

## 量子構造電子源の研究

代表研究者 三村 秀典 東北大学電気通信研究所助教授  
 共同研究者 横尾 邦義 東北大学電気通信研究所教授  
 共同研究者 嶋脇 秀隆 東北大学電気通信研究所助手  
 共同研究者 Hans Hartnagel ダルムシュタット工科大学教授

### 1 研究の目的

近年、微細加工技術を用い微小電子源を製作・集積し、性能の限界に到達しつつある半導体デバイス、真空管、液晶ディスプレイの次世代デバイスの開発を目指す真空マイクロエレクトロニクスに注目が集まっている。微小電子源を用いたフラットパネルディスプレイは、ほぼ実用の段階にあるが、例えば、超高周波デバイスへの応用においては、その開発は困難を極めている。これは、薄膜技術と針状陰極からの電界電子放射を基本とする電界放射陰極では、トランジスタと比べて相互コンダクタンスが小さいことと入力容量を十分に小さくできないこと等による。このように、従来の電界放射陰極の研究の延長、すなわち微細化と高集積化のみでは、真空マイクロエレクトロニクスに、特に電子デバイス分野において、ブレークスルーをもたらすのは困難で、微小電子源に半導体の機能性を付加することが重要である。その理由は、真空デバイスは効率、パワー、高速性、耐環境性などにおいて、原理的に半導体デバイスより優れているが、半導体デバイスではバンドエンジニアリングに基づく機能性に勝っているためである。我々は、半導体の機能を付加した電子源による真空デバイスの開発を提唱し、このデバイスを真空・半導体機能融合デバイスと呼んでいる。

本研究では、 $-V$ 属化合物半導体を用いて、高機能電子源を開発する研究を行った。研究の目的は、半導体を用いて半導体の機能を融合した高機能電子源を開発し、その陰極を用いた新しい真空デバイス（「真空・半導体機能融合デバイス」）を開発することにより、現在の半導体デバイスや真空デバイスの延長では実現できない高性能もしくは新機能デバイスを開発するためである。半導体材料としてSiでなく化合物半導体を用いた理由は、バンドエンジニアリングや 谷からX谷またはL谷への電子遷移や半絶縁性基板の利用など、Siには無い化合物半導体の特長を利用するためである。また、高性能電子源を開発する際、マイクロマシーニングを含めた高度なプロセス技術が必要となる。そこで、 $-V$ 属化合物半導体にマイクロマシーニング技術を用いた、ユニークな超高周波デバイスや光デバイスの研究を行っているダルムシュタット工科大学、超高周波研究所、Prof. Hartnagel 研究室を研究場所として選び、研究を行った。

### 2 研究の方法

本研究では、 $-V$ 属化合物半導体を用いた、高機能冷陰極を開発するため以下の研究を行った。

#### 2-1 GaAs/AlAs 単一量子構造を用いた共鳴トンネル電子源の研究

共鳴トンネル電子源は、共鳴トンネル効果をエネルギーフィルタとして用い、低エネルギー分散の電子源を開発しようとするものである。このような電子源を用いれば、電子ビームを用いた計測装置において飛躍的な性能の向上が期待できる。図1(a)に GaAs-AlAs 量子井戸を用いた共鳴トンネル電子源の構造を、図1(b)にそのエネルギーバンド図を示す。共鳴トンネル電子源材料として分子線エピタキシャル(MBE)法による GaAs-AlAs を用いた場合、GaAs-AlAs の結晶成長技術が成熟しているためほぼ設計通りの電子源を製作できるという利点がある。しかし、AlAs と GaAs の伝導帯のエネルギーバンドの不連続量は 点において、約1eV以下とゲート電極の  $n^+$  GaAs の仕事関数である約4eVと比べて非常に小さいという欠点がある。この欠点のため、約4eVの仕事関数を越えて、電子を真空中へ放射させるためには、長い加速層（図1(b)の undoped GaAs 層）を必要とする。しかし、この undoped GaAs 層中で、共鳴トンネルを経験した電子は散乱を受け、そのエネルギーは緩和され、低エネルギー分散の特性は失われる。そのため、エネルギー分散の極めて小さい共鳴トンネル電子源を実現するためには、出来る限り加速層を短くすることが重要である。本研究では、MBE 法により AlAs と GaAs がそれぞれ2.83nmの単一量子井戸構造を有し、加速層が64nm、 $n^+$  GaAs ゲート電極が20nmの量子構造電子源を製作した。電圧 - 電流特性の測定は、 $5 \times 10^{-8}$  Torr の真空度で、ダイオード電流とエミッション電流を同時に測定した。エミッション電流は電子源の上方約1cmの所にアノードを配置し、アノードに100Vの電圧を印加し行った。

