

Advanced HEED の諸特性

Characterization of an advanced HEED (High-efficiency Electron Emission Device)

根岸 伸安, 田中 亮太, 中田 智成

Nobuyasu Negishi, Ryota Tanaka, Tomonari Nakada

酒村 一到, 奥田 義行, 佐藤 英夫

Kazuto Sakemura, Yoshiyuki Okuda, Hideo Satoh

渡辺 温, 吉川 高正, 小笠原 清秀

Atsushi Watanabe, Takamasa Yoshikawa, Kiyohide Ogasawara

要旨 我々は1997年に高効率電子放出素子(High-efficiency Electron Emission Device: HEED)を発見して以来, その開発を続けている。独自の構造を持ったエミッションサイトを設けることにより性能を大きく改善したAdvanced HEEDについて, 今回は長時間の駆動による電子放出特性の変化を中心に評価を行った。放出電流密度の半減時間は約3000時間であり, さらなる改善を必要とするが, 再活性化というユニークな現象を確認した。

Summary As previously reported, the emission characteristics of the metal-insulator-semiconductor (MIS) electron emission device could be significantly improved by introducing micro-dimple structures as the emission sites. It is demonstrated that the device has some desirable features: a high emission current density, a low operation voltage, emission uniformity, and stable emission with small angle dispersion. It is also shown from the result of lifetime evaluation that the device shows a half-life of 3000 h, and that the deteriorated emission can be recovered by the DC reactivation treatment.

キーワード : 電子放出, 高効率, HEED, 活性化, SiO_x 層, トラップ, 経時変化

1. まえがき

冷陰極あるいはフィールドエミッターと呼ばれる電子放出素子は, タングステンフィラメントに代表される熱電子源と比べ, 小型・低消費電力・高速駆動などの特長を有している。これらの特長を生かし, 平面ディスプレイ⁽¹⁾や小型超高感度カメラ⁽²⁾, あるいは短パルスX線源⁽³⁾

などさまざまな応用が考えられ, 各所で研究開発が盛んに行われている。冷陰極にはスピント型⁽⁴⁾に代表されるゲートアレイ型と絶縁体-金属-絶縁体(MIM)型⁽⁵⁾に代表される面放出型とがある。我々はシンプルな素子構造で生産性に優れた面放出型に着目し, 1995年に東京農工大学の越田教授により開発された弾道電子面放

出素子^{(6),(7)}を基にした電子放出素子の開発を進めてきた。1997年には面放出型の中では極めて高効率に電子を放出する素子の開発に成功し⁽⁸⁾、これをHEED(High-efficiency Electron Emission Device: 高効率電子放出素子)と呼び、現在まで開発を進めている。

開発当初のHEEDはエミッション効率が28%と平面冷陰極としては非常に大きく、 $1\text{mA}/\text{cm}^2$ 以上の大きい放出電流密度を有していたが、一方で実用へ向けた観点からは駆動電圧が110Vと高く、電子放出が不均一であるといった問題点も抱えていた。これらの問題点に対しては、実効的な絶縁体層の厚さを小さくする独特の構造(エミッションサイトと呼ぶ)を考案することにより解決が得られている。このエミッションサイト構造をもつAdvanced HEEDは実用的な駆動電圧である20Vで $1.8\text{mA}/\text{cm}^2$ の放出電流密度が得られている。同時に電子放出の空間的、時間的な揺らぎも大幅に改善された⁽⁹⁾。

今回はこのAdvanced HEEDの諸特性を駆動における経時変化を中心に触れ、再活性化という特徴的な現象を紹介する。

2. 素子構造と実験系

図1に素子構造の模式的な断面を示す。Advanced-HEEDは下部電極、Si層、SiO_x層、表

面薄膜電極、炭素層の積層構造からなる。下部電極はCr50nm/Cu1 μm /Cr100nm/TiN150nmの4層構造である。TiN膜は熱工程で金属原子のSi層への拡散を防ぐ働きをする。Si層、SiO_x層をそれぞれ8.4 μm 、300nmの厚さで下部電極の上に形成する。最後に表面薄膜電極であるW層と炭素層を60nm、20nmで形成する。

