

## 量子ドット網構造半導体の研究

## Quantum Dot Network Structure Semiconductor

(研究プロジェクト番号: JSPS-RFTF 96P00103)

プロジェクトリーダー

堀越 佳治 早稲田大学理工学部・教授

コアメンバー

安藤 恒也 東京大学物性研究所・教授  
平山 祥郎 NTT物性科学基礎研究所・特別研究員

メンバー

吉野 淳二 東京工業大学理学部・教授  
安藤 精後 NTT物性科学基礎研究所・主任研究員  
宗田 孝之 早稲田大学理工学部・教授

## 1. 研究目的; 研究項目

研究プロジェクトの目標は、GaAs/AlGaAs、GaAs/InAsをはじめとする - 族化合物半導体の微細構造において、もともとのバルク材料では実現できない、新しい現象や機能の発見を行い、デバイスへの応用方向を探るうとするものである。本プロジェクトは光微小デバイス（安藤精後、宗田孝之、堀越佳治）、電子相関・電子物性（平山祥郎、吉野淳二、堀越佳治）、低次元電子伝導理論（安藤恒也、平山祥郎）の三つのサブグループから構成されている。

## 2. 光微小デバイスの研究成果

新しい現象や機能を見出すためには、マイクロ構造やナノ構造における高い構造精度が不可欠である。このため本プロジェクトでは、いわゆる“自己組織化”の手法を用いず、一貫してリソグラフィに基づく製法技術の研究をすすめてきた。具体的な加工技術として選択エピタキシャル成長法（ASE）および、反応性イオンエッチング法（RIE）を用いた。ASEにおいては境界面にファセットが発生するが、このファセットの制御技術確立することにより、原子スケールで平坦な側壁をもつ微細構造を自在に製作できる技術を実現した。この例を図1に示す。それぞれの構造のサイズは数 $\mu\text{m}$ であるが、この技術により、100nmの構造の製

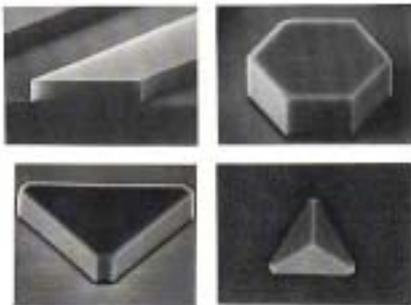


図1 GaAs (111) B 基板上に成長したさまざまなGaAs/AlGaAs 微細構造。側壁は{110}ファセットで形成されている。

作が可能であることを確認した。

これらの構造を光微小デバイスに応用し、極めてしきい値の低い六角形ディスクレーザー、三角形ディスクレーザー、および低損失光導波路等の実現に成功した。図2は光導波路をもつ正三角形ディスクレーザーの発振パターンを示したもので、スペクトルの解析から、発振はリングモードによって生じていることが明らかになった。

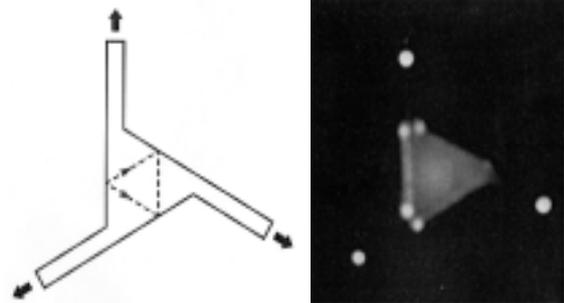


図2 光導波路をもつ正三角形ディスクレーザーの構造と発光パターン。光導波路も含め側壁はすべて{110}ファセットで形成されている。

## 3. 電子輸送現象・電子相関研究の成果

電子や正孔の相互作用を見るためには純粋な材料、言い換えれば移動度の著しく高い材料が不可欠である。これまでの我々の研究で電子移動度  $10^7\text{cm}^2/\text{Vs}$  を超える高品質 AlGaAs/GaAs ヘテロ接合を実現しているため、これを基礎にナノ構造の製作を行った。最初に表面ショットキー障壁を用いた量子ポイントコンタクト（一次元バリスティックチャネル）の形成を試み、ゼロ磁場におけるスピン相互作用によると思われるコンダクタンスの異常を発見した。

量子ドット網構造については ASE および RIE によりアンチドット構造を形成することにより製作した。図3は ASE により成長したアンチドット構造で、ドット半径 90nm のものである。ASE ではドット半径 60nm、密度  $5 \times 10^9\text{cm}^{-2}$  までの構造の製作に成功した。同様