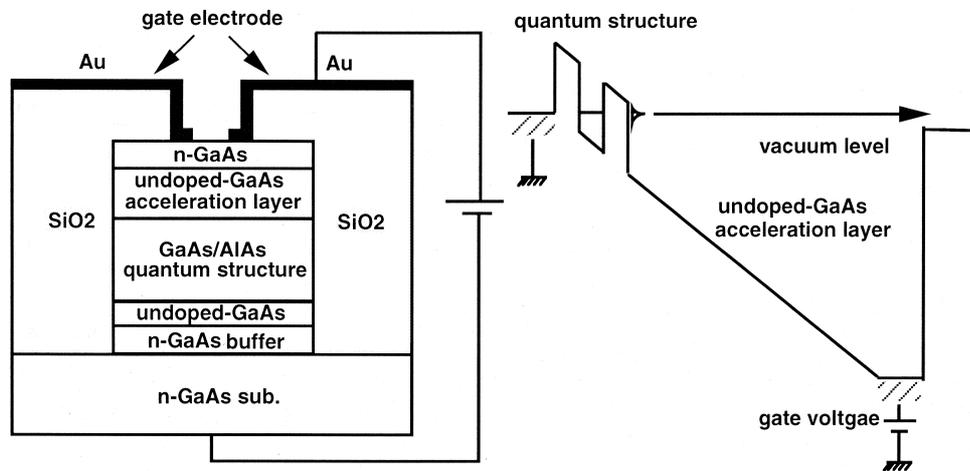
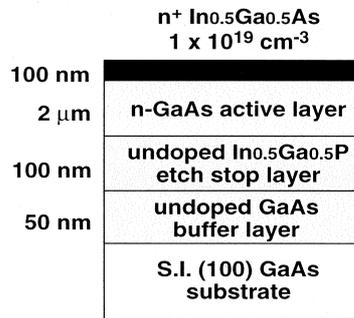


図1 GaAs-AlAs共鳴トンネル電子の構造 (a) とそのエネルギーバンド図 (b)

### 2-2 マイクロ波領域におけるバンチビーム発生用 GaAs 横型電子源の研究

GaAs 中を走行する電子は、電界強度が約 $3.2\text{kV/cm}$ を越えると、谷からL谷へ遷移し空間電荷によるドメインの形成と走行に伴う Gunn 発振を起こすことが知られている。GaAs で適当な構造のエミッタを製作し、この空間電荷ドメインを形成している電子を真空中へ放射させれば、マイクロ波周波数領域のバンチビーム（電子のパルス列）を容易に形成でき、このエミッタを小型・軽量、高効率、瞬時点灯などの特長を持つマイクロ波管へ応用することが可能になる。図2は Gunn 効果によるバンチビームの発生を検証するために製作した GaAs を用いた横型エミッタの製作プロセスである。横型構造エミッタとする利点は、空間電荷ドメインの走行距離を容易に最適化できることである。用いた基板は、半絶縁性の GaAs (S.I. GaAs) 上に MOCVD 法により成長した GaAs/InGaP ヘテロ構造である (a)。まず、クエン酸系のエッチング液を用い GaAs の異方性エッチングを用い、先端径が $100\text{nm}$ 以下の GaAs のウエッジを製作した (b)。InGaP 層はエッチングストップ層として用いている。つぎに、オーミック電極を形成し、上部の  $n^+$  InGaAs 層の一部をエッチングした (c)。これは、電子が  $n^+$  InGaAs 層を走行することを防ぎ、 $n$  GaAs 層を走行するようにするためである。その後、マイクロマシーニング技術を用い、GaAs エミッタ下の S.I. GaAs を側面からエッチングした (d)。最後は、2つの GaAs エミッタを繋いでいる InGaP 層をエッチングし、完成とした(c)。

