

“ナノの箱に電子を詰め込む：量子閉じこめによる多電子相関の制御”

独立行政法人物質・材料研究機構（理事長：潮田 資勝）量子ドットセンター（センター長：迫田 和彰）の黒田 隆主幹研究員、マルコ アバルキ博士研究員らは、北海道大学と共同で、半導体量子ドット¹⁾に複数の電子を閉じ込めることにより、ナノ極微空間の多電子状態を制御し、そのエネルギー値を変化させることに成功した。本研究結果により、安定かつ低消費電力で駆動可能な半導体非線形デバイスの開発を可能にした。

自然界で電子と陽子を近づけると、2つの粒子はクーロン力²⁾で引かれ合い、水素原子となる。さらにもう1つの電子もしくは陽子を水素原子に近づけると、多体効果³⁾による引力が生じ、合計3つの粒子から成る水素イオン原子／分子となる。

このような量子状態は固体の中にも存在する。半導体中で伝導電子と正孔がペアになると、水素原子に類似した励起子と呼ぶ状態になる。さらに伝導電子や正孔を加えると、イオン化励起子と呼ぶ3つの粒子の複合状態となる。天然の水素イオンと異なり、半導体では量子ドットと呼ばれるナノ構造化が可能である。そのため電子や正孔を数10ナノメートル程度の極微空間に閉じ込めることができ、多電子状態の安定化エネルギーが増加すると期待されていた。

本研究では、NIMS独自開発の液滴エピタキシー法⁴⁾で作製したガリウム砒素量子ドットを用いた。この量子ドットは、ヘテロ界面⁵⁾で結晶格子の大きさが完全に一致していることが特徴である。そのため、かつてないクリーンな量子閉じ込め構造を実現した。単一の量子ドットからの発光信号を計測することにより、イオン化励起子の観測に成功した。特にイオン化励起子の安定化エネルギーが10ミリ電子ボルトと、以前知られていた同種材料の量子井戸構造⁶⁾に比べて、5倍以上の値を示すことがわかった。このような多体エネルギーの増加は、電子が3次元的なナノ空間に詰め込まれる結果、多電子間のクーロン力が顕著に増大するからである。

今回の成果は、従来知られていなかった多電子状態のナノ空間への閉じ込め効果を初めて解明したものであり、学術的に極めてインパクトがある成果である。また、応用技術的な面からは、電子間相関は、光スイッチング素子やレーザーなどの多種多様な非線形効果デバイスの源であり、ナノ構造化によって相互作用強度が制御できれば、安定かつ低消費電力で駆動可能な光半導体デバイスの開発につながると期待できる。本成果は米国の学術誌 *Physical Review B* の速報欄で公開予定である。

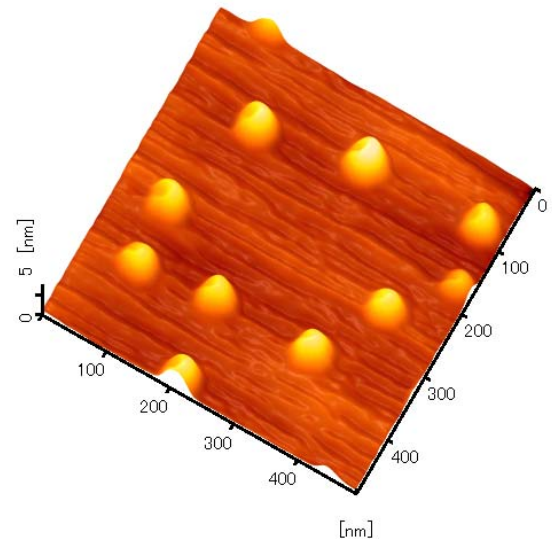


図1. 今回用いたガリウム砒素量子ドットの原子間力顕微鏡写真

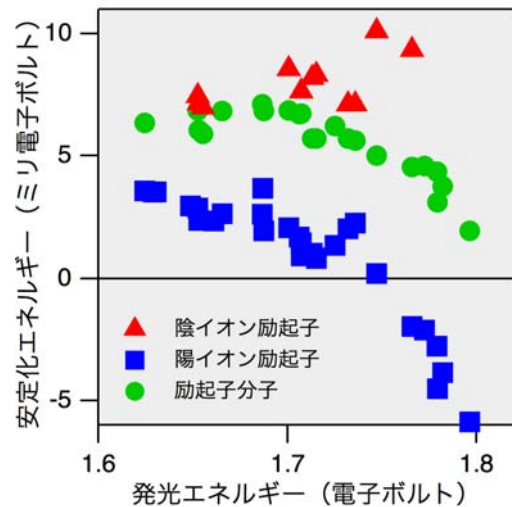
<掲載予定の論文タイトル>

ガリウム砒素量子ドットにおける励起子複合体の結合エネルギー
Energy renormalization of excitonic complexes in GaAs quantum dots, by M. Abbarchi et al.,
to appear in Phys. Rev. B, Rapid Communication.

<参考図>

イオン化励起子の安定化エネルギーと量子ドットの大きさとの関係図。

陰イオン化した励起子の安定化エネルギーは最大 10 ミリ電子ボルトとなることを見出した。一方、陽イオン化した励起子は、質的に異なるサイズ依存性となる。



<脚注>

- 注1 量子ドット：直径数10ナノメートルの半導体の微粒子。異種の半導体に埋め込むことにより、伝導電子をナノ空間に閉じ込めることができる。
- 注2 クーロン力：電荷を持つ粒子の間に働く力。電子と電子はお互いに斥けあい、電子と陽子は引かれあう。
- 注3 多体効果・多体問題：固体中の電子の運動は、周りにある莫大な数の電子や原子核からのクーロン力に影響され、1個の電子の運動とは異なるものとなる。しかし多くの物理特性は、相互作用しあう比較的少数の電子の運動として解析することができ、多体問題と呼ばれる。
- 注4 液滴エピタキシー法：物質・材料研究機構が1990年に開発した半導体量子ドットの作製手法。それまでの量子ドットの作製法と異なり、ヘテロ界面で結晶格子の大きさが一致した量子ドットを作ることができる。多様な材料種で量子ドットが実現できるため、各国で研究が進められている。
- 注5 ヘテロ界面：異なる半導体で作られたナノ構造の接合面のこと。ヘテロ界面では、結晶格子が欠陥をつくることなく、滑らかに繋がらねばならない。従来の量子ドットは、結晶格子の大きさが異なっているため、ヘテロ界面の安定化に問題があった。
- 注6 量子井戸構造：厚さ数10ナノメートルの薄膜のナノ構造。伝導電子を2次元ナノ空間に閉じ込めることができる。

<本件に関するお問い合わせ先>

独立行政法人物質・材料研究機構
量子ドットセンター ナノフォトニクスグループ
主幹研究員 黒田 隆
TEL: 029-860-4194
E-mail: kuroda.takashi@nims.go.jp
URL: http://www.nims.go.jp/laser_kuroda