ナノクリсталシリコンを用いた弾道電子面放出型電子源 (BSD) のフラットパネルディスプレイへの応用

菰 田 卓 哉*

*松下電工(株) (〒571-8686 大阪府門真市門真 1048)

Ballistic Electron Surface-Emitting Device (BSD) Based on Nano-Crystalline Silicon and Its Application to Flat Panel Display

Takuya KOMODA*

*Matsushita Electric Works, Ltd. (1048, Kadoma, Kadoma-shi, Osaka 571-8686)

Key Words : Nano-Crystalline Silicon, Ballistic Electron, Cold Cathode, FPD

1. はじめに

近年、従来の技術が抱えてきたさまざまな限界をブレイクスルーできる可能性を持ったキーテクノロジーとして、ナノテクノロジーへの期待が非常に高まってきている。その中でも量子サイズのナノクリсталシリコンは、この分野において比較的早くから多くの研究がなされてきた材料の一つである。たとえばナノクリсталシリコンは、バルクシリコンとは大きく異なる物理現象、たとえばその強い閉じ込め効果に起因したバンドギャップの増大がもたらす、室温での可視フォトルミネッセンス¹⁾やエレクトロルミネッセンス現象²⁾を示す。このため、従来の定説であった、間接遷移型のシリコンでは困難と考えられていた、シリコンのオプトエレクトロニクスへの応用を開くものとして、この材料に対して大きな期待が寄せられている。

しかし、ナノクリсталシリコンは、単にこのような発光現象にとどまらず、さまざまな新しい物理現象にともなう新機能を持つことが、最近になって次々と明らかにされてきた³⁾。筆者は、それら新現象、新機能の内、固体中での弾道電子伝導現象^{4),5)}という、量子サイズのナノクリсталシリコン特有の現象に着目し、その現象がもたらす弾道電子放出機能を利用した弾道電子面放出型電子源 (Ballistic electron Surface-emitting Device : BSD) を開発した^{6)~9)}。これは、Spindt 型を代表とする従来の冷陰極電子源^{10)~12)}とはまったく異なる動作原理、構造および特長を持つ冷陰極電子源である。BSD は、従来の冷陰極電子源では困難であった低電圧駆動、低真空下での動作、収束電極不要、面電子放出、低プロセスコスト、大型化などを実現できる技術であることから、一躍脚光を浴びるようになってきた^{13),14)}。

本稿では、これら BSD の構造と動作原理およびその作製法について述べるとともに、BSD を用いたフラットパネルディスプレイ (FPD) への応用について、筆者のグループで開発中の例を紹介し、液晶ディスプレイ (LCD) やプラズマ

ディスプレイパネル (PDP) に代わる 21 世紀の次世代 FPD の候補として非常に有望であることを述べる。

2. 弾道電子面放出型電子源 BSD

2. 1 構造と動作原理

BSD の基本的な構造モデルを図 1 に示す。柱状のポリシリコングレインの間に、ナノサイズのシリコン微結晶であるナノクリсталシリコン層からなる電子のドリフト層が、下部電極と表面電極間にサンドイッチされた構造をしている。このポリシリコンとナノクリсталシリコン層との混在システムの部分を NPS 層 (Nanocrystalline Poly-Silicon Layer) と呼ぶ。NPS 層中のドリフト層では、多数のナノクリсталシリコンが、厚み方向にチェーン状に連なっている。

NPS 層から構成された BSD の動作原理は、まず、電子が熱励起によって下部電極から NPS 層に注入される。ナノクリсталシリコンの表面は、後述する低温酸化プロセスで形成された薄い酸化膜によって覆われており、下部電極と表面電極間に印加した電圧の大部分はその各ナノクリсталシリコン表面の薄い酸化膜にかかり、強電界領域を形成することになる。この酸化膜は大変薄いため、電子は容易にトンネルして通過し、次のナノクリсталシリコンに注入される。ナノクリсталシリコンのサイズは、5 nm 以下と単結晶シリコン中の電子の平均自由行程である 50 nm と比較してはるかに小さい。よって、注入された電子は、ナノクリсталシリコン中の原子とほとんど衝突することなく、次の表面酸化膜に到達する。そこで再び強電界領域の酸化膜をトンネル通過し、次のナノクリсталシリコンに注入される。このように、エネルギーをロスすることなく表面方向に向かって繰り返し電子が移動するため、表面付近に到達した電子は、熱平衡状態よりかなり高い運動エネルギーを持ち、表面電極をもトンネルして真空中に放出される。