素子の表面には直径1 μm のエミッションサイトを形成している。図2にエミッションサイトの模式的な図とTEM写真を併せて示す。エミッションサイトはゴルフボールのディンプルのような形状であり、SiO_x層とW層がエミッションサイトの中心に向けて膜厚が徐々に減少する構造になっている。この構造はSi層を成膜後、SiO_x層とW層を成膜する際にエミッションサイトとなる位置にマイクロマスクを置き、成膜後に除去するといった手法で形成される。この実験ではエミッションサイトの密度は1000個/mm²である。

実験で用いた素子は下部電極と表面薄膜電極を互いに直行させた3 \times 8画素の単純マトリクス構造をしている。画素の大きさと電子放出部の大きさは、それぞれ6 \times 2mm、5.2 \times 1.2mmである。基板には44 \times 44mmのソーダライムガラスを使用した。放出した電子を受ける前面板にはITOをコートした蛍光体(P-22)付きガラス

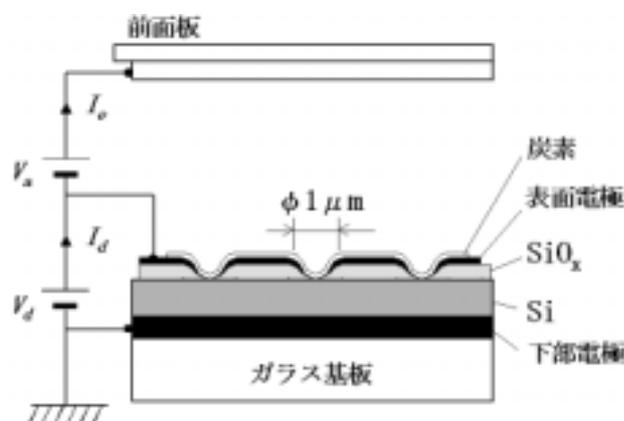


図1 素子の断面構造と測定システムの概略

Fig.1 Schematic cross-sectional view of advanced HEED emitter and diagram of the experimental configuration.

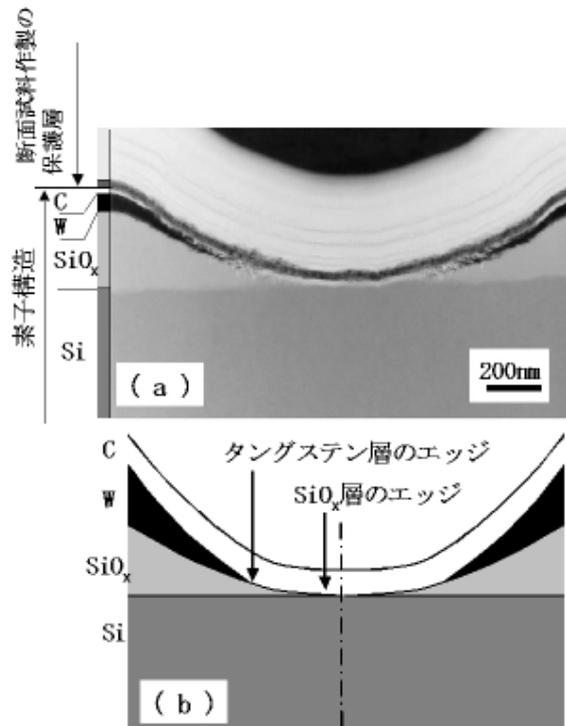


図2 エミッションサイトの断面
(a)TEM写真,(b)底部近傍の模式

Fig.2 (a)Cross-sectional TEM image of the emission site.
(b)Schematic illustration of the device near the bottom.

