

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 奥野 剛史  
 助手 鈴木 隆司  
 助手 池沢 道男  
 助手 阪東 一毅  
 助手 安坂 幸師

外国人研究員 (ナノサイエンス特別プロジェクト) Vladimir K. Kalevich  
 ベンチャービジネスラボラトリー研究員 陳 曄 (Ye Chen)  
 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 (奥野剛史、池沢道男、舩本泰章)

<光ヘテロダイン検出を利用した半導体量子構造からの高感度 FWM 信号検出> (池沢道男、菅野敦史、舩本泰章)

量子情報処理を実現するための一つの候補として、半導体量子点に閉じ込められた励起子が提案されていることもあって、半導体量子点における励起子コヒーレンスに興味を持たれ現在広く研究されている。デバイスとしての有用性を考えると、他の方法で作られた量子点よりも、半導体基板上に自己形成的に成長する各種の量子点が制御性や質の点で有利であると考えられが、このような試料についてはこれまでのところ四光波混合(Four-wave mixing, FWM)のような時間領域での励起子コヒーレンスの研究はあまり行われていない。その理由としては、一般にこの種の試料では量子点の密度が高くないために FWM 信号が弱いことがあげられる。この弱点を克服するため、自己形成量子点試料について反射配置での測定が可能な高感度ヘテロダイン検出システムを構築し、量子点での微弱 FWM 信号検出を目指して実験を行った。

用いた光学配置は図のとおりである。レーザー光源はフェムト秒モード同期チタンサファイアレーザーを用い、それを pump、probe、reference の3つのビームに分け

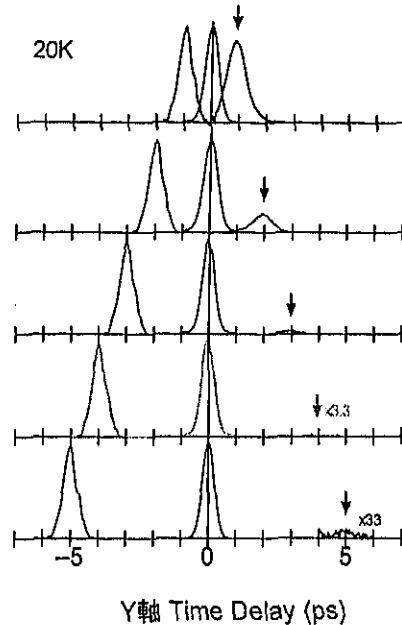
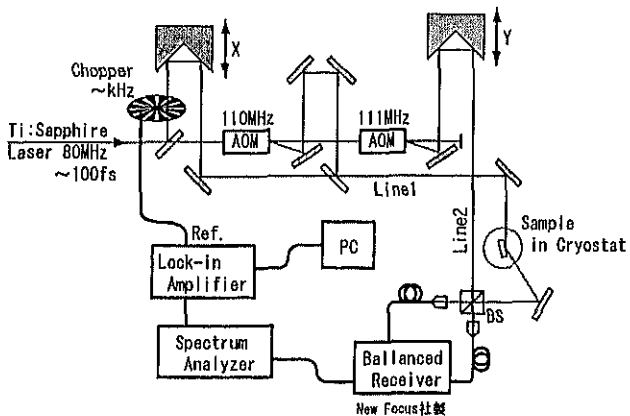


図1 光ヘテロダイン検出を利用した半導体量子構造からの高感度 FWM 信号検出

る。そのうち probe 光と reference 光には音響光学素子(AOM)を用いてそれぞれ+110MHz と+111MHz だけ周波数シフトさせておく。プリュースター角で配置されたサンプルには pump 光と probe 光が適当な時間遅延を伴って同軸で入射し、サンプルからはその遅延時間に応じた FWM 信号が反射方向に放射される。微弱な FWM 光はビームスプリッターを用いて強い reference 光と重ね合わせられ、バランス検出器にファイバーを介して入射し、ヘテロダイン検出される。ここで用いている AOM 周波数の組み合わせの場合には、通常の非同軸の FWM 実験で見られる(2k<sub>z</sub>-k<sub>z</sub>)方向に対応する FWM 光の周波数は、reference 光と比べて 109MHz だけ高いので、2つの光を重ね合わせた結果その周波数のビートが発生する。この周波数成分をスペクトルアナライザーで選び出して、その振幅を遅延時間に対して測定すればよい。この手法は高感度であるということ以外にも、reference 光を時間遅延させることによって FWM 光を時間分解できるという利点がある。

