に敏感に依存し、本点がデバイス作製での最も大きな特性向上のポイントであることがわかる。

さて、Spindt 型 Mo FEA デバイス作製では、ゲート穴の直径とコーンの形成角度は容易に制御できる。しかしながら、コーンのチップの尖鋭度の制御は容易



図 12 デバイス A の先端部の SEM 写真

Fig. 12 The SEM photomicrograph of the tip in the device A.

ではない。今回、我々は Spindt 型 Mo FEA デバイス B を作製するとき、図 13 に示したように、電子ビーム加熱蒸着源から回転基板を見込む角度  $\theta$  を微調整することで、コーンの形成角度がより小さくなつたことがわかつた。微小チップによるデバイス B の F-N プロットを、デバイス A の特性とともに図 15 に示す。

図 7 に示したデバイスの断面 SEM 写真から、デバイス B のコーンの形成角度は 14 度と観察され、デバイス A と比べ尖鋭に形成されたと考えられる。デバイス B の実験測定値に基づいて電流特性の計算のフィッティングを行つた結果、デバイス B のチップ半径は 5.9nm と推定された。これより、本チップ半径の微小化が電子放出特性改善に大いに役立つたと考えられる。

図 14 にデバイスの電流-電圧特性を示す。デバイス

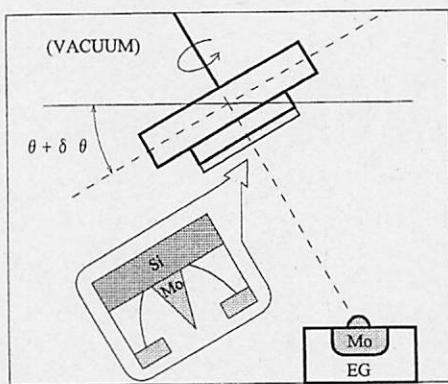


図 13 デバイス尖端形状を変えるための Mo 蒸着の概略図  
Fig. 13 Schematic illustration of Mo evaporation for changing the tip shape of the device.

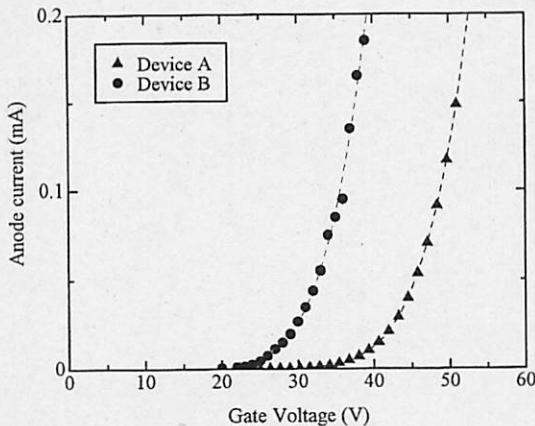


図 14 デバイスの電流-電圧特性  
Fig. 14 Current-voltage characteristics of devices.

A の測定値をコーンの数 7000 で換算した計算結果 (▲印) を同図に示す。作製したデバイス B はデバイス A より低いゲート電圧で動作し、より微細な尖鋭度を有するチップ構造に形成されたことがわかる。

なお、式(7)で導入した  $\psi$  の数値はコーンの形状等に依存する定数である。計算にかかるパラメータが一定の場合、F-N プロットのフィッティングラインにより唯一のチップ半径  $Re$  と因子  $\psi$  が算出される。図 15 に算出されたチップ半径  $Re$  に基づいて、異なる  $\psi$  値による測定値のフィッティングラインの差異を示す。同様に、図 16 に決められた  $\psi$  の数値に基づいて、異なる  $Re$  値による測定値のフィッティングラインの変化を示す。因子  $\psi$  を導入しなければ良好なフィッティング結果は得られない。また、デバイスの実測値 (F-N

