



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Formation and Device Application of III-V Semiconductor-based Functional Microstructures Achieved by Electrochemical Process [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	熊崎, 祐介
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第12628号
Issue Date	2017-03-23
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/65493
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/
Type	doctoral thesis
File Information	Yusuke_Kumazaki_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 熊崎 祐介

学 位 論 文 題 名

Formation and Device Application of III-V Semiconductor-based Functional Microstructures
Achieved by Electrochemical Process

（電気化学的制御に基づく III-V 族化合物半導体の微細加工と機能素子応用に関する研究）

20 世紀から 21 世紀にかけての急速な経済発展と人口増加に伴い、エネルギー資源の枯渇と環境汚染に関する問題（エネルギー環境問題）が顕在化しつつある。我が国においても、2011 年の東日本大震災とそれに伴う原子力発電所事故の発生以降、エネルギー環境問題への関心は急速に高まっており、革新的な創エネルギー技術及び省エネルギー技術の創出が求められている。なかでも、化石燃料に代わるエネルギー源として期待されている太陽電池の高効率化や、電力変換用トランジスタの低損失化など、半導体エレクトロニクス分野への期待は大きい。しかし、これら半導体機能素子の多くはシリコン (Si) で構成されているため、材料物性値に起因する素子性能の限界から、増え続ける市場の要求を満たすのは困難となってきた。

このような背景のもと、Si に代わる材料として III-V 族化合物半導体への期待が高まっている。光電変換の高効率化の観点からは、太陽光スペクトルと整合性のよい吸収波長帯をもつ燐化インジウム (InP) が、大電力を駆動するパワートランジスタ材料としては、禁制帯幅が広く絶縁破壊電界の高い窒化ガリウム (GaN) とその混晶である窒化アルミニウムガリウム (AlGaN) がその代表例として挙げられる。しかしながら、現状では III-V 族化合物半導体を用いた機能素子は期待されるほどの性能が得られておらず、Si 系機能素子に置き換わるまでには至っていない。その要因の一つとして、化合物半導体の場合、素子製造工程で導入される加工損傷に対し、その抑制手法や回復手法が未だ確立されていない点が挙げられる。例えば、機能素子作製のための微細加工や絶縁膜形成には制御性に優れたプラズマ加工技術が用いられるが、高エネルギー反応を利用するため結晶欠陥などの加工損傷を誘発する。このような加工面やその近傍には、禁制帯中に高密度の表面・界面準位やキャリアを捕獲・放出するトラップ準位が生成され、これが素子の性能劣化や動作不安定性を引き起こす大きな要因となっている。

本論文では、プラズマ加工技術と比較してより反応エネルギーの低い「電気化学加工技術」に注目し、III-V 族化合物半導体の微細加工と機能素子応用に関する検討を行った。機能素子材料として前述の InP 及び GaN、AlGaN を対象とし、電解液と半導体界面の電気化学的基礎特性を明らかにするとともに、電気化学酸化と溶解反応を基盤とする「多孔質構造形成技術」、「p 型ゲート形成技術」、「ゲートリセス加工技術」を確立した。特に、結晶面方位や材料の伝導性、半導体ヘテロ界面の分極に由来する「エッチングの自己制止機構」を新たに見出し、従来のプラズマ加工技術を上回る高い加工制御性を達成した。さらに開発した技術を、光電変換素子およびヘテロ接合電界効果トランジスタの作製に適用し、その有用性について議論した。

本論文は全 8 章で構成されている。以下に各章の要旨を示す。

第 1 章では、研究背景と目的を述べた。エネルギー環境問題に対する III-V 族化合物半導体の役割と直面する課題から、電気化学加工技術を利用することの優位性について記した。

第2章では、電気化学の基本原則、特に半導体/電解液界面のバンド構造とキャリア輸送、そして電気化学反応に亘るまでの電気化学加工技術を理解する上で必要な現象を記した。さらに、III-V 化合物半導体における電気化学加工技術の実用例を記した。

第3章では、全章に係る実験手法について述べた。具体的には、電気化学加工のセットアップと電気化学的評価技術について記し、加工後の構造的、光学的、電気的特性評価に用いた装置および原理について記した。

第4章では、光電変換素子の基板材料として注目される InP に対して、ナノ構造の一種である多孔質構造を電気化学的に形成し、光学的特性およびショットキー接合光電変換素子としての特性について得られた結果を示した。無加工 InP と多孔質 InP の比較により、多孔質構造の優位性について述べた。

第5章では、光を化学物質に変換する光電極材料への応用を目指し、GaN に対して多孔質構造を電気化学的に形成し、形状制御性向上に関する検討を行った。荷電キャリアの発生現象に注目し、バンド端吸収、Franz-Keldysh 効果、アバランシェ効果がそれぞれ関与する電気化学加工について検討することで、制御性に優れた微細加工を実現した。光電極としての特性では、多孔質構造の形成により無加工基板に対して大幅な改善が見られた。さらに数ナノメートルの形状の違いが特性に大きく影響を与えることを明らかにし、優れた制御性により極めて高い変換効率を実現した。

第6章では、パワーデバイスとして注目されている p-GaN/AlGaN/GaN ヘテロ構造における p-GaN の選択除去について検討した結果を示した。電気化学反応はドーピング不純物によって反応選択性が得られることが知られており、本構造においても p-GaN のみが反応する条件を見出し最適化することで、p-GaN を選択的に除去し、下地の AlGaN 層で自己停止することを見出した。電気的特性から良好な加工面が得られていることを明らかにし、p-GaN の選択除去プロセスとして電気化学加工技術が有望であることを示した。

第7章では、第6章と同様にパワーデバイス応用において注目されている AlGaN/GaN のリセスゲート構造の作製に電気化学加工技術を用いた。これまで明らかにされていなかった荷電キャリアの供給源に着目し電気化学条件を最適化することにより、表面平坦性に優れた加工技術を実現した。さらに、エッチングの自己停止が発現することを見出し、自己停止深さは制御可能であることを明らかにした。本手法によるリセスゲート AlGaN/GaN ヘテロ接合トランジスタを試作し評価したところ、相互コンダクタンスの向上や閾値の正方向シフトが確認された。

第8章では、本論文の結論を述べている。