基板を用いた。電子放出素子の基板と前面板は3mmのギャップを維持するための額縁型のスペーサーを挟んで封着されている。封着には通常のフリットガラスを用いて450の熱工程で処理を行った。封着された内部は 10^{-6} Torr台の真空に維持されている。

この実験素子を用いて素子電流密度 I_e と放出電流密度 I_d を図1に示したように測定した。電子を集め、蛍光体で放出電子を観察するための加速電圧 V_a は1kVで、一連の測定は室温で行った。電子放出効率 η は素子に注入された電流と電子放出電流の比である $\eta = I_e / (I_e + I_d)$ で定義している。放出電流の経時変化はパルス状の電圧印加で測定した。

3. 結果および考察

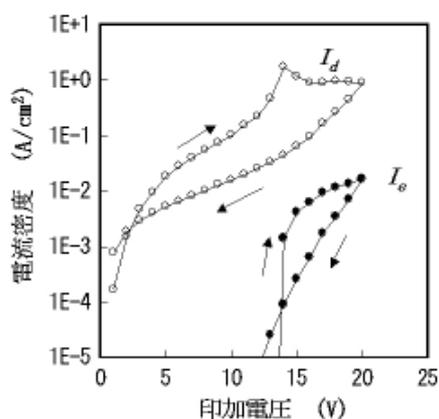
3.1 活性化

図3にDCで電圧を印加したときの I_e および

I_d を示す。このDCでの電圧印加は電子放出に必要な電界を SiO_x 層の表面電極側に形成させるために必要なプロセスで、“活性化”と称している。この活性化は素子への印加電圧 V_d を0.3V/sで電圧を掃引して行った。 V_d が14Vから電圧制御型の負性抵抗が現れ、同時に放出電流が観察され始める。 V_d が20Vのときに放出電流密度は10mA/cm²に達する。このときの放出電流はスパイクノイズが小さく、電子放出効率は1%を超える。DCでの電圧掃引時にあられる電圧制御型の負性抵抗は活性化のときに起こる興味深い現象である。活性化をした素子では、再びDC電圧掃引を行ってもこの現象は現れない。活性化後の I_e - V_d 特性をFowler-Nordheim(F-N)プロットに変換したものを図4に示す。F-Nプロットでは直線性を示しており、電子放出は電界誘起トンネリング効果に基づいていると考えられる。

以上のことより活性化と電子放出のモデルは以下のように考えられる。まず、HEED に用いている SiO_x 膜はアモルファス相からなり、不純物や酸素欠損などによる多くのトラップを有している。そのために負性抵抗が起こる 14V 以前の電圧では電子はホッピング伝導により SiO_x 中を流れる。さらに電圧を上げていくとトラップに電子が捕獲され始める。この過程が電圧制御型の負性抵抗として観察される。電子の捕獲は

電流が注入される Si 層側からおこり、捕獲された電子は固定化された電荷として働く。その結果、表面電極に近い側の電界は大きく増大され、走行する電子はホットエレクトロンと呼ばれる非常に高いエネルギーを持った状態になり、表面電極をトンネリングして真空中へ放出される。また、放出した電子のエネルギー分布を見ると、固体中でのエネルギーの損失が全くない弾道的な伝導も含んでおり⁽⁹⁾、このモデル



昇圧時には素子電流密度 I_d は 14V 以降で負性抵抗を示し、同時に放出電流密度 I_e が観察され始める。降圧時は昇圧時と電流値が異なり、ヒステリシスを描く。2回目以降の通電では昇圧時も降圧時と同じ特性になり、ヒステリシスは出ない。

図 3 活性化時の電流電圧特性。

Fig.3 Applied voltage (V_a) dependence of diode current (I_d) and emission current (I_e) under a dc operation. This operation activates the pulsed operation.

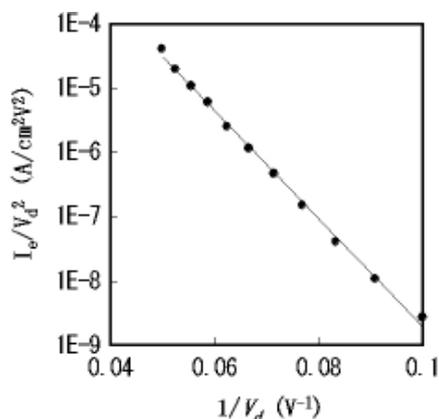


図 4 放出電流密度 - 電圧特性の Fowler-Nordheim プロット

Fig.4 F-N plots obtained from the activated emission characteristics shown in Fig.3.

