

VII. - 2 半導体物性グループ

教授 舛本 泰章
 助教授 野村晋太郎
 講師 三品 具文
 講師 奥野 剛史
 助手 鈴木 隆司
 助手 池沢 道男
 大学院生 (8名)

【1】半導体におけるフェムト秒、ピコ秒時間分解分光 (三品具文、舛本泰章、奥野剛史)

<MBE 成長 GaAs/AlAs 多重量子井戸における光非線形応答の Be による制御> (奥野剛史、舛本泰章、早崎裕一 A、門野真二郎 A、北出晋介 A、坂東弘之 A、岡本紘 A A 千葉大学工学部) [5,8,14]

これまでに、低温成長 GaAs/AlAs 多重量子井戸 (multiple quantum wells, MQW) の光非線形性が、バルク GaAs 膜と比較して大きく、吸収緩和の回復時間 (キャリア寿命) も短いということ、さらに、その有用な性質が、Be ドープにより改善しうることを明らかにしてきた。MQW を超高速光スイッチとして用いるためには、キャリア寿命が短いだけでなく、高繰り返しにたえうるために、ゆっくりした応答成分が抑えられていることも重要である。今回、Be 濃度を注意深く選ぶことにより、ゆっくりした成分を 1%以下にまで抑えられることを明らかにした。

図 1 は、室温においてポンププローブ法により測定した非線形信号の時間応答である。試料は、分子線エピタキシー (MBE) 法により作製した 7nm 厚の GaAs 井戸と 7nm 厚の AlAs 障壁の 100 周期の MQW であり、図中にドープした Be 濃度が記されている。各時間波形を 2 成分の指数関数でフィットし、そのゆっくりした成分の割合を図中括弧内に記す。undoped から $[Be] = 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ までは時間応答が速くなっており、ゆっくりした成分が 1%以下になっている。しかし、さらに Be 濃度が大きくなると、ゆっくりした成分は逆に増大している。この領域では、非線形信号の大きさは小さくなり、吸収スペクトルにおける励起子吸収ピークもブロードになっていた。このことより、試料の結晶性が悪くなっていると考えられ、ゆっくりした応答成分にも影響を及ぼしていることがわかった。

【2】半導体量子点の光物性 (舛本泰章、奥野剛史、池沢道男)

<低温における半導体量子点の普遍的な位相緩和メカニズム> (竹本一矢、池沢道男、舛本泰章) [3]

半導体量子点における均一幅の温度依存性は、閉じ込め領域の異なる系やマトリクスの違いによって解釈が様々であり、未だ共通のモデルは得られていな

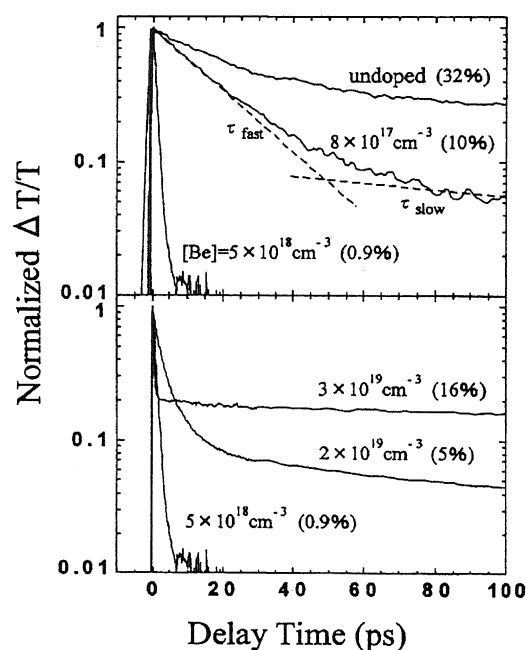


図 1 GaAs/AlAs MQW における光非線形信号の時間変化。

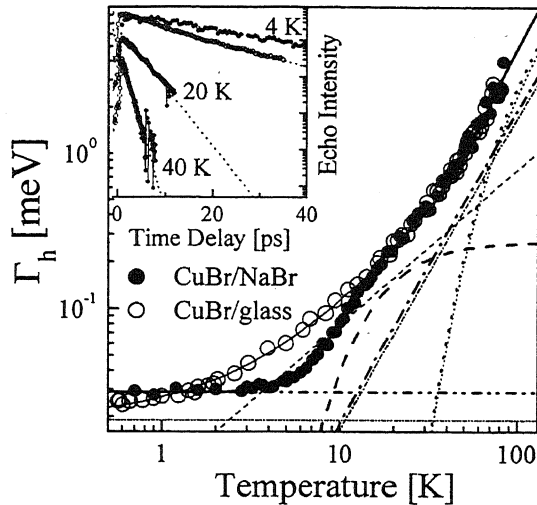


図2 NaBr 結晶中およびガラス中の CuBr 量子点の蓄積フォトンエコーと均一幅の温度依存性

$\hbar\omega \sim 1$ meV は confined phonon のエネルギー, $n(T)$ は LO フォノンの占有率である。ガラス中の CdSe 量子点についてもガラス中の CuBr と同様の結果が得られた。本結果は CuCl 量子点について以前報告された均一幅の温度依存性と類似しており、より狭い温度領域で議論してきた CdSe, CuBr についての単純な $\Gamma_h \propto T, T^{1.3}$ モデルは修正を要する。

量子点界面の二準位系および量子点に閉じ込められた音響フォノンとの相互作用が、低温における普遍的かつ本質的メカニズムを与えていると言えよう。

<紫外光照射における CuCl 量子点の光スペクトルの異常> (菅野敦史、舛本泰章)

