



深津 晋

東京大学大学院総合文化研究科

プロフィール：東京大学大学院工学系研究科物理工学専門課程博士課程中途退学、同年東京大学先端科学技術研究センター助手、平成6年東京大学教養学部基礎科学科助教授、平成8年東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻助教授

専門：物性物理、半導体工学 趣味：息子と遊ぶこと、自然観察、サッカー

マイクロ安定化半導体スーパーヘテロ界面の高度光機能化

要旨

半導体の分野では、ヘテロ構造といえば同族異種物質の接合を考えるのが常識である。本研究では、従来の枠組みを越えた、物質横断型の新しい半導体ヘテロ界面（スーパーヘテロ界面）を提案し、強制的エピタキシャル接合による新奇界面の構築と、界面ポテンシャルの制御にもとづく光機能化を試みた。

族横断型すなわち極端な結晶系不一致・格子不整合の条件下では、ヘテロ界面は潜在的に不安定であり、このような界面不安定性は、表面原子の排他的な凝集を促す。このような一種の自己組織化過程を利用すれば、同族元素の組み合わせのみでは得られない電子状態、光学特性を有する新しい界面・量子構造が構築できることが期待される。本研究では、SiとIII-V族化合物半導体に注目し、安定化された界面量子構造の創成と、輻射再結合特性を基軸とする物性制御を試みた。

スーパーヘテロ量子ドットの自発形成

シリコン分子線エピタキシ(MBE)を用いて、Si基板上へのInAs,InSb,GaSbの量子ドット形成を行い、自己組織化のカイネティクスを調べた。(同装置に化合物半導体を導入することが、本研究のポイントである。実は、化合物の導入は、不純物の背景ドーピングの観点から忌避されてきた。実際には、SiGe量子井戸などの輻射再結合には殆ど影響しないことが判明した。)基板温度、III族分子線強度、V/III比をパラメータとして成長モード遷移、量子ドットのベースサイズ、高さ、分布密度、配向性などの制御性について検討した。その結果、Si上では予想どおりに格子歪を駆動力として、成長当初からドットが自己組織化する、いわゆるVolmer-Weber型モードが選択され、密度とサイズには明瞭な相反関係があることがわかった。図1は、スーパーヘテロ量子ドットの発生に伴う、高速電子線回折(RHEED)像の変化である。基板の2x1構造が、ドット発生直後に1x1に変化し、急激な輝度減衰をともなってやがて3次元パターンに移行する。この後、Siキャップ成長を行うと2x1再構成表面が回復する。成長温度、材料供給速度比依存性の概要を図2に示した。ドットのサイズ・密度変化は、概ね表面拡散および反応律速で説明される。ただし、通常のIII-V族量子ドットとは異なり、V/III比が1程度で密度とサイズがそれぞれ最大(10x10 cm⁻²)、最小(3-40nm)となった(最適化基板温度300℃の場合)。また、ドットのサイズ分布は単峰の分布となり、40nm近辺に安定点が存在する。ドットのモフォロジはほぼ大きさには無関係に[110]およびその直交方向にベースが配向した、ファセット終端の規則多面体であった。ド

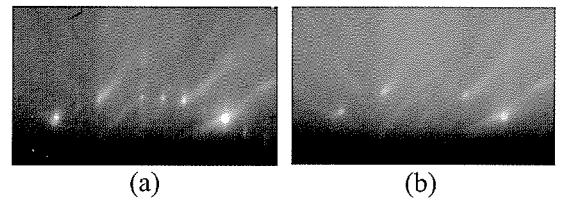


図1. InSb/Siスーパーヘテロ量子ドット形成過程を示す電子線回折パターン

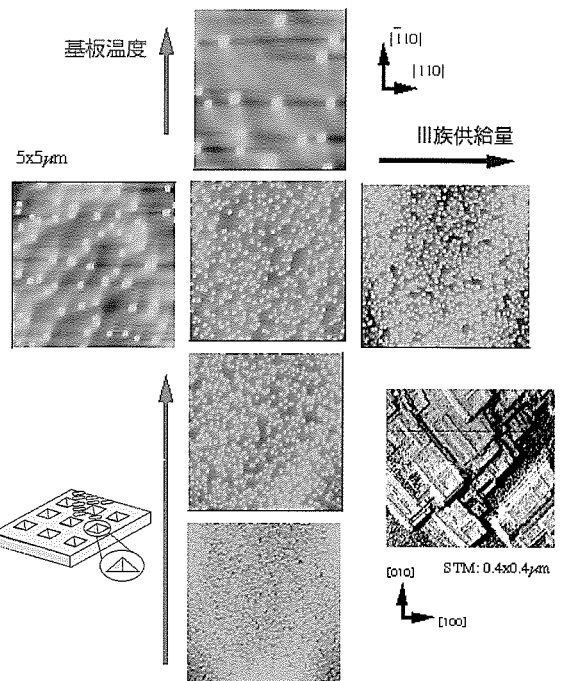


図2. InSb/Siスーパーヘテロ量子ドットのAFM像(右下はSTM像)

