

Quantum Nonlinear Effects in Nanostructures and Their Applications ナノ構造における量子光非線形効果とその応用

プロジェクトリーダー 川 辺 光 央
筑波大学 物質工学系 教授

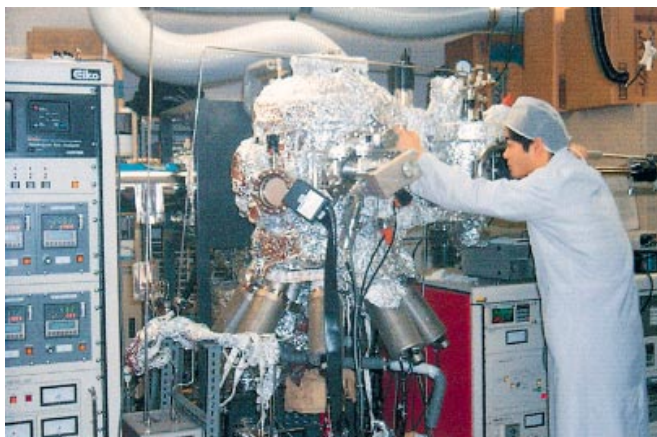


図1 実験風景



図2 パルスレーザーシステム

1. 研究の目的

21世紀に向け爆発的に需要が拡大する情報・通信を支える基盤として、半導体をベースとする光エレクトロニクスへの期待はますます増大する一方であり、従来技術の延長線上にない、新しい物理現象に基づく新規デバイスの開発が強く求められている。この要請に応えて「ナノ構造における量子光非線形効果とその応用」を提案する。この研究は物性物理学・電子工学・量子光学の学際研究という性格を持ち、光子と量子ドットの相互作用を利用して、究極的に微弱な光すなわち単光子により、量子ドットのエネルギー制御を行うものである。最近量子ドットにおいて、クーロンブロックードに関する基礎研究、応用研究が盛んに行われているが、本研究では、電子の代わりに光子を用いて量子ドットのエネルギー状態を変調し、極微弱光による光スイッチや光メモリ実現の基礎を与えるものである。さらに光波と量子ドットの相互作用を増強させる方法を研究することによって、新しい光デバイス作製の基礎を確立する。また、これらを実現するための基盤技術としてナノ構造形成法を確立する必要がある。最近さかんに研究されている自己組織化法に、表面エネルギー変調という制御パラメータを加えて量子ドットの形成法、構造・配列の制御法を研究し、量子ドットによる二次元、三次元格子作製方法を研究する。

本研究を遂行することにより、新しい概念の光デバイス実現の手がかりを得るばかりでなく、開発の必要が迫られている新デバイスの基盤技術であるナノ構造作製の確立に寄与することが出来る。

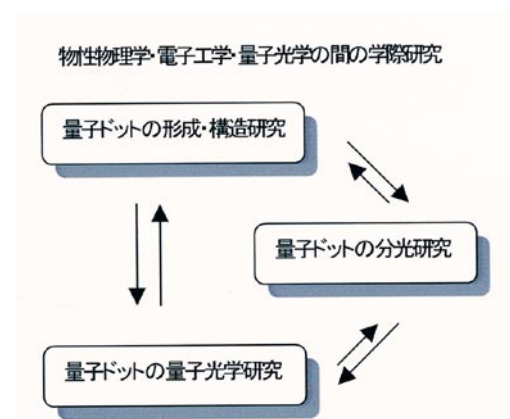


図3 研究の進め方・特色

2. 研究の内容

(1) 量子ドットの分光研究

量子ドットでは励起された電子、正孔や励起子の数によりエネルギーが変化し数の離散性がエネルギー・スペクトル上に顕に現われる。例えば、量子ドットの界面に1電子がトラップされるだけで、量子ドットのエネルギーが大きく変わり、吸収スペクトルの特定のエネルギー位置にディップが現れる永続的ホールバーニング現象を起こす事が最近発見された。更に、比較的少数の量子ドットを試料の中から高い空間分解能で選びだし、かつ、狭いスペクトル幅のレーザー光により選択的に励起し、単光子により量子ドットのエネルギーの制御が行える状況にある。本研究では、単光子による量子ドットのエネルギー変化を詳細に調べると共に、量子ドットの究極のスペクトル線幅とそれに関与しているエネルギー緩和機構を調べる。これらの研究を基に、光によるエネルギー制御に関する研究を深化させ、単光子量子ドットデバイス(光スイッチ、光メモリ)や量子ドットレーザー開発のための基礎を与える。また量子ドットは単光子との相互作用によってもそのエネルギーが変化(量子ジャンプ)するが、この新しい現象を量子光学の立場から研究を行う。さらに、量子ドット研究の新しい展開として、高密度、高整列性の結合形量子ドット網において期待される新しい電子状態、光物性を明らかにする。

