

# 真空ナノエレクトロニクスへ進化し続ける**真空管**

From Vacuum Tube to Vacuum Nanoelectronics



中本正幸

## 1. はじめに

真空管は、気密容器内で電子、イオンが運動することにより能動・受動作する電子デバイスである。1883年、エジソンによる熱電子放出現象、いわゆるエジソン効果の発見、1897年、ブラウンによるブラウン管の発明、同年のトムソンによる電子の比電荷測定と電子の発見、1904年、フレミングによる二極真空管の発明、1906年、ド・フォレストによる三極真空管の発明、1920年、バルクハウゼンとクルツによるバルクハウゼン・クルツ振動（BK振動）の発見とマイクロ波管の発明等、19世紀末～20世紀における物理学・電子工学上の重要な発明・発見により真空管は誕生した。エレクトロニクス誕生・発展の基盤となり、半導体デバイスとともに、現代の高度情報通信社会の形成に多大な貢献をした。しかし、熱陰極電子源の熱拡散の影響のため、多数の電子源を集積化・小形化することができず、コンピュータのような多数電子回路を集積した複雑な電子デバイスをはじめ、ほとんどの電子デバイスが、1960年代から半導体デバイスに急速に置き換えられていった。一方、真空管には、電子速度が速い、高絶縁耐圧・大電流密度が得られる、耐温度・耐放射線性等が高いなどの、半導体を凌駕する利点がある。そのため、1970年代に入り、半導体加工技術などを用いて、熱陰極ではなく、冷陰極、主に、電界放出陰極を用いて熱拡散を克服し、サブミクロン～ミクロンサイズの多数の微小な冷陰極を集積化した電界放出陰極アレー（FEA：Field Emission Array）が誕生した<sup>(1)</sup>。近年では、次世代平面ディスプレイとして注目さ

れるフィールドエミッションディスプレイ（FED：Field Emission Display）<sup>(2)</sup>、水銀を用いず環境汚染がなく、平面・異形光源作製可能な一般照明用及び液晶ディスプレイのバックライト用フィールドエミッションランプ（FEL：Field Emission Lamp）<sup>(3)~(5)</sup>、環境・エネルギー問題の高まりとともに注目される真空ナノパワースイッチングデバイス<sup>(6)</sup>、耐環境性を生かした宇宙デバイス<sup>(7)</sup>などの研究開発に用いられ、真空ナノエレクトロニクスといわれる分野が創成された。従来の熱陰極真空管も、大電流密度・大電力の特長を生かして、核融合・放送・通信用進行波管、高周波加熱用マグネトロンなどとして現在も活躍している。本稿では、急速に進展する真空ナノエレクトロニクス、特に、初期より最大の研究開発テーマとなってきたFEDを中心に、その現状と課題、最近の研究開発状況並びに進行波管、マグネトロンなどの技術進展等について述べる。

## 2. 真空ナノエレクトロニクスの概要と基本原理

真空ナノエレクトロニクスでは、前述のとおり、熱陰極の代わりに電界放出陰極アレー（FEA）に高真空中で高電界を印加して、量子力学的なトンネル効果により電子を引き出す。その基本構造を図1に示す。高電界を印加し、エミッタ先端の電界強度が $10^6 \sim 10^7 \text{V/cm}$ 程度になると、図2に示すように表面のポテンシャル障壁層が約10nm以下と薄くなり、エミッタ内の電子がこの障壁層を、FowlerとNordheimにより定式化された量子力学的トンネル効果により透過し真空中に放出される。主に次の利点を用いられる。

- (1) 格子散乱による電子の速度低下がなく、原理的には光速まで加速可能で、26Vの加速電圧で

中本正幸 正員 静岡大学電子工学研究所  
E-mail m-nakamoto@rie.shizuoka.ac.jp  
Masayuki NAKAMOTO, Member (Research Institute of Electronics, Shizuoka University, Hamamatsu-shi, 432-8011 Japan).  
電子情報通信学会誌 Vol.93 No.1 pp.23-28 2010年1月  
©電子情報通信学会 2010

