

## VII 2 半導体物性グループ

教授 舩本 泰章  
助教授 野村晋太郎  
講師 三品 具文  
助手 鈴木 隆司  
助手 奥野 剛史  
助手 池沢 道男  
大学院生 (9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、舩本泰章、奥野剛史)

#### <グラファイト層間化合物におけるコヒーレント・フォノンの研究> (三品具文、舩本泰章) [19]

コヒーレント・フォノン分光法による時間領域スペクトルの観測は、ラマン分光法などによる周波数領域スペクトルでは入手不可能なフォノンのダイナミクスの情報を得ることができる。本研究ではグラファイトの層間に塩化第二鉄 ( $\text{FeCl}_3$ ) をインターカレントとして侵入させた試料に、フェムト秒パルスを用いた反射型ポンプ・プローブ時間分光を行い、グラファイト層間化合物 (GIC) のコヒーレント・フォノンについて調べた。two-bulb 法により反応温度と反応物温度を制御することで、ステージ数のことなる幾つかの  $\text{FeCl}_3$ -GIC を用意した。コヒーレント・フォノンの観測には繰り返し 82 MHz のモード同期 Ti:sapphire レーザーから出力される波長 790 nm、パルス幅約 130 fs のパルスを用いて、試料からのプローブ光の反射光をフォトダイオードで検出した。インターカレーションにより、層内変位に対応した  $1580 \text{ cm}^{-1}$  のフォノンモードは減少し、層内の  $\text{FeCl}_3$  の量に応じた強度で高エネルギー側に新たなピークを生じることが知られている。サンプルのステージ数を評価するために、ラマン散乱を用い、高エネルギー側に生じるラマン散乱線の強さからサンプルのステージ数 (2, 3, 10) を評価した。図 1 は、HOPG と GIC についてのコヒーレント・フォノン測定の結果である。ほぼ同様の測定条件であるが、HOPG で見られるグラファイトの層間変位に対応した  $43 \text{ cm}^{-1}$  の振動構造が、GIC では失われ、かわりにもっと短い周期の振動 (より高エネルギーのモード) が第 2 ステージの GIC からは観測された。これはインターカレントが侵入したことによりグラファイトの層間がなんらかの影響を受けたためと考えられる。より高いステージになると振動構造が見られなかった。

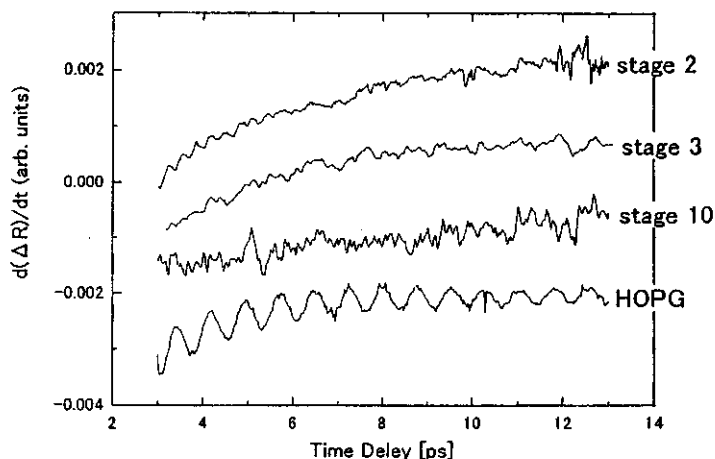


図 1 観測されたコヒーレント・フォノン信号

<Be をドーピングした低温 MBE 成長 GaAs/AlAs 多重量子井戸における光非線形性とその時間応答> (奥野剛史、舩本泰章、佐久間康<sup>A</sup>、早崎裕一<sup>A</sup>、岡本紘<sup>A</sup> <sup>A</sup>千葉大学工学部) [2,24,39]

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、

厚い GaAs 膜と比較して、大きさが大きく回復時間（キャリア寿命）も短い、ということを示してきた。このことは、低温成長 MQW が超高速光スイッチとしてより有用であることを示す。今回、Be をドーピングすることによって、さらに有効な性質をもっていることを明らかにした。試料は、分子線エピタキシー（MBE）法により作製したもので、7 nm の GaAs 井戸と 7 nm の AlAs 障壁を 100 周期積み、Be を一様にドーピングしてある。図は、測定した光飽和密度（Fsat）とキャリア緩和時間（Response Time）を、成長温度に対してプロットしたものである。図上部から、成長温度にも依るが、Be ドーピングにより、光非線形性の低下が最大で 3 から 4 倍（Fsat が上向きに 3 から 4 倍）程度にはおこっていることがわかる。しかしながら、図下部から、緩和時間の変化はそれよりも大きく、1/10 以下にまでなっている。このことから、Be 濃度をうまく選ぶことにより、光非線形性はそれほど低下させずに緩和時間を大きく低減できていることがわかる。すなわち、信号強度がある程度大きく応答時間も短いという、光スイッチに要求される性質をかねそなえていることが示された。アンドープの MQW では、緩和時間がいちばん短くても 0.7~0.9 ps であったのに対し、Be ドーピングの MQW では、0.25 ps までのものが得られた。

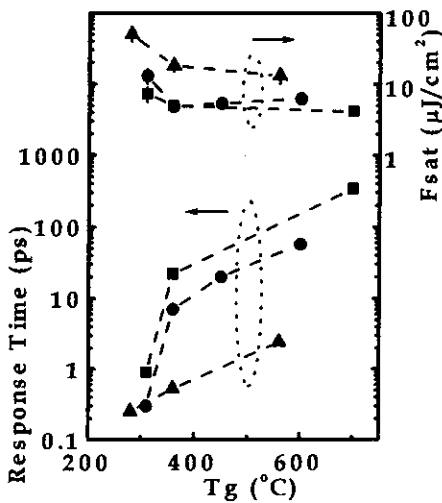


図2 GaAs/AlAs MQW における光飽和密度 (Fsat) とキャリア緩和時間 (Response Time)。横軸は成長温度。■：アンドープ、●：Be 濃度  $7.8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 、▲：Be 濃度  $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 。Fsat が小さいほどより弱い光強度で飽和する、つまり、光非線形性が大きいことを意味する。Response Time とともに、縦軸で下にあるほど、光スイッチとして良好な性質をもっていることを示す。

## 【2】半導体量子点の光物性（舩本泰章、奥野剛史、池沢道男）

<CdSe 量子点の極低温における蓄積フォトンエコー>（竹本一矢、舩本泰章）[25,47]

半導体量子点のスペクトル均一幅の温度依存性には、エネルギー緩和や欠陥・不純物散乱、表面散乱、フォノン散乱、キャリア散乱など様々な位相緩和過程の情報が含まれ、非常に重要である。しかしながら、低温領域の鋭い均一線幅に関しては、スペクトル領域からのアプローチでは分光器の分解能限界などの困難を伴うがゆえ、これまで詳しい議論がなされてこなかった。本研究では、時間領域の分光法である蓄積フォトンエコーを用いて、CdSe 量子点の均一幅の温度依存性や粒径依存性の測定を 0.6 K の低温領域まで行い、他の CuBr や CuCl 量子点の試料と比較して議論を行った。光源には再生増幅した Ti:sapphire レーザーのパラメトリック発振（繰返し 200 kHz, パルス幅 280 fs）を使用、2 K 以下での測定に  $^3\text{He}$  を寒剤として用いた。

実験結果を図に示す。粒径の異なる 4 つの CdSe 量子点について、均一幅はいずれも 2 K ~ 25 K の範囲で温度線形性を示す一方、2 K 以下の温度領域では傾きが緩やかになり、0 K の極限では一定の値に漸近することが明らかになった。このような特徴は  $\Gamma_h(T) = \Gamma_h(0\text{K}) + B h(T)$  の式で良く再現できる。 $\Gamma_h$  は均一幅、 $h(T)$  は Bose 分布関数  $h(T) = [\exp(\delta/k_B T) - 1]^{-1}$  を表し、 $\delta$  は 2.5 ~ 3.6 nm のドットに対して 0.40 ~ 0.20 meV である。さらに  $\delta$  は粒径の小さい試料ほど大きくなる傾向を示した。高温領域での均一幅の

温度リニアな特性は、閉じ込め励起子-音響フォノン間の変形ポテンシャル相互作用に基づく理論との一致により良く説明できるが、極低温領域でのこうした振る舞いは、閉じ込め音響フォノンの分布が低エネルギー側に裾を引いており、0.20 meV より小さなエネルギーで裾が切れていることを示唆している。

ここで他の試料と比較してみると、0 Kの極限での均一幅はCdSeが0.16~0.25 meV、CuBrが23~59  $\mu\text{eV}$ であり、いずれも量子点のサイズに反比例する。CuClでは1~2  $\mu\text{eV}$ であり、母体の違いによって低温領域での温度特性が大きく変化した。これらの結果は、量子点に局在する励起子の位相緩和過程に、量子点界面の効果が少なからず影響しており、量子点を母体まで含めて扱うことの重要性を表していると言える。

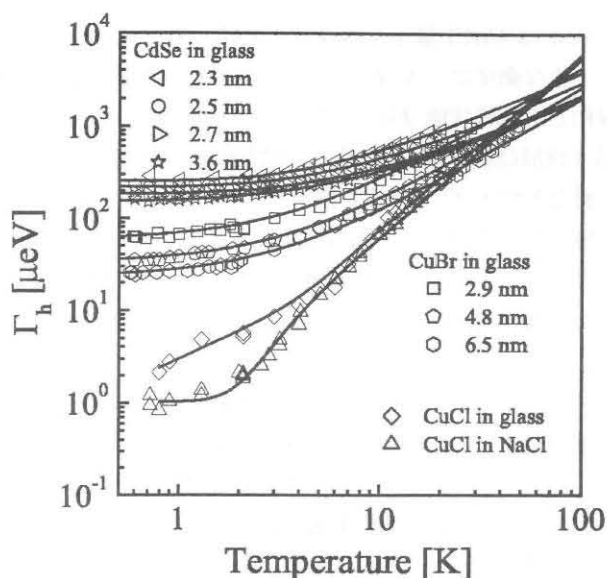


図3 CdSe, CuCl, CuBr 量子点のスペクトル均一幅の温度依存性

#### <CuCl 量子キューブにおける励起子-フォノン結合状態> (趙家龍、舛本泰章) [51]

最近、永続的ホールバーニング分光で光励起したガラス中のCuCl量子点における縦波光学 (LO) フォノンのエネルギーが10%のソフトニングをおこすことが確認された。一方、NaCl結晶中のCuCl量子点は立方体形状をもち、ガラス中の球状のCuCl量子点とは異なった、量子状態が存在する。LOフォノンのエネルギーが量子キューブに閉じ込められた励起子の基底状態と励起状態とのエネルギー間隔に近づいたときの振る舞いを永続的ホールバーニング分光で研究した。