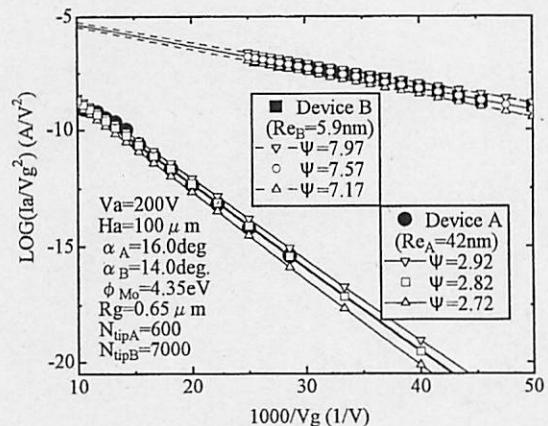


図 15 ファウラー-ノルドハイムプロットでの異なる  $\psi$  値のフィッティング  
Fig. 15 Fitting of different  $\psi$  in Fowler-Nordheim plots.

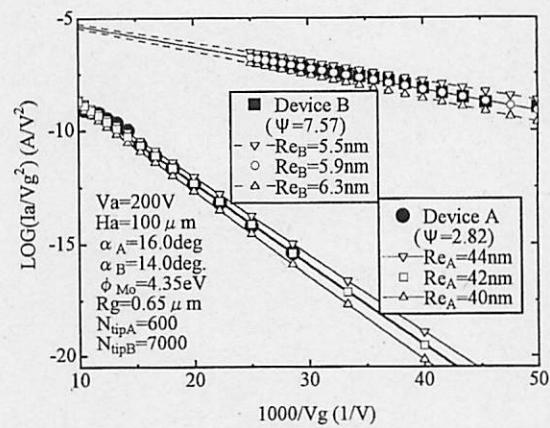


図 16 ファウラー-ノルドハイムプロットでの異なる  $Re$  値のフィッティング  
Fig. 16 Fitting of different  $Re$  in Fowler-Nordheim plots.

プロット)なしに唯一の  $\psi$  値を算出できない。計算精度を高める因子  $\psi$  を導入することにより測定値とのフィッティングが可能になる。定義した  $\psi = \sigma\kappa^2$  から、因子を  $\sigma = 1$  とすると、 $\kappa = \psi^{1/2}$  となる。デバイス A では  $Re = 42\text{nm}$ ,  $\psi = 2.82$ ,  $\kappa = 1.679$  となり、デバイス B では  $Re = 5.9\text{nm}$ ,  $\psi = 7.57$ ,  $\kappa = 2.751$  となる。コーンのチップ半径  $Re$  が  $42\text{nm}$  以上に大きくなると  $\kappa$  値は 1 に近づく。すなわち、電子放出の領域はエリヤモデルの計算値に近づくと考えられる。一方、チップ半径  $Re$  が  $5.9\text{nm}$  以下では  $\kappa$  値は  $2.751$  より大きな値になりかねない。チップ径が微小化するにつれて、エミッタ尖端部での電界強度は強くなり、同時に電子

放出の領域はエリアモデルの面積より大きくなることも可能であると考えられる。したがって、作製したデバイスの実測値からコーンのチップ半径と電子放出面積を見積もることができる。本実験では、デバイスのコーン数評価値は±5%程度の誤差はあり得るもの、実際上のチップの電子放出面積と空間電荷効果を考慮する広義的な意味で、 $\psi$  の計算数値導入は妥当であると考えられる。

## 5. むすび

我々は Spindt 型 Mo FEA を作製し、電子放出特性の測定を行った。軸対称性をもつモデルの上に、Spindt 型デバイスのエミッタ構造に適するチップのエリアモデルを提案し、更に計算精度を高める広義的な因子  $\psi$  を定義することにより、解析に妥当な計算結果を得た。測定した実験データに基づいて、ファウラー・ノルドハイム式による各種シミュレーションを行った結果、電子放出特性はエミッタ尖端部のチップ曲率半径により、敏感に変化した。モデルに従って計算した結果は、素子の SEM 観察に基づく実験結果とよい一致が見られ、これに基づきより微細な尖鋭度を有するデバイスのチップ径を推定することができた。