量子点では、その体積に比べ表面積の割合が大きくなるため界面の影響が顕著である。そのため、量子点中の電子状態には界面やマトリクス状態が大きく反映される。半導体量子点において永続的ホールバーニング現象が観測されるが、これは母体マトリクスへの生成キャリアのトラップという描像で説明されている。また、局所的に電場が発生するため、これに伴い光スペクトルの形状も変化する。このことを逆に利用し、意図的にキャリアをトラップさせることで、局所電場の研究に用いることができる。

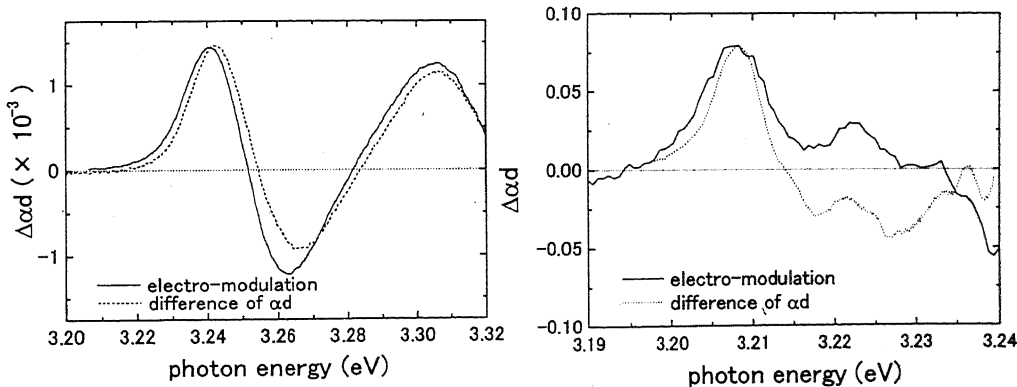


図3 ガラス結晶中の CuCl 量子点の差分吸収スペクトルおよび電場変調スペクトル(左図)と NaCl 結晶中の CuCl 量子点での差分吸収スペクトルおよび電場変調スペクトルの比較。

本研究ではガラスおよびNaCl結晶中に埋め込んだCuCl量子点を用いて紫外光照射による光スペクトルの変化を調べたところ、吸収スペクトルの微小な変化(レッドシフト)が観測された。ガラス中に分散させたCuCl量子点では差分吸収スペクトルと電場変調信号に良い一致が見られる。そのためこのレッドシフトは、紫外光照射によって量子点近傍に局所電場が発生したことによるシュタルクシフトであると考えられることができる。このときの内部電場を見積もると $\sim 10^6$ V/cm程度であり、これは母体マトリクスにキャリアが捕獲されていると考えると妥当な値である。しかしNaCl結晶に分散させたものはよい一致はみられない。原因として母体マトリクスの違い等が考えられるが、今後、内部電場の粒径依存性等をより詳細に研究する必要がある。

<半導体量子点の音響型コヒーレントフォノン> (池沢道男、舛本泰章) [10, 関連論文12]

半導体量子点における閉じ込められた音響型フォノンの研究は十分になされているとは言えず、コヒーレントフォノンの観測例も少ない。音響型フォノンは特に低温で量子点のデコヒーレンスに重要な寄与をすることが分かっており重要である。これまで磷酸ガラス中に析出させたPbSe量子点をサンプルとして、閉じ込めを受けた音響型コヒーレントフォノンの観測を行って、ラマン散乱との相補的な関係について議論してきた。PbSe量子点は近赤外に共鳴エネルギーを持つ系であったが、現在、可視領域に共鳴エネルギーを持つ他の量子点系(CuCl, CuBr, CdS)にも範囲を広げてコヒーレントフォノンの研究を行っている。

例として、CuBr量子点についての結果を図に示す。図の上部には、室温と2Kにおけるサンプルの吸収スペクトルを示してある。サンプルAとBはそれぞれ3.1nmと1.9nmの平均粒径を持つことがX線小角散乱の結果から分かっている。コヒーレントフォノンの測定は、実験手法としてはフェムト秒チタンサファイアレーザーパルスを用いた透過型のポンプ-プローブ法を用いているが、CuBr量子点は図のように青色の領域に共鳴エネルギーを持つので、ポンプ光プローブ光ともに第二高調波を用いている。図

の下部には、室温における透過率変化と、その裾の部分の拡大図を示してある。拡大図の中にピコ秒程度の周期を持つ振動成分があるのが分かる。またその振動数は粒径の小さなサンプルBの方が高い。等方的な球状弾性体のモデルに依れば、フォノンの振動数は粒径の逆数に比例し、小さい粒径の量子点ほど速い振動を示すということが予想されるが、挿入図に示すように実際にその傾向が確認されているので、これは量子点に閉じ込められた音響型コヒーレントフォノンによる信号と解釈される。

PbSe量子点の場合には、マトリクスとしてリンを主成分とするガラスを用いたが、CuBr量子点ではシリカガラスをマトリクスに用いている。光学的フォノンと違って音響型フォノンの場合には、多くの場合量子点の形状変化を伴うことが多いので、量子点を取り囲んでいるマトリクスとの相互作用が重要になってくると思われ、マトリクスの弾性定数や密度の違いが音響フォノンエネルギースペクトルに影響を与えることが考えられる。そのため、いくつかのホストマトリクスの組み合わせでコヒーレント

