微小電子源と真空マイクロエレクトロニクス

別 井 圭 一

(株)富士通研究所 ㊞243-01 厚木市森の里若宮 10-1

(1991年12月3日受理)

Micro Cathode and Vacuum Microelectronics

Keiichi BETSUI

Fujitsu Laboratories LTD.

10-1, Morinosato-Wakamiya, Atsugi 243-01

(Received December 3, 1991)

半導体の微細加工技術を応用した新しい微小電子源の開発が進んでいる。このミクロンサイズの微小電子源を利用して、超微細な電子管素子や、フラットパネルディスプレイなどをつくる技術が注目されている。この技術は真空電子を用いて、従来の半導体素子では達成できない新しい機能をもった電子デバイスをめざすものであり、真空マイクロエレクトロニクスという新しい技術分野を形成しつつある。ここでは、筆者の研究を中心にこの分野について解説する。

1. はじめに

半導体デバイスの目ざましい進歩にともない、微細加工技術も著しい進歩を遂げている。この微細加工技術は単に半導体素子の作製に应用されるだけでなくさまざまな分野に应用されている。従来の機械加工では不可能な超微細な構造を作ることができ、しかも一度に大量生産ができるというこの技術の特長を活かすことにより、従来の製造技術では困難な点を克服することができる。電子源にもこの半導体の作製技術を応用し、新しいタイプの陰極を作製しようという試みが活発化している。

電子源のうち熱陰極は実用電子源として多くの用途に実用されているが、高温状態で動作するため微小化に向かず半導体の技術の応用は難しい。一方、電界放出陰極を始めとする冷陰極は半導体技術とのマッチングがよく微小化により従来にない特性の陰極が構成できる可能性がある。

微小電子源の特長はまずそれがきわめて小さいことであり、独立な陰極を非常に高い密度で形成できることである。さらに陰極だけでなく電極などの構造も半導体微細加工技術を応用したマイクロマシン技術で同時に作製することも可能である。従来の電子管では、熱陰極が用

いられ、制御電極などもすべて機械加工、機械組立てにより作製されていた。CRT などの一部の応用を除いて電子管が半導体にその座を明け渡したのは、機械加工、組立てによる信頼性の低さ、量産性の悪さ、小型化の限界などが原因であり、電荷移送媒体としての真空の特性が悪いわけではない。実際、半導体などの固体内部の電子と異なり真空中では電子に高いエネルギーを与えたり、さらに偏向や収束させることが容易である。また放射線、温度などの影響を受けないために耐環境性が強いなどの多くの利点をもっている。

近年、半導体の微細加工技術を用いることにより従来の電子管のもっていた欠点を克服し、まったく新しい電子デバイスをつくる技術、真空マイクロエレクトロニクスが注目されている¹⁻³⁾。この技術は上記の真空電子の特長を活かし、(1)超高速素子、高周波数増幅素子、(2)耐環境素子(高温環境、放射線環境、宇宙環境)、(3)高精細薄型ディスプレイ、(4)電子ビーム応用技術(電子線露光、電子線計測、自由電子レーザー)などのさまざまな応用が考えられている。

真空マイクロエレクトロニクスの研究はこれまで主として米国が中心に行われてきた。最近、微小電界放出陰極が実用レベルに達したので、研究者の数が増え、

図 1 電界放出陰極の構造 (a)は縦型, (b)は横型

1988 年より真空マイクロエレクトロニクス の国際会議も開かれるようになった。昨年はこの国際会議が日本で開催されたこともあって国内の研究も活発化している。本稿では微小電子源とその応用について筆者の研究を中心に解説する。