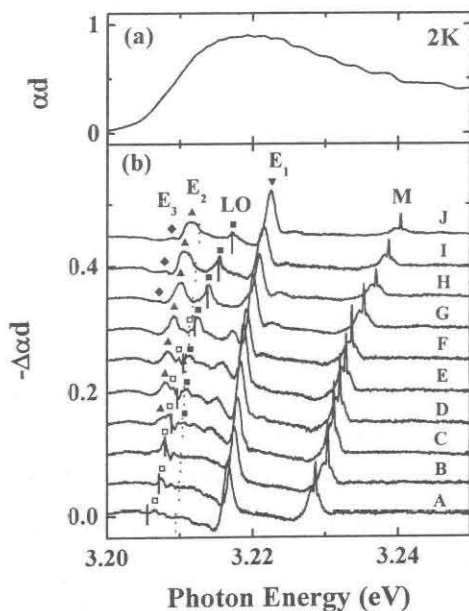


図4 大きいサイズCuCl量子点の吸収と永続的ホールバーニングスペクトル。

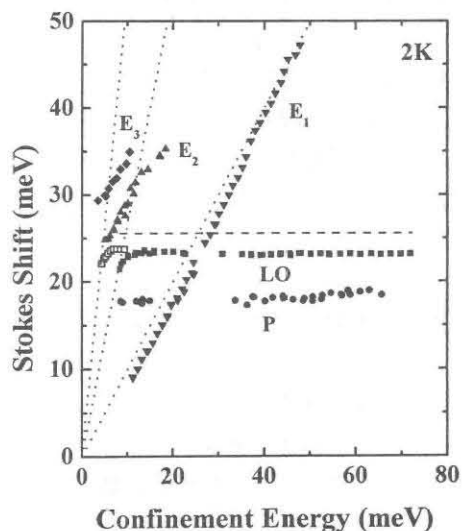


図5 ストークスシフトの励起子の閉じ込めエネルギー依存性。

図 4 は CuCl 量子点の吸収と永続的ホールバーニングスペクトルを示す。量子キューブモデルを用いて、主な衛星ホール  $E_1$  はそのエネルギー依存性から、量子キューブの第一励起状態  $E_{2,1,1}$  を励起の後、緩和した基底状態  $E_{1,1,1}$  のホールバーニングであることが分かる。大きい CuCl 量子点中のホール  $E_2$  と  $E_3$  は励起状態  $E_{3,1,1}$  と  $E_{3,3,1}$  の励起の後、緩和した基底状態  $E_{1,1,1}$  のホールバーニングと考えられる。

異なるサイズの CuCl 量子キューブにおける励起子状態とフォノンモードを測定し、励起子-フォノン結合状態を調べた。図 5 は励起子閉じ込めエネルギーに対して、ホール  $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$ 、LO と P のストークスシフトのサイズ依存性を示す。ホール LO のストークスシフトは 23 meV であり、これは光励起状態の LO フォノンと考えられ、一方、広いホール P はストークスシフト 18 meV で TO フォノンと考えられる。

大きいサイズの CuCl 量子点の永続的ホールバーニングスペクトル(図 4(b))を見ると、量子点のサイズが増加すると、ホール  $E_2$  と LO が近づいていく。さらに LO フォノンのエネルギーが小さくなるとともに、LO フォノンモードが光学許容の励起状態  $E_{3,1,1}$  と反交差する。ホール  $E_2$  のストークスシフトは基底状態  $E_{1,1,1}$  と高い励起状態  $E_{3,1,1}$  とのエネルギー差である。励起子基底状態のフォノンバンドと高い励起状態  $E_{3,1,1}$  との反交差が図 4 に明らかに観測された。さらに、図 4(b)にホール  $E_2$  と LO との間に鋭いピークが見られ、このピークの振る舞いは、LO フォノンモードと高い励起状態  $E_{3,1,1}$  との反交差と考えられる。

#### <CuBr と CuI 量子点における LO フォノンモードと励起子状態> (趙家龍、舛本泰章)

ガラス中の CuBr 量子点における励起子-フォノン結合状態を観測するために、異なるサイズの CuBr 量子点の LO フォノンモードと励起子状態を永続的ホールバーニング分光で研究した。小さい CuBr 量子点の LO フォノンサイドバンドのエネルギーが 18 meV (バルク CuBr の LO フォノンは 21 meV) と得られた。衛星ホール  $E_1$  が励起子の励起状態の励起による基底状態のホールバーニングと考えられる。サイズが大きくなるとともに、LO フォノンエネルギーが小さくなり、LO フォノンモードが励起状態と反交差する。この実験結果は励起子とフォノン共鳴で CuBr 量子点中の LO フォノンと励起子との相互作用が励起子-フォノン結合モードの形成をおこすことを示している。さらに、2 K で NaBr 結晶中の CuBr 量子点の吸収の PSHB スペクトルを測定し、鋭い LO フォノンホールのストークスシフトが 17.6 meV と得られた。

CuI 量子点の吸収と PSHB スペクトルが測定された。バルク CuI 結晶の LO フォノンエネルギー 18.7 meV に比べ、永続的ホールバーニングでは LO フォノンエネルギーが 17.4 meV と得られた。

以上の実験結果は CuBr と CuI 量子点における LO フォノンエネルギーのソフトニングを示している。励起子とフォノンの相互作用で CuBr と CuI 量子点における LO フォノンエネルギーのソフトニングが定性的に説明された。

#### <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の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。

本研究ではガラス中の 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、二光子励起発光強度および一光子励起発光強度の減少、ならびに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(図 6)。測定した電場変調スペクトルと紫外光照射前後の差分吸収スペクトルとを比較すると、よい一致が見られた。したがって、紫外光照射によって局所電場が発生し、それによるシュタルクシフトが観測されたと考えることができる。局所電場の強度を電場変調透過測定と差分吸収スペ

クトルの変化量により見積もったところ、 $\sim 10^6$  V/cm 程度となった。この大きさはガラス母体中にトラップされたキャリアによって発生したものと考えると妥当な大きさである。

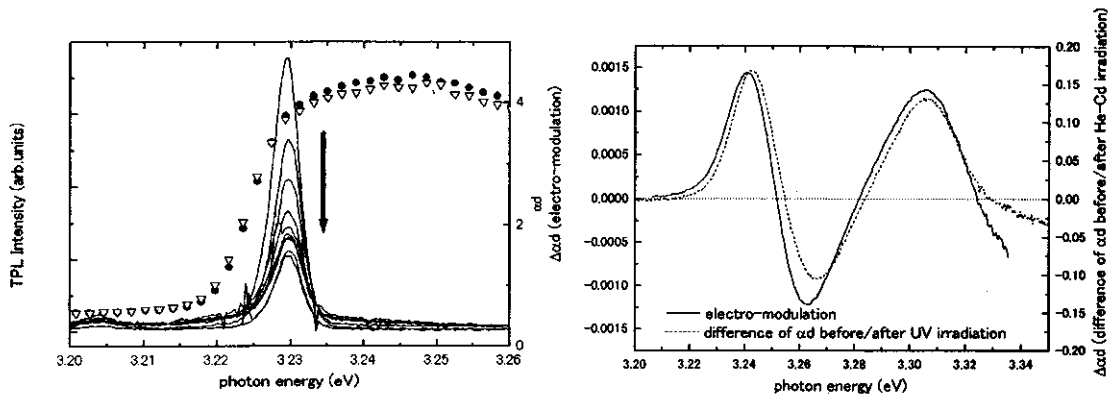


図 6 (左)：二光子励起発光スペクトルおよび吸収スペクトルの紫外光照射前後における変化。(右)：電場変調信号と紫外光照射前後における差分吸収スペクトルの比較

#### <NaCl 中の CuCl 量子点における電場変調光スペクトル> (成瀬文隆、舛本泰章)

永続的ホールバーニングを示す量子点内には強い内部電場が発生していると考えられる。この考えを確かめるため、ホールバーニング中に外部から電場をかけドット内の内部電場を調べた。外部電場をかけるため、CuCl 量子点を含む NaCl 結晶を数百マイクロン程にへき開し、両面に透明導電膜 ITO を蒸着させこれに電極を取り付け交流電場をかけ測定にはロックインアンプ、フォトマルを使用した。また選択励起光源としてナノ秒色素レーザー、プローブ光としてキセノンランプを使用した。プローブ光をあて続けることによるホールの変化の影響を最小限にするために、ホールバーニング (HB) 中の電場変調スペクトル測定時には、常に色素レーザーをサンプルに照射した。図 7 にサンプル A (粒径  $R=4.1$  nm) の HB 中の電場変調スペクトルを示す。色素レーザーでの選択励起の波長はおよそ 386 nm でこれはこのサンプルの  $Z_3$  励起子吸収帯のピーク値である。図 7 によると HB させた 386 nm での電場変調信号が急激な変化を示した。サンプルに電場をかけると電場の 2 乗に比例するシュタルクシフトにより電場変調スペクトルは電場の 2 乗に比例するように強度が増してゆく。実際 386 nm の信号は電場の 2 乗に比例して増加する。しかし HB によるスペクトルの変化量はあきらかに電場の 1 乗に比例している。しかも粒径が小さいサンプルの方がその増加スピードが大きいことが明らかになった。これは HB 中の量子点の内部電場が外部電場に比べ強く、そのためにスペクトル強度は内部電場と外部電場の積に比例するシュタルクシフトを示すものと考えられる。またドット内の内部電場は量子点の周囲にトラップされた電子やホールとのクーロン力により発生しているためその強度はドットの粒径を  $R$  とすると  $1/R$  に比例しているためと考えられる。

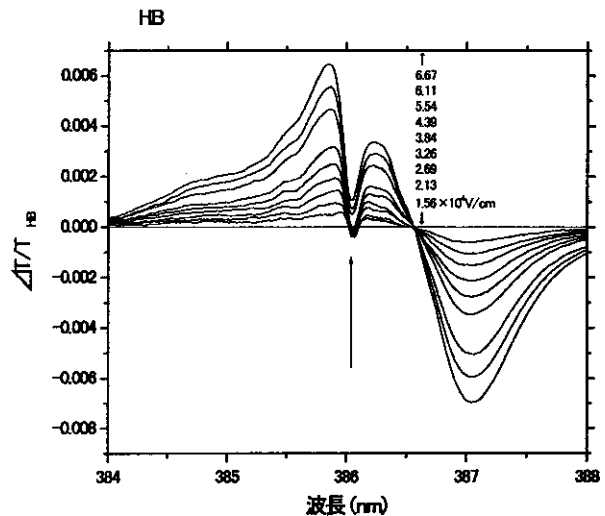


図 7 HB 中の電場変調スペクトル

<PbSe 量子点のコヒーレントフォノンとラマン散乱> (池沢道男、舛本泰章、A.A.Lipovskii<sup>A</sup>、ASt.-Petersburg State Technical University)