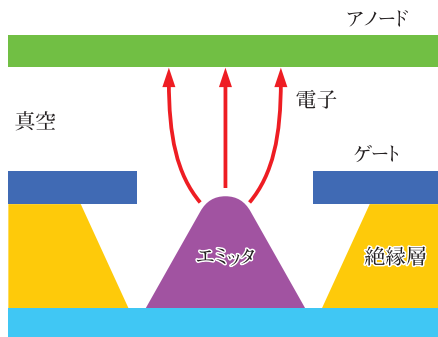


図1 電界放出陰極アレー (FEA) の基本構造

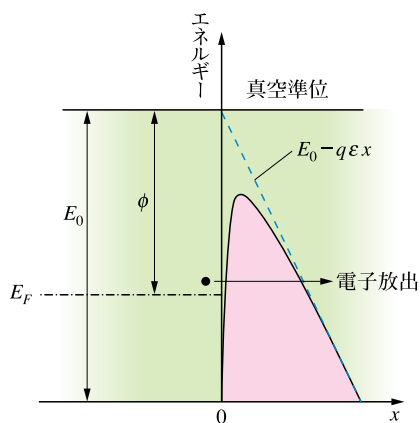


図2 電界電子放出のエネルギーバンド図

も光速の十分の一に達する。

- (2) 主要キャリアが電子だけであり、デバイス設計が容易。
- (3) 電磁気学的収束・偏向などにより、電子ビームを容易に制御可能。
- (4) 真空は、高い絶縁耐圧性を持つとともに格子散乱などによるエネルギー損失がなく、高効率動作が可能。
- (5) 金属・絶縁体のみで構成することが可能なため、耐温度・耐放射線性に優れる。

(6) フェルミレベル近傍から真空へ放出されるため電子のエネルギーがそろっている。

(7) 構造・材料自由度が高く、MEMS技術等を用いて高機能デバイス創造が期待できる。

前記(1)~(3)並びに(6)から、超高速・電子ビームデバイス、また、(4)から、5階建てビルディングの高さにもなる現在の電力変換設備の大きさを約1/100に、すなわち、直径約1m、高さ数十cmの大きさにまで小形化を可能とする筆者提案の真空ナノパワースイッチングデバイス<sup>(7)</sup>、更に、(5)及び(7)より、高温、高放射線等の極限環境下でも利用可能な宇宙デバイス<sup>(8)</sup>等への応用が研究されてきた。しかし、初期より研究開発の中心を担ってきたデバイスはFEDである。真空ナノエレクトロニクスの主な研究課題は、(1)高効率・高信頼性FEAに関する課題、(a)破壊、電流変動が少なく、均一に電界電子放出するFEA開発、(b)大面積で低価格のFEA実現、(c)デバイス仕様を満たす電界放出電流が得られるFEA、(2)真空きょう体・スペーサに関する課題、(3)低加速電圧・高輝度蛍光体材料の開発などに大別される。最大の課題は、(1)であり、高効率・高信頼性安定動作のFEA及びそれらを用いたFEDに、研究開発の大部分が集約されてきた。

### 3. フィールドエミッションディスプレイ

#### 3.1 FEDの構成と基本原理

FEDでは、電界放出電子を陽極-陰極間に印加した電圧で加速し、陽極上のRGB蛍光体画素を逐次発光させて画像を表示する。代表的なFEDの構成を図3に示す。CRT (Cathode Ray Tube, 陰極線管) に比べて高精細性、高輝度性の点で優れる。FEDの特長は、(1)自発光形であり、広視野角、(2)高速応答が可能( $\mu\text{s}$ オーダー)で、残像のない滑らかな動画像が得られる、(3)耐環境性に優れる、(4)高輝度、高精細、(5)画像ひ

