

シリコン基板上窒化物系半導体を用いたフィールドエミッタに関する研究 (032106004)

Field emission of GaN pyramid array on Si substrate

山口 雅史 名古屋大学・工学研究科

Masahito Yamaguchi, Graduate School of Engineering, Nagoya University

本田 善央 石島 達夫

Yoshio Honda and Tatsuo Ishijima

名古屋大学・工学研究科

Graduate School of Engineering, Nagoya University

研究期間 平成 15 年度～平成 17 年度

概要

シリコン基板上への窒化物半導体(AlGaIn/GaN)単結晶六角錐構造の選択成長技術およびプラズマ診断・制御に基づいたプラズマプロセスによるシリコン酸化(窒化)膜成膜技術やシリコン加工技術を用いることで、ミクロンあるいはサブミクロンの大きさの極微細 GaN 系六角錐半導体結晶を基板上に高密度に均一に並べる技術を研究開発し、高精細ディスプレイを中心とした多用途の電子線照射源を製造する技術確立することを目的とした。その結果、AlN/GaN 試料において閾値電界 $6 \text{ V}/\mu\text{m}$ を達成し、最大電流密度は $5.6 \times 10^{-1} \text{ A}/\text{cm}^2$ という値が得られた。また、GaN や AlGaIn/GaN の試料では不純物をドーピングすることで閾値電界を下げるのが可能であるが、AlN/GaN 試料においては AlN 層における残留不純物が p 型となるために、ドーピングすることで閾値電界が増加する傾向が見られた。

Abstract

AlGaIn/GaN micro pyramid array was grown with the selective MOVPE on a (111) Si substrate. The growth conditions were studying the optimization of the growth processes. The emission profiles of samples were also investigated at room temperature. The threshold field for the field emission from AlN/GaN micro pyramid structures was $6 \text{ V}/\mu\text{m}$. The increase of the threshold field in the AlN/GaN sample was attributed to the conductivity type conversion in the AlN layer. The current distribution was not uniform but we achieved the maximum current density of $5.6 \times 10^{-1} \text{ A}/\text{cm}^2$.

1. まえがき

窒化物半導体は物理的に堅牢、化学的に安定であり、特に AlGaIn あるいは AlN は電子親和力が極めて小さいという特長があり、低電圧駆動、長寿命かつ大電流を扱う電子エミッタ材料として有望である。また自己形成的にミクロンあるいはサブミクロンサイズの六角錐形状を形成するために高密度に電子源を配置することが可能である。本研究は、加工を施した Si 基板上には複数のファセットで囲まれた GaN 微細単結晶(多面体)が自然形成原理に従って成長するという MOVPE 選択成長法の特徴を活用し、高密度の電子源を基板上に配列し高輝度のフィールドエミッタを開発することを目的としている。

2. 研究内容及び成果

Si 基板上に作製した GaN 六角錐構造をより良いエミッタ素子として実現するためには、結晶先端に効率よく電界が集中するよう形状を尖鋭にすることが必要である。また表面の電子親和力低下を実現するためには GaN の表面に AlN 層あるいは AlGaIn 層を必要とする。そこで、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ ヘテロ構造を有する六角錐構造を作製し、その先端形状を尖鋭化することを試みた。

プラズマ診断・制御に基づいたプラズマプロセスによる Si 酸化膜をマスクとした基板を用い、MOVPE 選択成長法により成長した GaN 六角錐構造の表面に AlGaIn を 10nm 成長したところ、表面にクラックは確認されず、良好なモフォロジーが得られた。成長した結晶の表面 SEM 像が図 1 である。この時の成長条件は、温度が 1030°C 、