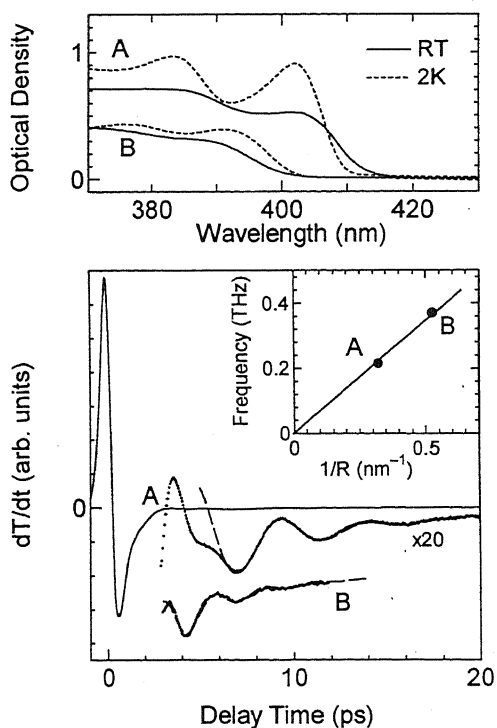


図4 CuBr量子点のコヒーレントフォノン信号

フォノンの周期、また信号強度がどのようになるかを調べる事によって何らかの知見が得られるものと期待している。

また、コヒーレントフォノンで観測される振動モードと、ラマン散乱で観測されるモードの関係についてはしばしば興味をもたれるが、これらの試料についてもラマン散乱の測定を行ってそれらの関係を明らかにする予定である。

<量子点の量子ビート>

エネルギーの近い2つの光学遷移が時間の短い光パルスで励起されると、光励起された2つの分極はわずかに異なるそれぞれ振動数で振動することとなる。これらの光励起された2つの分極は互いに干渉し、うなりを生ずる。これが量子ビートである。半導体中の励起子は大きな振動子強度を持っているので、励起子の共鳴発光、光吸収、4光波混合などの時間波形に量子ビートが観測される。量子点では、不均一広がり度で発光スペクトルが広がっていても、発光量子準位が微細構造を持ち、そのサブレベル間コヒーレンスが保たれると、スペクトル領域では不均一広がり度で隠されて全く見えない微細構造が量子干渉し、時間領域で明確な発光強度の振動—量子ビート—となって観測される。したがって振動の周期 T から光学遷移間の微細なエネルギー差 \hbar/T がわかる。量子点では、閉じこめられた電子スピンのコヒーレンス時間がバルク結晶中のそれと比べて長くなる可能性があり、こうした観点からも電子スピンのコヒーレンスが関与する量子ビートが興味の対象となる。観測にかかるのは、磁場の有無、磁場の方向と偏光の種類により少なくとも4種類の量子ビートである。これらはファラデー配置で円偏光をもちいて観測される bright 励起子のゼーマン分裂による量子ビート、ファラデー配置以外の配置で励起と観測で同じ円偏光、直線偏光で観測される bright 励起子と磁場により部分的に許容となった dark 励起子の分裂による量子ビート、無磁場のとき直線偏光で観測されるイオン化励起子の分裂による量子ビート、フォークト配置で円偏光をもちいて観測される電子のゼーマン分裂による量子ビートである。

<InP 量子点の量子ビート> (舩本泰章)

磁場下で中性化された自己形成 InP 量子点の発光帯をピコ秒チタン・サファイアレーザーで励起し、励起エネルギーの $\Delta E = 45\text{meV}$ だけ低エネルギー側にある狭い縦波光学型(LO)フォノンサイドバンド発

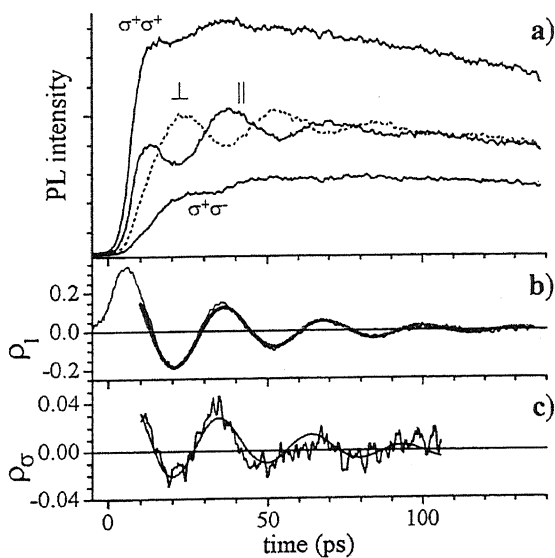


図5 イオン化された自己形成 InP 量子点の発光に観測される量子ビート

光をストリークカメラを用いて時間分解すると、磁場の逆数に比例した周期をもつ量子ビートが観測される。ファラデー配置で観測されるビートの振幅は右円偏光で励起し、左円偏光で観測するとき最も大きくなる。ビートの周期の逆数は互いに近接する光学遷移間のエネルギー差 $\hbar\omega$ をあらわすが、磁場の大きさ B に比例している。また、ビートの振幅と周期は量子点の成長方向 z と磁場の方向との間の角度 θ に依存し、 $\theta=0$ ではビートはなく、 $\theta \neq 0$ でビートは観測された。これらの特徴は、InP 量子点中の heavy-hole 励起子のスピンハミルトニアンを考え、ゼーマン成分間のエネルギー差の磁場依存性を計算することで説明できることが明らかになった。観測された量子ビートは、bright な heavy-hole 励起子 ($J_z=+1$) と磁場により部分的に許容となった dark な heavy-hole 励起子 ($J_z=+2$) の干

