

超ヘテロ・ナノ結晶の創製と 光・電子新機能素子への応用

渡辺正裕 研究室

- 専門分野：量子効果光・電子デバイス、ヘテロ・ナノ結晶工学
- Home Page： <http://www.pe.titech.ac.jp/WatanabeLab/>



研究目的

金属・絶縁体・半導体など、性質が異なる複数の材料を用いたナノメートル厚の薄膜、あるいは微結晶を原子レベルで接合させる技術を創出するとともに、その新しく作り出された人工結晶（超ヘテロ・ナノ結晶）の中で生じる光及び電子の量子物性を応用した新機能素子の実現を目指している。

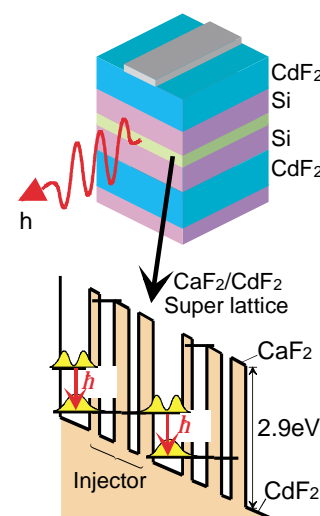
研究テーマ

1. ヘテロ・ナノ結晶サブバンド間遷移レーザー

異なる種類の材料（半導体、絶縁体、あるいは金属）を接合させると、その接合界面に大きな伝導帯バンド不連続が形成され、そのポテンシャル障壁を利用して人為的に電子やホールを閉じこめたり、波の性質を利用した共鳴トンネルなどの量子現象を利用することが可能となる。従来から光通信や光記録などに用いられている半導体レーザーなどの光デバイスでも、化合物半導体の組成を変化させることによりその伝導帯バンド不連続がキャリア閉じ込めや量子井戸形成に利用されてきたが、類似の材料を用いた半導体ヘテロ接合では伝導帯バンド不連続の大きさに限りがある。これを性質の大きく異なる材料で構成すれば、バンド構造の設計自由度は大幅に拡大し、これまでに考えられなかった新しい応用や学問分野が開けてくる。本研究では、シリコン基板上に単結晶薄膜形成可能な絶縁体・半導体材料を用いて、可視～赤外の発光の可能性を有するサブバンド間遷移レーザーを理論的に提案し、実際の結晶成長、素子形成の基礎実験を行っている。

2. 超ヘテロ・ナノ結晶を形成する技術の開拓

本研究室では、原子レベルで接合したナノ結晶を実現するため、シリコンと結晶構造が類似で良質の結晶が得やすい材料構成を採用してナノ結晶形成の実験を行っている。弗化カルシウム（ CaF_2 ）と呼ばれる材料は、禁制帯幅 12eV の弗化物系絶縁物であり、シリコン基板上に単結晶薄膜成長可能であることから、結晶格子の乱れによる電子波の散乱を抑えるのに有利であり、さらに、禁制帯幅が大きいため絶縁耐圧が大きく、エレクトロニクス応用に適した性質を持っている。これまでの結晶成長技術の研究から、3-4原子層（1ナノメートル程度）の弗化カルシウムと、金属コバルトシリサイド、半導体シリコン、あるいは絶縁体弗化カドミウムの量子井戸をサンドイッチした人工積層単結晶の形成が可能となってきた。この新しく可能となった人工結晶に電極を形成して膜に垂直方向の電流電圧特性を測定したところ、既存の半導体材料では得ることが困難な微分負性抵抗特性をはじめ観測し、構造制御により特性が変化することを確認した。



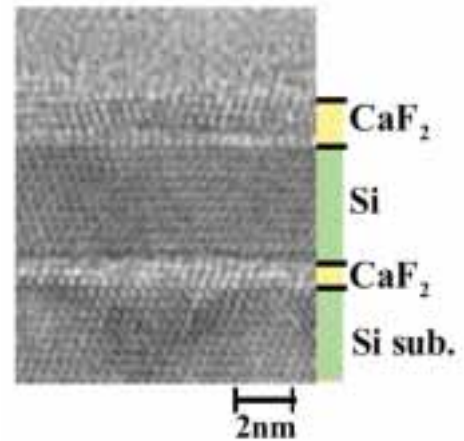
絶縁体 CaF_2 / CdF_2 超格子サブバンド間遷移レーザーの模式図と超格子光活性層（1周期分）のバンド構造

これは数原子層厚の超ヘテロ結晶の量子物性を人工的に制御できる可能性を示している。今後、基板の原子ステップやテラスなどの原子レベル構造制御により、さらに複雑な量子構造を、より精密に設計・制御することを目指す。

3. 超ヘテロ・ナノ結晶の光・電子新機能

ヘテロ・ナノ結晶を用いた共鳴トンネルダイオードの微分負性抵抗特性は、既存のトランジスタ集積回路と融合することにより、回路の高機能化・高集積化に役立つ可能性がある。本研究では同一シリコン基板上にトランジスタと超ヘテロ・ナノ結晶共鳴トンネル素子を集積化する研究を行っている。また、弗化カルシウム-シリコンあるいは、弗化カルシウム 弗化カドミウムの組み合わせを用いて形成した量子井戸構造中のサブバンドで

生じることが予想される光・電子相互作用を実験的に実証し、発光・受光デバイス応用への基礎的評価を行うとともに、それらのデータをもとにして、デバイス応用の可能性を具体化していくことを目指す。



シリコン基板上に形成された3原子層弗化カルシウム / 12原子層シリコン / 3原子層弗化カルシウムの人工積層単結晶の透過型電子顕微鏡による断面格子像

教員からのメッセージ

修士課程では具体的な研究テーマへの取組みを通して基礎力を身につけてください。すなわち、基礎からものを考える力（基礎学力の習熟）、計画を立て、実行し、その結果からあらたな実行計画を立案する段取り力、人にわかりやすい言葉で説明し、共感を引き出すコミュニケーション力、などです。博士課程ではさらに進んで、自らの考えで研究テーマを引き出し、実現していく訓練を通じて、独創力を磨きます。

関連学会・国際会議等

学会：応用物理学会、電子情報通信学会等
国際会議：MRS, EMC, SSDM 他

参考文献

1. 渡辺正裕、末益 崇、浅田雅洋: 金属/絶縁体ヘテロ接合電子デバイス, 応用物理, 63, 124-131 (1994)
2. M. Watanabe, T. Matsunuma, T. Maruyama and Y. Maeda; "Electroluminescence of Nanocrystal Si Embedded in Single-Crystal CaF₂/Si(111)", Jpn. J. Appl. Phys., 37, L591-L593 (1998)
3. M. Watanabe, T. Funayama, T. Teraji, N. Sakamaki, "CaF₂/CdF₂ Double-Barrier Resonant Tunneling Diode with High Room-Temperature Peak-to-Valley Ratio," Jpn. J. Appl. Phys., 39 [7B] L716-L719 (2000)
4. M. Watanabe, N. Sakamaki, and T. Ishikawa; "Feasibility study of CdF₂/CaF₂ intersubband transition lasers," The 4th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, WC1-5, II-40 (2001)
5. M. Watanabe, M. Matsuda, H. Fujioka, T. Kanazawa, and M. Asada; "Structure Dependence of Negative Differential Resistance Characteristics of CdF₂/CaF₂ Resonant Tunneling Diode grown by Local Epitaxy on Silicon", 2003 Silicon Nanoelectronics Workshop, 8-07, 106-107 (2003)