システムを評価するために、例として通常の方法では信号が得にくいと思われる GaAs/AlGaAs 単一量子井戸と 15 層の積層量子点にこの手法を適用し、比較的容易に四光波混合信号を得ることができた。図に単一量子井戸からの信号を示した。横軸はreference 光の時間遅延である。左に見えるパルスが pump 光の入射タイミングに対応し、時刻ゼロに固定してある probe 光パルスその後、矢印で示したように時間遅れのある FWM 信号が観測されているので、フォトンエコー的振る舞いであることがはっきり分かる。今後、検出システムをさらに改良するとともに、適応できる波長範囲を広げて様々な量子点試料についての本格的な測定を行っていく予定である。

<低温成長 Be ドープ GaAs における高速かつ広帯域の光非線形応答> (奥野剛史、舩本泰章、門野真二郎<sup>A</sup>、北出晋介<sup>A</sup>、坂東弘之<sup>A</sup>、岡本紘<sup>A</sup> <sup>A</sup>千葉大学工学部) [6,31]

GaAs 等の半導体をレーザー光で励起した際には、光吸収スペクトルがレーザー波長において飽和する現象が知られている。光励起された非平衡キャリアに起因するこの光非線形現象は、大部分が 200fs 程度という高速で緩和する。しかし、通常はバンド充填効果など 1ns 程度の低速緩和成分も伴っており、高速緩和を応用しての高繰り返しスイッチ動作を実現する際の妨げになっている。今回、GaAs 膜の成長温度やドーピングを制御し、吸収飽和強度や非線形緩和時間の波長依存を調べることにより、高繰り返しかつ広帯域の高速緩和を得ることができた。

分子線エピタキシー法により成長した 700nm 厚の GaAs を用いた。良好な振る舞いを示した試料は、成長温度が 250°C、ドーピングした Be 濃度は  $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  である。100fs のレーザーパルスで吸収飽和強度を測定すると、バンド端の 865nm から高エネルギー側 180meV の領域にて  $100 \mu\text{J}/\text{cm}^2$  と一定であった。また、ポンププローブ法により緩和時間を測定すると、865nm から 230meV の領域にて、緩和時間 1ps

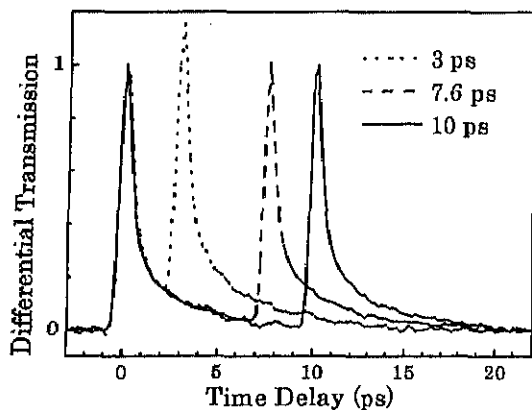


図2 低温成長 Be ドープ GaAs において 2 個のポンプパルスを用いた光非線形信号の時間変化。

以下かつ低速緩和成分 7% 以下という結果が得られた。アンチサイト As イオン (As<sub>Ga</sub><sup>+</sup> ドナー) にトラップされた電子と Be アクセプターにトラップされた正孔との再結合時間が短くなるからであると考えられる。図2は、ポンプパルスを2個にして高繰り返し動作の可能性を示したものである。励起波長は 780nm、各ポンプ光強度は  $3 \mu\text{J}/\text{cm}^2$  である。ポンプパルス間隔が 3ps と小さい時には、2 個目のピークは 1 個目のすそに影響されて持ち上がっている。しかしパルス間隔が 7.6ps や 10ps と大きい時には、同じ 2 個のパルス