渉に起因しており、結晶方位に依存した異方性が観測される。

一方、電子が1個残されたイオン化された自己形成 InP 量子点の励起状態を共鳴励起すると、その音響型フォノンサイドバンドに量子点中の狭い空間に閉じ込められた電子と光励起された電子・正孔対は強く相互作用し、特に、正孔間に働く交換相互作用が、電子2個、正孔1個からなるイオン化励起子のエネルギー分裂をひきおこし、図5に示されるようなスピン量子ビートが正孔が励起状態にある間、無磁場で観測される。この周期は30ps程度でイオン化した量子点中に残された電子のスピンの局所的な磁石として働き、励起子に0.12meV程度のZeeman分裂を与え、これがスピン量子ビートを生み出していると考えられる。発光エネルギーの高エネルギーシフトにともない量子点のサイズが減少し、エネルギー一差が大きくなり相互作用が増加するのがビート周期の減少として観測される。

<歪み誘起 GaAs 量子点の量子ビート> (西林一彦、奥野剛史、三品具文、舛本泰章)

半導体表面上の自己形成型量子点(Self Assembled Dots : SAD)がもたらす歪みにより表面付近の量子井戸内に形成される擬量子点(Strain-induced Quantum dot)に関する研究が盛んに行われている。この擬量子点に対して磁場中において発光の偏光成分について時間分解測定を行った。試料はGaAs(3.9nm)/AlGaAs 量子井戸構造の表面にSADとしてInPを成長させたものを用いた。励起光は量子点の第一励起状態にLOフォノンのエネルギーを加えたエネルギーに合わせ、検出は量子点の第一励起状態のエネルギーで行った。図6は半導体の結晶成長方向と平行方向に磁場をかけた(Faraday 配置)ときに直線偏光にされた励起光源で試料を励起したときのものである。発光の偏光成分の、励起光と平行な偏光成分(∥)と垂直な偏光成分(⊥)に振動している構造が現れた。この振動の振幅の間隔は磁場の強さに比例して小さくなっていった。この振動構造は電子・正孔のゼーマン分裂だと考え、量子点のg因子を求めたところ、0.47となった。

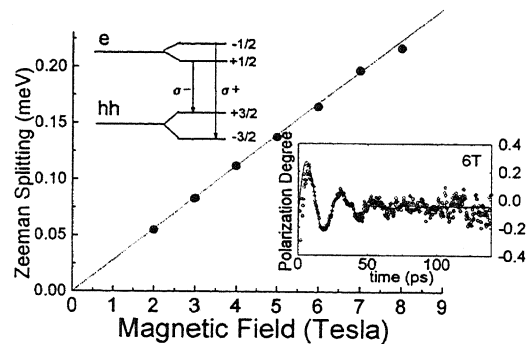
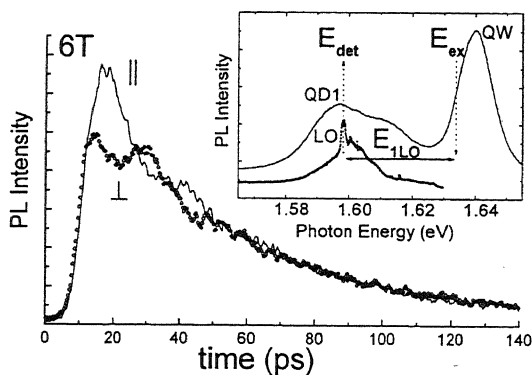


図6 磁場を掛けて量子点を励起したときの発光の偏光成分。 図7 ゼーマン分裂の磁場の強度依存性。

<CdTe 自己形成量子点における共鳴励起発光> (奥野剛史、野村光宏、舛本泰章、寺井慶和^A、黒田眞司^A、滝田宏樹^A ^A筑波大学物質工学系) [6,13]

自己形成型の半導体量子点は、格子定数の違いに起因するヘテロ界面での歪みによって作製されるが、その形状や界面、まわりの環境など、不明な点が多い。ZnTe上に成長されたII-VI族化合物半導体CdTe量子点について、共鳴励起の発光スペクトルを測定することにより、CdTe量子点のまわりはZn_xCd_{1-x}Te (xは約0.8で、0.5から1の範囲に分布)となっていることを明らかにすることができた。

図8(a)は、共鳴発光スペクトル測定によって得られたZnTe(-like)LOフォノンエネルギーを、そのスペクトルが観測されたエネルギー位置を横軸としてプロットしたものである。この図から、観測された