半導体量子点における閉じ込められた格子振動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。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た。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・プローブ法である。図 8 は、室温におけるコヒーレントフォノン信号の粒径依存性を示している。大きなゆっくりとした電子系の応答の上に、小さな振動成分を確認することができる。振動成分の大きさは、プローブ光強度の百万分の一のオーダーの微小な変調である。この実験結果では非常に速く振幅が減衰しているように見えているが、これは量子点の粒径のばらつきによるフォノン周波数の分布を反映したものであって、実際のコヒーレントフォノン振幅の減衰を直接表すものではない。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、図 8 に示すように実際にその傾向が確認されている。

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もたれるが、量子点においてそれらの関係を粒径依存性を含めて明らかにした研究はまだない。そこで我々は、上記の結果と比較するために同試料に対して室温でのラマン散乱の測定を行った。励起光源はチタンサファイアレーザー (CW 発振) で、低波数の微弱なラマン散乱を測定するために、1 m のダブル分光器と電子冷却型の光電子増倍管を用いて光子カウンティングを行った。結果は図 9 に示す。上に位置しているものほど、粒径の小さな試料に対応する。レーザー光の両側に見えるピークが閉じ込められた音響フォノンに対応するラマンピークだと考えられ、振動数が粒径に反比例するという関係も確認できた。しかし、振動数の絶対値はコヒーレントフォノンの観測結果と一致せず、半分程度の振動数になっていた。定量的な計算から、コヒーレントフォノンで見られる振動モードは、全対称なモード ( $l=0$ ) とよく一致するが、ラマン散乱で観測されたピークは、よりエネルギーの低い  $l=2$  の spheroidal mode である可能性が高い。このように、2つの実験手法で相補的な情報が得られることが示された。

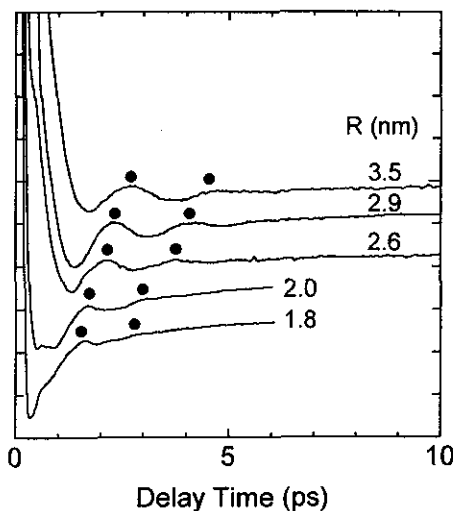


図 8 PbSe 量子点のコヒーレントフォノン信号

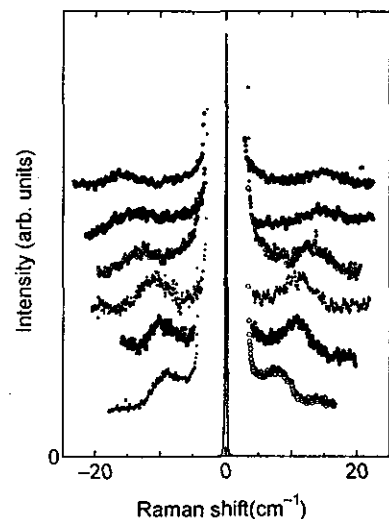


図 9 Raman 散乱

<PbSe 量子点におけるバンド内遷移> (奥野剛史、G.R. Hayes<sup>A</sup>、B. Deveaud<sup>A</sup>、A.A. Lipovskii<sup>B</sup>、舛本泰章 <sup>A</sup> Swiss Federal Institute of Technology-Lausanne, <sup>B</sup> St. Peteruburg State Technical

University) [5,46]

PbSeは、バルク結晶の励起子ボア半径が46 nmであり、GaAsにおける12 nmやCdSにおける3 nm等の通常の半導体と比較して極めて大きい。そのため、量子点にした場合、極めて強い閉じ込めを受ける励起子系として典型的である、量子点を光デバイスに応用するための基礎を得ることができると期待される。

作製したリン酸ガラス中のPbSe量子点試料の吸収スペクトルを測定すると、室温において、粒径に依存するシャープな吸収ピークを観測することができた。図10に、平均半径2.9および1.8 nmの試料のものを示す。最低吸収ピーク（上向き矢印）は0.84および1.21 eVにみられる。これらの試料において、バンド間励起による最低吸収ピークでの透過率変化を測定（ポンププローブ法）した一例が図11(a)である。この図では、主な減衰成分として25 psの緩和時間を示しており、平均半径がさらに小さいものほど短い緩和時間をもっていた。この結果は、粒径によって緩和時間を制御

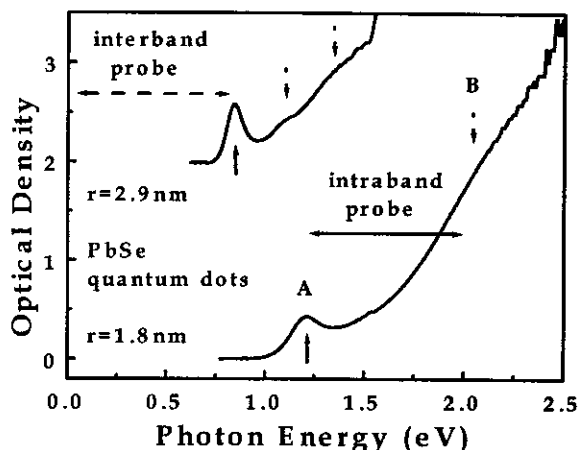


図10 PbSe量子点試料の吸収スペクトル（室温）。

することに成功した、ともいえるものである。しかし、図11(a)の時間減衰には、1 nsの長寿命成分もみられ、光スイッチとして応用する際にはこれが繰り返しを制限することになる。そこで、バンド内遷移の有用性を調べた。量子井戸においてバンド内遷移を用いた赤外光レーザーの研究が注目を集めているが、量子点におけるバンド内遷移の研究例は極めて少ない状況にある。

図10の吸収スペクトルには、最低吸収ピークの高エネルギー側に、励起状態の吸収ピーク（下向き矢印）もみられている。バンド間

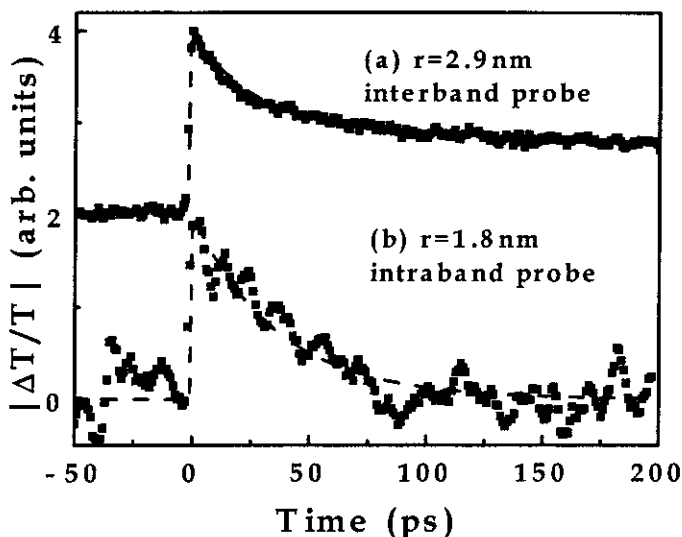


図11 PbSe量子点における過渡吸収の時間変化（室温）。プローブ光はいずれも0.84 eV (1.5 μm)。(a) バンド間遷移のプローブ。(b) バンド内遷移のプローブ。

を励起し、図中AB矢印間のバンド内遷移をプローブ(0.84 eV, 1.5 μm)して透過率変化を測定したのが図11(b)である。得られた減衰信号波形は、36 psの単一指数関数減衰でフィットできるものであり、長寿命成分は観測されなかった。これは、PbSe量子点のバンド内遷移が、近赤外領域の光スイッチデバイスとして応用可能であることを示すものである。バンド間遷移プローブとバンド内遷移プローブとで時間減衰が異なる原因としては、電子と正孔が分離し、両者の緩和が異なっているという可能性がある。

<歪み誘起 GaAs 量子点の非線形発光> (西林一彦, 奥野剛史, 三品具文, 舛本泰章) [36]

歪み誘起量子点(半導体表面に自己形成型量子点を成長させたとき、表面付近に成長させた量子井戸内に伝播する歪みを利用して井戸内に生成させる三次元量子閉じ込め領域)は欠陥が少なく大きさも均質であることから、近年、量子点光物性の基礎の面から典型例として研究が行われている。この歪み誘起量子点の、発光スペクトルから個々のエネルギー準位を確定できるという点に着目し、その発光の非線形成分を測定し、個々の準位の振る舞いを調べた。

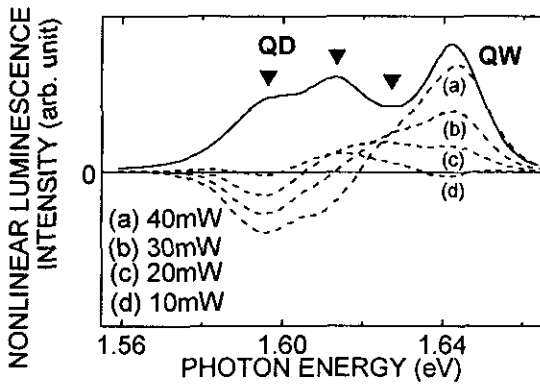


図 12 歪み誘起 GaAs 量子点の非線形発光スペクトル

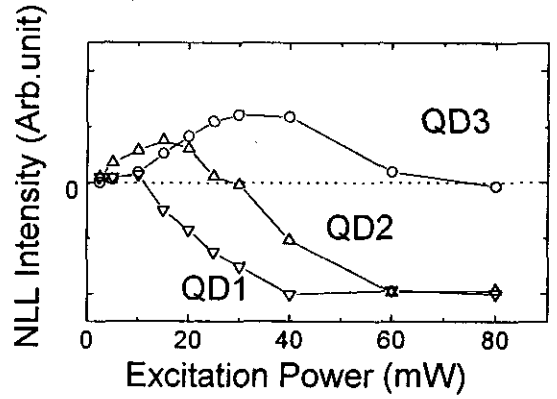


図 13 量子点中の第 1、第 2、第 3 量子準位の非線形発光強度の励起光強度依存性

用いた試料は GaAs(3.9 nm)/AlGaAs 量子井戸を含む試料の表面に InP 自己形成型量子点を成長させたもので、図 12 実線がその発光スペクトルである。量子井戸からの発光の低エネルギー側に位置する発光領域が歪み誘起量子点からのものである。これに対して、その発光の非線形(高次)成分を抽出したものが図 12 の点線である。測定は、励起光源の Nd:YVO<sub>4</sub> CW レーザーを一度二つに分け、チョッパーを通した後に試料上で再び混合し、その信号の和周波成分をロックイン増幅器にかけて取り出すことで行った。光の非線形成分の符号は、負においては励起光強度の増加に対して発光の飽和、正ならば線形以上の発光の増加を意味する。図 13 は量子点の各準位の非線形成分の強度依存を示したものである。各準位が順次飽和していく様子がわかる。歪み誘起量子点の発光は、上準位からの電子・正孔対の緩和による供給と、下の準位への緩和と再結合に寄る発光の度合いによって説明される。N 番目の準位に取りうる電子の状態数は 2N 個であり、電子はこの量子状態の“空席”の状態に緩和する。即ち、歪み誘起量子点の非線形発光は電子・正孔対の緩和時間、発光寿命、量子状態の飽和に起因するものと考えられる。それらを考慮したモデル計算を用いることで図 13 を説明することが出来る。これより、歪み誘起量子点の非線形発光成分を測定することで、その準位間の緩和時間を見積もることが出来る。