2. 微小電子源の原理と構造

微小電子源として最も精力的な研究が続けられているのが電界放出陰極アレイである。微小電界放出陰極の構造は図 1 に示すように、縦型と横型に大きく分類できる。縦型は直径 $1\sim 2\mu\text{m}$ のゲート電極口の中に円錐形のエミッタチップが垂直に置かれている。一方横型は基板に平行にエミッタが配置されその前方にゲートが置かれている。どちらの場合もゲートをエミッタに対して正電位とすると、尖ったエミッタ先端に大きな電界が発生する。表面の電界が 10^7 V/cm 程度になるとチップ内部の電子は表面のポテンシャル障壁をトンネル効果により通過し真空中に飛び出してくる。従来の電界放出陰極はタングステンなどの高融点金属線の先端を電解研磨法により尖らせて作るが、その先端の曲率半径は $0.1\mu\text{m}$ 程度と比較的大きく数 μA の放出電流を得るのに数 kV の電圧を必要とした。それに対して、この微小電界放出陰極では先端の曲率半径は 10 nm 程度と小さく、またチップ先端とゲート電極の間隔は約 $1\mu\text{m}$ と近いので、 100 V 程度の引出し電圧で数 μA の放出電流を取り出すことができる。個々の陰極としての放出電流値はせいぜい $100\mu\text{A}$ 程度であるが、放射領域が数 μm のため多数の陰極をアレイ状に配置することにより平面状の陰極として動作可能となり、高い放出電流密度を得ることができる。一方横型は、基本的に平面形状の加工なので半導体の微細加工プロセスをそのまま活かせる。また薄膜を用いることで膜面に垂直な方向の曲率を非常に小さくできる。さらに絶縁性の基板を用いることで電極間の静電容量を小さくできるために高速の増幅素子を作る場合に有利である。微小電子源としてはここで述べた電

界放出陰極以外に接合のアバランシェ降伏を用いるもの^{4,5)}、MIM 構造のトンネル電子を用いるもの⁶⁾などのさまざまな方式が提案、検討されている。

3. 微小電界放出陰極の作製方法

半導体の微細加工技術が進歩したといっても、通常の光による露光技術ではせいぜい $0.3\mu\text{m}$ 程度が解像できるにすぎない。一方、微小電界放出陰極に必要なチップの曲率半径は 20 nm 以下であり、これを達成するには特殊な作製プロセスが必要である。

縦型の電界放出陰極は SRI の Spindt らにより初めて作製された⁷⁾。Spindt らの用いた電界放出陰極の作製方法を図 2 に示す。導電性基板(シリコン)上に絶縁

図 2 Spindt らが最初に用いた電界放出陰極の作製プロセス

膜, ゲートとなる金属膜を成膜する。金属膜, 絶縁膜に円形の小さな穴を通常のフォトリソで形成する。その後アルミなどの犠牲層を基板に対して浅い角度で蒸着する。この工程によりゲート口径は縮小するとともにゲート電極膜は犠牲層に覆われる。その後, モリブデンなどのエミッタとなる金属を基板に対して垂直に蒸着する。ゲート口径は蒸着とともに小さくなるので穴の内部に円錐型のエミッタティップが形成できる。このあと犠牲層のエッチングにより不要のモリブデンを除去して素子は完成する。

一方, NAL の Gray らはシリコンの結晶面方位異方性エッチングを用いて同じような構造を作った⁸⁾。シリコンの表面に SiO_2 などエッチング用のマスクを形成し, 異方性エッチング液 (KOH 水溶液など) を用いてシリコンをエッチングしマスク下部にピラミッド型のシリコンエミッタを形成する方法である。われわれはこのエッチングによるエミッタ形成法を発展させて特性のよいシリコンエミッタを作製できた⁹⁾。このエミッタ作製プロセスを図3に示す。(a)シリコン基板上に熱酸化膜を形成する。(b)つぎにこれをリアクティブイオンエッチング (RIE) により円形にパターン形成する。(c)これをマスクとしてシリコンを RIE によりエッチングしエミッタティップを形成する。エッチング時の条件を適当に選び, マスク下部に適当なサイドエッチングが生じる条件で RIE を行うと, 円錐形状のエミッタが