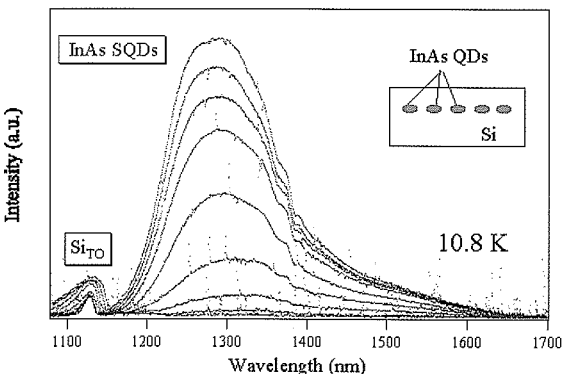


図2. InAs/Siスーパー量子ドットの蛍光

ット発生位置の制御に関しては、おそらくScwoebelバリアに基づく効果として、微傾斜基板のステップ端に整列した準規則構造を自発形成することがわかった。

Si中埋め込みInAs,InSb量子ドットの光学特性

Siキャップ層を形成した埋め込みスーパーヘテロ量子ドットにおける光励起後のエネルギー緩和過程を蛍光測定によって調べた。その結果、Inベースの量子ドット(InAs,InSb)では1.2-1.3μm付近にピークをもつSiサブギャップのブロードな

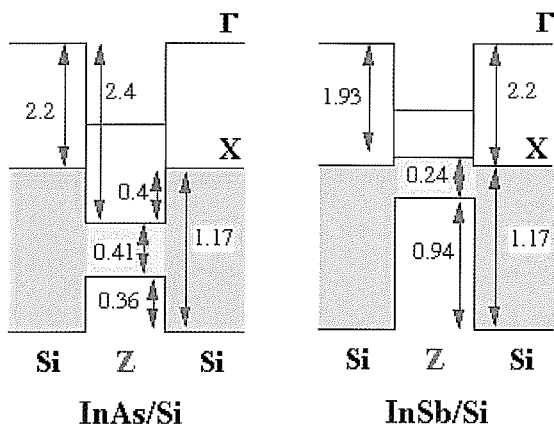


図4. スーパーヘテロ界面のバンド接続

界面に発生する自発双極子が関与していることを示唆する。

また、Inベース量子ドットの蛍光スペクトルは、試料の熱処理にともなってInドープSiのスペクトルと酷似した形状に変化した。これは、Inベース量子ドットの成長温度の上限を決めるとともに、界面準位が強局在性を備えながらも、孤立系ではなく、シリコンバンド端とエネルギー緩和を通して直接につながっていることを示している。

一方、GaSb量子ドットの蛍光特性は、スペクトルの類似性を除いてはInベース量子ドットとは大きく異なった。強度、寿命測定からは、電子状態の局在性がより強く、低散逸の量子ドット構造を構築できることが期待できる。

InAs/Siスーパーヘテロ近赤外検出器

埋め込みIII-V族ドットの新しい利用法として、再分布したInのSiサブギャップ準位を介した極薄活性層の近赤外検出器を考案した。代表的な構造、電極配置の検出器を試作し、本研究で新規開発した超広帯域波長可変レーザを用いて、1-2 μm 帯での波長感度とサブGHzの動作帯域を検証した。また、これらの検出器の波長感度は、数分子層InAsのみを活性層とした検出器よりも1桁以上高かった。

マイクロキャビティによる間接遷移物質の自然放出制御

蛍光寿命の観測結果と理論計算からは、Si中埋め込みIII-V族ドットではバンド接続がタイプIIとなるため、ドットが直接遷移であるにもかかわらずシステムとしては間接遷移として振舞うことがわかった。そこで間接遷移制御のアプローチとしてマイクロキャビティによる自然放出制御を試みた。

狭帯域幅のSiを選び、SOIの最上層を活性層として、スパッタSi/SiO₂分布ブラッグ反射器によりQ値が10-20、反射率70%:99.9%の非対称FP共振器を形成した。FPを形成していないSOIをコントロールとして発光減衰を観測したところ、因子2-3の再結合速度増強が見出された。これは、フォノン放出過程を含んだ輻射再結合でも、また散逸があるシステムでも自然放出制御が観測可能な事例となっている。

発光が得られた。(図3)一方、GaSbもブロードな蛍光を示すが、ピーク位置は低エネルギー側に移動する。相対強度はInベース量子ドットの方が弱い。励起強度依存性、温度消光特性からは発光性再結合が励起子に起因するものであるが、寿命が数100ns以上に及ぶことから、強い束縛状態あるいはSi由来の間接遷移である可能性があることがわかった。以上の実験結果は、伝導帯端が空間的にはSi内に位置する一方、正孔はIII-V族量子ドットに局在することを意味する。すなわち、タイプII型のバンド接続となる。図は変形ポテンシャルによる計算結果である。ここではInベースのスーパーヘテロ界面の接続を示したが、ほぼすべてのIII-V族とSiの接合において、図のようにSiが伝導帯端を主張する間接遷移となる。

一方で、蛍光エネルギーに明確な量子サイズ効果が観測されない事実は、サイズおよびその揺らぎが大きいことに加えて、光学遷移が量子ドット内部の電子状態ではなく、界面近傍に発生する局在準位によるものであること、Si/III-V族