波形が繰り返されている。これは、低速緩和成分を抑えることにより 100GHz 以上の高繰り返し返

し動作が可能であることを示すものである。これらのことを  $1.5\mu\text{m}$  帯で実現するために、InGaAs 系での研究を現在すすめている。

【2】量子ドットの光物性 (舛本泰章、奥野剛史)

<CuBr 量子点における LO フォノンのソフトニング> (菅野敦史、舛本泰章) [12]

量子点中に閉じ込められた LO フォノンはフレリッヒ相互作用により励起子の強い影響を受ける。そのため量子点中に励起子が存在する“励起状態”の量子点では、“基底状態”とは違った格子振動が観測される。光励起によって励起子を生成した量子点で LO フォノンのエネルギーが減少することが CuCl 量子点などで報告されている。

ガラス中および NaBr 結晶中に分散させた CuBr 量子点について一光子励起共鳴発光および二光子励起発光測定を行ったところ、発光スペクトルに入射レーザーの線幅と同等な鋭いピークが観測された。このピークの発光寿命測定を行ったところ、非常に速い減衰を示し CuBr の LO フォノンが関与した発光ピークであることがわかった。この LO フォノン起源の発光エネルギーはバルクより  $1\sim 2\text{meV}$  程度減少しており、これは量子点の励起状態の LO フォノンであると考えられる。このことはホールバーニング分光で観測された実験結果とも一致する。この励起状態のソフトニングは、量子点中の励起子がフレリッヒ相互作用の二次摂動を通してフォノンのエネルギーを変化させて観測されたものだと考えられる。

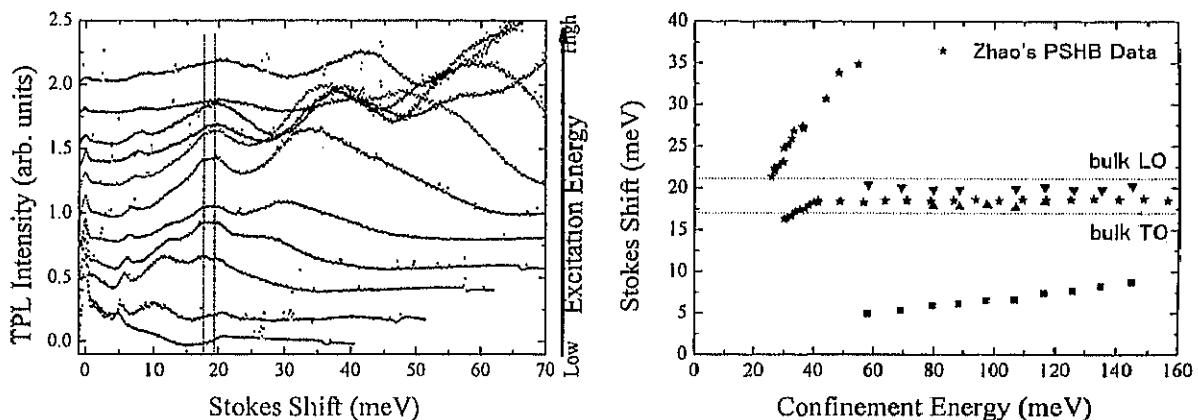


図3 ガラス中の CuBr 量子点の二光子励起発光スペクトルの励起エネルギー依存性。発光スペクトル中に明確なピーク構造が見られ、バルクのフォノンよりもエネルギーが減少していることがわかる

<量子ドットの発光の示す4種類の量子ビート> (舛本泰章、I. Ignatiev、S. Verbin、西林一彦、奥野剛史) [3,4,5,10,11,15,16,18,27,29]

基底状態を共有するエネルギーの近い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。量子ドットでは、不均一広がりて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  $h/T$  がわかる。量子ドットでは、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り、表1に分類する。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、ファラデー配置で励起と観測に同じ円偏光、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。自己形成 InP 量子ドットや歪誘起 GaAs 量子ドットを対象として実験（磁場下または無磁場下でピコ秒共鳴励起で観測される発光の時間分解）で4種類の量子ビートを見出しこれらの特徴についてまとめた。