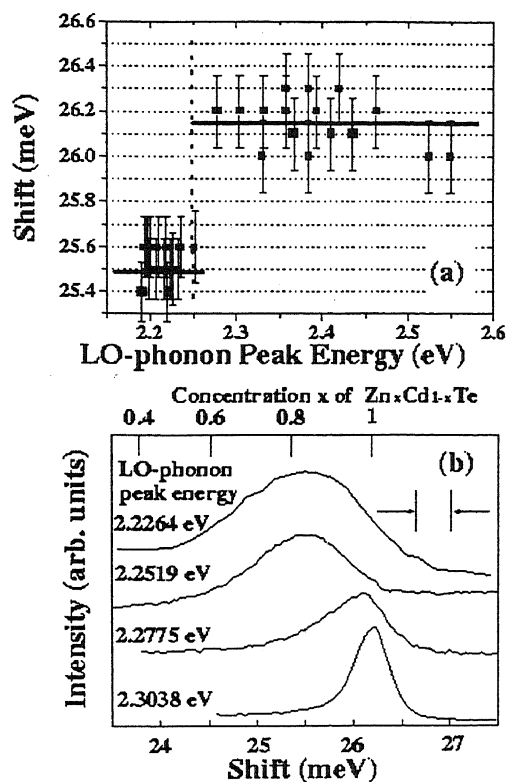


図8 CdTe 量子点における LO フォノンの (a) シフト量と (b) そのスペクトル例。

エネルギー位置がぬれ層 (2.25 eV) よりも低エネルギー側にあるときに、ZnTe の LO フォノン (26.0 meV) よりも小さい 25.5 meV の LO フォノンが検出されていることがわかる。(b) は、観測された実際の LO フォノンスペクトルの例である。横軸は、励起光エネルギーからのシフト量である。スペクトルが観測されたエネルギー位置が図中に記されている。観測されたエネルギーがより低エネルギーの時に、LO フォノンスペクトルが広がっていることがわかる。これは CdTe 量子点の周りが $Zn_xCd_{1-x}Te$ の混晶になっていることを示しており、スペクトルの広がり具合から、 x は約 0.8 で、0.5 から 1 の範囲に分布していることがわかる。

<科学技術振興事業団創造科学技術推進事業—単一量子点プロジェクトでの研究> [1,7,9,11]

科学技術振興事業団創造科学技術推進事業—単一量子点プロジェクトでの研究 (1995年10月から2000年9月まで) が舛本泰章を総括責任者として、つくば市東光台の筑波コンソーシアムを拠点として行われ、今年度もいくつかの成果を得た。

【3】 半導体ナノワイヤーの光物性 (舛本泰章、奥野剛史)

Si 系ナノワイヤーを作成し、構造および発光特性の研究を行なった。Fe を触媒として含む Si 粉末をアルゴンガス流のもと、1200~1250°C の高温下でエキシマーレーザーによりレーザーアブレーションを行ったとき、表面が SiO や SiO₂ によりカバーされた、Si ナノワイヤーが生成されていることが、透過電子顕微鏡、走査電子顕微鏡、XRD、EDX 分析により確認された。更に、Cu の存在下で CuSi を含む Si 系ナノワイヤーが生成されることを見出した。また、アルゴンガス流のもと、1400°C の高温下で ZnO を加熱してナノベルト状の ZnO 生成が確認された。これは低温では自由励起子発光が観測された。これらの実験結果はナノワイヤー状半導体の高い可能性を示すものであり今後、詳しく研究していく方針である。

【4】 電子をドーブした半導体ナノメートル構造の光物性 (野村晋太郎)

<単一量子井戸中の量子点状態の空間分解発光測定> (野村晋太郎) [15,18]

プローブ型測定法の進歩により、波動関数の空間分解測定が現実のものとなりつつある。本研究では近接場光学顕微鏡を用いて量子点に局在した電子—正孔状態の空間分解測定を試みた。井戸幅 5 nm の GaAs/AlGaAs 単一量子井戸において As 下で成長中断をすることにより面内方向に数 10 nm の大きさの原子層一層のステップからなる凹みを形成し、そこに局在化する電子—正孔状態からの発光を分解能 50 nm 以下で空間分解測定した。発光スペクトルには光励起パワーに依存して、最低励起子状態、励起子分子状態、励起子の励起状態が見られ、それぞれの空間分布を測定した。励起子分子状態からの発光分布は励起子状態からの発光分布よりも狭いことが明らかになった。これは励起子分子の有効質量が励起子

よりも重いことを反映していると考えられる。また、励起子の励起状態の発光スペクトルの分布は p-like であることが明らかになった。発光強度は波動関数の自乗に比例するとされ、本測定は波動関数分布を発光分布から直接的に測定するものである。

本研究は神奈川科学技術アカデミー齋木敏治、松田一成、理化学研究所青柳克信との共同研究である。

<量子点アレーにおける発光スペクトル> (野村晋太郎)

電子ビーム露光法により作成したナノスケールの正方格子を用いて、横方向の周期的ポテンシャルを n 型の GaAs/AlGaAs ヘテロ構造に印加し、面内電子密度分布を 2 次元電子系から 0 次元系へと連続的に変化させることが可能であることを示してきた。本年度はアクセプター原子をデルタドープした系を用いた。この系は正孔をデルタ関数的に扱えるため、発光スペクトルと電子状態との対応付けが直接的であるという長所がある。0 磁場および強磁場下において発光スペクトルの横方向ポテンシャルの強さに対する依存性を測定し、0 次元的状态が実現されていることを示した。発光強度より基底状態以外の電子状態を得られる長所があることを利用し、高いランダウ準位内電子スピンの偏極度を発光の偏光度から測定し、電子スピンの偏極度と核スピン偏極度の制御を試みた。発光スペクトルは局所密度汎関数法を用いた計算との比較を行い、良い一致が得られた。

本研究は理化学研究所との共同研究である。

<自己組織化ナノポーラス構造を用いた量子点アレー形成の試み> (野村晋太郎)

従来から電子ビーム露光法により周期が 150 nm - 500 nm の量子点アレー構造を作成してきているが、大面積の試料を作成するには非常に長時間がかかること、リソグラフィーとしての極微細化の限界があることから自己組織化の手法を取り入れることを試みた。本年度はアルミニウムを一定の条件で陽極酸化することにより得られる自己組織化おとしては例外的に規則性の高い三角格子が形成されることを利用した。条件により、実際に周期が 60 nm から 600 nm の三角格子構造を得ることができ、さらにこの構造を金電極に転写して量子点アレーを作成するための手法の開発を行った。

【5】 $\text{Fe}_{1.33}\text{Nb}_{2.67}\text{Se}_{10}$ の四極子分裂の特異な温度変化 (鈴木 隆司)