図3(a) に製作した横型エミッタの写真、図3(b) に横型エミッタの構造図を示す。空間電荷によるドメインの形成に伴う Gunn 発振を生じさせるためには、エミッタ内の電界強度を約 $3.2\text{kV/cm}$ 以上に、かつ  $nL$  積 ( $n$  は GaAs 不純物濃度、 $L$  はドメインの走行距離) を約 $1 \times 10^{12}\text{cm}^{-2}$  以上にすることが必要である。この条件を満たすように、本研究では、 $n$  GaAs 層として、 $1 \times 10^{15}\text{cm}^{-3}$  の不純物濃度をまたドメインの走行距離として約 $70\ \mu\text{m}$ となるように設計した。この場合の予想されるバンチビームの周波数は $1.7\text{GHz}$ である。また、Gunn が生じた場合の特性と生じない場合の特性を比較するため、不純物濃度 $1 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$  の素子も作成した。この素子では、不純物濃度が高いので、電界強度が約 $3.2\text{kV/cm}$ 以上とならないため、Gunn 効果は生じないものと考えられる。電圧 - 電流特性の測定は、真空装置中で、 $5 \times 10^{-8}$  Torr の真空度で行った。



(a)

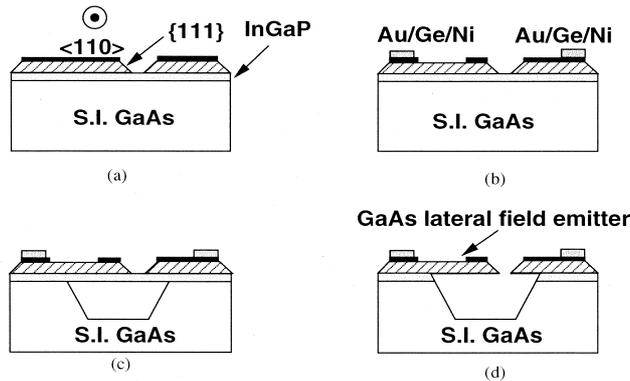


図2 GaAs横型エミッタ製作プロセス

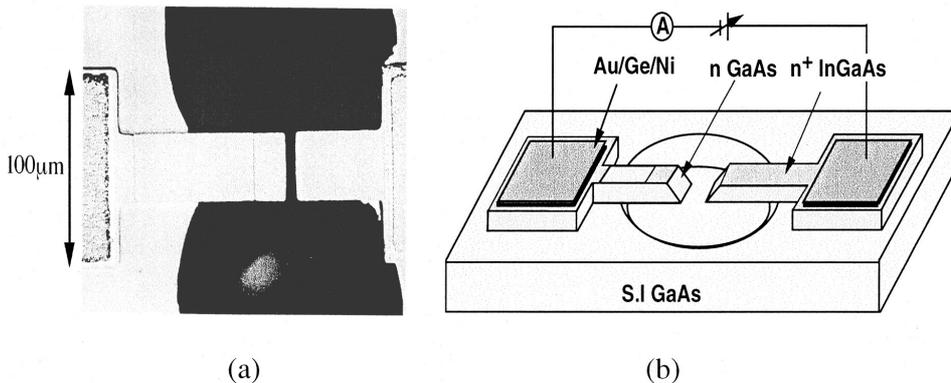


図3 製作したGaAs横型エミッタの写真 (a) と構造図 (b)

### 3 結果

#### 3-1. GaAs/AlAs 単一量子構造を用いた共鳴トンネル電子源の研究

図4に測定した量子構造電子源のゲート電圧に対するダイオード電流及びエミッション電流を示す。量子構造をトンネルした電子の中で、 $n^+$  GaAs 層の仕事関数である約4eV以上のエネルギーを持つ電子はエミッション電流として真空中へ放射され、約4eV以下のエネルギーを持つ電子はゲート電極に取り込まれダイオード電流となる。すなわち、undoped GaAs 加速度層と  $n^+$  GaAs ゲート電極層をほぼバリスティックに走行した電子のみが真空中へでることができる。図より明らかなように、ダイオード電流には共鳴トンネル効果による明確な負性抵抗が見られる。そして、負性抵抗が見られる電圧において、エミッション電流の急激な増加が見られ、オフ共鳴によるダイオード電流の減少と共に、エミッション電流はいったん減少する。このように、共鳴トンネル効果によるダイオード電流の負性抵抗とエミッション電流には強い関係が見られ、エミッション電流が共鳴トンネル効果によるものであることを示唆している。しかし、エミッション電流が共鳴トンネル効果によるものであることを確定するためには、電子のエネルギー分析を行う必要があり、現在準備中である。なお、印加電圧7V以上で、エミッション電流がいったん減少したあと、ゲート電圧の増加に従い、ほぼ単調に増加している。こ