表1 量子ドットの4種類の量子ビート

Quantum Beats (QB)	Magnetic field	Configuration	Polarization
Excitonic QB Exciton Zeeman split	$B \neq 0$	Faraday $\theta = 0^\circ$	Linear Polarization
Excitonic QB Bright-dark exciton split	$B \neq 0$	Faraday $0^\circ < \theta \leq 90^\circ$	Co-Linear and Co-Circular Polarization
Trionic QB Trionic split	$B = 0$	$\theta = 0^\circ$	Linear Polarization
Electron Spin QB Electron Zeeman split	$B \neq 0$	Voigt $\theta = 0^\circ$	Circular Polarization

<GaAs 量子点の量子ビート> (西林一彦、奥野剛史、舛本泰章、任紅文) [11]

直線偏光を用いて磁場中（ファラデー配置）における歪誘起 GaAs 量子点の時間分解分光の測定を行った結果、量子点に閉じ込められた励起子のエネルギー準位がゼーマン分裂することに起因する量子ビートを観測した。また、ファラデー配置においてゼーマン分裂の大きさの角度依存性を調べた。さらに、

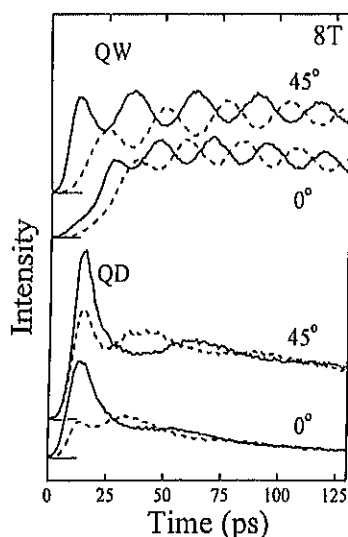


図4 自由電子のラーマの歳差運動による GaAs 量子点と量子井戸の量子ビート

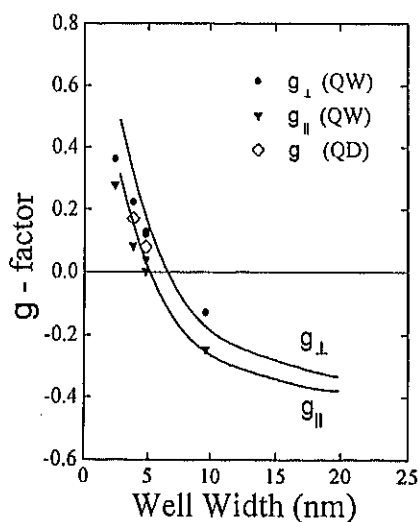


図5 g 因子の量子井戸厚依存性

フォークト配置の光学系で円偏光を用いることで試料のスピン状態を選択的に光励起する測定を行った。その結果、量子点内に閉じ込められた電子がラーマーの歳差運動をすることに起因する量子ビートを観測した。また実験結果の解析によって、GaAs 量子点の励起子、電子および正孔の g 因子の値を特定した。さらに歪誘起量子点の電子の g 因子は印加した磁場の方向に依存せず、等方的であるという事を明らかにした。これは歪が GaAs 量子点を形成する過程で、GaAs 量子井戸の重い正孔と軽い正孔のエネルギーバンドが互いに近づく方向に変調を受ける結果、互いのバンドが重なりあう為に異方性が打ち消されるためと考えられる。

<Spin optical polarization in negatively-charged InAs/GaAs quantum dots > (V. Kalevich, 池沢道男、奥野剛史、舛本泰章) [22]

The goal of the research was an experimental investigation of spin optical polarization in negatively-charged InAs/GaAs quantum dots (QDs) and its dependence on the external electric field.

