

近接場光学顕微鏡による半導体量子ドットのコヒーレント制御

北海道大学 大学院工学研究科

戸田泰則

1 はじめに

次世代通信あるいは情報処理技術として、物質の量子状態を直接利用するコヒーレント制御が注目されている。コヒーレント制御を演算素子として応用するためには、長時間に渡ってコヒーレンスが保持される物理現象を探索していく必要があり、ピコ秒もしくはフェムト秒という時間領域における極限計測が必要不可欠である。他方ナノメートル空間に電子、正孔を閉じ込めることで実現される半導体量子ドット (QD) は、原子準位に類似の離散化した状態密度を持ち、その電子-正孔対 (キャリア) と格子 (フォノン) の相互作用は他の半導体高次構造と著しく異なることが予測される。例えば QD におけるキャリアと光学フォノンの相互作用は、光学フォノンの分散特性により著しく抑圧される。しかしながら、キャリアのエネルギーが光学フォノンのエネルギーとちょうど一致する場合は、閉じ込めに起因する相互作用の増強が起こり、キャリアと光学フォノンの結合を強くすると考えられる。本研究の目的として、高い空間分解能をもつ近接場分光 (SNOM) を時間領域に発展させ、半導体量子ドット中キャリアの位相緩和を観測するとともに上述のキャリア-フォノン相互作用を利用した新しいコヒーレント制御の実現を目指した。

2 研究成果

2.1 フォノンイメージング

QD の閉じ込めに由来する光物性を調べるためには、QD の寸法に即した観測技術が必要である。この理由は、閉じ込め構造の体積が小さくなるほど、閉じ込めの大きさや周囲の環境の変化による摂動が大きくなるためである。従来の巨視的な光学測定では、この摂動による不均一広がりのため、QD 本来の光学的性質が隠されてしまう。これに対して SNOM は個々の QD にアクセス可能であり、閉じ込めを反映した狭い線幅をもつ発光が観測される。したがって発光スペクトルを利用することで、より精密な測定が可能となる。さらに SNOM イメージングでは、QD を通して周囲の局所的な光物性を検出することが可能となる。これは局所的なセンサー、いわばナノセンサーというべき役割をもつ。ナノセンサーとしての単一 QD 分光の一例として、本年度研究成果であるフォノンイメージングの結果を簡潔に記す。QD の 0 次元性を利用することで、QD の周囲に熱浴として存在する格子場のイメージングが可能となる。前述のように QD のキャリアと光学フォノンの相互作用は、光学フォノンのエネルギー分散が小さいため、キャリアの緩和に大きな寄与は無いと考えられていた。しかしながら自己形成 QD では、その良質なヘテロ界面の存在と、非常に大きな閉じ込めの存在のために、周囲にあるフォノンとの結合が強まる。この様子は SNOM 像によって明らかとなる。図 1 に励起エネルギーの異なる二つの SNOMQD スペクトル像を示す。緩和エネルギー 36meV 付近に存在するすべての QD が共鳴的に発光している様子が確

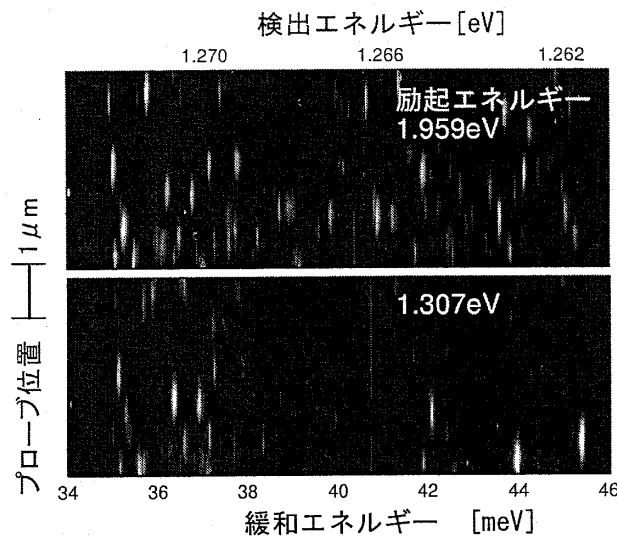


図 1: 異なる励起エネルギーにおける同一場所の発光スペクトル像。緩和エネルギー（励起エネルギーと検出エネルギーの差）が 36meV に対応するドットは発光に寄与している様子が観測される。

認められる。これは GaAs の縦光学フォノンのエネルギーに相当し、この領域に存在するすべての QD に対して共鳴していることからフォノンとキャリアの強い結合が示唆される。