これは、共鳴トンネルエミッションではなく、加速層のみで加速された電子が真空中へ放射されているものと現在のところ考えている。また、エミッション電流がダイオード電流に比較して、非常に小さな値になっているが、これは、undoped GaAs 及び  $n^+$  GaAs ゲート電極層で電子が強い散乱を受けていることを示している。

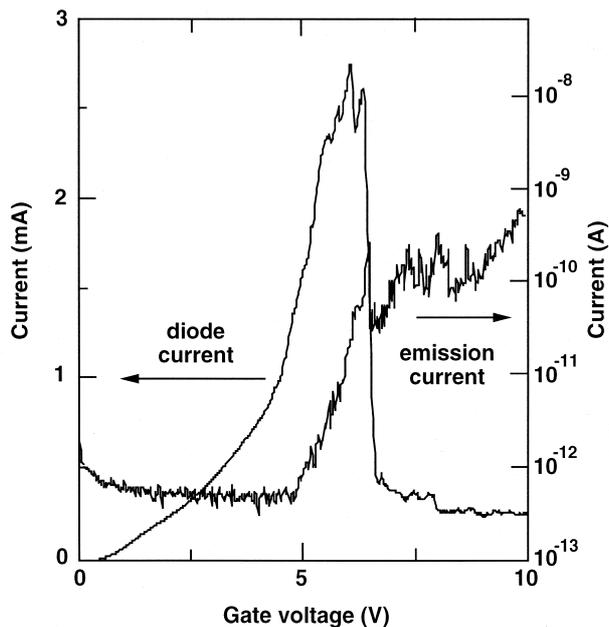


図4 量子構造電子源の電圧 電流特性

### 3-2 . マイクロ波領域におけるパンチビーム発生用 GaAs 横型電子源の研究

図5に $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ の不純物濃度を持つ GaAs 横型電子源の電圧 - 電流特性を示す。図5(a)にリニアスケールのグラフを(b)に Fowler-Nordheim プロットを示す。図5(a)に示すようにエミッション電流は約60Vから生じ、約110Vで不安定になる。この電圧 - 電流特性は通常バルクの GaAs で製作した Gunn 素子の特性と、しきいち電圧の存在を除いて非常に類似している。また、約60Vから約110Vの電流は Fowler-Nordheim プロットで直線になることから、実際に真空中へ電子が放射されているものと考えられる。

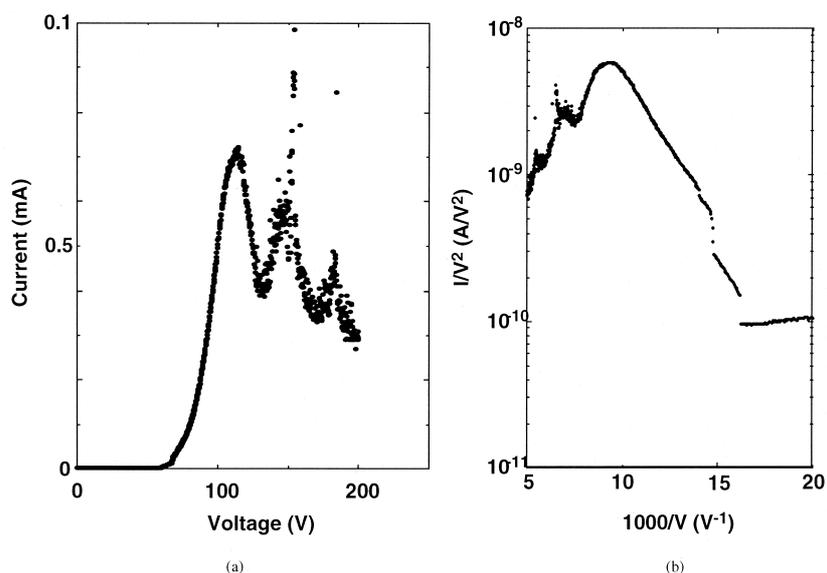


図5 不純物濃度 $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ の横型エミッタの電圧 電流特性  
リニアスケール (a) と Fowler Nordheim プロット (b)