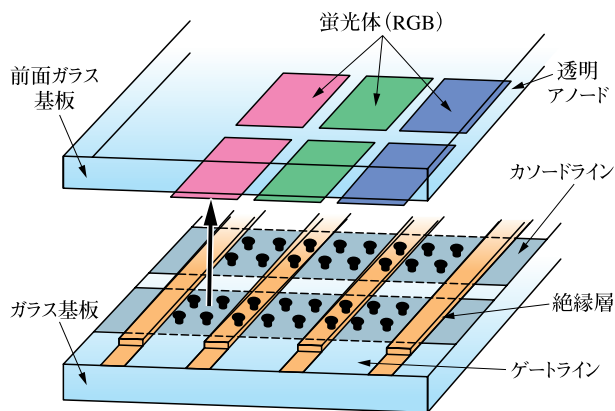


図3 FEDの基本構成

フルカラーFEDの構造

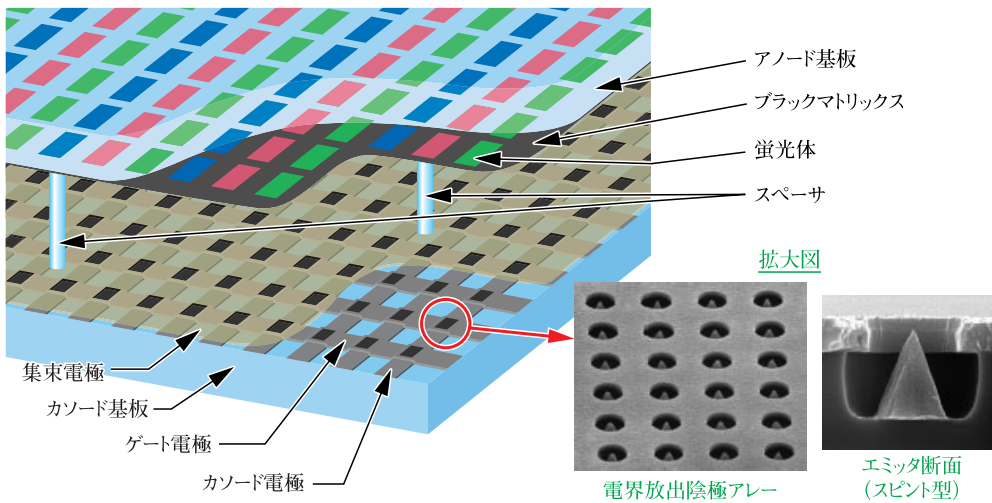


図4 回転蒸着法エミッタを用いた11.3インチFEDのパネル構造



図5 回転蒸着法エミッタを用いた14.4インチFED

ずみが少ない, (6) 低消費電力, (7) バックライトによる漏れ光やプラズマ維持の予備放電による発光がないため, 純粋な黒表示が容易, (8) ピーク輝度も高く10万対1以上の高コントラスト, (9) 低輝度でも色度点が変わらず色再現性が良好, (10) 「ホールド型表示」のLCD, 有機EL等とは異なり, FEDは一瞬発光して直ちに消えるインパルス型表示のため輪郭ぼやけがない, などが挙げられる.

### 3.2 回転蒸着法 (Spindt 法) FEA を用いた FED

FEAには, 大別して, 縦形構造と横形構造の2種類ある. 縦形構造の一種である回転蒸着法 (Spindt 法) FEA<sup>(1)</sup>は, 世界最初のFED<sup>(2)</sup>に用いられ, 大部分のFEDは回転蒸着法FEAを用いている. エミッタの破壊・電界電子放出特性の不均一性・非安定性・劣化, 更にはステッパ等の使用による高コスト, また, 大面積化

が困難という課題があるが, 図4に示す構造の11.3インチ, VGA, フルカラーのFEDが発表された<sup>(8)</sup>. 加速電圧を3kVに増加させ, 発光効率の高い蛍光体の使用を可能とし, 輝度350cd/m<sup>2</sup>, 消費電力11WのFEDを実現した. 車載モニタとして, 600cd/m<sup>2</sup>, 消費電力4Wの3インチFEDの量産化<sup>(7)</sup>. また, 図5に示す3kV加速で400cd/m<sup>2</sup>の14.4インチFEDも発表された<sup>(9)</sup>. 更に, 2008年, エミッタ基底部直径を約130nmと小さくしたSpindt型FEAを用いて, 240Hz高速駆動が可能で動画像ぼけのない, 400cd/m<sup>2</sup>の放送局モニタ用高画質19.2インチFEDが発表されるまでに至った<sup>(10)</sup>.

