

副格子交換ヘテロ構造半導体の高度制御

近藤高志

東京大学大学院工学系研究科

1. 研究のねらい

GaAs に代表される閃亜鉛鉱構造を有する化合物半導体は高い光学的非線形性を有し、2次の非線形光学効果を用いた非線形光学デバイスの材料として有望である。我々はこれまで、化合物半導体を用いた疑似位相整合(QPM)非線形光学デバイスの実用化に不可欠な周期空間反転ヘテロ構造の作製法である副格子交換エピタキシー技術を独自に開発し、GaAs 系副格子交換技術をベースとして導波路型波長変換デバイスへの適用を目指して研究を進めてきた。本研究では、副格子交換ヘテロ構造半導体を用いた QPM 非線形光学デバイスの実用化を見据えて、実用デバイス作製プロセスの基盤技術としての副格子交換エピタキシー法の高度化を図り、汎用の技術としてその一般性をより高めることを目的とした。具体的には、高効率導波路デバイス作製に必要な再成長過程の最適化、GaAs 基板以外への拡張に取り組むとともに、この手法と微細加工・再成長法とを組み合わせることで作製した導波路デバイスにおける波長変換特性の基礎評価をおこない、半導体 QPM 非線形光学デバイスという新規分野の発展の基礎を築いた。

2. 研究成果

2-1) InP 基板上副格子交換の実現

副格子交換エピタキシー法の、基盤的結晶成長技術としての一般性を高めることを目的として、InP 基板上での副格子交換の実現を図った。IV 族中間層としては、格子整合しないものの比較的良質な結晶成長の可能な Ge を用いて、InP 基板上での副格子交換の可否について検討をおこなった。検討の対象としたのは、InP(100)基板上の $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{Ge}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ の系である。 $[0\bar{1}1]$ 方向に 4° 傾けた InP(100)基板上で、Ge 中間層を臨界膜厚を超えて成長し緩和させることによって InGaAs エピタキシャル層の副格子交換を実現できることを初めて示した。Ge 中間層が臨界膜厚より薄い場合や、基板のオフ方向が異なる場合には副格子交換が起こらないことから、InP 基板上副格子交換においても、GaAs 基板上副格子交換と同様、逆位相境界の自己消滅が副格子交換の実現に主要な役割を果たしていることがわかった。

2-2) GaAs 基板上副格子交換 GaAs/AlGaAs 周期反転再成長の最適化

副格子交換エピタキシー法を用いた半導体 QPM 波長変換デバイスを実用化するためには、以下の条件を満たす再成長条件を確立する必要がある。ひとつは、波長変換効率に直接影響するデューティ比をコントロールするために反転・非反転境界(人工逆位相境界)が(100)基板に対して垂直に伝播するように制御すること、もうひとつは、伝搬損失を低減するために再成長表面・界面の平坦性を確保することである。GaAs(100)基板上の GaAs/Ge/GaAs 副格子交換エピタキシーと周期エッチング、MBE 再成長と化学機械研磨(CMP)による平坦化によって作製した周期反転 GaAs テンプレート上での GaAs の MBE 再成長について最適化をおこない、上記の 2 点を満足する再成長条件を見出すことに成功した。前者の逆位相境界の伝播方向は、MBE 成長時の V-III 比のみでほぼ完全に制御できた。GaAs 成長時の Ga と As

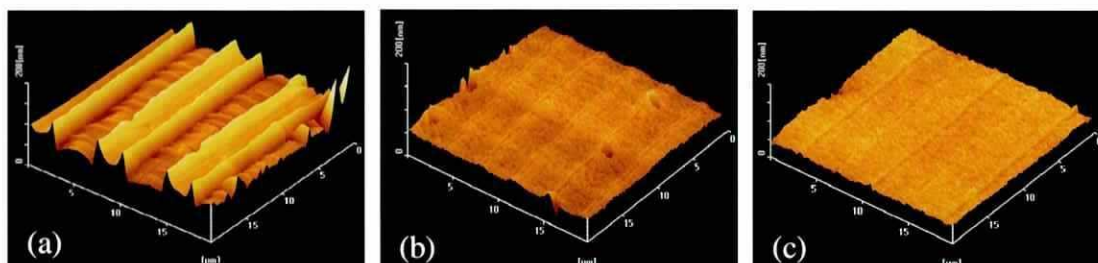


図1 周期副格子反転 GaAs テンプレート基板上に MBE 再成長したエピタキシャル層の表面 AFM 像。
(a) 再成長温度 600°C の GaAs, (b) 再成長温度 300°C の GaAs, (c) 再成長温度 350°C の $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$ 。