低次元化合物 $\text{Fe}_{1.33}\text{Nb}_{2.67}\text{Se}_{10}$ は、 NbSe_3 と同様に低次元の導体で低温 (144K 以下) で CDW(charge density wave)を伴う構造相転移を起こすことで興味を持たれている。この物質のメスバウアー効果の実験は以前に、我々と同時に他の著者達によっても行われ、300K 以下では同様な結果が得られている。しかし、我々は 414K までの高温まで測定温度領域を広げた結果、四極子分裂 QS が温度とともに急激に大きくなることを見出した。ここで四極子分裂は非対称定数を除くと、 $QS=(1/2)e^2qQ$ とかける。Q は原子核の四重極モーメントであり、q は核の位置の電場勾配である。一般的に、QS は温度とともに小さくなるのが普通で、これは格子振動による均一化と d 電子の軌道の占有率の均一化によると考えられる。従ってこの物質の q の温度依存性は特異なものである。この物質の結晶構造は monoclinic であるが、

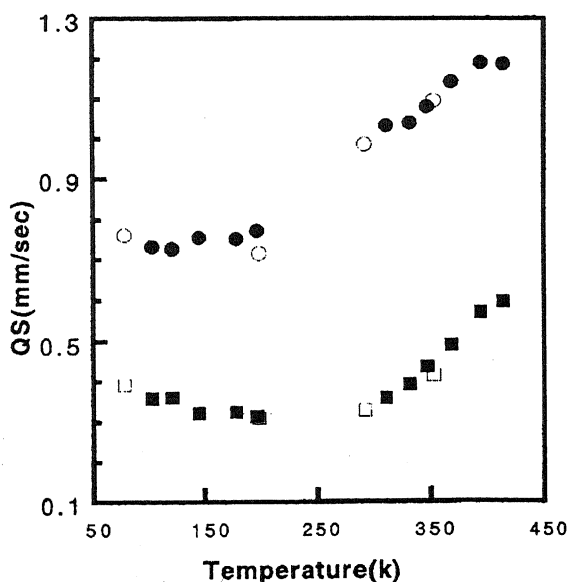


図9 白ぬきのマークは統計の良い測定値。

Fe 原子は Nb 原子とともに Se 原子に八面体に囲まれた、ほぼ立方対称な位置にある。Fe 原子と Nb 原子の存在比は 2 対 1 であり、無秩序に分布すれば Fe 原子の占める site は 3 種類で、存在比は 4 : 4 : 1 になる。又、我々の場合にも 4 本のピークが観測され、Fe 原子の占める site の 3 種類の site のうち存在比の大きな 2 つの site のピークしか測定されていない。

これらのスペクトルを 2 site の doublets としてメスバウアースペクトル解析プログラム MossWinn で解析した結果が図 9 である。

この物質の q の特異な温度依存性を説明するには、幾つかの可能性が考えられる。一つには高温 ($T > 200\text{K}$) でも連続的 (2 次的) 構造相転移が起こっている可能性がある。しかしこのことは、X 線その他の実験では確認されていない。 q の原因である d 電子の基底状態は磁気帯磁率の測定から 3 価の low spin state ($S=1/2$) と考えられ、このことはこの物質の組成比からも推定できる。

Fe 原子の 2 価の high spin state ($S=2$) の状態は一般に q が大きい事が知られているので、この状態がエネルギー的に近くに存在すれば、d 電子の温度によるこの状態への遷移が起こり q が増大することが考えられる。しかし、この遷移が起これば同位体シフト δ も大きくなるはずであるが、 δ は逆に温度とともに小さくなる。 q の正の温度依存性を説明するものとして、NQR の実験結果を使った d 電子と配位子 (Se) の π 結合に対する格子振動の影響を取り入れた理論がある。それによれば、格子振動の bending mode が π 結合を弱めていく結果 $d\pi-p\pi$ 軌道の電子配置の変化が起こる。この Haas and Marram の理論によれば、 $\hbar\omega \sim 20\text{cm}^{-1}$ 程度の低エネルギーの振動モードが存在すれば、勾配含めて q の正の温度依存性が説明出来、 δ の温度依存性とも矛盾しない。

<論文>

1. J. Qi, X. Guo, K. Sakurai and Y. Masumoto: "Atomic structure around Mn ions in $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{S}$ ($x = 0.01-0.02$) nanocrystals prepared by colloidal chemistry procedure", *Scripta Materialia* **44**, 2315 (2001); Proc. 5th Int. Conf. Nanostructured Materials (Sendai, 2000).
2. A.V. Fedorov, A.V. Baranov, A. Itoh and Y. Masumoto: "Renormalization of Energy Spectrum of Quantum Dots under Vibrational Resonance Conditions", *Semiconductors* **35**, 1390 (2001). Translated from *Fizika i Technika Poluprovodnikov* **35**, 1452 (2001).
3. Y. Masumoto: "Energy and phase relaxation in quantum dots", Abstracts of 8th Int. Workshop on Femtosecond Technology, p. 31 (Tsukuba, 2001). //INVITED PAPER//
4. T. Okuno, G.R. Hayes, B. Deveaud, A.A. Lipovskii and Y. Masumoto: "Intraband transition in PbSe quantum dots", Abstracts of 8th Int. Workshop on Femtosecond Technology, p. 82 (Tsukuba, 2001).
5. T. Okuno, Y. Masumoto, Y. Sakuma, Y. Hayasaki, S. Kadono and H. Okamoto: "Fast Response Time in Optical Nonlinearity of MBE-grown GaAs/AlAs MQW at around $n=2$ Level", Abstracts of 8th Int. Workshop on Femtosecond Technology, p. 145 (Tsukuba, 2001).
6. T. Okuno, M. Nomura, Y. Masumoto, Y. Terai, S. Kuroda and K. Takita: "Eighteenth order optical phonons in CdTe quantum dots in ZnTe", Abstracts of 1st Int. Workshop on Quantum Nonplanar Nanostructures & Nanoelectronics '01, p. 103 (Tsukuba, 2001).
7. E. Tokunaga, K. Kurihara, M. Baba, Y. Masumoto and M. Matsuoka: "Bipolariton coupling in biexciton optical decay: Degenerate and nondegenerate polariton emissions in CuCl", *Phys. Rev. B* **64**, 045209 (2001).
8. T. Okuno, Y. Masumoto, Y. Sakuma, Y. Hayasaki and H. Okamoto: "Femtosecond response time in beryllium-doped low-temperature-grown GaAs/AlAs multiple quantum wells", *Appl. Phys. Lett.* **79**, 764 (2001).