実際に真空中に放出された電子のエネルギー分布を図 2 に示す。図からわかるように、マクスウェル分布とはまったく

図1 BSDの基本構造モデル図

図2 BSDの放出電子エネルギー分布

違うエネルギー分布を示す。従来の冷陰極電子源に比較して非常に高い電子エネルギーを持っていることが理解される。また、電子エネルギーの最大値 E_{max} は、印加した電圧 V_{ps} から表面電極金属の仕事関数分を引いた値にほぼ一致する。さらに、常温では NPS 層中での多少の衝突があると考えられるので、引加した電圧がそのまま電子のエネルギーに転嫁されず、分布の最多電子数のエネルギー値 E_p は最大値 E_{max} の約 60% である。しかも、これらの電子エネルギーの最大値 E_{max} と最多電子数のエネルギー値 E_p は、印加電圧 V_{ps} に強く依存し、 V_{ps} の増加とともに E_{max} と E_p もともに高エネルギー側にシフトしてゆく。これらの測定結果から、NPS 層で電子は固体中にも関わらず、あたかも真空中の電子とはほぼ同様の振る舞い(弾道電子伝導現象)を示すという、通常の固体では決して起こらない、量子サイズのナノクリスタルシリコンなればこそこの現象が発現していると考えられる。そして、BSD は、この弾道電子伝導現象で生み出されたホットな電子を活用している(弾道電子放出型)という意味で、これまで知られている、どのタイプの冷陰極電子源とも異なる、まったく新規な固体電子源である。

2. 2 BSD の作製法

BSD の作製方法には、いくつかのバリエーションが存在するが、ここでは、ガラス基板上にオール低温プロセスで形

成する場合の工程について説明する。まず、ガラス基板上に下部電極を形成する。その上部にポリシリコン層を約 1.5 μm 形成する。このポリシリコン層に対し、50 wt% フッ化水素水溶液とエタノールを 1 : 1 に混合した電解液中で、光照射しながら白金電極を負極、ポリシリコン層を正極として陽極酸化処理を行う。この陽極酸化処理によって、ナノサイズ (5 nm 以下) の微結晶シリコンからなる NPS 層が形成される。特にポリシリコンを用いた場合には、ポリシリコンの結晶粒界部分では結晶のグレイン部分より早く反応が起こるので、この陽極酸化処理によって、柱状のポリシリコン結晶表面にナノクリスタルシリコンが支配的に形成されると考えられる。その結果、前項に記載したような、ナノクリスタルシリコンに比べてより巨大な柱状のシリコン結晶粒が多く残留した NPS 層が形成される。洗浄後、電解液を硫酸溶液に交換し、陽極酸化処理と同じく電圧を印加して、ナノクリスタルシリコンの表面に薄い酸化膜を形成する(これを電気化学酸化プロセス: Electrochemical Oxidation (ECO) プロセスと呼ぶ)。

NPS 層の形成の鍵を握るこの陽極酸化処理と ECO プロセスとは、一つの装置の中で一連のプロセスとして実現できる。このプロセス自体は、液相でのプロセスであるので、基板の大きさにはほとんど制限がなく、大型化が容易に実現できる。また、プロセスは加熱を必要とせず常温で行われ、プロセス時間も極めて短いため低コストでの生産が期待できる。これらの点は、後で述べるようなディスプレイへの応用を考えた場合、非常に好都合であり、BSD はナノクリスタルシリコンというナノテクノロジーをベースとした技術にも関わらず、実用化が容易な技術であると考えている。

この後、表面に金属薄膜(厚さ約 10 nm)を蒸着し、これをパターニングして表面電極とすることで BSD が完成する。

2. 3 BSD の特性

図 3 に、ガラス基板上に作製した代表的な BSD の電圧電流特性を示す。電子放出は、表面電極側を正極として電圧を印加した場合にのみ観測される。約 6 V から電子放出(エミッション電流 I_e)が観測されはじめ、印加電圧 V_{ps} の増大とともにエミッション電流 I_e は増加してゆき、印加電圧 V_{ps} が 16 V の時、最大 1.3 mA/cm² のエミッション電流 I_e と 1.5% のエミッション効率 η (エミッション電流 I_e を BSD

に流した電流 I_{ps} で割った値)が得られた。これらの値は、他の冷陰極電子源と比べても遜色がない上に、動作電圧が低いという特長もあり、ディスプレイへの応用に必要な画面輝度、消費電力を考えても充分満足できるものである。

BSD の特筆すべき電子放出特性としては、(1) 放出電流が電子源と垂直に放出され広がらない、(2) エミッション電流の経時変化に、いわゆるフリッカノイズと呼ばれるスパイク状の変化がない、(3) 動作雰囲気気の真空度を 10 Pa 程度まで落としても、エミッション電流密度はほとんど変わらず、真空度が悪い状態においても良好な電子放出特性を維持し続ける、などがあり、このようなエミッション電流特性は、従来の Spindt 型電子源などにおいては、外部回路などの付加なしでは得るのが難しい。

また、BSD の電子放出は BSD の電子源表面からほぼ全面にわたって均一に起こる。従来の Spindt 型電子源の電子放出は、不均一な点状であることが知られており¹⁵⁾、この点でも BSD は電子源として望ましい性質を持っていると言える。なお、このように表面全体から電子放出が生じるところから、面放出型と名付けた。