を支持する結果となっている。

3.2 パルス駆動

次にディスプレイなどに応用する際に用いるパルス駆動での電子放出特性について述べる。図5に活性化後にパルス状の電圧掃引したときの電子放出特性を示す。パルスの周波数，デューティはそれぞれ60Hz，1/120であり，電圧を0.3 V/sで20Vまで掃引して測定を行った。

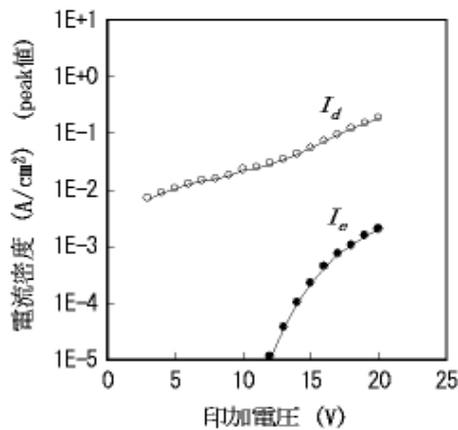


図5 活性化後のパルス駆動における電流電圧特性

Fig.5 Applied voltage (V_d) dependence of diode current (I_d) and emission current (I_e) under a pulsed operation. This dynamic emission has been activated by a dc-operation shown in Fig.3.

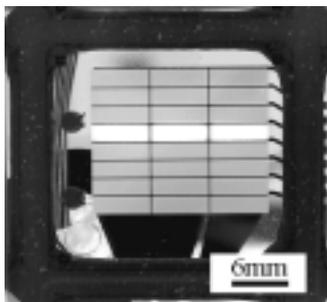


図6 放出電子による蛍光体の発光パターン

Fig.6 Photograph of the emission image pattern observed on the experimental flat panel. The one-line parts are operated without any focusing electrodes.

20Vでの放出電流密度は2mA/cm²であり，ディスプレイへ応用するに十分な電子放出が得られている。放出電子で前面板の蛍光体を発光させた様子を図6に示す。この写真では1ライン(3画素)を選択し電子放出させているが，画素の中では均一で，時間的な揺らぎも小さい発光パターンが得られている。素子基板と前面板の間にはグリッド電極や仕切り板は設けていないが隣接画素へのクロストークは観察されていない。

3.3 長時間駆動における経時変化と再活性化

先のパルス条件での放出電流密度の経時変化を図7に示す。これによると約3000時間で電子放出量が初期の半減となっている。この半減時間に関してはさらなる改善が要求され，今後の課題である。

長時間の駆動における放出電流の劣化のメカニズムを知ることは重要である。この手がかりを得るために経時劣化した素子に対して，再び活性化を行う実験を行った。始めに最初の活性化であるDCでの電圧掃引は25Vで行った。これは後のパルス駆動を25Vで行い，経時劣化を加速させることを意図している。活性化で述べたように，一度活性化した素子では，再び活性化と同じDCでの電圧掃引しても活性化のときに見られた負性抵抗を示さない。このことを確認した後で，周波数60Hz，デューティ1/120，ピーク電圧25Vのパルスを1000時間連続で印加した。放出電流密度は初期の1/5程度まで劣化し，逆に素子電流密度は増加した。この後，パルス駆動を止めて同一の素子に対して再びDCでの電圧掃引を行い，活性化を試みた。このときには再び負性抵抗が確認され，再活性化後のパルス駆動では最初の活性化と同じレベルには到らないものの，放出電流密度が復活した。この実験の様子を図8および図9に示す。これらの結果より素子駆動における劣化は活性化においてSiO_x層のトラップに捕獲された電子が駆動中に発生する局所的な熱により離脱し，表面近傍の強電界が緩和したためというモデルを考えている。再活性化時には離脱したトラップ

に再び電子が捕獲される過程で負性抵抗が観察され、放出電流密度が回復したものと考えられる。すなわち放出電流密度の低下は素子に破壊があったのではなく、状態の変化によるものであり、例えばこの再活性化を利用して素子の長