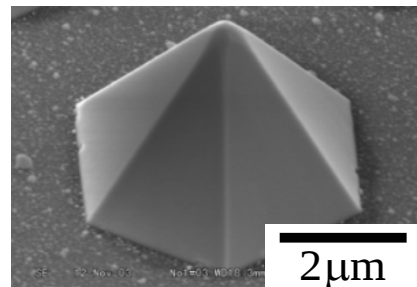


図 1 GaN 六角錐 SEM 像

V/III比が約 5000、成長時間が 10 分であった。

結晶の先端に現れる自己停止面(C面)の幅をプロットし成長温度で比較してみると、GaN の成長温度が 1030°C と 1060°C の結晶では、平均の幅はそれぞれ 150 nm 、 250 nm 程度であり、成長温度が低いほど C 面幅が狭く、ばらつきが小さいことがわかった。これは、成長温度が低いほど、結晶の縦方向の成長が促進されることに起因していると考えられる。ただし、 1000°C まで下げたところ先端付近にピットが生じ、不完全な結晶形状となった。よって、結晶の形状品質を損なわない範囲において成長温度を下げるのが、結晶の尖鋭化に有効であることがわかった。

次に、Si 基板上に作製した $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 六角錐構造のエミッタ素子としての特性を評価するために、Si 基板に電極を設け、結晶先端部からの電界放出を行い、エミッション電流の測定を行った。

準備した試料は、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ ($x=0, 0.35, 1$)、および表面層にのみ Si をドーピングした $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ ($x=0, 0.35, 1$) の計 6 種類である。GaN の成長温度は、六角錐構

造の先端部分が尖鋭となる条件とし、成長時間は10分とした。 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 表面層の成長温度はGaNと同じ温度に固定し、成長時間は1分とした。また、Siドーピングは $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 表面層のみとし、 $x=0$ のGaN六角錐構造へのドーピングは、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 層を成長するタイミングでSiドーピングGaN層を成長した。測定では、直径20 μm 内に含まれる $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ /GaN六角錐構造(約十数個)からの電子放出を、多数の測定箇所において観測した。図2は、6種類それぞれの試料において12 $\text{V}/\mu\text{m}$ で最大電流密度が得られた測定箇所のエミッション電流-電圧特性を示している。電流密度に関しては、AlN表面層の試料を除いて、Siドーピングすることで電流密度が増加している傾向があり、0.1 A/cm^2 以上の値を示した。また、最大の電流密度が得られた試料は、ドーピングをしていない表面層がAlNの試料であり、その値は0.56 A/cm^2 と極めて高い値を示した。この値は、カーボンナノチューブ試料で示されている電流密度0.1~1 A/cm^2 、閾値電界1.9 $\text{V}/\mu\text{m}$ と比較して、同程度の性能を有しており、GaN系電子線放出源が高い能力を有していることを示している。

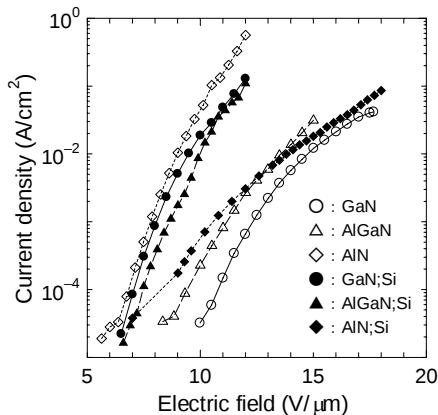


図2 電界-エミッション電流密度特性

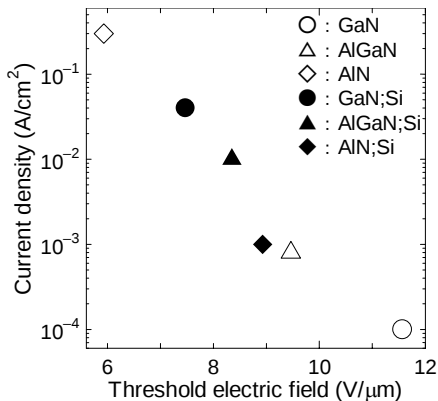


図3 各試料における平均の閾値電界と12 $\text{V}/\mu\text{m}$ における平均電流密度との関係

一方、各試料における様々な測定点での平均閾値電界と12 $\text{V}/\mu\text{m}$ における平均電流密度をプロットした図を図3に示す。ドーピングしていない試料に関しては、Alの組成が高くなるにつれて閾値電界が減少していることが分かり、AlGaInのAl組成が多くなるほど電子親和力がGaInに比べて小さくなることと定性的に一致している。また、Siドーピングした試料では、逆に組成が高くなるほど閾値電界も高くなっている。この原因としては、Siのドーピングによる伝導型の変化や、Alの組成が高くなるにつれてドーピングしたSiが活性化し難くなるといったことが考えられる。