## 文献

- [1] C.A.Spindt, "A thin film field emission cathode," *J. Appl. Phys.*, vol.39, no.7, pp.3504–3505, 1968.
- [2] C.A.Spindt, I.Brodie, L.Humphrey, and E.R.Westerberg, "Physical properties of thin-film field emission cathodes with molybdenum cones," *J. Appl. Phys.*, vol.47, no.12, pp.5248–5263, 1976.
- [3] C.A.Spindt, C.E.Holland, A.Rosengreen, and I.Brodie, "Field-emitter arrays for vacuum microelectronics," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol.38, no.10, pp.2355–2363, Oct. 1991.
- [4] 伊藤順司, 金丸正剛, 松川 貴, "ナノメートル加工の応用(1)–真空マイクロエレクトロニクスへの応用," *応用物理*, vol.67, no.12, pp.1390–1394, Dec. 1998.
- [5] R.M.Mobley and J.E.Boers, "Computer simulation of micro-triode performance," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol.38, no.10, pp.2383–2388, Oct. 1991.
- [6] R. Ttue, "Simulation of thin field emitter array cathodes," *IEDM Tech. Dig.*, pp.379–383, Dec. 1992.
- [7] D.W.Jenkins, "Emission area of a field emitter array," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol.40, no.3, pp.666–672, March 1993.
- [8] E.G.Zaidman, "Simulation of field emission microtritodes," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol.40, no.5, pp.1009–1016, May 1993.
- [9] K.L.Jensen and E.G.Zaidman, "Analytic expressions for emission in sharp field emitter diodes," *J. Appl. Phys.*,

- vol.77, no.7, pp.3569–3571, 1 April 1995.
- [10] N.S.Kim, Y.J.Lee, and A.Hariz, "Simulation of nonsymmetrical geometry effects on electrical characteristics of micrometer-size field emitters," *Asia Display 98*, pp.707–710, Seoul, Korea, Oct. 1998.
- [11] R.H.Fowler and L.W.Nordheim, "Electron emission in intense electric fields," *Proc. Royal. Soc. London*, vol.119a, pp.173–181, 1928.
- [12] D.W.Branston and D.Stephani, "Field emission from metal-coated silicon tips," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol.38, no.10, pp.2329–2333, Oct. 1991.

(平成 10 年 12 月 24 日受付, 11 年 4 月 16 日再受付)

羅 永春



昭60中国・遼寧大・理・半導体卒。昭63ハルビン工業大学大学院・工・半導体素子修士課程了。同年遼寧大学物理学部助手。平成3年、同講師。現在富山大学大学院・工・物性デバイス博士後期課程在学中。シリコン圧力センサ、SIT&SITH、IC-CAD等の研究に従事した。現在、真空マイクロデバイス作製及び解析、FEA デバイスによる有機材料の発光に関する研究に従事。応用物理学会会員。

磯田 淳平



平9富山大・工・電子情報卒。現在、同大学院工学研究科博士前期課程在学中。真空マイクロデバイスの作製プロセス及びその回路シミュレーションの研究に従事。

柴田 幹



昭44富山県高岡工芸高校・電気卒。同年富山大学・工・電子工学科・技官。以来、無機及び有機エレクトロルミネッセンス、Bi系高温超導電薄膜、LB膜などの研究に従事。応用物理学会会員。

岡田 裕之 (正員)



昭63東工大大学院理工学研究科博士課程了。同年、住友電気工業(株)入社。平3富山大学工学部電子情報工学科講師。平6同助教授。液晶デバイス、真空マイクロデバイス、有機電界発光デバイスなどの研究に従事。工博、液晶学会、応用物理学会、SID各会員。

女川 博義 (正員)



昭39東北大・工・電子卒。同年、東北大学  
工学部電子工学助手。昭44富山大学工学部  
電子工学科助手、同講師、助教授を経て、昭  
63同教授。液晶デバイス、LB膜、有機電界  
発光デバイスなどの研究に従事。工博。応用  
物理学会、情報表示学会(SID)各会員。