9. M. Tanaka and Y. Masumoto: "Energy transfer mechanism in Mn²⁺ doped CdS nanocrystals", *Solid State Commun.* **120**, 7 (2001).
10. M. Ikezawa, T. Okuno, Y. Masumoto and A.A. Lipovskii: "Complementary detection of confined acoustic phonons in quantum dots by coherent phonon measurement and Raman scattering", *Phys. Rev. B* **64**, 201315 (2001).
11. I.Ya. Gerlovin, Yu.K. Dolgikh, S.A. Eliseev, V.V. Ovsyankin, Yu.P. Efimov, V.V. Petrov, I.V. Ignatiev, I.E. Kozin and Y. Masumoto: "Fine structure and spin dynamics of excitons in the GaAs/Al_xGa_{1-x}As superlattices", *Phys. Rev. B* **65**, 035317 (2001).
12. A.V. Fedorov, A.V. Baranov and Y. Masumoto: "Acoustic phonon problem in nanocrystal-dielectric matrix systems", *Solid State Commun.* **122**, 139 (2002).
13. T. Okuno, M. Nomura, Y. Masumoto, Y. Terai, S. Kuroda, K. Takita: "Optical study of phonon-mediated carrier relaxation in CdTe/ZnTe self-assembled quantum dots", submitted to *Journal of the Physical Society of Japan*.
14. T. Okuno, Y. Masumoto, S. Kadono, S. Kitade, H. Bando, H. Okamoto: "Ultrafast and wideband response in optical nonlinearity of molecular-beam-epitaxy grown GaAs", to be published in *Jpn. J. Appl. Phys.*
15. S. Nomura, T. Nakanishi, and Y. Aoyagi: "Fermi-edge singularities in photoluminescence spectra of n-type modulation-doped quantum well with lateral periodic potential", *Phys. Rev. B*, **63**(15), 165330-1-6 (2001).
16. T. Akane, K. Sugioka, K. Hammura, Y. Aoyagi, K. Midorikawa, K. Obata, K. Toyoda, and S. Nomura: "GaN ablation etching by simultaneous irradiation with F-2 laser and KrF excimer laser", *J.Vac. Sci. Technol. B* **19** (4) 1388-1391 (Jul. 2001).
17. K. Ozasa, S. Nomura, and Y. Aoyagi: "Pressure effects on nanoprobe photoluminescence of quasi-zero-dimensional confinement quantum dots", *Superlattices and Microstruct.* **30** (4) 169-179 (2001).
18. S. Nomura, K. Matsuda, T. Saiki, and Y. Aoyagi: "Near-Field Scanning Optical Microscopy of Quantum Dot Arrays", *Jpn. J. Appl. Phys.* (in press).

<国際会議>

1. Y. Masumoto: "Energy and phase relaxation in quantum dots", Abstracts of 8th Int. Workshop on Femtosecond Technology, p. 31 (Tsukuba, 2001). //INVITED PAPER//
2. T. Okuno, G.R. Hayes, B. Deveaud, A.A. Lipovskii and Y. Masumoto: "Intraband transition in PbSe quantum dots", Abstracts of 8th Int. Workshop on Femtosecond Technology, p. 82 (Tsukuba, 2001).
3. T. Okuno, Y. Masumoto, Y. Sakuma, Y. Hayasaki, S. Kadono and H. Okamoto: "Fast Response Time in Optical Nonlinearity of MBE-grown GaAs/AlAs MQW at around n=2 Level", Abstracts of 8th Int. Workshop on Femtosecond Technology, p. 145 (Tsukuba, 2001).
4. T. Okuno, M. Nomura, Y. Masumoto, Y. Terai, S. Kuroda and K. Takita: "Eighteenth order optical phonons in CdTe quantum dots in ZnTe", Abstracts of 1st Int. Workshop on Quantum Nonplanar Nanostructures & Nanoelectronics '01, p. 103 (Tsukuba, 2001).
5. T. Okuno, Y. Masumoto, Y. Sakuma, Y. Hayasaki, S. Kadono, H. Okamoto: "Optical nonlinearity and response time in beryllium-doped standard temperature MBE grown GaAs/AlAs MQW", The 4th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO/Pacific Rim 2001), Technical Digest Volume-I pp.528-529 (Chiba, July 15-19, 2001).