1. The photoluminescence (PL) spectra in the InAs/GaAs QDs and the GaAs barrier excited both above and under barrier have been measured at 77K and 2K.
2. The high-sensitive polarization analyzer with an InGaAsP photomultiplier, quartz polarization modulator and two-channel photon counter has been designed and fabricated to measure the PL circular polarization up to 1.4  $\mu\text{m}$  wavelength with the accuracy better than 0.1% in CW-measurements.
3. Circular polarization of low-temperature luminescence in negatively-charged InAs QDs embedded into an n-i-n structure was measured under CW pumping both above and below the barrier. The luminescence polarization was found to show the sign inversion when the excitation energy changes from the above- to under-barrier value. Both positive and negative luminescence polarization decreases sharply at the electric bias.
4. The negative luminescence polarization was found to be practically decayed by a weak transverse magnetic field ( $\sim 100$  Oe), indicating the long-lived spin memory in QDs.
5. Kinetics of the circular luminescence polarization excited by circular polarized picosecond pulses of light was measured with the picosecond time resolution. The negative luminescence polarization in the QDs with two intrinsic electrons was found to be stable during carrier lifetime ( $\sim 2\text{ns}$ ), which is a direct evidence for a long-lived spin memory in the InAs/GaAs QDs under study.

<Optical Studies of Self-Assembled CdTe Quantum Dots > (陳 曄、奥野剛史、舛本泰章) [13,28]

Quantum beats technique is known to be an efficient way for studying a fine energy structure and spin dynamics of carriers in 2D structures. However, the observations of quantum beats of the QDs are limited. The obstacle of observing the QB's is associated with a great spread of Zeeman splitting in the inhomogeneous ensemble of QD's and the presence of excess charges. We plan to study the spin quantum beats of CdTe quantum dots in magnetic field. In the first stage we initially measured the temperature dependence of photoluminescence and time-resolved photoluminescence spectra of CdTe QDs and 1ML QW. For QDs, the PL line shows a strange characteristic at the temperature range from 50K to 100K. The figure 6 represents the energy position of PL lines as a function of temperature for CdTe QDs and 1ML QW. We can see that the emission line of QW shows typical shrinking effect of band gap (We observed the emission of barrier in 1 ML QW sample), while the emission peak of QDs does not follow the shrinking effect of band gap of bulk CdTe. Detailed analysis shows that the energy position follows the shrinking effect well at temperature below 50K. However, it diverges at the temperatures from 50K to 100K. Further increasing the temperature, the

energy position of emission seems to follow the shrinking effect of band gap with an up shift about 12meV again. It seems to indicate an activated process occurs at this temperature range. The

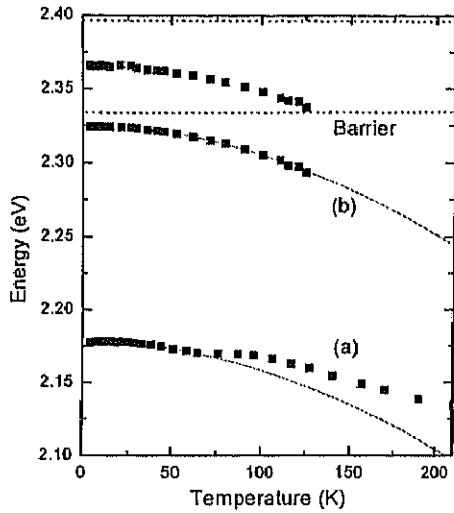


Fig.6 The temperature dependence of the energy position of emission lines for CdTe QDs (a) and QW (b).

FWHM of emission line of QDs keeps unchanged at low temperature, while increases drastically with increasing temperature above 50K. We also measured the time-resolved photoluminescence spectra as a function of temperature. Within the error range the decay time of emission line of QDs keep unchanged at low temperature below 50K, and decreases drastically at the temperatures from 50K to 100K. Further increasing temperature the decay time of emission line decreases slowly. We can't obtain good explanation for these observations yet. One possibility is that this excitation process is associated with the dissociation of exciton with increasing temperature. Another possibility is that it is related to the laser energy become above the barriers with increasing temperature to 125K. Further experiments are needed to understand this strange phenomenon.