図6に $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ の不純物濃度を持つ GaAs 横型電子源の電圧 - 電流特性を示す。図6(a)に log スケールのグラフを (b) に Fowler-Nordheim プロットを示す。図で明らかなように、 $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ の不純物濃度を持つ GaAs 横型電子源では Gunn 効果は生じないため、Fowler-Nordheim プロットは直線のみで、エミッション電流の飽和や不安定は観測されない。以上のことより、 $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ の不純物濃度を持つ GaAs 横型電子源では Gunn 効果による約1.7GHzのバンチビームが発生している可能性が非常に強い。

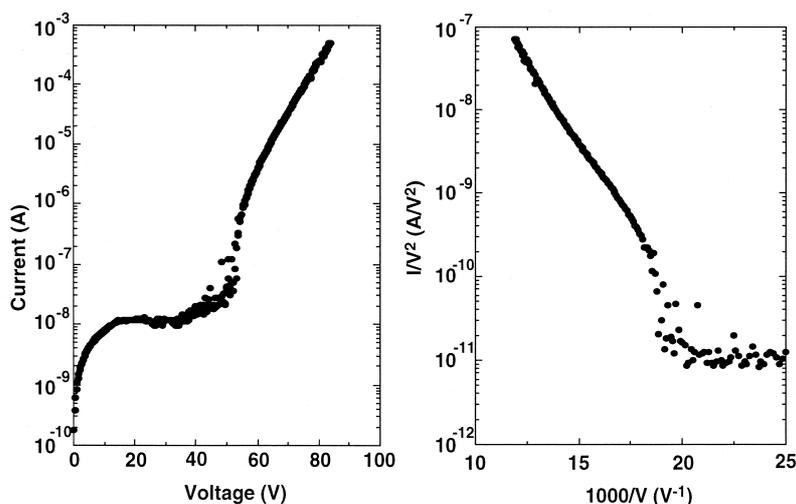


図6 不純物濃度  $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$  の横型エミッタの電圧 電流特性 logスケール (a) と Fowler-Nordheim プロット (b)

#### 4 まとめ

MBE により AIAs と GaAs が 2.83nm の単一量子井戸構造を有する共鳴トンネル電子源を製作し、共鳴トンネルに関係していると考えられるエミッション電流を観測した。今後、放射電子のエネルギー計測を通して、このエミッション電流が共鳴トンネル効果によるものであることを確認する予定である。そして、低エネルギー分散は電子源の開発を進める。

また、マイクロマシーニング技術を用い、 $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ の不純物濃度を持つ GaAs 横型電子源を製作し、Gunn 効果により生じていると思われる、エミッション電流の不安定性を見いだした。今後、バンチビームの直接計測を行うとともに、Gunn 効果を用いた変調ビームエミッタを用い、小型・軽量・高効率なマイクロ波発振管を製作する予定である。

これらの成果は真空マイクロエレクトロニクスにおいて新分野の開拓につながるものであり、本研究に多大なご援助をいただいた電気通信普及財団に心よりお礼申し上げます。

#### < 発表資料 >

| 題 名  | 掲載誌・学会名等   | 発表年月        |
|--|--|-------------|
| Resonant tunneling emission from GaAs/AIAs quantum structures              | 12th International Vacuum Microelectronics Conference, Darmstadt p.378 | 1999年7月     |
| Lateral GaAs field emitters fabricated by micromachining technique         | 12th International Vacuum Microelectronics Conference, Darmstadt p.146 | 1999年7月     |
| Morphology modification of porous (100)-Gap for field-emitter applications | 12th International Vacuum Microelectronics Conference, Darmstadt p.336 | 1999年7月     |
| GaAs系電界放射陰極 (I)  | 第47回応用物理学関係連合講演会 29a-ZA-7  | 2000年3月     |
| 半導体エミッタからの電子放射特性   | 電子情報信学会論文誌,C   | 2000年8月(予定) |