(2) 量子ドットの量子光学への応用

現在実現されている半導体量子ドットは、 $10^{10}/\text{cm}^2$ 程度の面密度のものしか得られていない。従って、この希薄な量子ドットと単光子との非線形相互作用を起こさせるためには、光波と量子ドットの相互作用を可能な限り増強する必要がある。そのために、光の波長程度の周期性で屈折率が変化するフォトニック結晶構造を用いて相互作用の増強を図り、量子ドットとの相互作用を強める。また、量子ドットによる二次元および三次元周期構造(量子ドット格子)と、閉じ込められ制御された電磁波モードとの相互作用の研究も行う。これは、量子ドット格子デバイス開発のための基礎を与えるものである。

(3) 量子ドット形成法

半導体量子ドットの形成技術としては、基板と量子ドットの格子不整合に起因する格子歪みを利用した自己組織化法によりInGaAsP系量子ドットを研究する他、結晶、ガラス、ポリマー中に分散成長させる方法も用い、CuCl、CuBr、CdS、CdSe、CdTe等の量子ドット形成法の研究も行う。基板との間の歪みエネルギーが最小となるように形成された量子ドットは基板の歪みを介してドット間斥力を生じ、ドット整列の駆動力となる。ドットの寸法、密度は歪み量と共に付着原子の拡散長に依存する。成長表面を水素原子などにより修飾して表面エネルギーを変調し、ドット形状の制御を行う。さらに、格子歪み以外の、たとえば相分離などの機構を利用してドットの整列性、ドット間結合を制御し、1次元、2次元、3次元的に結合した量子ドット超格子の実現を図る。自己組織化の現象は表面エネルギーに大きく影響を受ける。従って基板表面の結晶方位も重要な制御因子であり、この視点からの研究も行う。

3. 研究の体制

期 間：1997年8月～2002年3月

構 成：プロジェクトリーダー1名、コアメンバー2名、研究協力者5名

実施場所：筑波大学物質工学系、物理学系、物理工学系

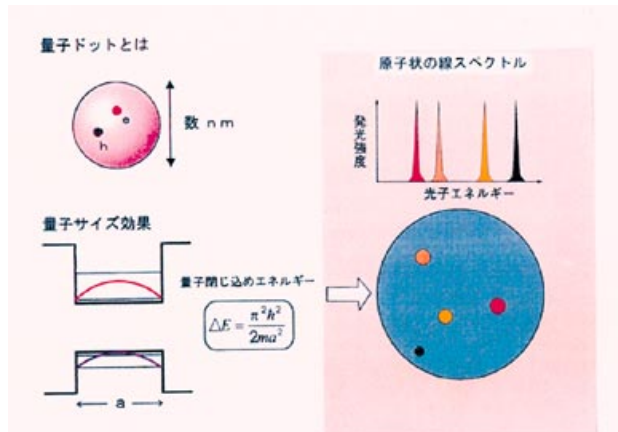


図4 量子ドットとは

量子ドット間の相互作用

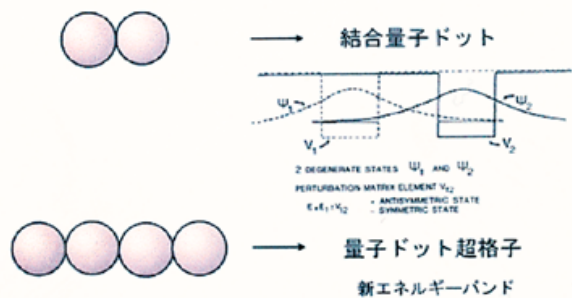


図5 結合量子ドット

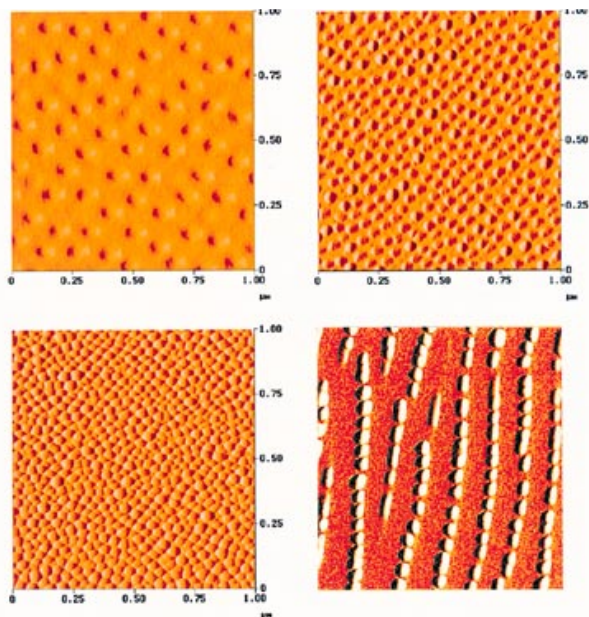


図6 成長温度等による量子ドットの制御