6. Shintaro, Nomura, Kazunari Matsuda, Toshiharu Saiki, "Spatially resolved photoluminescence in n-type modulation-doped lateral quantum dot arrays", First International Workshop in Quantum Nonplaner Nanostructures and Nanoelectronics", (2-4 July, 2001, Tsukuba).
7. K. Matsuda, T. Saiki, H. Saito, K. Nishi, S. Nomura and Y. Aoyagi, "Optical Near-Field Spectroscopy of Semiconductor Nano-structures", CLEO/Pacific Rim 2001 (The 4th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics), (Chiba, 15-19 July, 2001) (invited).
8. K. Hammura, S. Nomura, and Y. Aoyagi, "Time-resolved photoluminescence near Fermi level in a field-induced quantum dot lattice", The 10th international conference on Modulated Semiconductor Structures, (Linz, 23-27 July, 2001).
9. S. Nomura and Y. Aoyagi, "Photoluminescence of Field-Effec Quantum Dot Arrays Based on a Be-Delta Doped Single Heterojunction", 2001 International Conference on Solid State Devices and Materials, (Tokyo, 26-28 Sep. 2001).
10. S. Nomura, K. Matsuda, T. Saiki, and Y. Aoyagi, "Near-Field Scanning Oprical Microscopy of Quantum Dot Arrays", 2001 International Conference on Solid State Devices and Materials, (Tbkyo, 26-28 Sep. 2001).
11. T. Suzuki and N. Okubo: "Temperature Dependence of Quadrupole Splittings in Low Dimensional Compound $Fe_{1.33}Nb_{2.67}Se_{10}$ ", XVI International Symposium on Nuclear Quadrupole Interactions", (Sept., 2001, Hiroshima).

<学位論文>

理工学研究科修士論文

1. 石井 康博 水素原子ビームによる Si(100)表面上の水素引き抜き反応のダイナミクス
2. 大柄根大輔 Ni(110) におけるナトリウムと酸素の共吸着に関する実験的研究

<講演>

1. 池沢道男、奥野剛史、舛本泰章、A.A. Lipovskii : "PbSe 量子点に閉じ込められた音響型フォノンのラマン散乱とコヒーレントフォノン" 日本物理学会 (2001年9月)
2. 奥野剛史、池沢道男、A.A. Lipovskii、舛本泰章 : "PbSe 量子点における近赤外バンド内遷移" 日本物理学会 (2001年9月)
3. 舛本泰章、成瀬文隆、菅野敦史 : "CuCl 量子点における光誘起電気双極子" 日本物理学会 (2001年9月)
4. 舛本泰章、I.E. Kozin, I.V. Ignatiev, V.G. Davydov, H.-W. Ren, 杉崎満、K.V. Kavokin, A.V. Kavokin, G. Malpuech : "イオン化量子点の発光が示す量子ビート" 日本物理学会 (2001年9月)
5. 門野真二郎、北出晋介、岡本紘、奥野剛史、舛本泰章 : "GaAs の光吸収飽和過渡特性の波長依存性" 応用物理学会 (2001年9月)
6. 北出晋介、早崎裕一、岡本紘、奥野剛史、舛本泰章 : "GaAs/AlAs 量子井戸構造の光吸収飽和過渡特性の波長依存性" 応用物理学会 (2001年9月)
7. 竹本一矢、池沢道男、舛本泰章 : "CuBr 量子点の均一幅の温度依存性再考" 日本物理学会 (2002年3月)
8. 奥野剛史、野村光宏、舛本泰章、寺井慶和、黒田真司、滝田宏樹 : "CdTe 自己形成量子ドットにおけるキャリア緩和と多フォノン観測" 日本物理学会 (2002年3月)

9. 舛本泰章：“量子ドットのコヒーレンスと量子ビート”（シンポジウム講演）日本物理学会（2002年3月）
10. 舛本泰章, I.A. Yugova, I.V. Ignatiev, I.E. Kozin, V.G. Davydov, I.Ya. Gerlovin, 杉崎満：“InP 量子ドットの発光が示す量子ビート” 日本物理学会（2002年3月）
11. 原田慎一郎、北出晋介、岡本紘、奥野剛史、舛本泰章：“低温 MBE 成長 Be ドープ GaAs の二重パルス励起における光吸収飽和過渡特性” 応用物理学会（2002年3月）
12. 北出晋介、門野真二郎、岡本紘、奥野剛史、舛本泰章：“低温 MBE 成長 Be ドープ GaAs の光吸収飽和過渡特性の波長依存性” 応用物理学会（2002年3月）
13. 坂東弘之、守山佳、岡本紘、奥野剛史、舛本泰章：“GaAs-AlAs MQW の光非線形性とその高速応答化における井戸幅依存性” 応用物理学会（2002年3月）
14. 松田一成、齋木敏治、野村晋太郎、青柳克信、低温近接場光学顕微鏡による半導体量子構造の発光イメージング、「近接場光学研究会」、大阪、2001年6月。
15. 野村晋太郎、青柳克信、電場効果量子ドット中フリーデル振動の発光スペクトルへの寄与、日本物理学会秋季大会、徳島市、2001年9月。
16. 松田一成、齋木敏治、野村晋太郎、三原勝、青柳克信、GaAs 量子ドットにおける空間分解能 30nm の近接場発光イメージング/分光の発光分光、平塚市、第 49 回応用物理学関係連合講演会、2002年3月。
17. 野村晋太郎、青柳克信、Be- δ ドープ横方向超格子構造の発光分光、平塚市、第 49 回応用物理学関係連合講演会、2002年3月。
18. 野村晋太郎、青柳克信、ホールの局在した n 型量子ドットアレーの発光分光、日本物理学会年次大会、草津市、2002年3月。