形成されてくる。そこで, 完全にマスクが取れる前にエッチングを終了する。この状態ではエミッタティップ先端は尖っていない。(d)この後, シリコンを熱酸化しエミッタティップ表面に酸化膜を形成する。この処理によりエミッタティップ内部にシリコンのきわめて鋭い先端が形成される。(e)その後, 絶縁膜およびゲート電極膜を蒸着する。(f)フッ酸に浸漬してエミッタティップ表面の熱酸化膜を除去し, マスクとその上にある絶縁膜と電極膜のリフトオフを行う。(g)電極パターンを形成し素子は完成する。この方法はエッチング工程がすべてドライプロセスであり, エッチングの一樣性, 再現性がウェットエッチングによる方法と比較し大きく改善された。またエッチングマスクを蒸着時にゲート口径の形成に用いるためエミッタティップをきわめて正確にゲート口径の中心に形成できる。さらにこの方法はシリコンだけでなくタンタルなどの金属エミッタの形成にも適用できる¹⁰⁾。RIE による作製ではエッチング条件を適当に選択することによりエミッタティップの形状をコントロールできる。図4(a)はエッチング深さとサイドエッチングの比を約2としたときの RIE 後のエミッタティップの SEM 写真である。なめらかに凹んだ稜線をもつ円錐形のエミッタティップが形成できた。図4(b)はゲート径を縮小し特性を向上させることを目的として, 2段階の RIE により形成した砲弾型エミッタティップの SEM 写真である¹¹⁾。1段目のエッチングでサイドエッチングにより先端を形成し2段目のエッチングは垂直エッチングを行いエミッタの高さを高くしている。図5(a)はこの方法で作製したシングルティップ電界放出陰極の SEM 写真である。熱酸化による先鋭化によりティップ先端の曲率半径が 10 nm 以下の非常に鋭いエミッタティップが形成できる。図5(b)は砲弾型エミッタアレイの SEM 写真である。エミッタティップの間隔は 4 μm であり, 100 個 (10 $\times$ 10) と 6400 個 (80 $\times$ 80) の陰極を集積した。ゲート口径は砲弾型のもので約2ミクロンである。これらの陰極の電子放出特性については後で述べる。

一方横型の電界放出陰極を作製する際には, 基本的に平面形状の加工なので半導体製造プロセスがそのまま活かせるが, 一回の露光とエッチングでエミッタティップ先端を作製すると先端の曲率半径は解像限界から光学的にきまる曲率半径より小さくならない¹²⁾。そこで先端を形成するのに図6に示すように一つの辺ごとに露光とエッチングを繰り返して2回のエッチングにより先端を形成する手法をとっている^{13,14)}。これにより先端の曲率半径は露光時の解像度によらず, エッチング時のパターンエッジの滑らかさで決定され, 滑らかであるほど先端の

図3 RIEと酸化プロセスによるシリコンFEAの作製プロセス

(a)

(b)

図 4 RIE 後のエミッタの SEM 写真 (a)は円錐型エミッタ, (b)は砲弾型エミッタ

(a)

(b)

図 5 シリコン電界放出陰極の SEM 写真

曲率半径は小さくなる。また横型ではエミッタとゲートを同一のマスクで形成するとゲートとエミッタ間隔を解像度以下に近づけられない。そこでエミッタを形成した後これを用いて自己整合プロセスでゲート電極を形成す

図6 2回露光エッチングによる横型エミッタの作製プロセス

図7 セルフアラインプロセスによるゲート電極の作製プロセス

る方法をとっている¹⁴⁻¹⁷⁾。図7に自己整合ゲート作製プロセスの一例を示す。エミッタ先端を利用して蒸着によりゲートエッジを形成する。図の例ではエミッタよりゲート電極を下に形成した構造であるが、電子を上方に放出させたい場合はゲート下部に絶縁膜を置き、エミッタより上方に位置させる例もある^{15,16)}。ゲートエミッタ間の距離はエミッタの形成時のサイドエッチングの量と基板のエッチング量などでコントロールしている。