【3】新しいナノ構造の探求 (阪東一毅、安坂幸師、舛本泰章)

<ZnO 単一ナノベルトの室温励起子レーザー発振> (阪東一毅、沢辺大樹、舛本泰章)

近年、ZnO を用いた一次元ナノ結晶の作成・評価が盛んに行われており、ロッド状ワイヤーの室温レーザー発振の成功にまで至っている。特に我々はベルト状の構造を有するナノベルトを取り上げ、その室温レーザー発振を期待して研究を行った。これまで、このナノベルトの基礎発光特性を調べ、バンド端における励起子発光を観測することができた。このため比較的結晶端面が良好なナノベルトを選び出し、ナノベルト自身が共振器構造となることを期待して単一ナノベルトからの室温レーザー発振観測を試みた。ZnO ナノベルトは Ar 雰囲気中で ZnO 粉末を高温加熱(1450°C)することによって作成された。このナノベルトを銅板上に分散させ、単一ナノベルトからの発光を長距離顕微鏡を用いて空間的に分解し測定した。励起光源は Nd:YAG レーザーの 4 倍波(266nm)であり、図はその発光スペクトルである。

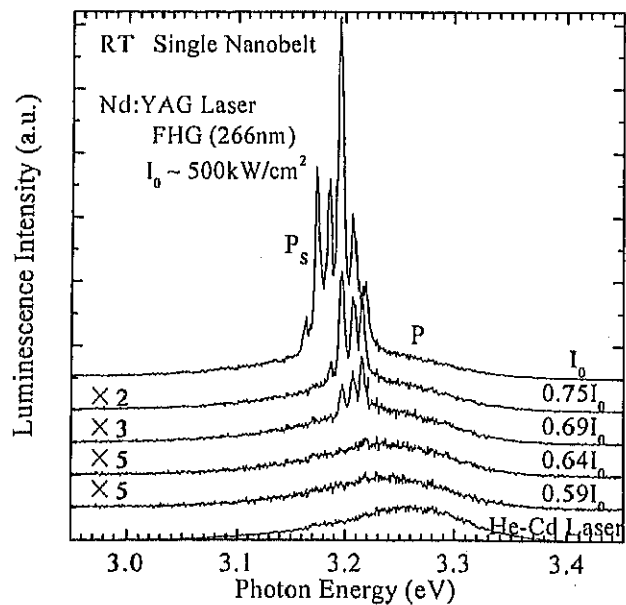


図7 ZnO 単一ナノベルトの発光スペクトルの励起強度依存性, (挿入図: SEM 像)

SEM 観察によって結晶端面の比較的良好的なナノベルトを選び出した。挿入図はそのナノベルトの SEM 像である。図のように Nd:YAG レーザー励起の最弱励起下(0.59I<sub>0</sub>)では励起子-励起子散乱過程によるブロードな自然放射光(P)が観測された。励起強度を上げていくと、この P 発光帯ピークのやや低エネルギー側において数本の鋭いピーク(P<sub>S</sub>)が現れた。より強い励起強度ではその P<sub>S</sub> 発光帯のピーク強度が P 発光帯に比べて劇的に強くなり、低エネルギー側でピークの本数も増加した。これらのピークはほぼ一定のエネルギー間隔(約 10meV)で現れていることから、ZnO ナノベルト自身が結晶端面を鏡とする共振器となり、レーザー発振が生じているものと考えることができる。

<200kV 高分解能透過電子顕微鏡(JEM-2010F)の立ち上げ状況> (安坂幸師、阪東一毅、舛本泰章)

高分解能透過電子顕微鏡法は物質の形態とその結晶構造を原子レベルで同時に測定できる唯一の手法である。最近、数理物質科学研究科で電界放出型高分解能透過電子顕微鏡(FE-HRTEM)が購入された。この装置にはエネルギー分散型 X 線分光装置と走査像観察装置が設置されているので、この FE-HRTEM は通常透過電顕像観察や結晶構造解析、原子レベルでの構造像観察に加え、ナノメートル領域での元素分析、元素マッピング、走査透過電子顕微鏡像観察等に利用できる。この装置の分解能は 0.19nm (粒子像)であり、最小プローブ径は 0.5nm である。図 8 に分解能調査の一例として、この FE-HRTEM で撮影した Au 結晶の高分解能透過電子顕微鏡像を示す。現在、装置は一部調整中であり本格的に稼働していないが、半導体物性グループでは ZnO ナノベルト等でデータが得られはじめています。今後この装置は本学で創製した先端材料について物性と構造との関係を研究する上で大きく貢献するものと思われる。

