

「金属/絶縁体/半導体ヘテロ超格子の形成とその量子効果デバイス応用に関する研究」

東京工業大学大学院 総合理工学研究科 渡辺正裕

絶縁体、半導体、金属などの異なる材料同士をエピタキシャル積層成長した人工ヘテロ構造には、その接合界面に際立って大きな物性の相違が期待できる。特に、界面に大きな伝導帯バンド不連続が存在する場合、それらをナノメートル層厚で多層に積み重ねたヘテロ構造を形成することにより、ヘテロ構造中を走行する電子波を、反射や共鳴により制御したり、サブバンド間遷移を利用して光との相互作用を人工的に制御することが可能となる。しかも、これらの量子効果を用いた電子や光の人工制御が原理上室温でも可能となる点で応用上大きな波及効果を期待できる。さらに、シリコンと整合性の良い材料系を採用することで、次世代の集積回路技術と親和性が高い新技術の創出が期待される点に本研究の特徴がある。

本研究ではシリコン基板上へのエピタキシャル特性に優れた金属/絶縁体/半導体材料として、弗化物系絶縁体弗化カルシウム・弗化カドミウム、シリサイド系金属コバルトシリサイド、及び半導体シリコンを採用している。これらの材料を組み合わせた極薄膜

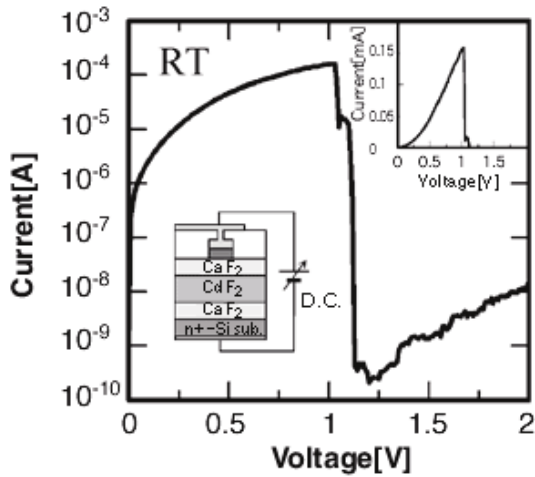


図2 CaF₂/CdF₂共鳴トンネル構造の室温電流電圧特性。ピーク/バレー電流比が10万を越える微分負性抵抗が観測されている。

な成果である。これらの成果により、本材料系で量子井戸中の共鳴トンネルを利用した微分負性抵抗型の非線形電子素子によるメモリ回路や、サブバンド間の光遷移を利用した利用した発光/受光素子の可能性が射程距離に入ったといえる。

超ヘテロナノ結晶を用いた量子構造の形成の際には、原子層オーダーの層厚制御性が要求されるが、異種材料同士でかつ、膜厚が数原子層と極限的に薄い場合、格子不整合及び化学結合の違い等により、多くの場合、2次元あるいは3次元的な核成長過程を経てその核サイズで決まる密度の結晶粒界あるいは欠陥が膜中にランダムに形成されることとなる。これらは物性の系統的な評価や、現象の再現性、特性の均一性などに深刻な障害となるため、これらを排除する手法を創出する必要がある。

そこで本研究では、成膜前に微細加工技術を用いて臨界サイズ以下の結晶成長領域をあらかじめ定義し、その限られたナノ空間中にほぼ完全な積層結晶を形成する手法を考案した。まず臨界サイズとして基板のテラス幅を仮定すると、そのテラス幅よりも小さい領域に結晶成長及び素子形成を行えば、原子ステップが原因で発生する致命的な積層欠陥を大幅に抑制することができる。図3に示すような電子ビーム露光装置でパターンニングされたナノサイズ領域へのエピタキシャル成長を試みたところ、ナノ微小孔の直径がテラス幅を下回ると、この手法を用いて作製された共鳴トンネルダイオードの均一性・再現性が著しく改善される結果を得た。現在この技法を発展させて、超ヘテロ量子構造の精密化及び多層構造化を精力的に推進している。