4. 電子放出特性

われわれの作製したシリコン電界放出陰極の電子放出特性を以下に示す¹⁰⁾。図8に6400ティップアレイ陰極の放出電流、ゲート電流と引出し電圧の関係を示す。放出電流は80Vで8mAが得られた。この構造の電界放出陰極ではゲート電流はアノード電流の0.1%程度であり放出電子の大部分を利用することができる。シリコン単陰極では最大放出電流として50 μ A程度が得られている。また電流密度は100ティップアレイで50A/cm²程度が得られている。

電界放出型の陰極では放出電流の安定性が大きな問題となる¹⁸⁾。電界放出陰極の電流変動の原因は、(1)エミッタ表面の吸着ガス分子などの移動、(2)真空中の残留ガス分子のエミッタ表面への付着あるいは脱離などがある。どちらも表面の仕事関数の局所的な変化を生じ、放出電流が変化する。上記の作製方法で作ったシリコン単陰極では50%程度の電流変動があるが、多数の陰極を集積して同時に動作させると、電流変動は統計的に平均化される。実際、6400ティップアレイの電流変動は1%以下となっている。しかし個々のエミッタの電流変動が問題になるような増幅器などへの応用では電流の安定性をさらに高める必要がある。そのためにはエミッタ材料の検討、ティップ表面の脱ガス処理¹⁹⁾などの検討が必要である。このような微小電界放出陰極では10,000時間程度の連続動作の報告²⁰⁾もあるが、上述したように

図8 6400 ティップアレイの電子放出特性

図9 電界放出陰極を用いたフラットパネルディスプレイの構造図

陰極の寿命は表面の状態、残留ガスなどに左右されるため、今後十分な検討が必要である。

5. 応 用

この微小電子源の応用として最も期待されているのがフラットパネルディスプレイである^{21,22)}。電界放出陰極アレイを用いたフラットパネルディスプレイの構造を図9に示す。カソード電極ラインとゲート電極ラインにより X-Y マトリクスを構成する。その交差部分に電界放出陰極アレイを配置する。駆動は電子放出特性に図8に示すような非線形性があることを利用する。特定のゲートラインとカソードラインに電圧を印加することによりいわゆる単純マトリクス駆動が可能である。電界放出陰極は非常に小さいので、1画素あたり多数のエミッタを配置することにより、個々のエミッタの電流変動は平均化され目で見てほとんどわからないほどに低減できる。さらに個々のエミッタの欠陥による動作不良に対して非常に大きな冗長性が期待できる。フランスの LETI は6インチのモノクロディスプレイを試作しており、昨年はフルカラーのものも発表した²³⁾。

一方、真空電子の高速性を利用し、増幅素子を構成すれば高速動作が期待できる。微小電界放出陰極を用いた増幅素子としては図10に示すような構造が提案されている。図10(a)は縦型の素子のゲート電極の外側に陽極を配置した構造で、エミッタから放出された電子は反転して陽極に到達する²⁴⁾。実際、われわれはこの構造の微小三極管を上記の作製プロセスで試作した。単陰極の素子で相互コンダクタンス $0.2\mu\text{S}$ が得られている¹⁰⁾。(b)はアノードをエミッタ上方に配置した垂直型である。この形はアノードにより密閉されるため非常に小さい真空キャビティが構成できる²⁵⁾。この構造の三極管はアノード、エミッタ間の距離を小さくできるために電子

図10 電界放出陰極を用いたマイクロ三極管の構造

の走行時間は小さくなるが、一方でゲートエミッタ間の容量が大きいため高速動作のためには大きな相互コンダクタンスが必要になる。(c)は横型陰極を用いて三極管を構成した場合の構造である。絶縁性の基板を用いることにより各電極間の静電容量を小さくでき高速動作に有利である。ゲート電圧に対するアノード電流の非線形性を改善するために四極管構造¹⁷⁾や、ティップ先端に有効に電界が加わるようにゲート電極を立体的に構成し、