<CdTe 自己形成量子点におけるサイト選択分光> (野村光宏, 奥野剛史, 舛本泰章, 寺井慶和<sup>A</sup>, 黒田真司<sup>A</sup>, 瀧田宏樹<sup>A</sup> <sup>A</sup>筑波大学物質工学系)

電子が LO フォノンをカスケード的に放出しながらエネルギーを失っていく緩和過程は半導体中の電子のエネルギー緩和過程としては最速で、超高速電子デバイスや明るい発光デバイスの性能を支配する重要な因子である。このことは量子点についても同様だが、エネルギースペクトルの離散性のため、LO フォノンのカスケード放出が制限される環境下であり、量子点中の電子のエネルギー緩和過程には不明な点が多い。ZnTe 上の成長された II-VI 族化合物半導体 CdTe 自己組織化量子点について共鳴ラマン散乱(発光)測定、励起スペクトルの測定、共鳴励起による発光の時間分解測定を行い電子のエネルギー緩和機構を研究した。アルゴンレーザーを励起光源として共鳴ラマン散乱(発光)は複数の鋭いピークからなり、そのエネルギー間隔からバリアー層の ZnTe の LO フォノンである。CdTe 量子点の発光励起



スペクトルは、18次にも及ぶ高次のLOフォノン構造が見られた。図14に示す2.38 eVにあるピークはバリアー層であるZnTeの吸収、検出エネルギーによらない2.25 eVにあるピークは2層のCdTe量子井戸の吸収とエネルギー的に一致し、周期的に見えているピークは共鳴ラマン散乱（発光）測定で観測したZnTeのLOフォノンに一致する。さらにCdTe量子点の発光に重なるLOフォノンの構造の時間減衰にはレーザーと同じ早い成分は含まれていないことが確かめられた。

これらの結果は、ZnTeバリアー層に光生成されたキャリアはZnTeのLOフォノンをカスケード的に放出しながらエネルギーを失い、さらにCdTe自己形成量子点の電子状態まで緩和してもZnTeのLOフォノンを放出しながら緩和し発光にいたる過程が明らかにされた。発光励起スペクトルに見られる、18次にも及ぶ高次のLOフォノン構造からZnTeを母体とするCdTe自己形成量子点が高効率のキャリアの受容体として機能することを明らかにすることができた。

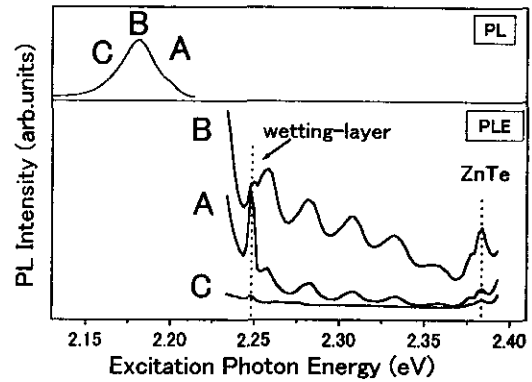


図14 CdTe量子点の発光スペクトルと励起スペクトル

< 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 > [1,3,4,6-18,20-23,26-35,37,38,40-45,48-50,52-65]

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）が舩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、今年度をもって終了した。今年度もいくつかの成果を得た。

### 【3】電子をドープした半導体ナノメートル構造の光物性（野村晋太郎） [66,67]

< 横方向量子点アレーの空間分解発光スペクトル >（野村晋太郎）

正方格子状表面電極を用いて、無バイアス状態での二次元電子系から負バイアスを印加することにより、量子点正方格子状態へと連続的に電子密度空間分布を制御可能であることを調べてきた。本研究では、より直接的に近接場光学顕微鏡を用いて、発光強度の空間分解像を高い分解能で検出することにより、量子点電子状態の形成を示した。

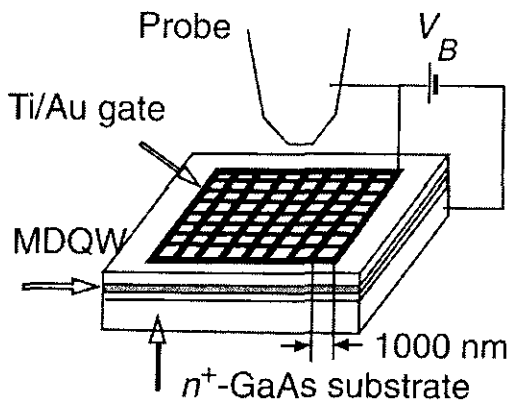


図15 量子点アレー試料構造の概略図。

試料として図15に示すようなナノメートルスケールの網状電極を変調ドープ量子井戸構造の表面に作製したものを用いた。図16に7.5 Kにおける試料のAFM像とバイアス電圧-0.65 Vにおける1.511 eVを中心としたスペクトル領域の発光空間像を示す。発光空間像には発光強度が丸いドット状に分布していることがわかる。これは電子密度分布を反映したものであると考えられる。この結果は負バイアス電圧印加により、電子密度空間分布を変調することが可能であることを直接的に示している。この実験結果と試料ゲート構造を忠実に取り入れた自己無撞着計算の比較を行い、このような空間分解発光像が得られるのは、電子密度

の大きい量子点中心付近ではスクリーニングのためにポテンシャル勾配が小さく、正孔の拡散速度が遅く、反対にゲート下ではポテンシャル勾配が大きいため正孔の拡散速度が速いためであることが示された。

本研究は神奈川県科学技術アカデミー、齋木敏治博士、松田一成博士、理研、青柳克信博士との共同研究である。

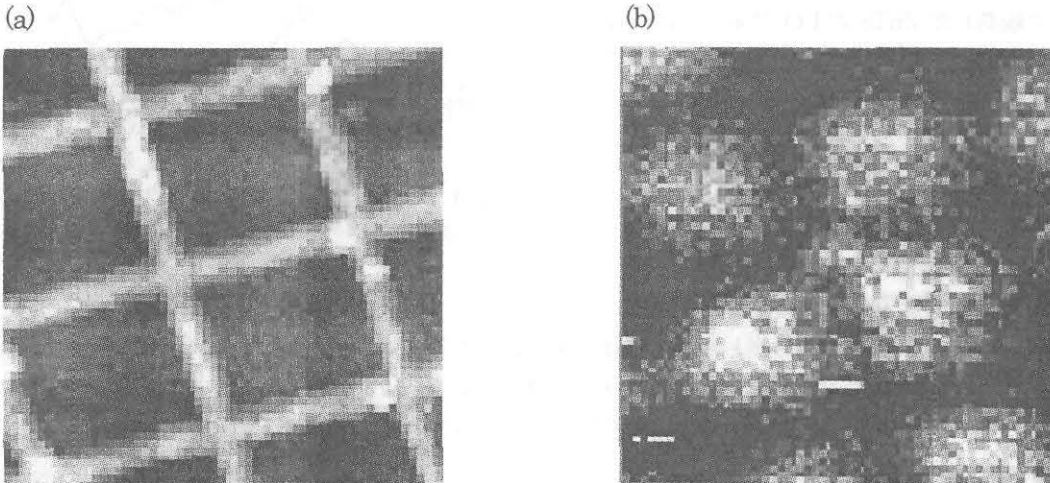


図 16 量子点アレー試料の(a) AFM 像、(b)負バイアス (-0.65 V) における 1.511 eV 発光空間像。

#### <横方向量子点アレーの時間分解発光スペクトル> (野村晋太郎)

正孔が自由に動くと考えられる変調ドープ量子井戸試料を用いた場合、測定される発光には正孔状態も電子状態と等しく重要である。しかしながら、発光に関与している正孔状態を理論的に予測することは困難である。もし、正孔が一粒子的に振る舞い、十分早くポテンシャル極小点へ緩和したとすると、正孔は負バイアス下において電極下に存在し、量子点を形成している電子とは空間的に離れた状態をつくる。その結果、発光は非常に弱くなるとの結論が導かれ、観測される発光強度と矛盾する。実際は、電子と正孔とのクーロン相互作用が重要で、かつ、ポテンシャル極小点への正孔の緩和のダイナミクスが観測されるスペクトルに寄与していると考えられる。

そこで発光に関与している正孔のダイナミクスについての知見を得るために時間分解発光スペクトルの観測を行なった。フェルミ端異常の発光ピークを中心とした波長領域の発光強度の時間依存性の結果は、指数関数的減衰を示し、時定数は 350 ps である。同じ波長領域での無バイアス状態での二次元電子系の減衰の時定数は 450 ps であり、フェルミ端異常の発光の方がやや速い減衰を示している。フェルミ端異常の発光に関与する正孔の波数はフェルミ波数であり、一方同じ波長での二次元電子系の発光に関与する波数はそれよりも小さく、大きいフェルミ波数の正孔がより早く緩和すると考えると理解される。また、測定結果はフェルミ端異常の発光ピークエネルギーは時間の経過に対して一定であり、その発光に寄与する正孔のエネルギーは一定であることが示された。

本研究は理研、青柳克信博士、半村清孝博士との共同研究である。

#### <横方向量子点アレーの偏光依存発光スペクトル> (野村晋太郎)

量子点アレーの電子状態の分光学的研究の特長の一つに偏光依存スペクトルの測定により電子系のスピンに関する情報を得られる点が挙げられる。本研究では GaAs/AlGaAs n 型変調ドープ量子井戸基板上の周期 150 nm の網状表面電極に負バイアス電圧を印加して実現した量子点アレーの偏光依存発光測定を行なった。バイアス電圧の印加により、ポテンシャル閉じ込めが大きくなるとともに全電子数は小さくなり、量子点中央部の電子密度をほぼ一定に保ったまま量子点の拡がりの変化が起こる。最低ランダ