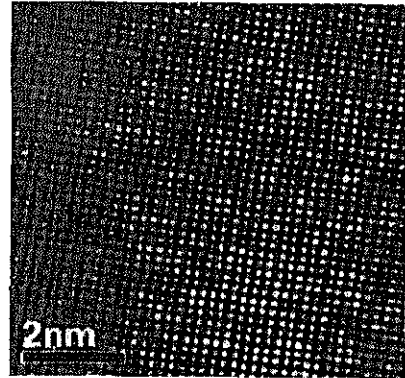


図 8 Au 結晶の高分解能電子顕微鏡像

【4】半導体ナノメートル構造の光物性 (野村晋太郎)

<量子ドットアレーにおける発光スペクトル> (野村晋太郎) [32,35]

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 ヘテロ構造に印加することにより、面内電子密度分布を 2 次元電子的状態から 0 次元的状态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。本年度は量子ドットアレー中電子系のスピン偏極度に注目し、ランダウ準位の占有数が 3 の強磁場下においてスピン偏極度の横方向ポテンシャルの強さに対する依存性を測定した。その結果、図 9 に見られるシャークアップ過程による低エネルギー側ピーク(SU0)は  $N=1$  のランダウ準位によるピーク(LL1)と同様のバイアス依存性を示すことから、Hawrylak 等の理論の正当

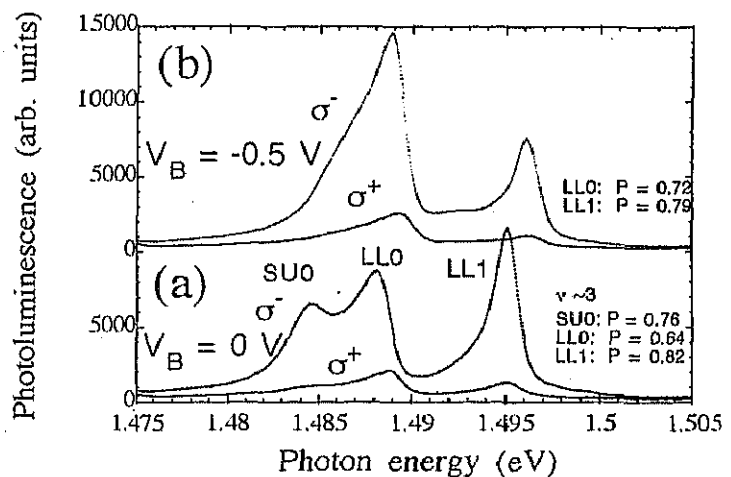


図 9 5 T における円偏光発光スペクトル。バイアス電圧 (a) 0 V, (b) -0.5 V。

性が示された。バイアス電圧に応じ高スピン状態が実現されていることを示した。次にスピン偏極度の磁場依存性を測定し、横方向ポテンシャルによってスカーミオン励起に特徴的とされるディップが消失することを示し、横方向ポテンシャルによってスカーミオン励起の安定性が失われる可能性を提案した。本研究は理化学研究所青柳主任研究員との共同研究である。

<単一量子井戸中の量子ドット状態の空間分解発光測定> (野村晋太郎) [33,34]

本研究では近接場光学顕微鏡を用いて量子ドットに局在した電子-正孔状態の空間分解測定を試みた。プローブ作製技術の進歩により、空間分解能 30 nm で量子ドット中の最低励起子状態、励起子分子状態、(図 10 を参照) 励起子の励起状態の発光強度の空間マッピングを行った。励起子の励起状態の発光スペクトルの分布は明確に p-like であることが明らかになった。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ことを初めて試みるものである。