エミッタを取り囲んだ構造も作られている^{26,27)}。現状では放出電流が小さいために相互コンダクタンスは小さいが、今後電極材料、作製プロセスなどの改良により性能の向上が望まれる。

6. む す び

電界放出陰極の微小電子源についてわれわれの研究を中心にその特長、作製方法、特性などを紹介した。微小電子源の研究はまだ始まったばかりであり、素子の性能もまだ黎明期にあるといえる。しかし一方で、ディスプレイを始めとして非常に広範囲の応用が期待できるデバイスであり、今後の素子性能の向上が望まれる。実用化に当たっては、陰極の安定性を高めるのが最重要課題であり、安定性を改善するための地道な努力が必要である。研究者の数も確実に増加しており今後の開発の加速されることが期待できる。

文 献

- 1) たとえば、横尾邦義：真空 **32**, 63 (1989).
- 2) 南日康夫、内海孝夫：応用物理 **57**, 1421 (1988).
- 3) 伊藤順司：応用物理 **59**, 164 (1990).
- 4) G. G.P. van Gorkom and A. M.E. Hoeberechts : Vacuum Microelectronics **89**, 41 (1989).
- 5) T. Tsukamoto, N. Watanabe and M. Okunuki : Vacuum Microelectronics **89**, 65 (1989).
- 6) 横尾邦義、小野昭一：“トンネル現象の物理と応用”(培風館, 1987) p. 79.
- 7) C. A. Spindt, I. Brodie, L. Hummpery and E. R. Westerberg : J. Appl. Phys. **47**, 5248 (1976).
- 8) H. F. Gray : Proc. 29th Intl. Field Emission Symp. Aug., 111 (1982).
- 9) 別井圭一：電子情報通信学会秋季全国大会講演論文集, 5-282 (1990).
- 10) S. Fukuta and K. Betsui : Technical Digest of IVMC **91**, 144 (1991).
- 11) K. Betsui : Technical Digest of IVMC **91**, 26 (1991).
- 12) 伊藤順司：第 50 回応用物理学会学術講演会予稿集, 484 (1989).
- 13) 藤原ちづる、石井浩市、蘭 宗樹：第 51 回応用物理学会学術講演会予稿集, 542 (1990).
- 14) 西村則雄、金丸正剛、伊藤順司、中田久士、渡辺照男、伊藤茂生：第 38 回応用物理関係連合講演会予稿集, 525 (1991).
- 15) 金子 彰、菅野 亨、富井 薫：電子情報通信学会秋季全国大会講演論文集, 5-286 (1990).
- 16) A. Kaneko : Technical Digest of IVMC **91**, 50 (1991).
- 17) H. Komatsu : Technical Digest of IVMC **91**, 48 (1991).
- 18) たとえば、安達 洋：真空 **29**, 13 (1986).
- 19) C. Oshima and A. Ohtuka : Technical Digest of IVMC **91**, 102 (1991).
- 20) C. A. Spindt, C. E. Holland and R. D. Stowell : Appl. Surface Sci. **16**, 268 (1983).
- 21) 富井 薫：フラットパネルディスプレイ '90, 103 (1990).
- 22) I. Brodie : Information Display **1**, 17 (1989).
- 23) R. Meyer : Technical Digest of IVMC **91**, 6 (1991).
- 24) H. F. Gray, G. J. Campisi : Mat. Res. Soc. Symp. Proc. **76**, 25 (1987).
- 25) V. Makhov, N. Duzhev and A. Kozlov : Technical Digest of IVMC **88**, 7-2 (1988).
- 26) H. H. Busta : Vacuum Microelectronics **89**, 29 (1989).
- 27) 濡木ちづる、石井浩市、蘭 宗樹：第 38 回応用物理関係連合講演会予稿集, 525 (1991).