試料形状と閾値電界の関係を調べるために、試料の頂上部分の形状分布と平均閾値電界の関係を図4に示す。先端

が500 nm以上の稜線を形成したものと先端がピット状になったもの以外を良好な試料とすると、今回の6種類の試料では、SiドーピングのAlN試料やノンドーピングのGaIn試料の形状が均一ではなく、ノンドーピングのAlN試料が最も均一な試料であることが確認された。また閾値電界は、試料の形状の分布と対応するように、良好な試料が多いノンドーピングAlN試料では閾値電界が最も低く、試料形状の余り良くない試料では、閾値が高くなるという傾向が得られた。一方、ほぼ同等の試料形状を有するノンドーピングAlGaInとSiドーピングAlGaInにおいては、ドーピングした試料の方が、閾値が低くまた最大電流密度も高くなることが分かった。

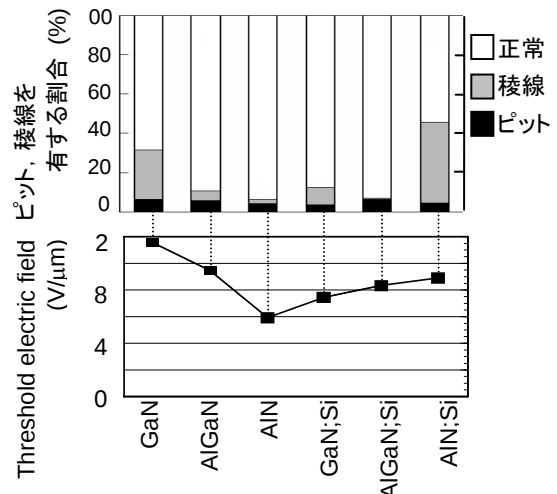


図4 各試料における平均閾値電界と試料形状との関係

3. むすび

我々は、MOVPE選択成長法を用いて先端の先鋭化条件を最適化した $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaIn}$ 六角錐アレイ構造を作製した。また、表面層にSiをドーピングした試料も作製し、計6種類の試料においてエミッション特性を測定した。その結果、基本的には、Alの組成を多くすることで閾値電界が減少することや、Siをドーピングすることで電流密度が増加することが分かった。しかしながら、これらの物性値は先端形状に依存していることも分かり、Siをドーピングした上での試料形状均一化を図る必要があることがわかった。

【誌上発表リスト】

- [1] Y. Honda, M. Torikai, T. Nakamura, Y. Kuroiwa, M. Yamaguchi, and N. Sawaki, "The compositional non-uniformity in the AlGaIn capping layer of the AlGaIn/GaN pyramids grown on (111) Si substrate by selective MOVPE," *phys. stat. sol. (c)* **0**, pp.2043-2046 (2003).
- [2] 本田善央、中村剛、山口雅史、澤木宣彦、"MOVPE法によるSi基板上へのGaIn/AlNピラミッド構造の作製"、*信学技報*、ED2004-18, pp.17-22, (2004)
- [3] T. Okada, T. Ishijima, Y. Honda and H. Sugai, "Behavior of Nitrogen Atom in High Density Plasma in Rare Gas/Nitrogen Mixture," *Proc. of 2005 International Symposium on Dry Process* pp.95-96 (2005).

【申請特許リスト】

- [1] Nobuhiko Sawaki, Yoshio Honda, Semiconductor element structure, electron emitter and method for fabricating a semiconductor element structure, USA, 2003/5/23.