

ナノスケール歪場による半導体ナノ構造の発光特性制御の基礎的研究

プロジェクト代表者：荒居善雄（理工学研究科・教授）

1 緒言

In(Ga)As/GaAs 量子ドット (QD)は、半導体レーザーや発光ダイオード、単電子素子、光検出素子、量子回路等の電子デバイスやオプトエレクトロニクスの領域において応用が期待されている。QD を用いたデバイスの性能を高めるためには、QD の光/電子特性の詳細な理解とその最適化が必要であり、そのためには、QD の力学的、光学的ならびに電子的特性を測定することが重要である。具体的には、QD の位置と QD が受ける歪および QD の発光応答を、それぞれ測定することによって達成される。しかし、現在までに、個々の QD の受ける歪と QD の発光応答を同時に測定した研究は少ない。光ファイバーナノプローブの押し込み試験は QD を含む試料に局所的な歪場を形成し、プローブの開口部近傍に限られた QD の発光を測定可能である。しかし、発光する QD の位置を同定する試みは、前述した QD の応用においてナノプローブ押し込みによる QD のエネルギーレベル最適化に必要な知識であるにも関わらず、従来行われていない。プローブ先端の形状が精密に加工されていなかったこと、QD の形状や受ける歪場を再現するためには従来の 2 次元解析は不十分であったこと、ナノプローブの押し込み試験において押し込み荷重が実測されず、試料とプローブの相対変位から間接的に推定されていたことが、その原因と考えられる。

本研究では、ナノプローブ押し込みシステムを発展させ、QD の位置と QD が受ける歪および QD の発光応答をそれぞれ測定する新しい実験技術を導入した。この新しいナノプローブ押し込みシステムを用いて、In_{0.5}Ga_{0.5}As/GaAs QD の新規な発光特性を明らかにした。また、この実験結果を理解するために理論解析を行い、そのメカニズムを明らかにした。

2 方法

エネルギーバンドに及ぼす歪の影響を解析した。さらに、格子不整合歪のメカニズム、議論の対象となる InGaAs/GaAs QD のエネルギーバンド構造および歪ハミルトニアンについて検討した。

本研究では、極低温環境下に高感度ロードセルを組み込むことにより、発光測定と押し込み荷重測定を同時に行った点に、試験方法における特徴がある。

3 結果および考察

押し込み試験において、発光強度の増強が認められるとともに、最大約 90 meV の高エネルギー側へのシフトが観察された。単位押し込み荷重当たりのエネルギーシフト量は、発光輝線ごとに 99 から 146 meV/mN の範囲で変動した。水平方向へのスキャンを伴う繰り返し押し込み試験結果から、単位押し込み

荷重当たりのエネルギーシフト量の変動は個々のQDとナノプローブの相対位置の違いに起因していることが明らかになった。水平方向スキャン押し込み試験結果では、異なる位置にあると考えられる個々のQDからの発光輝線の描く形状は異なることが明らかになった。

解析は、格子不整合歪の解析とナノプローブ押し込みの解析に分かれる。垂直歪成分では、押し込み方向の垂直歪成分が支配的であった。静水圧歪分布は、ナノプローブ直下では半径方向の変化が小さく、ナノプローブと試料の接触端に近づくに伴い、急激に減少する。押し込み方向と半径方向の作る面内のせん断歪成分はナノプローブと試料の接触端直下で急激に増加し、さらに外側では急激に減少する。押し込み方向の垂直歪成分では、押し込みによる歪と格子不整合による歪は同程度であるが、試料面に平行な垂直歪成分では、格子不整合による歪が支配的である。

精密に測定した押し込み荷重に基づき、ナノプローブの押し込みによるQDのエネルギーシフトについて、実験結果とシミュレーション結果の間に定量的な一致が見られた。ナノプローブの直下にあるQDのエネルギーシフトは伝導帯のレベルの上昇が主（78%）であり、価電子帯のレベルの低下（22%）よりも大きい。ナノプローブと試料の接触端直下では、伝導帯のレベルの上昇はナノプローブの直下の場合の1/2程度であるが、価電子帯のレベルの変化はほぼゼロである。周囲の材料の拘束が失われるために伝導帯のレベルの上昇が小さくなり、押し込み方向と半径方向の作る面内のせん断歪成分が増加するために、価電子帯のレベルの低下が小さくなったと考えられる。

水平方向スキャン押し込み試験結果とシミュレーション結果を比較することによりナノプローブに対するQDの相対位置を同定する方法を確立した。ナノプローブ押し込み試験において観察されているQDの多くは、ナノプローブと試料の接触端近傍に位置することが明らかになった。接触端近傍のせん断歪成分の増加が価電子帯のレベルの上昇をもたらし、GaAsのホールに対するポテンシャルの谷間を形成した結果、ホールが接触端近傍に集中し、発光が増強されたと考えられる。

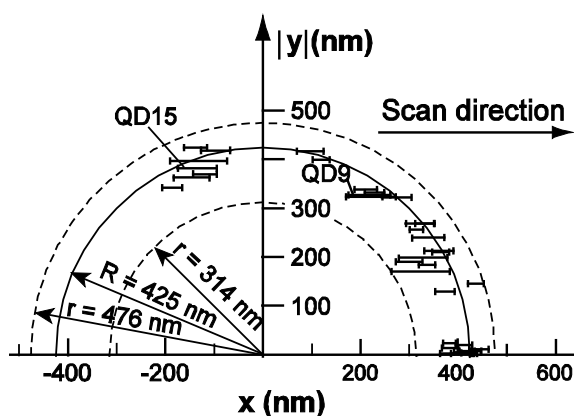


図1 量子ドットの位置同定結果

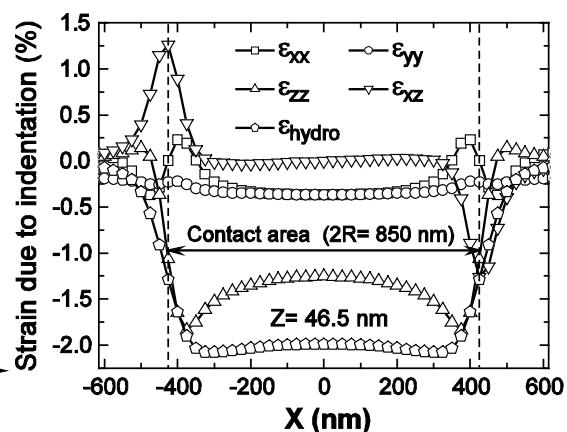


図2 ナノプローブによる歪解析結果