ウ状態にのみ電子が占有する  $1 < \nu < 2$  において、ポテンシャル閉じ込めの増大に伴い上向きスピンの下向きスピンのフリップするとともに中央部から周辺部への電子の移動がおこると考えられる。4.8 T, 1.6 K における最低ランダウ状態の発光ピークの偏光度のバイアス電圧依存性の測定により、負バイアスの印加に伴って偏光度が大きくなりスピンのフリップがおきていることが示された。

#### <n 型半導体のバイアス電圧依存電場変調スペクトル> (野村晋太郎)

2次元電子系の光学スペクトルにおいて、電子密度を0から連続的に変化させた際に励起子状態、荷電励起子状態等を経て、フェルミ端異常を伴う電子ガス状態へと移り変わることが知られている。これらの状態変化に起因する光学スペクトルの変化を敏感に捉えるために、連続的に DC バイアス電圧印加により電子密度を変化させつつ、AC バイアス印加し、変調分光を行なった。電子状態に応じた、定性的に異なった変調反射スペクトルが得られた。

#### <2次元電子系における磁気閉じ込め> (中山貴司、野村晋太郎、舛本泰章)

ナノメートルスケールの網状電極を変調ドープ量子井戸構造の表面に作製し、バイアス電圧を印加することにより、電場勾配による2次元電子系の横方向閉じ込めの研究を行なっている。この場合、電子と正孔のポテンシャルの底は空間的に離れた位置に存在する。それに対して、磁気閉じ込めの場合は、ポテンシャルの底が電子と正孔の双方で2次元平面内で同じ位置となることが考えられる。そこで、本研究では、変調ドープ量子井戸構造の表面に超伝導体金属を形成し、面に対して垂直磁場下において生じる不均一磁場による2次元電子系からの発光の変化を観測した。超伝導体金属下の発光スペクトルを超伝導転移点以下の温度、転移点以上の温度、および、超伝導体金属を形成しない部分からの発光スペクトル、それぞれの磁場依存性を測定し、マイスナー効果に起因すると考えられる発光エネルギーシフトの変化を観測した。

#### 【4】低次元化合物 $\text{Fe}_{1+x}\text{Nb}_{3-x}\text{Se}_{10}$ ( $x=1/3$ ) の四極子分裂の温度変化 (鈴木 隆司)

$\text{Fe}_{1+x}\text{Nb}_{3-x}\text{Se}_{10}$  ( $x=1/3$ ) は低次元性物質で、 $\text{NbSe}_3$  と同様に低温で CDW 転移を起こすことで知られている。これまで転移温度以下のメスバウアー効果の実験に注目した解析が行われてきた。我々は室温より高温で、四極子分裂が温度とともに急激に大きくなることを見出した。電場勾配  $q$  は、一般的に温度上昇によって小さくなるのが普通で、この化合物の  $q$  の正の温度依存性は特異である。その原因について NQR の実験について報告されている理論を元にして、新たな考察を加えた。Fe 原子と Se 原子の  $\pi$  結合に対する格子振動の影響を考慮すると、 $q$  の温度依存性は次のようになる。

$$q(T) = F \frac{1}{\exp(\hbar\omega / kT) - 1} q_{st}$$

F は、Fe 原子と Se 原子の  $\pi$  軌道の相互作用と格子振動のパラメータに依存する。適当なパラメータを選ぶことにより、四極子分裂の正の温度依存性が説明出来た。

#### <論文>

1. E.A. Muljarov, E.A. Zhukov, V.S. Dneprovskii and Y. Masumoto: "Dielectrically enhanced excitons in semiconductor-insulator quantum wires: theory and experiment", Phys. Rev. B **62**, 7420 (2000).
2. T. Okuno, Y. Masumoto, M. Ito and H. Okamoto: "Large optical nonlinearity and fast response time in low-temperature grown GaAs/AlAs multiple quantum wells", Appl. Phys. Lett. **77**, 58

(2000).

3. M. Takahashi, Y. Toriumi, T. Matsumoto, Y. Masumoto and N. Koshida: "Significant Photoinduced Refractive Index Change Observed in Porous Silicon Fabry-Perot Resonators", *Appl. Phys. Lett.* **76**, 1990 (2000).
4. M. Sugisaki, H.-W. Ren, K. Nishi, S. Sugou and Y. Masumoto: "Excitons at a single localized center induced by a natural composition modulation in bulk  $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ ", *Phys. Rev. B* **61**, 16040 (2000).
5. T. Okuno, Y. Masumoto, M. Ikezawa, T. Ogawa and A.A. Lipovskii: "Size-dependent picosecond energy relaxation in PbSe quantum dots", *Appl. Phys. Lett.* **77**, 504 (2000).
6. A.I. Belogorokhov, L.I. Belogorokhova, Y. Masumoto, T. Matsumoto and E.A. Zhukov: "The effect of deuterium on the optical properties of free standing porous silicon layers", *Proc. Ioffe Institute 8th Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology"*, p.460 (St. Petersburg, 2000).
7. V. Davydov, I.V. Ignatiev, I.E. Kozin, S.V. Nair, J.-S. Lee, H.-W. Ren, S. Sugou and Y. Masumoto: "Carrier relaxation dynamics in self-assembled quantum dots", *Proc. Ioffe Institute 8th Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology"*, p.379 (St. Petersburg, 2000).
8. A.V. Baranov, V. Davydov, A. Fedorov, H.-W. Ren, S. Sugou and Y. Masumoto: "Two-pulse coherent population of quantum states in inhomogeneous ensemble detected by the phonon-assisted resonant luminescence", *Proc. Ioffe Institute 8th Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology"*, p.367 (St. Petersburg, 2000).
9. V. Davydov, A.V. Fedorov, I.V. Ignatiev, S.V. Nair, H.-W. Ren, M. Sugisaki, S. Sugou and Y. Masumoto: "Observation of quantum beats in photoluminescence of self-assembled quantum dots", *Proc. Ioffe Institute 8th Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology"*, p.395 (St. Petersburg, 2000).
10. I.A. Yugova, V.G. Davydov, Yu.K. Dolgikh, Yu.P. Efimov, S.A. Eliseev, A.V. Fedorov, I.Ya. Gerlovin, I.V. Ignatiev, I.E. Kozin, V.V. Petrov, V.V. Ovsyankin, K. Nishi, H.-W. Ren, S. Sugou and Y. Masumoto: "Spectroscopy of the high energy quantum confined excitonic states in the thick GaAs quantum wells", *Proc. Ioffe Institute 8th Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology"*, p.276 (St. Petersburg, 2000).
11. M. Tanaka, S. Sawai, M. Sengoku, M. Kato and Y. Masumoto: "Luminescence properties of ZnS phosphor nanocrystals prepared by laser-induced gas-evaporation method", *J. Appl. Phys.* **87**, 8535 (2000).
12. H.-W. Ren, S.V. Nair, T. Okuno, K. Nishibayashi, J.-S. Lee, S. Sugou and Y. Masumoto: "Confinement effect in strain-induced InGaAs/GaAs quantum dots", *Physica E* **7**, 403 (2000); *Proc. 9th Int. Conf. Modulated Semiconductor Structures (Fukuoka, 1999)*.
13. J.-S. Lee, M. Sugisaki, H.-W. Ren, S. Sugou and Y. Masumoto: "Spontaneous one-dimensional lateral alignment of multistacked InGaAs quantum dots on GaAs (n11)B Substrates", *Physica E* **7**, 303 (2000); *9th Int. Conf. Modulated Semiconductor Structures (Fukuoka, 1999)*.
14. J.-S. Lee, S. Sugou and Y. Masumoto: "Mechanism of ellipsometry monolayer oscillation during metalorganic vapor-phase epitaxy", *J. Appl. Phys.* **88**, 196 (2000).
15. J. Qi, T. Matsumoto, M. Tanaka and Y. Masumoto: "Preparation of White Light Electroluminescent Europium Silicate Thin Films", *Electrochem. Solid-State Lett.* **3**, 239 (2000).
16. M. Tanaka, J. Qi and Y. Masumoto: "Optical properties of undoped and  $\text{Mn}^{2+}$ -doped CdS nanocrystals in polymer", *J. Cryst. Growth* **214/215**, 410 (2000); *Ninth Int. Conf. II-VI Compounds (Kyoto, 1999)*.

17. H. Yamada, M. Tanaka, T. Maruyama, Y. Masumoto, T. Yao and K. Akimoto: "Efficient luminescence from Sm-doped ZnSSe/undoped-ZnS multi-quantum wells", *J. Cryst. Growth*, **214-215**, 935 (2000).
18. H.-W. Ren, S.V. Nair, J.-S. Lee, S. Sugou and Y. Masumoto: "Photoluminescence of Strain-Induced Coupled InGaAs/GaAs Quantum-Dot Pairs", *J. Electronic Materials* **29**, 520 (2000); Proc. 1999 Electronic Materials Conf. (Santa Barbara, 1999).
19. T. Mishina, K. Nitta and Y. Masumoto: "Coherent lattice vibration of interlayer shearing mode of graphite", *Phys. Rev. B* **62**, 2908 (2000).
20. M. Tanaka and Y. Masumoto: "Very weak temperature quenching in orange luminescence of ZnS:Mn<sup>2+</sup> nanocrystals in polymer", *Chem. Phys. Lett.* **324**, 249 (2000).
21. E. Tokunaga, A.L. Ivanov, S.V. Nair and Y. Masumoto: "Biexciton Wavefunction in Bulk CuCl Probed by Inverse Polariton Series", *physica status solidi (b)* **221**, 359 (2000); *Nonlinear optics and excitation kinetics in semiconductors (NOEKS)* (Marburg, 2000).
22. J.S. Lee and Y. Masumoto: "In situ observation of ellipsometry monolayer vapor-phase epitaxy", To be published in *J. Electrochem. Soc.*; The SOTAPOCS Symposium of the 197th Meeting of the Electrochemical Society (Toronto, 2000).
23. H.-W. Ren and Y. Masumoto: "Electron coupling in InGaAs/GaAs quantum dot-pairs fabricated with InP island stressors", *Twelfth Int. Conf. Indium Phosphide and Related Materials* (Williamsburg, 2000).
24. T. Okuno, Y. Masumoto, Y. Sakuma, M. Ito and H. Okamoto: "Ultrafast Optical Response Time of Low-Temperature MBE-Grown Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As-AlAs MQW", *Abstracts of 7th Int. Workshop on Femtosecond Technology*, p.199 (Tsukuba, 2000).
25. Y. Masumoto, M. Ikezawa, B.-R. Hyun, K. Takemoto and M. Furuya: "Homogeneous Width of Confined Excitons in Quantum Dots at Very Low Temperatures", *physica status solidi (b)* **224**, 613 (2001); *Int. Conf. Semiconductor Quantum Dots* (Munich, 2000). //INVITED PAPER//
26. S.V. Nair and Y. Masumoto: "Multi-Exciton States and Many-Body Correlations in Quantum Dots", *physica status solidi (b)* **224**, 739 (2001); *Int. Conf. Semiconductor Quantum Dots* (Munich, 2000).
27. M. Sugisaki, H.-W. Ren, I.S. Osadko, K. Nishi and Y. Masumoto: "Fluorescence Intermittency in InP Self-Assembled Quantum Dots", *physica status solidi (b)* **224**, 67 (2001); *Int. Conf. Semiconductor Quantum Dots* (Munich, 2000).
28. A.V. Baranov, V. Davydov, A.V. Fedorov, H.-W. Ren, S. Sugou and Y. Masumoto: "Coherent Control of Stress-Induced InGaAs Quantum Dots by Means of Phonon-Assisted Resonant Photoluminescence", *physica status solidi (b)* **224**, 461 (2001); *Int. Conf. Semiconductor Quantum Dots* (Munich, 2000).
29. V.G. Davydov, A.V. Fedorov, I.V. Ignatiev, I.E. Kozin, H.-W. Ren, M. Sugisaki, S. Sugou and Y. Masumoto: "Quantum Beats in Photoluminescence of InP Quantum Dots in Electric Field", *physica status solidi (b)* **224**, 425 (2001); *Int. Conf. Semiconductor Quantum Dots* (Munich, 2000).
30. V. Davydov, I.V. Ignatiev, I.E. Kozin, S.V. Nair, J.-S. Lee, H.-W. Ren, S. Sugou and Y. Masumoto: "Carrier Relaxation Dynamics in Self-Assembled Quantum Dots Studied by Artificial Control of Nonradiative Losses", *physica status solidi (b)* **224**, 493 (2001); *Int. Conf. Semiconductor Quantum Dots* (Munich, 2000).
31. I.E. Kozin, V. Davydov, Yu. Dolgikh, Yu. Efimov, S. Eliseev, A. Fedorov, I. Gerlovin, I. Ignatiev, V.