### 3.3 新しいFEAを用いたFED

回転蒸着法FEAの場合には, エミッタの先鋭性・均一性などが課題であり, 20~60インチサイズのプロトタイプも発表されていない. 近年では, 均一性・再現性に優れた低電圧駆動の先鋭エミッタが得られ, 大面積化も可能な転写モールド法FEA及び, それを進展させ, 真空プロセス不要, 大面積で, ナノメートルオーダの先鋭度が得られる金型転写モールド法が発表された<sup>(11)~(13)</sup>. 真空ナノデバイスの実現に重要な, ナノメートルオーダで任意にエミッタ先端曲率半径を変化させ, 駆動電圧を任意に制御することも可能になった<sup>(7)</sup>. カーボンナノチューブ (CNT) FEAは, 化学的に安定で, 低真空動作が期待されるため, 研究が激増している<sup>(14), (15)</sup>. 長さが10μmを越え, 直径が5~50nmと小さく, 低電圧駆動が期待される. 図6に示す高解像度のキャラクタディスプレイ用FED<sup>(16)</sup>が開発された. また, 筆者らが発表したFEL用高輝度緑色発光蛍光体SrGa<sub>2</sub>S<sub>4</sub>:Eu<sup>(5)</sup>を, 従来のブラウン管用緑色発光蛍光体ZnS:Cu, Alの代わりに用いたFEDが発表され<sup>(17)</sup>, 600cd/m<sup>2</sup>, 7.7lm/Wの





図6 高解像度キャラクタディスプレイ用 CNTFED ピクセルピッチ：1.8mm，ディスプレイエリア：57.6mm×460.8mm.

高効率を得た。有望な FED の一つであるが、発光が不均一で、CNT の破壊もあり、高効率・安定 CNTFEA 作製法、大面積・低価格化等が、今後の CNTFED の課題である。

横形構造では、Surface-conduction Electron-emitter Display (SED, 表面伝導エミッタ形ディスプレイ)がある<sup>(18),(19)</sup>。図7に示すように、粒径5~10nmの超微粒子酸化パラジウム薄膜に、通電溶融による裂け目(ギャップ：ナノメートルオーダー)を生じさせ、エミッタ及びゲートとして用いて電子を引き出し、約10kVをアノードに印加、450cd/m<sup>2</sup>、コントラスト10万：1、55インチフルHD(1,920×1,080画素)のプロトタイプを試作している<sup>(19)</sup>。印刷法で形成できるため、大画面FED形成に向き低コスト等、様々な利点を持っている。

自発光で広視野角、低消費電力で、高精細、小~大画面まで作製可能、また、広い動作温度領域を持つFEDは、次世代平面ディスプレイとして高いポテンシャルを持っている。解決すべき技術課題は数多くあるが、FEDの量産も開始された。高度情報化社会を担う、高品質ディスプレイの実現が期待される。

#### 4. フィールドエミッションランプ (FEL)

FELは、FEA基板と蛍光体を塗布したアノード基板を真空容器中に対向させ、電子を加速して蛍光体を励起

発光させる光源である。その特長は(1)水銀不使用、(2)平面発光・前面発光が可能で、管形蛍光ランプの実効全光束が表示全光束よりも大幅に低い(30~70%減)のに比較して実効全光束と全光束がほぼ等しい、(3)平面、管形以外の異形光源(曲面等)が可能、(4)温度変化・湿度に強い、(5)X-Yマトリックス形成不要でエミッタ欠陥の許容率が高く、低コストなどの特長を持つ。筆者は、低環境負荷の次世代照明としてFELを1991年より提唱<sup>(11)</sup>、研究を開始し、水銀レス光源としては初めて既存の蛍光ランプと同等の実効発光効率約40lm/Wを持つ一般照明用プロトタイプを開発した<sup>(4)</sup>。また、高効率発光蛍光体及び局所調光可能な水銀レス面発光光源も開発し、初めて既存の蛍光ランプを越える液晶バックライト性能を達成した<sup>(5)</sup>。ここ数年、韓国、台湾を中心にFEL研究が急激に活発化している<sup>(20)</sup>。

#### 5. マグネトロン

マグネトロンは、1921年に、アルバート・ハルによって発明され、カソードと円筒形アノードを持ち、その管軸方向に磁界を加えた二極管である。1927年に、岡部金治郎はアノード円筒を分割し、第二種電子振動と呼ばれる新しい振動を見だし、現在、広く用いられる多分割アノード形マグネトロンを開発した。図8にマグネトロンの基本構成とその原理を示す。中心軸にあるカソードから放出された電子は、磁界によりローレンツ力が働き曲げられる。磁界を強くすると電子はアノードには到達せずにトロコイド式軌道を描き、カソード周囲を回転しながら周回する。電子は分割電極片に順次電荷を誘導し、周期とアノード分割片の数に応じた振動数のマイクロ波を発生する。第2次世界大戦中にレーダの誕生に多大な貢献をした。1945年に、マイクロ波により食物(ポップコーン、鶏卵)が加熱されることが発見され、1953