3. BSD のフラットパネルディスプレイへの応用

冷陰極電子源を用いて蛍光体を発光させるタイプのディスプレイは、発光原理そのものが CRT と同じであり、CRT と同様の動画性能やコントラストを実現できる高画質のディ

スプレイとして期待されている。しかも、消費電力の点でも、極めて低消費電力化が図れると試算されているなど¹⁶⁾、これからの環境問題を考える上でも次世代の FPD であると言える。そこで、これまで述べてきた BSD 電子源の数々の特長を生かすべく、FPD への応用可能性を調べるため、対角 2.6 インチで、168(RGB)×126 画素のプロトタイプフルカラー-BSD ディスプレイパネルを世界で初めて試作した。画素サイズは約 300 μm 角(約 80 dpi)である。前述したプロセスにより、ガラス基板上に BSD を形成し、スペーサを介して、P 22 蛍光体を塗布した前面パネルをはりつけ、ディスプレイパネルを試作した。蛍光体と BSD の表面電極との間に 6 kV の DC 電圧を印加することで放出電子を加速し、蛍光体を加速電子によって衝突励起発光させる。前面パネルと BSD との間隔は 3 mm とし、放出電子収束用のグリッド電極は設置していない。

図 4 に試作したディスプレイパネルの外観およびその発光パターンを示す。各画素は面内で均一に発光していることが分る。電極間距離 3 mm において、収束電極なしで放出電子が偏向を受けず、カソード面にはほぼ垂直に平行を保ったまま進行していると推測される。この特性は画素の高精細化やパネルの大面积化、パネル構造の簡素化、コストダウンなどの点で極めて優位な特徴である。また、発光にちらつきなどもなく、LCD とは違い通常の NTSC 信号での動画再生にも問題なく追従できている。もちろん、視野角依存性も LCD に比べ問題なく小さい。

4. ま と め

ナノクリスタルシリコンをベース材料に、ナノ構造が奏でる新しい現象、機能を活用した新しい冷陰極電子源である BSD について紹介した。BSD は、従来の電子源が抱えていた数々の欠点をカバーでき、CRT 並みの高画質と低消費電力を兼ね備えた FPD への応用が期待される。この BSD を応用した FPD は、LCD や PDP といった既存の FPD に代わる、21 世紀の次世代 FPD として、近い将来必ず実現されるものと考ええる。

(2002-9-2 受理)

図3 代表的な BSD の V-I 特性

外観

発光パターン

図4 試作したパネルの外観と発光パターン

文 献

1) L. T. Canham ; *Appl. Phys. Lett.*, **57**, 1046 (1990)

2) N. Koshida and H. Koyama ; *Appl. Phys. Lett.*, **60**, 347 (1992)

3) 越田信義 ; 応用物理, **69**, 792 (2000)

4) N. Koshida, T. Ozaki, X. Sheng and H. Koyama ; *Jpn. J. Appl. Phys.*, **34**, L 705 (1995)

5) T. Komoda, X. Sheng and N. Koshida ; *J. Vac. Sci. & Technol.*, **B 17**, 1076 (1999)

6) T. Komoda, Y. Honda, T. Hatai, Y. Watabe, T. Ichihara, K. Aizawa, Y. Kondo, X. Sheng, A. Kojima and N. Koshida ; Proc. 6th Int. Display Workshops (IDW'99), FED 3-2, 939 (1999)

7) T. Komoda, Y. Honda, T. Hatai, Y. Watabe, T. Ichihara, K. Aizawa, Y. Kondo and N. Koshida ; 2000 Society for Information Display International Symposium Digest of Technical Papers (SID'00), XXXI, 28.4, 428 (2000)

8) T. Komoda, Y. Honda, T. Hatai, Y. Watabe, T. Ichihara, K. Aizawa, and N. Koshida ; 2001 Society for Information Display International Symposium Digest of Technical Papers (SID'01), XXXII, 14.1, 188 (2001)

9) T. Komoda, Y. Honda, T. Ichihara, T. Hatai, Y. Takegawa, Y. Watabe, K. Aizawa, V. Vezin and N. Koshida ; 2002 Society for Information Display International Symposium Digest of Technical Papers (SID'02), XXXIII, 39.3, 1128 (2002)

10) C. A. Spindt ; *J. Appl. Phys.*, **39**, 3504 (1968)

11) 山口英司, 畑中勝則, 中桐孝志 ; 月刊ディスプレイ, **4**, 25 (1998)

12) T. Kusunoki, M. Sagawa, M. Suzuki, A. Ishizaka and K. Tsuji ; Proc. 7th Int. Display Workshops (IDW'00), FED 2-3, 959 (2000)

13) Trigger, 2000.10, 34 (2000)

14) 週刊宝島, 2002.5.8&15, (553), 66 (2002)

15) T. Matsukawa, S. Kanemaru, M. Nagao and J. Itoh ; Proc. 6th Int. Display Workshops (IDW'99), FED 3-3, 943 (1999)

16) 日経エレクトロニクス, 1997.5.5, (688), 111 (1997)