- Petrov, V. Ovsyankin, I. Yugova, H.-W. Ren and Y. Masumoto: "Evidence of the high energy excitonic states in the spectra of thick GaAs quantum wells", 2000 Int. Conf. Excitonic Processes in Condensed Matter (Osaka, 2000).
32. Yu. Dolgikh, S. Eliseev, I. Gerlovin, V. Ovsyankin, Yu. Efimov, I. Ignatiev, I. Kozin, V. Pertrov, V. Pantukhin and Y. Masumoto: "Polarization dynamics of HH-exciton resonance photoluminescence in the GaAs/AlGaAs superlattices", 2000 Int. Conf. Excitonic Processes in Condensed Matter (Osaka, 2000).
  33. I.V. Ignatiev, I.E. Kozin, S.V. Nair, H.-W. Ren, S. Sugou and Y. Masumoto: "Carrier relaxation dynamics in InP quantum dots studied by artificial control of nonradiative losses", *Phys. Rev. B* **61**, 15633 (2000).
  34. J. Qi, T. Matsumoto and Y. Masumoto: "Characterization of Simultaneously Fabricated Silicon and Silicon Monoxide Nanowires", *Jpn. J. Appl. Phys.* **40**, L134 (2001).
  35. Y. Masumoto, I.V. Ignatiev, I.E. Kozin, V.G. Davydov, S.V. Nair, H.-W. Ren, J.-S. Lee and S. Sugou: "Breakdown of the Phonon Bottleneck Effect in Self-Assembled Quantum Dots", *Jap. J. Appl. Phys.* **40**, 1947 (2001); *Proc. Third Int. Symp on Formation, Physics and Device Application of Quantum Dot Structures* (Sapporo, 2000).
  36. K. Nishibayashi, T. Okuno, T. Mishina, S. Sugou, H.-W. Ren and Y. Masumoto: "Optical Study of Strain-Induced GaAs Quantum Dots", *Jap. J. Appl. Phys.* **40**, 2084 (2001); *Proc. Third Int. Symp on Formation, Physics and Device Application of Quantum Dot Structures* (Sapporo, 2000).
  37. I.Ya. Gerlovin, Yu.K. Dolgikh, S.A. Eliseev, V.V. Ovsyankin, Yu.P. Efimov, I.V. Ignatiev, I.E. Kozin, V.V. Petrov and Y. Masumoto: "Picosecond dynamics of polarized resonance photoluminescence in the GaAs/AlGaAs superlattices", *Proc. 25th Int. Conf. Physics of Semiconductors*, p.567 (Osaka, 2000).
  38. V.G. Davydov, Yu.K. Dolgikh, Yu.P. Efimov, S.A. Eliseev, A.V. Fedorov, I.Ya. Gerlovin, I.V. Ignatiev, I.E. Kozin, V.V. Petrov, V.V. Ovsyankin, I.A. Yugova, H.-W. Ren, S. Sugou and Y. Masumoto: "Modulation spectroscopy of critical points in excitonic energy structure of thick GaAs quantum wells", *Proc. 25th Int. Conf. Physics of Semiconductors*, p.547 (Osaka, 2000).
  39. T. Okuno, Y. Masumoto, Y. Sakuma, M. Ito and H. Okamoto: "Femtosecond response times of large optical nonlinearity in low-temperature grown GaAs/AlAs multiple quantum wells", *Proc. 25th Int. Conf. Physics of Semiconductors*, p.589 (Osaka, 2000).
  40. S.V. Nair and Y. Masumoto: "Stark effect of multi-exciton states in semiconductor quantum dots", Presented in 25th Int. Conf. Physics of Semiconductors (Osaka, 2000).
  41. E. Zhukov, Y. Masumoto, V. Dneprovskii, E. Muljarov, K. Chernoutsan and S. Romanov: "Excitons in InP quantum wires with dielectric barriers", *Proc. 25th Int. Conf. Physics of Semiconductors*, p.1275 (Osaka, 2000).
  42. H. Shim, H.-W. Ren, S.V. Nair, K. Nishi and Y. Masumoto: "Nonlinear luminescence measurement of InP self-assembled quantum dots", *Proc. 25th Int. Conf. Physics of Semiconductors*, p.1171 (Osaka, 2000).
  43. M. Sugisaki, H.-W. Ren, S.V. Nair, K. Nishi and Y. Masumoto: "Optical properties of InP single quantum dot in electric field", *Proc. 25th Int. Conf. Physics of Semiconductors*, p.1261 (Osaka, 2000).
  44. I.E. Kozin, V.G. Davydov, A.V. Fedorov, I.V. Ignatiev, H.-W. Ren, M. Sugisaki, S. Sugou and Y. Masumoto: "Electric field induced quantum beats in photoluminescence of self-assembled

- quantum dots", Proc. 25th Int. Conf. Physics of Semiconductors, p.1149 (Osaka, 2000).
45. I.V. Ignatiev, V.G. Davydov, I.E. Kozin, J.S. Lee, S.V. Nair, H.-W. Ren, S. Sugou and Y. Masumoto: "Phonon-assisted carrier relaxation in self-assembled quantum dots", Proc. 25th Int. Conf. Physics of Semiconductors, p.1127 (Osaka, 2000).
  46. T. Okuno, A.A. Lipovskii, M. Ikezawa, T. Ogawa and Y. Masumoto: "Strong size dependence of energy relaxation time in strongly confined PbSe quantum dots", Proc. 25th Int. Conf. Physics of Semiconductors, p. 1179 (Osaka, 2000).
  47. Y. Masumoto, M. Ikezawa, B.-R. Hyun, K. Takemoto and M. Furuya: "Optical homogeneous width of quantum dots at very low temperatures", Proc. 25th Int. Conf. Physics of Semiconductors, p.1271 (Osaka, 2000).
  48. T. Miyajima, T. Hino, S. Tomiya, A. Satake, E. Tokunaga, Y. Masumoto, T. Maruyama, M. Ikeya, S. Morishima, K. Akimoto, K. Yanashima, S. Hashimoto, T. Kobayashi and M. Ikeda: "Non-radiative Nature of Threading Dislocations in GaN Grown by Metal-organic Chemical Vapor Deposition", To be published in Jpn. J. Appl. Phys.: Presented in Int. Workshop on Nitride Semiconductors (Nagoya, 2000).
  49. M. Sugisaki, H.-W. Ren, K. Nishi and Y. Masumoto: "Fluorescence Intermittency in Self-Assembled InP Quantum Dots", Phys. Rev. Lett. **86**, 4883 (2001).
  50. J.-S. Lee, S. Sugou and Y. Masumoto: "In-situ observation of ellipsometry monolayer oscillations of metalorganic vapor-phase epitaxy-grown III-V compound materials", J. Cryst. Growth **209**, 614 (2000).
  51. J. Zhao, S.V. Nair and Y. Masumoto: "Exciton-phonon coupled states in CuCl quantum cubes", Phys. Rev. B **63**, 033307 (2000).
  52. I.V. Ignatiev, I.E. Kozin, V.G. Davydov, S.V. Nair, J.-S. Lee, H.-W. Ren, S. Sugou and Y. Masumoto: "Phonon resonances in photoluminescence spectra of self-assembled quantum dots in an electric field", Phys. Rev. B **63**, 075316 (2001).
  53. H.-W. Ren, S.V. Nair, J.-S. Lee, S. Sugou and Y. Masumoto: "Photoluminescence of strain induced coupled InGaAs/GaAs quantum dot-pairs", Submitted to J. electronic Materials.
  54. J. Qi, T. Matsumoto, M. Tanaka and Y. Masumoto: "Europium silicate thin films on Si substrates fabricated by radio frequency sputtering method", J. Phys. D: Appl. Phys. **33** 2074 (2000).
  55. M. Tanaka, J. Qi and Y. Masumoto: "Electronic level structure of Mn<sup>+2</sup> doped into CdS nanocrystals", Submitted to Phys. Rev. B.
  56. M. Tanaka, J. Qi and Y. Masumoto: "Luminescence properties and excitation mechanism of Mn<sup>+2</sup> doped into CdS nanocrystals", Submitted to Physica E.
  57. J. Qi, X. Guo, K. Sakurai, M. Tanaka and Y. Masumoto: "Local structures around Mn ions in ZnS:Mn nanocrystals", Submitted to J. Synchrotron Radiation ;The 11th Int. Conf. X-ray Absorption Fine Structure (Ako, 2000).
  58. J. Qi, X. Guo, K. Sakurai, M. Tanaka and Y. Masumoto: "Atomic structure around Mn ions in Zn<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>S nanocrystals prepared by colloidal chemistry procedure", Submitted to Scripta Materialia (Elsevier Science).
  59. M. Sugisaki, H.-W. Ren, K. Nishi and Y. Masumoto: "Photoluminescence and micro-imaging study of optically anisotropic InP self-assembled quantum dots", Solid State Commun. **117**, 679 (2001).
  60. M. Sugisaki, H.-W. Ren, S.V. Nair, K. Nishi and Y. Masumoto: "Many carrier effects in