のフラックス比を 44 前後に設定することにより、逆位相境界が垂直に伝播するようになる。後者の再成長表面・界面の平坦性に関しては、もっぱら成長温度が支配的要因となっている。Ga 原子が GaAs(100) 面上で $[0\bar{1}1]$ 方向へ優先的に拡散するという異方性拡散のために、優先拡散方向が互いに 90° 回転したドメインが交互に並んだ周期反転 GaAs(100) 表面では特徴的な成長レートの空間分布が発生することになる。この現象について拡散方程式に基づいた理論解析をおこない、低温成長によってこの成長レート分布を軽減できることをあきらかにした。図 1 に 600°C で再成長した GaAs と 300°C で再成長した GaAs の表面構造の AFM 像を示す。低温成長では Ga 原子の拡散の異方性が小さくなり、残存段差の RMS 値は 4.5 nm まで小さくなることを確認できた。AlGaAs の場合にも GaAs の場合と同様、低温成長によって表面の平坦性が格段に改善できることも確認した(図 1(c))。

2-3) 周期反転 GaAs/AlGaAs 導波路における QPM 光パラメトリック過程

赤外域で動作する超小型光パラメトリックデバイスを念頭に置いて QPM 周期 $7.6\ \mu\text{m}$ の GaAs/AlGaAs リッジ型導波路を作製し、長さ 2 mm のデバイスでパラメトリック蛍光測定をおこなった。用いたデバイスは化学エッチングによって平坦化したテンプレート上に通常温度で作製したもので、上記の最適化をおこなっていない。波長 1064 nm の TM 偏光励起光に対して対称性を反映した TE 偏光のシグナルが得られた。室温で得られたパラメトリック蛍光のピーク波長は 1653 nm で、文献の屈折率データを用いた計算値 1655 nm とよく一致した。QPM シグナルの半値幅から見積もった実効的相互作用長は 0.9 mm で、残存段差による伝播損失を考慮すると妥当な値である。パラメトリック蛍光のピーク波長の温度依存性を測定したところ、図 2 のような温度チューニングカーブが得られ、その温度係数は波長 $1.6\ \mu\text{m}$ 付近で -1.3 nm/K 、 $3\ \mu\text{m}$ 付近で 4.4 nm/K であった。また、得られた規格化変換効率は上記の実効的相互作用長とコンシステントであった。したがって、最適化した作製プロセスを用いて低損失化が実現できれば、理論予測どおりの高効率デバイスが実現できるものと考えられる。周期反転半導体導波路における QPM パラメトリック相互作用の観測は、本研究において初めて実現されたものである。

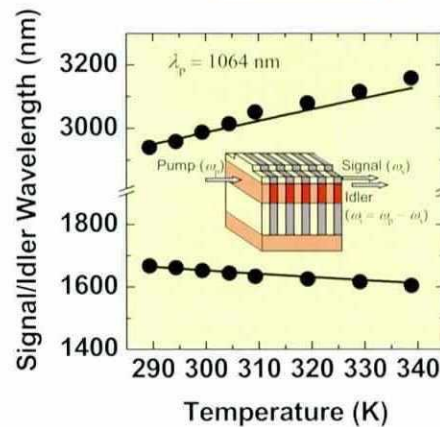
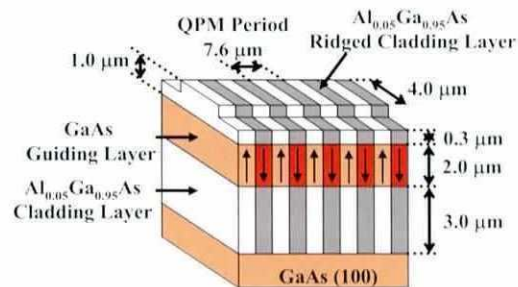


図2 周期反転 GaAs/AlGaAs リッジ型導波路の構造と QPM 光パラメトリック蛍光の温度チューニング特性

3. 主な論文等

- 1) H. Tachibana, T. Matsushita, K. Ara, and T. Kondo: "Quasi-Phase-Matched Parametric Fluorescence in Periodically Inverted GaAs Waveguides," Tech. Dig. Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO2003), CMA6 (2003).
- 2) T. Yamamura, T. Matsushita, T. Koitabashi and T. Kondo: "Influence of Anisotropic Diffusion of Ga Atoms on GaAs Growth on Alternately Inverted (100) Substrates," Jpn. J. Appl. Phys., **44**, L1397-1399 (2005).

4. その他

特許出願

近藤高志: "疑似位相整合型波長変換素子及びその製造方法," 特開 2005-115150.

著書

近藤高志: "分極反転デバイスの基礎と応用"(分担執筆, 宮澤信太郎・栗村直監修)(オプトロニクス社, 2005)「半導体材料」pp. 214-226.