な構造を高移動度ウエハ上に RIE 加工を施すことにより製作した。この場合さらに密度の高い量子ドット網の形成が可能となり、その密度は  $9.2 \times 10^{10} \text{cm}^{-2}$  に達した。この値は、規則正しい量子ドット格子としてはこれまでに報告されたものの中で最も高いものである。

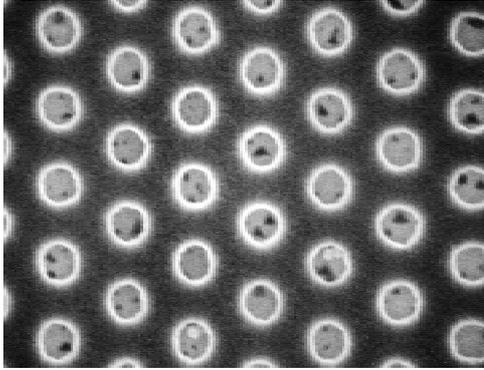


図3 MEE 法による選択エピタキシャル成長法で形成したアンチドット格子。ドットの直径は 90nm。

図4は、RIE法で製作した  $9.2 \times 10^{10} \text{cm}^{-2}$  の密度をもつ量子ドット網の伝導特性を、単位ドットあたりの電子数と磁場の関数として示したものである。伝導特性はグレイスケールで示してある。整数量子ホール効果によるコンダクタンス極小点は斜めの線として現れている。量子ドット網の特徴は垂直な直線の出現である。これらの直線は特定の電子密度においてコンダクタンスが極小になることを示している。コンダクタンスの極小は、予想通り単位量子ドットあたり1個の電子が分布したとき現れるが、この電子密度以下の領域に多くの垂直な直線が現れる。これは複数個のドットから成るドットクラスターに特定の数の電子が分布すると電子系が安定化することを示しており、新しい発見である。理論グループでは、これらの解明を目指して量子ドット網の伝導特性の評価を行い、古典論と量子論の境界領域の特性を明らかにし、実験との比較をおこなった。

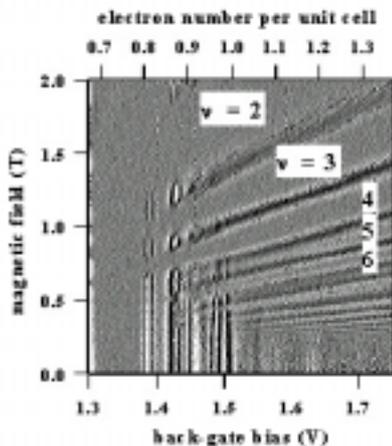


図4 RIE法により高移動度 AlGaAs/GaAs ウエハ上に形成したアンチドット格子の伝導特性。量子ドット密度  $9.2 \times 10^{10} \text{cm}^{-2}$ 、ドット半径 30 nm。

#### 4. まとめ

半導体マイクロ構造やナノ構造は、バルク結晶からは考えられない新しい現象や機能を生む可能性を秘めている。本プロジェクトの目標は、高い精度の微細構造を実現し、上記の特徴を発見するとともに、それらのデバイスへの応用方向を探ることにあつた。微小光デバイス研究における成果は、将来のブロードバンドシステムにおいて高効率の光集積回路への応用を可能にするものと期待できる。また、電子相関、量子ドット網の研究においては、スピン相互作用、クーロン相互作用に基づく新しい現象を発見した。これらの発見は、今後半導体ナノ構造を応用していく上で、重要なヒントを与えるものと期待される。

#### 主な発表論文

1. Y. Horikoshi, S. Ando, H. Ando, N. Kobayashi, "Surface atomic processes during flow-rate modulation epitaxy" Appl. Surf. Sci. 112, 48-54 (1997)
2. S. Ando, N. Kobayashi and H. Ando, "Short-cavity Fabry-Perot lasers using crystal facets" Jpn. J. Appl. Phys. 37, L105-107 (1998)
3. S. Uryu and T. Ando, "Numerical Study of Localization in Antidot Lattices" Phys. Rev. B 58 10583-10588 (1998)
4. Y. Horikoshi, "Advanced epitaxial growth techniques: Atomic layer epitaxy and migration-enhanced epitaxy" J. Crystal Growth, 201/202, 150-158 (1999)
5. S. Nuttinck, K. Hashimoto, S. Miyashita, T. Saku, Y. Yamamoto, and Y. Hirayama, "Quantum point contacts in a density-tunable two-dimensional electron gas" Jpn. J. Appl. Phys. 39, 655-657 (2000)
6. A. Kawaharazuka, T. Saku, Y. Tokura, Y. Horikoshi and Y. Hirayama, "Transport characteristics of electrons in weak short-period two-dimensional potential arrays" Appl. Phys. Lett. 79 (3) 427-429 (2001)