- self-assembled InP quantum dots", *Solid State Commun.* **117**, 435 (2001).
61. J. Qi and Y. Masumoto: "Copper silicide nanocrystals in silicon nanowires", *Materials Research Bulletin* **36**, 1407 (2001).
  62. T. Matsumoto, J. Suzuki, M. Ohnuma, Y. Kanemitsu and Y. Masumoto: "Direct Evidence of Quantum Size Effect in Nanocrystalline Silicon by Optical Absorption", *Phys. Rev. B* **63**, 195322 (2001).
  63. J.-S. Lee and Y. Masumoto: "Real-time monitoring of ellipsometry monolayer oscillations during metalorganic vapor-phase epitaxy", *J. Crystal Growth* **221**, 111 (2000).
  64. E. Tskunaga, A.L. Ivanov, S.V. Nair and Y. Masumoto: "Hopfield coefficients measured by inverse polariton series", *Phys. Rev. B* **63**, 233203 (2001).
  65. 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", submitted to *Applied Physics Letters*.
  66. 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).
  67. S. Nomura, T. Sugano, and Y. Aoyagi, "Temperature dependence of photoluminescence spectra in n-type modulation doped quantum dot arrays", *Physica E* **7**, 466-469 (2000).
  68. T. Akane, K. Sugioka, S. Nomura, K. Hammura, N. Aoki, K. Toyoda, Y. Aoyagi and K. Midorikawa, "F2 laser etching of GaN", *Appl. Surf. Sci.* **168** (1-4) 335-339 (2000).
  69. Y. Kurokawa, S. Nomura, Y. Takemori, Y. Aoyagi, "Large scale calculation of optical dielectric functions of diamond nanocrystallites", *Phys. Rev. B* **61** 12616 (2000).
  70. Y. Kurokawa, S. Nomura, Y. Takemori, Y. Aoyagi, "Fast algorithm for Calculating Two-Photon Absorption Spectra by Real-Time Real-Space Higher-Order Finite-Difference Method", *Progr. Theor. Phys. Supplement No.138*, 145-146, (2000).
  71. Y. Kurokawa, S. Nomura, Y. Takemori, Y. Aoyagi, "Electronic properties of polysilane calculated with the real-time real-space higher-order finite-difference method", *Prog. Theor. Phys. Supplement No. 138*, 147-148, (2000).
  72. 野村晋太郎、半村清隆、青柳克信、「横方向量子ドットナノ構造の発光分光」電子情報通信学会技術研究報告 Vol. 100 No. 642, 83 - 87.

<著書>

舛本泰章：ナノ結晶のレーザー分光（「レーザー測定」丸善実験物理学講座9巻、櫛田孝司編、丸善、2000）

<国際会議>

1. A.I. Belogorokhov, L.I. Belogorokhova, Y. Masumoto, T. Matsumoto and E.A. Zhukov: "The effect of deuterium on the optical properties of free standing porous silicon layers", *Proc. Ioffe Institute 8th Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology"*, p.460 (St. Petersburg, 2000).
2. V. Davydov, I.V. Ignatiev, I.E. Kozin, S.V. Nair, J.-S. Lee, H.-W. Ren, S. Sugou and Y. Masumoto: "Carrier relaxation dynamics in self-assembled quantum dots", *Proc. Ioffe Institute 8th Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology"*, p.379 (St. Petersburg, 2000).
3. A.V. Baranov, V. Davydov, A. Fedorov, H.-W. Ren, S. Sugou and Y. Masumoto: "Two-pulse coherent population of quantum states in inhomogeneous ensemble detected by the



- phonon-assisted resonant luminescence", Proc. Ioffe Institute 8th Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology", p.367 (St. Petersburg, 2000).
4. Davydov, A.V. Fedorov, I.V. Ignatiev, S.V. Nair, H.-W. Ren, M. Sugisaki, S. Sugou and Y. Masumoto: "Observation of quantum beats in photoluminescence of self-assembled quantum dots", Proc. Ioffe Institute 8th Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology", p.395 (St. Petersburg, 2000).
  5. I.A. Yugova, V.G. Davydov, Yu.K. Dolgikh, Yu.P. Efimov, S.A. Eliseev, A.V. Fedorov, I.Ya. Gerlovin, I.V. Ignatiev, I.E. Kozin, V.V. Petrov, V.V. Ovsyankin, K. Nishi, H.-W. Ren, S. Sugou and Y. Masumoto: "Spectroscopy of the high energy quantum confined excitonic states in the thick GaAs quantum wells", Proc. Ioffe Institute 8th Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology", p.276 (St. Petersburg, 2000).
  6. E. Tokunaga, A.L. Ivanov, S.V. Nair and Y. Masumoto: "Biexciton Wavefunction in Bulk CuCl Probed by Inverse Polariton Series", *physica status solidi (b)* 221, 359 (2000); Nonlinear optics and excitation kinetics in semiconductors (NOEKS) (Marburg, 2000).
  7. J.S. Lee and Y. Masumoto: "In situ observation of ellipsometry monolayer vapor-phase epitaxy", To be published in *J. Electrochem. Soc.: The SOTAPOCS Symposium of the 197th Meeting of the Electrochemical Society* (Toronto, 2000).
  8. H.-W. Ren and Y. Masumoto: "Electron coupling in InGaAs/GaAs quantum dot-pairs fabricated with InP island stressors", Twelfth Int. Conf. Indium Phosphide and Related Materials (Williamsburg, 2000).
  9. T. Okuno, Y. Masumoto, Y. Sakuma, M. Ito and H. Okamoto: "Ultrafast Optical Response Time of Low-Temperature MBE-Grown  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{AlAs}$  MQW", Abstracts of 7th Int. Workshop on Femtosecond Technology, p.199 (Tsukuba, 2000).
  10. Y. Masumoto, M. Ikezawa, B.-R. Hyun, K. Takemoto and M. Furuya: "Homogeneous Width of Confined Excitons in Quantum Dots at Very Low Temperatures", *physica status solidi (b)* 224, 613 (2001); Int. Conf. Semiconductor Quantum Dots (Munich, 2000). //INVITED PAPER//
  11. S.V. Nair and Y. Masumoto: "Multi-Exciton States and Many-Body Correlations in Quantum Dots", *physica status solidi (b)* 224, 739 (2001); Int. Conf. Semiconductor Quantum Dots (Munich, 2000).
  12. M. Sugisaki, H.-W. Ren, I.S. Osadko, K. Nishi and Y. Masumoto: "Fluorescence Intermittency in InP Self-Assembled Quantum Dots", *physica status solidi (b)* 224, 67 (2001); Int. Conf. Semiconductor Quantum Dots (Munich, 2000).
  13. A.V. Baranov, V. Davydov, A.V. Fedorov, H.-W. Ren, S. Sugou and Y. Masumoto: "Coherent Control of Stress-Induced InGaAs Quantum Dots by Means of Phonon-Assisted Resonant Photoluminescence", *physica status solidi (b)* 224, 461 (2001); Int. Conf. Semiconductor Quantum Dots (Munich, 2000).
  14. V.G. Davydov, A.V. Fedorov, I.V. Ignatiev, I.E. Kozin, H.-W. Ren, M. Sugisaki, S. Sugou and Y. Masumoto: "Quantum Beats in Photoluminescence of InP Quantum Dots in Electric Field", *physica status solidi (b)* 224, 425 (2001); Int. Conf. Semiconductor Quantum Dots (Munich, 2000).
  15. V. Davydov, I.V. Ignatiev, I.E. Kozin, S.V. Nair, J.-S. Lee, H.-W. Ren, S. Sugou and Y. Masumoto: "Carrier Relaxation Dynamics in Self-Assembled Quantum Dots Studied by Artificial Control of Nonradiative Losses", *physica status solidi (b)* 224, 493 (2001); Int. Conf. Semiconductor Quantum Dots (Munich, 2000).

16. I.E. Kozin, V. Davydov, Yu. Dolgikh, Yu. Efimov, S. Eliseev, A. Fedorov, I. Gerlovin, I. Ignatiev, V. Petrov, V. Ovsyankin, I. Yugova, H.-W. Ren and Y. Masumoto: "Evidence of the high energy excitonic states in the spectra of thick GaAs quantum wells", 2000 Int. Conf. Excitonic Processes in Condensed Matter (Osaka, 2000).
17. Yu. Dolgikh, S. Eliseev, I. Gerlovin, V. Ovsyankin, Yu. Efimov, I. Ignatiev, I. Kozin, V. Petrov, V. Pantukhin and Y. Masumoto: "Polarization dynamics of HH-exciton resonance photoluminescence in the GaAs/AlGaAs superlattices", 2000 Int. Conf. Excitonic Processes in Condensed Matter (Osaka, 2000).
18. J. Qi, T. Matsumoto and Y. Masumoto: "Characterization of Simultaneously Fabricated Silicon and Silicon Monoxide Nanowires", *Jpn. J. Appl. Phys.* **40**, L134 (2001).
19. Y. Masumoto, I.V. Ignatiev, I.E. Kozin, V.G. Davydov, S.V. Nair, H.-W. Ren, J.-S. Lee and S. Sugou: "Breakdown of the Phonon Bottleneck Effect in Self-Assembled Quantum Dots", *Jap. J. Appl. Phys.* **40**, 1947 (2001); *Proc. Third Int. Symp on Formation, Physics and Device Application of Quantum Dot Structures* (Sapporo, 2000).
20. K. Nishibayashi, T. Okuno, T. Mishina, S. Sugou, H.-W. Ren and Y. Masumoto: "Optical Study of Strain-Induced GaAs Quantum Dots", *Jap. J. Appl. Phys.* **40**, 2084 (2001); *Proc. Third Int. Symp on Formation, Physics and Device Application of Quantum Dot Structures* (Sapporo, 2000).
21. Ya. Gerlovin, Yu.K. Dolgikh, S.A. Eliseev, V.V. Ovsyankin, Yu.P. Efimov, I.V. Ignatiev, I.E. Kozin, V.V. Petrov and Y. Masumoto: "Picosecond dynamics of polarized resonance photoluminescence in the GaAs/AlGaAs-superlattices", *Proc. 25th Int. Conf. Physics of Semiconductors*, p.567 (Osaka, 2000).
22. V.G. Davydov, Yu.K. Dolgikh, Yu.P. Efimov, S.A. Eliseev, A.V. Fedorov, I.Ya. Gerlovin, I.V. Ignatiev, I.E. Kozin, V.V. Petrov, V.V. Ovsyankin, I.A. Yugova, H.-W. Ren, S. Sugou and Y. Masumoto: "Modulation spectroscopy of critical points in excitonic energy structure of thick GaAs quantum wells", *Proc. 25th Int. Conf. Physics of Semiconductors*, p.547 (Osaka, 2000).
23. T. Okuno, Y. Masumoto, Y. Sakuma, M. Ito and H. Okamoto: "Femtosecond response times of large optical nonlinearity in low-temperature grown GaAs/AlAs multiple quantum wells", *Proc. 25th Int. Conf. Physics of Semiconductors*, p.589 (Osaka, 2000).
24. S.V. Nair and Y. Masumoto: "Stark effect of multi-exciton states in semiconductor quantum dots", Presented in 25th Int. Conf. Physics of Semiconductors (Osaka, 2000).
25. E. Zhukov, Y. Masumoto, V. Dneprovskii, E. Muljarov, K. Chernoutsan and S. Romanov: "Excitons in InP quantum wires with dielectric barriers", *Proc. 25th Int. Conf. Physics of Semiconductors*, p.1275 (Osaka, 2000).
26. H. Shim, H.-W. Ren, S.V. Nair, K. Nishi and Y. Masumoto: "Nonlinear luminescence measurement of InP self-assembled quantum dots", *Proc. 25th Int. Conf. Physics of Semiconductors*, p.1171 (Osaka, 2000).
27. M. Sugisaki, H.-W. Ren, S.V. Nair, K. Nishi and Y. Masumoto: "Optical properties of InP single quantum dot in electric field", *Proc. 25th Int. Conf. Physics of Semiconductors*, p.1261 (Osaka, 2000).
28. I.E. Kozin, V.G. Davydov, A.V. Fedorov, I.V. Ignatiev, H.-W. Ren, M. Sugisaki, S. Sugou and Y. Masumoto: "Electric field induced quantum beats in photoluminescence of self-assembled quantum dots", *Proc. 25th Int. Conf. Physics of Semiconductors*, p.1149 (Osaka, 2000).
29. I.V. Ignatiev, V.G. Davydov, I.E. Kozin, J.S. Lee, S.V. Nair, H.-W. Ren, S. Sugou and Y.