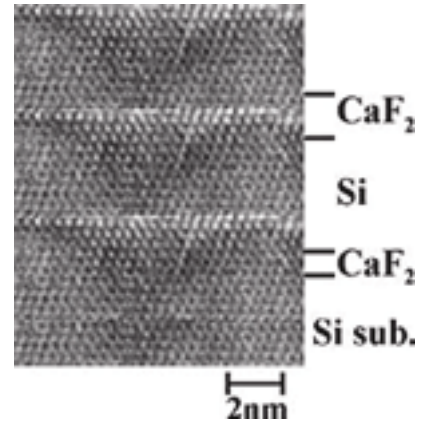


図1 シリコン基板上に形成された数原子層厚の弗化カルシウム(CaF₂)とシリコン (Si)の積層超格子断面格子像。

積層エピタキシャル結晶成長技術を開拓し、これをもとに試作した金属/絶縁体共鳴トンネルダイオードの微分負性抵抗特性をはじめて観測する[1]とともに、金属/絶縁体量子効果3端子増幅素子の動作を実証した。絶縁体/半導体量子構造の一例として、シリコン基板上に形成した弗化カルシウム、シリコン量子構造の一例を図1に示す[2]。3原子層(1nm)程度の弗化カルシウム層を成膜することが可能となっており、この構造では室温における微分負性抵抗特性も観測されている。

また、弗化物系絶縁物同士の組み合わせである、弗化カルシウム・弗化カドミウムヘテロ構造では、三重障壁共鳴トンネルダイオード構造の室温微分負性抵抗を始めて実証[3]するとともに、二重障壁共鳴トンネルダイオード構造の作製と評価において、既存の化合物半導体ヘテロ構造では原理的に困難な十万を越えるピーク対バレー電流比を有する巨大微分負性抵抗を世界で始めて実証[4]した。これは伝導帯バンド不連続が大きいという特徴を有する絶縁体ヘテロ構造を用いて初めて実現したという点で画期的な成果である。

また、弗化物系絶縁物同士の組み合わせである、弗化カルシウム・弗化カドミウムヘテロ構造では、三重障壁共鳴トンネルダイオード構造の室温微分負性抵抗を始めて実証[3]するとともに、二重障壁共鳴トンネルダイオード構造の作製と評価において、既存の化合物半導体ヘテロ構造では原理的に困難な十万を越えるピーク対バレー電流比を有する巨大微分負性抵抗を世界で始めて実証[4]した。これは伝導帯バンド不連続が大きいという特徴を有する絶縁体ヘテロ構造を用いて初めて実現したという点で画期的な成果である。

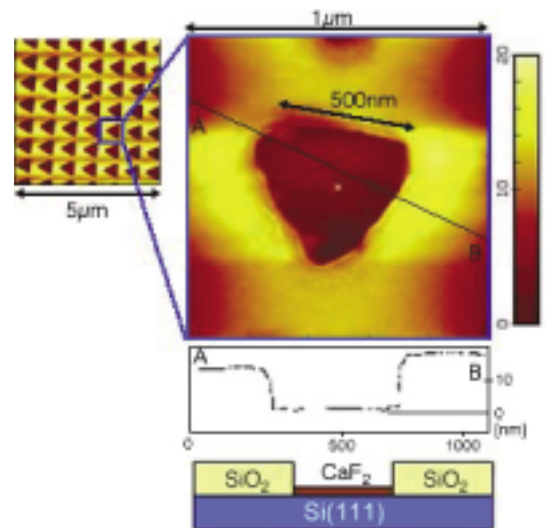


図3 Si基板上にSiO₂をマスクとして500nm径のナノサイズ微小孔中に選択エピタキシャル成長した3原子層厚のCaF₂の表面AFM像。孔の底に原子レベルで平坦なCaF₂膜が形成されている。

References

- [1] M. Watanabe, T. Suemasu, S. Muratake and M. Asada, "Negative Differential Resistance of Metal(CoSi₂)/Insulator(CaF₂) Triple-Barrier Resonant Tunneling Diode," Appl. Phys. Lett., 62, 3, pp.300-302, 1993.
- [2] M. Watanabe, Y. Iketani, M. Asada, "Epitaxial Growth and Electrical Characteristics of CaF₂/Si/CaF₂ Resonant Tunneling Diode Structures Grown on Si(111) 1 ° -off Substrate," Jpn. J. Appl. Phys., vol.39, no.10A, pp.L964-L967, 2000.
- [3] M. Watanabe, Y. Aoki, W. Saitoh and M. Tsuganezawa, "Negative Differential Resistance of CdF₂/CaF₂ Resonant Tunneling Diode on Si(111) Grown by Partially Ionized Beam Epitaxy," Jpn. J. Appl. Phys., vol.38, no.2A, pp.L116-L118, 1999.
- [4] 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., vol.39, no.7B, pp.L716-L719, 2000.