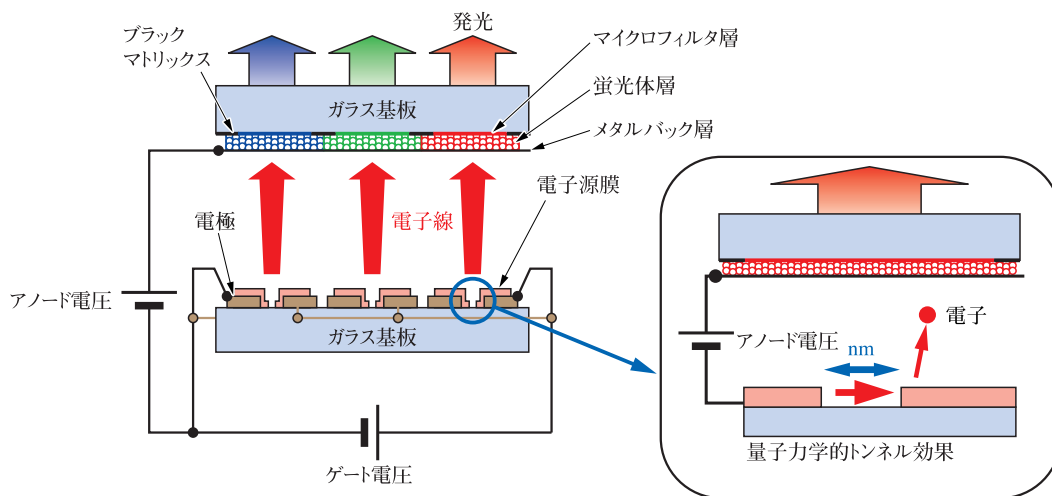


図7 SEDの基本構造

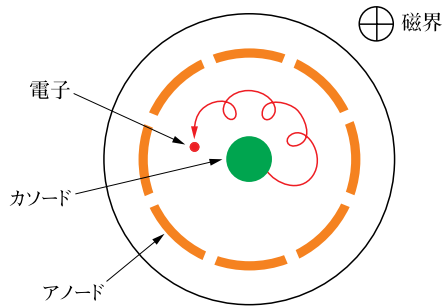


図8 マグネトロンの基本構成とその原理 中心軸のアノードから放出された電子は強磁界印加により、ローレンツ力により曲げられる。電子はアノードには到達せず、カソードの周囲を回転しながら周回し分割電極片に電荷を誘導し分極片の数に応じた振動数のマイクロ波を発生させる。

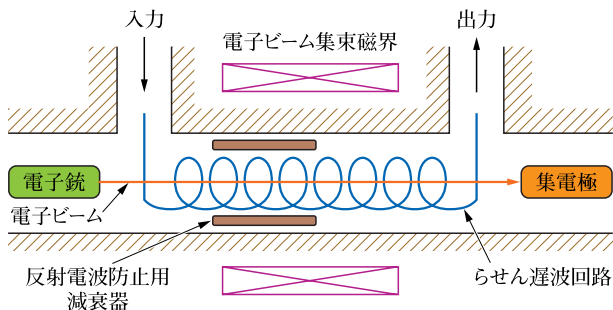


図9 進行波管の基本構成とその原理 真空中において電子銃から放出された電子ビームの速度が同方向に進むらせん遅波回路により減速された電磁波の速度とほぼ等しい場合に電子ビームと電磁波の間に生じる相互作用を利用してマイクロ波が増幅される。増幅出力は集電極に集められる。

年に電子レンジが実用化された。現在、ほとんどのマグネトロンは電子レンジ用である。出力効率向上のためには資源枯渇が懸念される希土類磁石が必要であったが、新たな磁気回路設計により従来の磁石でも1.2倍の磁束、6%の出力効率向上が得られる<sup>(21)</sup>など、現在も開発が進められている。価格完成度が高く、筆者も1990年代前半に検討はしたが、真空ナノエレクトロニクスの応用はほとんど試みられていない。