- Masumoto: "Phonon-assisted carrier relaxation in self-assembled quantum dots", Proc. 25th Int. Conf. Physics of Semiconductors, p.1127 (Osaka, 2000).
30. T. Okuno, A.A. Lipovskii, M. Ikezawa, T. Ogawa and Y. Masumoto: "Strong size dependence of energy relaxation time in strongly confined PbSe quantum dots", Proc. 25th Int. Conf. Physics of Semiconductors, p. 1179 (Osaka, 2000).
  31. Y. Masumoto, M. Ikezawa, B.-R. Hyun, K. Takemoto and M. Furuya: "Optical homogeneous width of quantum dots at very low temperatures", Proc. 25th Int. Conf. Physics of Semiconductors, p.1271 (Osaka, 2000).
  32. T. Miyajima, T. Hino, S. Tomiya, A. Satake, E. Tokunaga, Y. Masumoto, T. Maruyama, M. Ikeya, S. Morishima, K. Akimoto, K. Yanashima, S. Hashimoto, T. Kobayashi and M. Ikeda: "Non-radiative Nature of Threading Dislocations in GaN Grown by Metal-organic Chemical Vapor Deposition", To be published in Jpn. J. Appl. Phys.; Presented in Int. Workshop on Nitride Semiconductors (Nagoya, 2000).
  33. J. Zhao, S.V. Nair and Y. Masumoto: "Exciton-phonon coupled states in CuCl quantum cubes", Phys. Rev. B **63**, 033307 (2000).
  34. M. Tanaka, J. Qi and Y. Masumoto: "Luminescence properties and excitation mechanism of Mn<sup>2+</sup> doped into CdS nanocrystals", Submitted to Physica E.
  35. J. Qi, X. Guo, K. Sakurai, M. Tanaka and Y. Masumoto: "Local structures around Mn ions in ZnS:Mn nanocrystals", Submitted to J. Synchrotron Radiation ;The 11th Int. Conf. X-ray Absorption Fine Structure (Ako, 2000).
  36. S. Nomura, T. Nakanishi, and Y. Aoyagi, "Controlling Fermi-edge singularities by a periodic external potential", the 25 th International Conference on Physics of Semiconductors (ICPS25), (17-22 Sept. 2000, Osaka).
  37. T. Okuno, Y. Masumoto, Y. Sakuma, M. Ito, and H. Okamoto: "Ultrafast optical response time of low-temperature MBE-grown Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As-AlAs MQW", The 7th International Workshop on Femtosecond Technology (FST2000), Abstracts p.199 (Tsukuba, 2000).

<学位論文>

物理学研究科博士論文

1. 趙家龍: Confined Exciton States and Phonon Modes in Cuprous Halides Quantum Dots

物理学研究科修士論文

1. 菅野敦史 紫外光照射による CuCl 量子点の光スペクトルの異常

理工学研究科修士論文

1. 成瀬文隆 NaCl 中の CuCl 量子ドットにおける電場変調光スペクトル
2. 中山貴司 GaAs/AlGaAs 2次元電子系における磁気閉じ込め
3. 野村光宏 CdTe 自己形成量子ドットにおけるサイト選択分光

<講演>

1. 威継発, 舛本泰章: "シリコン系ナノワイヤーの作製と観察" つくば地区合同フォーラム (クラ

- スター・超微粒子・ナノ構造)、つくば市 (2000年6月)
2. 野村晋太郎 半導体ナノ構造におけるフェルミ端異常、つくば地区合同フォーラム (クラスター・超微粒子・ナノ構造)、つくば市 (2000年6月)
  3. 三品具文、高良龍史、舛本泰章: “グラファイトにおけるコヒーレントフォノンの研究II” 日本物理学会 (2000年9月)
  4. 趙家龍、池沢道男、舛本泰章: “CuBrとCuI量子点におけるフォノン-永続的ホールバーニング分光” 日本物理学会 (2000年9月)
  5. 西林一彦、舛本泰章、三品具文、奥野剛史、任紅文、菅生繁男: “歪み誘起 GaAs 量子点の非線形発光” 日本物理学会 (2000年9月)
  6. 池沢道男、三品具文、舛本泰章、A.A. Lipovskii: “PbSe 量子点における格子振動ダイナミクス” 日本物理学会 (2000年9月)
  7. 竹本一矢、舛本泰章: “極低温における CdSe 量子点の蓄積フォトンエコー” 日本物理学会 (2000年9月)
  8. 野村光宏、奥野剛史、舛本泰章、寺井慶和、黒田眞司、滝田宏樹: “CdTe 自己形成量子ドットのサイト選択分光” 日本物理学会 (2000年9月)
  9. A.V. Baranov, V. Davidov, A.V. Fedorov, H.-W. Ren, 菅生繁雄、舛本泰章: “共鳴二次発光を用いた歪誘起 InGaAs/GaAs 量子点の位相緩和測定” 日本物理学会 (2000年9月)
  10. 野村晋太郎、青柳克信: “量子ドット正方格子の最低励起状態近傍発光スペクトル II” 日本物理学会年会、新潟市 (2000年9月)
  11. 半村清隆、野村晋太郎、青柳克信: “量子ドット正方格子のフェルミ面近傍時間分解発光スペクトル” 日本物理学会年会、新潟市 (2000年9月)
  12. 早崎裕一、岡本紘、奥野剛史、舛本泰章: “低温 MBE 成長 GaAs/AlAs MQW の励起子吸収緩和の過渡特性に及ぼすアニールの効果” 応用物理学会 (2000年9月)
  13. 佐久間康、岡本紘、奥野剛史、舛本泰章: “Beをドーブした低温 MBE 成長 GaAs 膜および GaAs/AlAs MQW における吸収飽和の過渡特性(2)” 応用物理学会 (2000年9月)
  14. 門野真二郎、岡本紘、奥野剛史、舛本泰章: “低温 MBE 成長 GaAs/AlAs MQW のキャリア寿命に及ぼす As 圧の効果” 応用物理学会 (2000年9月)
  15. 菅野敦史、舛本泰章: “紫外光照射による CuCl 量子点の光スペクトル異常” 日本物理学会 (2001年3月)
  16. 徳永英司、李定植、西研一、舛本泰章: “マルチチャンネルダブルロックインによる単一粒子・2次元分光IV” 日本物理学会 (2001年3月)
  17. 佐久間康、榎野英治、岡本紘、奥野剛史、舛本泰章: “Be をドーブした低温 MBE 成長 GaAs 膜及び GaAs/AlAs MQW におけるキャリア密度の p/n 反転現象” 応用物理学会 (2001年3月)
  18. 守山佳、桜井あやの、岡本紘、奥野剛史、舛本泰章: “GaAs-AlAs 量子井戸構造の光非線形性の量子井戸層の厚さ依存性” 応用物理学会 (2001年3月)
  19. 早崎裕一、北出晋介、岡本紘、奥野剛史、舛本泰章: “Be をドーブした MBE 成長 GaAs/AlAs MQW における吸収飽和過渡特性の Be 濃度依存性” 応用物理学会 (2001年3月)
  20. 戚継発、舛本泰章: “シリコンナノワイヤの作製と光物性” (2001年3月)
  21. 田中正規、舛本泰章: “CdS:Mn<sup>2+</sup>ナノ結晶におけるエネルギー伝達機構” (2001年3月)
  22. 松田一成、斎木敏治、野村晋太郎、青柳克信: “低温近接場光学顕微鏡を用いた量子ドット正方格子の発光イメージング” 第48回応用物理学関係連合講演会、東京都千代田区 (2001年3月)
  23. 野村晋太郎、松田一成、斎木敏治、青柳克信: “量子ドット正方格子の空間分解発光スペクトル” 日本物理学会年会、八王子市 (2001年3月)
  24. 半村清隆、野村晋太郎、青柳克信: “量子ドット正方格子のフェルミ面近傍時間分解発光スペクトル

- II” 日本物理学会年会、八王子市 (2001 年 3 月)
25. 野村晋太郎: “新奇なナノ構造デバイスと近接場分光” KAST 終了プロジェクト報告会、川崎市 (2001 年 3 月)
  26. 野村晋太郎、半村清隆、青柳克信: “横方向量子ドットナノ構造の発光分光” 電子情報通信学会電子デバイス研究会、札幌市 (2001 年 3 月)
  27. 鈴木 隆司: “ $\text{Fe}_{1+x}\text{Nb}_{3-x}\text{Se}_{10}$  の四極子分裂の温度変化” 日本物理学会 (2001 年 3 月)