寿命化を図ることも可能である。

4. 最近のトピックス

放出電流密度はエミッションサイトの密度で制御することができるので電子放出量を増やす

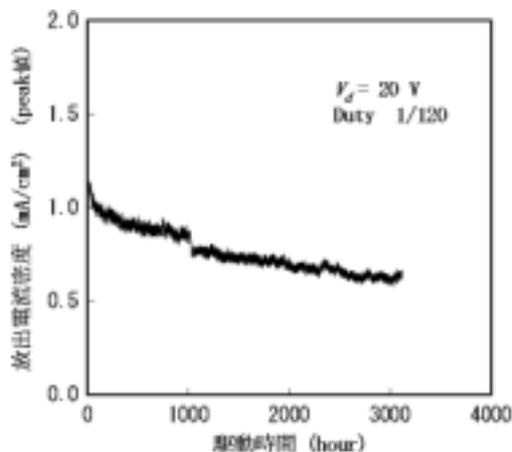
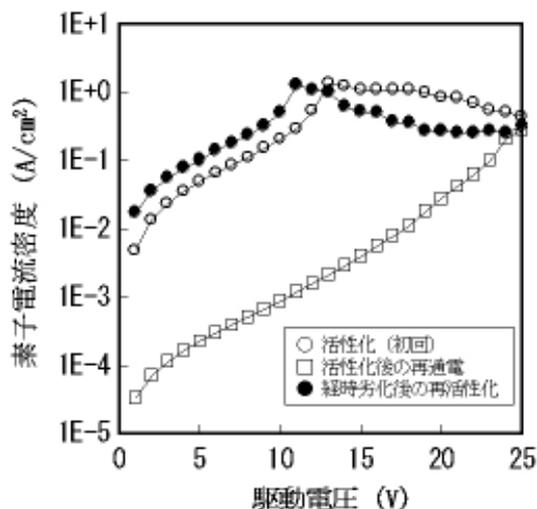


図7 パルス駆動における放出電流密度の経時変化

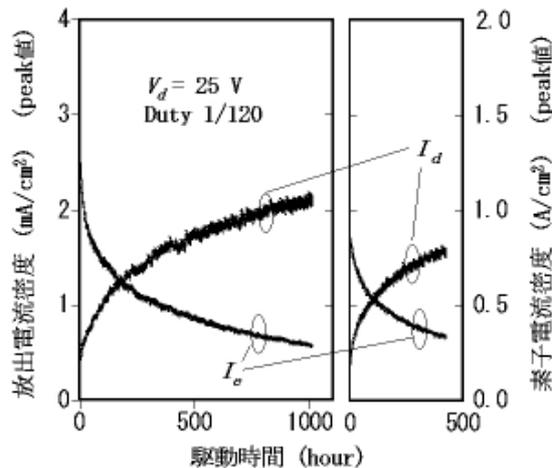
Fig. 7 Time evolution of the emission current under a long-term pulsed operation.



放出電流密度は略し、素子電流密度のみをプロットしてある。活性化後に再度DC通電すると図1で示した降圧時と同じ特性になる。連続通電で劣化させた後にDC通電すると再び負性抵抗が観察され、再活性化することができた。

図8 再活性化実験の電流電圧特性

Fig. 8 Current-voltage curves under a dc operation for activation (○) and reactivation (●) processes. The curve corresponding to the activated diode is denoted by □ plots.



パルス駆動を1011時間行った後,図8に示した再活性化を行い,引き続きパルス駆動での連続通電を行った。最初の連続通電で劣化した放出電流密度 I_e が再活性化により初期の64%まで回復した。

図 9 25 V のパルス駆動中の放出電流密度 I_e と素子電流密度 I_d の経時変化

Fig. 9 Time evolution of the diode current I_d and the corresponding emission current I_e under a pulsed operation. After an operation for 1011 h, the reactivation processing by a dc-operation is introduced. Note that the emission is recovered to 64% of the initial value.