## 6. 進行波管

1942年に、コンフナーは進行波管(TWT: Traveling Wave Tube)を考案し、1947年に理論が確立された。図9に、進行波管の基本構成とその原理を示す。電子銃と高周波の移相速度を遅くするらせん遅波回路、電子ビームを遅波回路全長にわたり集束させる電子ビーム集束磁界、及び集電極で構成される。電子銃から放出された電子ビームの速度が、同方向に進むらせん遅波回路により減速された電磁波の速度とほぼ等しい場合に、電子ビームと電磁波間に生じる相互作用を利用してマイクロ波を増幅する。通信・放送用、特に衛星通信用、レーダ用として用いられた。省エネルギー、立ち上げ時間の低減、小形化が得られるため、真空ナノエレクトロニクス

の応用が開始され、周波数11.5GHzで出力28.2W、効率約10%<sup>(22)</sup>や、周波数4GHzで出力45W、効率25%<sup>(23)</sup>の進行波管が試作されている。

## 7. おわりに

真空管は、エレクトロニクス誕生・発展の基盤となり、現代の高度情報通信社会を形成した。熱陰極を用いた従来の真空管は、大部分が半導体デバイスに置き換えられ、代表的な真空管であるブラウン管も姿を消しつつある。しかし、半導体デバイスでは困難な高出力電子デバイスでは、マグネトロンや進行波管などが現在も活躍している。一方、MEMS技術などを利用し、集積化・小形化の障害であった熱陰極ではなく冷陰極を用いた真空ナノエレクトロニクスが誕生・発展しつつある。高絶縁耐圧・大電流密度が得られる、耐温度・耐放射線性等が高いなどの半導体デバイスを凌駕する利点を持ち、21世紀のグリーンエレクトロニクスの発展に多大な貢献をすることが期待される。

## 文 献

- (1) 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.
- (2) R. Meyer, A. Ghis, P. Rambaud, and F. Muller, "Microtips fluorescent displays," Japan Display 86 Tech. Digest, pp.513-515, 1986.
- (3) M. Nakamoto, H. Kominami, Y. Nakanishi, Y. Takigawa, Y. Ohgi, H. Hiraki, and M. Haba, "White color flat field emission lamps for high quality general lighting," IDW '05 Tech. Digest, pp.1997-1998, 2005.
- (4) M. Nakamoto, K. Shiratori, G. Sato, H. Kominami, Y. Nakanishi, H. Hiraki, and M. Haba, "White color flat field emission lamps with newly developed high luminance green phosphor," IDW '07 Tech. Digest, pp.1349-1352, 2007.
- (5) H.X. Wang, H. Harazono, N. Jiang, H. Hiraki, Y. Harada, M. Haba, and M. Nakamoto, "Fabrication of high brightness flat field emission lamp with 6kV anode voltage for local dimming LCD BLU," SID '08 Tech.Digest, pp.74-77, 2008.
- (6) M. Nakamoto, T. Hasegawa, and K. Fukuda, "Uniform, stable and high integrated field emitter arrays for high performance displays and vacuum microelectronic switching devices," International Electron Devices Meeting, Tech. Digest, pp.717-720, 1997.
- (7) M. Nakamoto, J. Moon, and K. Shiratori, "Low work function nanometer-order controlled transfer mold field emitter arrays," IVMC '09 Tech. Digest, pp.29-30, 2009.
- (8) K. Sakurada, M. Kitada, T. Niiyama, M. Namikawa, Y. Takeya, and M. Tanaka, "Development of high resolution Spindt-type FED," IDW '06 Tech. Digest, pp.1805-1808, 2006.
- (9) S. Itoh, M. Tanaka, T. Tonegawa, M. Taniguchi, K. Tamura, Y. Marushima, Y. Fujimura, M. Namikawa, Y. Naito, F. Kataoka, K. Nawamaki, Y. Kubo, T. Niiyama, Y. Takeya, K. Deguchi, S. Kawata, Y. Sato, and T. Yamaura, "Development of field emission displays (FEDs)," IDW '06 Tech. Digest, pp.1821-1824, 2006.
- (10) Y. Iguchi, H. Kenmotsu, Y. Hatano, Y. Kato, S. Kanagawa, T. Ishii, S. Okanan, T. Kosugi, H. Ikeda, and K. Kokubu, "Technologies and prospects of fine pitch field emission display monitor," SID '08 Tech. Digest, pp.58-61, 2008.