2.2 コヒーレント励起分光

前述の結果にもとづき、フォノンを選択的に励起することでキャリア状態を変化させることが可能であることが理解された。我々はさらに時空間に制御された近接場光の発生を試み、フォノン共鳴を利用した単一 QD のキャリア状態を制御することを試みた。光源にはモードロックチタンサファイアレーザーを用いる。パルス幅、エネルギーはグレーティングペアを用いた光学系で制御され、マイケルソン干渉計によりパルス列にされた後、ファイバに集光される。ファイバの分散による光パルスの広がりの影響を考慮し、今回の測定では時間分解能を 1ps 程度に設定している。パルス列の間隔はキャリアの励起時間差に対応しており、ひとつめのパルスで励起されたキャリアがその位相を保持していれば、二つめのパルスで励起されたキャリアとの間に干渉を生じる。その振幅の減衰から位相緩和が見積もられ、およそ 15ps であることがわかった。この位相緩和時間は光学フォノンの緩和時間にほぼ対応していると考えられる。すなわち QD キャリアの効率的な緩和は、光学フォノン緩和が支配的であることに起因すると考えられる。次に異なる二つの共鳴を同時に励起することにより、QD の励起緩和過程における量子干渉を観測した。結果を図 2 に示す。二つの独立した量子状態を一つのパルスで励起することにより、ヤングのスリット実験に類似の量子干渉を観測することが可能となる。その結果、前述の位相緩和に重畳して、共鳴のエネルギー差に相当する干渉信号が得られる。この結果から QD におけるコヒーレント制御の可能性が強く示唆される。

謝辞

本研究を遂行するに当たり、財団法人新世代研究所よりご援助を賜りました。深く感謝いたします。

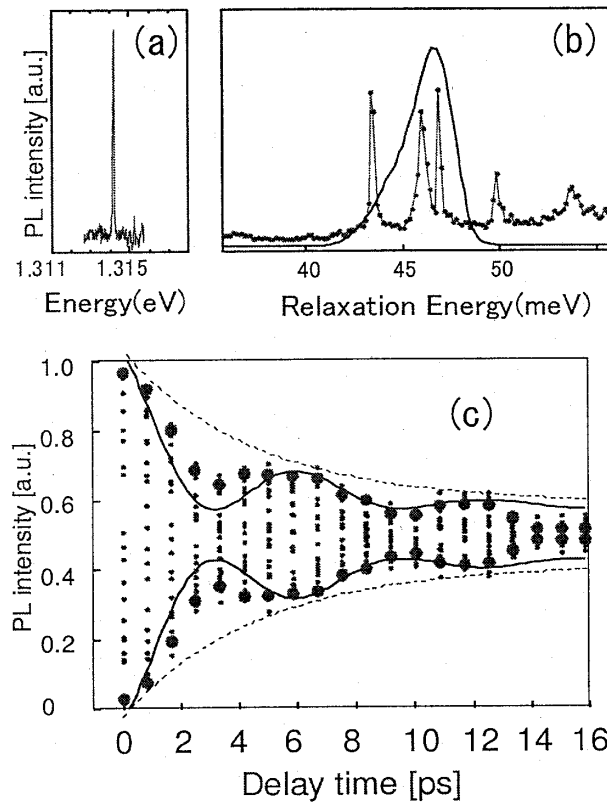


図 2: 単一 QD の PL(a)PLE(b) スペクトル. (b) の太線は励起パルスのスペクトルを示している. (c) はそのときのコヒーレント励起スペクトル. PL 干渉 (●) の振幅 (○) を遅延時間に対してプロットした.

本研究に関する発表

投稿論文

1. Y. Toda, T. Sugimoto, M. Nishioka, Y. Arakawa
Near-field coherent excitation spectroscopy of InGaAs/GaAs self-assembled quantum dots, Applied Physics Letters 76, 3887 (2000)
2. Y. Toda, and Y. Arakawa
Near-field spectroscopy of a single InGaAs self-assembled quantum dots, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum electronics 6, 528 (2000)

国際会議

1. Y. Toda, T. Sugimoto, S. Ishida, M. Nishioka, and Y. Arakawa
25th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS25), Osaka, Japan, D200 (2000)
2. Y. Toda, T. Sugimoto, M. Nishioka, and Y. Arakawa
Quantum Electronics and Laser Science Conference (QELS2000), San Francisco, USA, QMJ2 (2000)