ことは比較的容易にできる。最近では放出電流密度を従来の100倍以上にし,さらに低電圧駆動という特長を生かしてアクティブ駆動型にした素子の開発を試みている。この素子は撮像デバイスへの応用が期待できる。詳細な内容は近日中に発表を行う予定である。

5. まとめ

エミッションサイト構造を持つAdvanced HEED の特性を素子の経時変化を中心に紹介した。素子の構造は非常にシンプルであり,20Vでの駆動,1mA/cm²以上の放出電流,小さい放出電子の角度分散などディスプレイの応用には好ましい条件を兼ね備えている。長時間駆動による素子の劣化の点では改善を要するが,再活性化が可能というユニークな特性も有していることが解った。

HEED はディスプレイへの応用のみならず,最近のトピックスで示した通り高性能な要求にも対応できる電子放出素子である。我々は今後

もHEEDの開発を続け,特長に満ちた製品を世に送り出したいと考えている。

6. 謝辞

本研究を行うにあたり,多くの助言を頂きました東京農工大学の越田信義教授に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- (1)例えば Society for Information Display 2005 International Symposium digest of Technical Papers. Field Emission Display(FED)に関して14件の発表があった。
- (2)難波正和,瀧口吉郎,長田勝玄,宮川和典,渡部俊久,岡崎三郎,江上典文,小原有司,田中満,伊藤茂生,映像情報メディア学会誌 Vol.59 No.3, pp.396-402 (2005).
- (3)T. Matsumoto, H. Mimura, J. Vac. Sci. Technol. B 23, 831(2005).
- (4)C.A. Sipndt, I. Brodie, L. Humphrey, and E.R. Westerberg, J. Appl. Phys. 47, 5248(1976).

- (5) C.A. Mead, J. Appl. Phys. 32, 646 (1961)
- (6) N. Koshida, T. Ozaki, X. Sheng and H. Koyama, Jpn. J. Appl. Phys. 34, L705 (1995).
- (7) N. Koshida, X. Sheng and H. Koyama, Appl. Surf. Sci. 146, 371 (1999).
- (8) N. Negishi, T. Chuman, S. Iwasaki, T. Yoshikasa, H. Ito, and K. Ogasawara, Jpn. J. Appl. Phys., Part 2 36, L939 (1997).
- (9) K. Sakemura, N. Negishi, T. Yamada, H. Satoh, A. Watanabe, T. Yoshikawa, K. Ogasawara, and N. Koshida, J. Vac. Sci. Technol. B 22, 1367 (2004).

筆者紹介

根岸 伸安 (ねぎし のぶやす)

技術開発本部 総合研究所 高機デバイス研究部。光磁気ディスクの開発を経て、現在は電子放出素子の開発に従事。

田中 亮太 (たなか りょうた)

技術開発本部 総合研究所 高機デバイス研究部。入社以来、電子放出素子の開発に従事。

中田 智成 (なかだ ともなり)

技術開発本部 総合研究所 高機デバイス研究部。入社以来、電子放出素子の開発に従事。

酒村 一到 (さけむら かずと)

技術開発本部 総合研究所 高機デバイス研究部。ポリマー二次電池の開発を経て、現在は電子放出素子の開発に従事。

奥田 義行 (おくだ よしゆき)

技術開発本部 総合研究所 高機デバイス研究部。レーザーディスクプレーヤー、有機EL駆動系の開発を経て、現在は電子放出素子の開発に従事。

佐藤 英夫 (さとう ひでお)

技術開発本部 総合研究所 表示デバイス研究部。ロボット、画像認識などの自動化機器の開発を経て、現在は有機半導体および電子放出素子の開発に従事。

渡辺 温 (わたなべ あつし)

技術開発本部 総合研究所 高機デバイス研究部。DAT用磁気ヘッド、青色半導体レーザーの開発を経て、現在は電子放出素子の開発に従事。

吉川 高正 (よしかわ たかまさ)

技術開発本部 総合研究所 高機デバイス研究部。光磁気ディスク、電子放出素子の開発を経て、現在は高機能デバイス研究部部長。

小笠原 清秀 (おがさわら きよひで)

技術開発本部 総合研究所。ハイポリマー振動膜、リボンセンダストヘッド、光磁気ディスク、電子放出素子の開発を経て、現在はHEED担当部長。