- (11) M. Nakamoto, T. Ono, and Y. Nakamura, "Fabrication of field emitter arrays by transfer mold technique," IVMC '93 Tech. Digest, Late News, no.28, pp.1-3, 1993.
- (12) M. Nakamoto, T. Hasegawa, T. Ono, T. Sakai, and N. Sakuma, "Low operation voltage field emitter arrays using low work function materials fabricated by transfer mold technique," International Electron Devices Meeting, Tech. Digest, pp.297-300, 1996.
- (13) M. Nakamoto, K. Fukuda, A. Inoue, F. Takahashi, and S. Honda, "Low operation voltage high integrated field emitter arrays by transfer metal mold technique using ultra precision machining and super micro electroplating technology," International Electron Devices Meeting, Tech. Digest, pp.423-426, 2000.
- (14) S. Uemura, T. Nagasako, J. Yotani, T. Shimojo, and Y. Saito, "Carbon nanotube FED elements," SID '98 Tech. Digest, pp.1052-1055, 1998.
- (15) J. Yotani, S. Uemura, T. Nagasako, H. Kurachi, H. Yamada, T. Ezaki, and T. Maesoba, "High-luminance triode panel structure for large size CNT FED," IDW '01 Tech. Digest, pp.1209-1212, 2001.
- (16) S. Uemura, H. Kurachi, J. Yotani, T. Nagasako, T. Nakao, M. Ito, A. Sakurai, M. Kajiwara, K. Sato, and Y. Saito, "Improvements of color CNT-FED character-displays," SID '09 Tech. Digest, pp.46-49, 2009.
- (17) E.J. Chi, C.H. Chang, J.H. Park, C.G. Lee, C.H. Lee, S.J. Yoo, Y.C. You, D.S. Zang, and D.H. Choe, "Recent improvements in brightness and color gamut of carbon nanotube field emission display," SID '06 Tech. Digest, pp.1841-1844, 2006.
- (18) T. Oguchi, E. Yamaguchi, K. Sasaki, K. Suzuki, S. Uzawa, and K. Hatanaka, "A 36-inch surface-conduction electron-emitter display (SED)," SID '05 Tech. Digest, pp.1929-1931, 2005.
- (19) K. Yamamoto, I. Nomura, K. Yamazaki, S. Uzawa, and K. Hatanaka, "Fabrication and characterization of surface conduction electron emitters," SID '05 Tech. Digest, pp.1933-1935, 2005.
- (20) Y.C. Kim, H.J. Kim, I.T. Han, Y.H. Kim, and J.M. Kim, "Development of carbon nanotube field emitters in the backlight for liquid crystal display," IVMC '09 Tech. Digest, pp.49-50, 2009.
- (21) 森 英男, "電子デバイス・材料," 東芝レビュー, vol.63, no.3, pp.53-54, 2008.
- (22) H. Makishima, S. Miyano, H. Imura, J. Matsuoka, H. Takemura, and A. Okamoto, "Design and performance of traveling-wave tubes using field emitter array cathodes," Appl.Surf. Sci., vol.146, no.1-4, pp.230-233, 1999.
- (23) D. Whaley, R. Duggal, C. Armstrong, C. Bellow, C. Holland, and C. Spindt, "Operation of a low-voltage high-transconductance field-emitter-array TWT," IVEC '08 Tech. Digest, pp.78-79, 2008.

(平成 21 年 8 月 31 日受付 平成 21 年 9 月 30 日最終受付)



なかもと まさゆき  
中本 正幸 (正員)

1977 横浜国大大学院工学研究科修士課程了。同年(株)東芝に入社。2004 東芝研究開発センター定年扱退職。同年、静岡大電子工学研究所教授就任。1986-1988 米国 MIT 客員教授。工博。三波長形蛍光ランプ用希土類蛍光体及び同ランプ(商品名メロウルック)、現在広く用いられている焦電形赤外線センサ並びに三次元超音波検査装置を開発。真空ナノテクノロジー、核融合炉用耐環境素子、カーボンナノチューブ、MEMS、宇宙デバイス等の研究に従事。1983-1989 The Electrochemical Society の日本人初の Symposium Chairman, Society for Information Display (SID) の FED 委員会委員長, International Display Workshop (IDW) の MEMS Workshop 委員長, 日本 MIT 会理事。