本研究は神奈川科学技術アカデミー斎木敏治研究室長、松田一成研究員、理化学研究所青柳主任研究員との共同研究である。

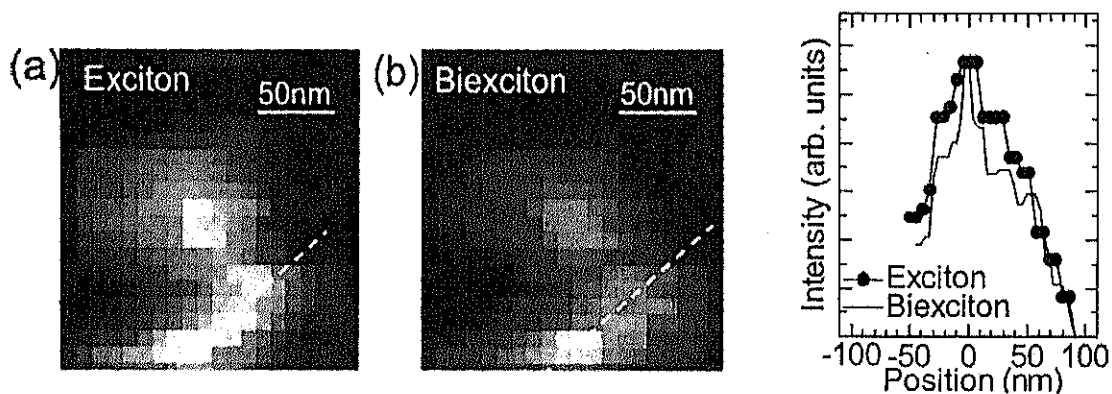


図 10 (左) 励起子(a)、励起子分子(b)発光の空間分布。(右) 発光空間プロファイル。

<自己組織化ナノポーラス構造を用いた量子ドットアレー形成> (今井剛、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 の量子ドット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。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例外的に規則性の高い三角格子をテンプレートとして単一ヘテロ接合基板に金電極を転写した。この電極にバイアス電圧を印加することにより面内ポテンシャルを変調した。電子状態の変化を発光分光により検出し、2次元電子系から結合量子ドット系への変化を発光スペクトルに観測することができた。

【5】Fe<sup>57</sup>及びEu<sup>151</sup>のメスバウアー効果 (鈴木 隆司)

<メスバウアー効果による低次元化合物 Fe<sub>1.33</sub>Nb<sub>2.67</sub>Se<sub>10</sub>の研究> (鈴木 隆司) [36]

Fe<sub>1.33</sub>Nb<sub>2.67</sub>Se<sub>10</sub> は1次元伝導性を示しCDW (charge density wave)相転移を起こすことで興味をもたれている。この物質のメスバウアー効果の実験結果を解析して報告した。

実験で観測されたスペクトルは4本のピークをもち、2対(A, B)の電場勾配qによる分裂とみなせる。以前指摘した様に、実験結果(図 11~13)を説明するには幾つかの可能性がある。高温(T>200K)で連続的構造相転移が起こっている場合、又はFe原子の電子状態(原子価)が変化している場合などである。



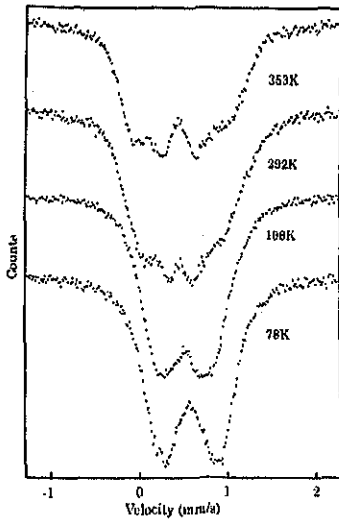


図 11

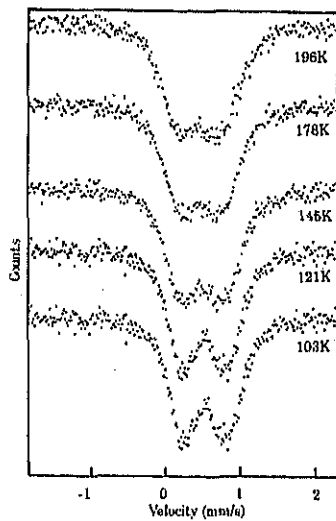


図 12

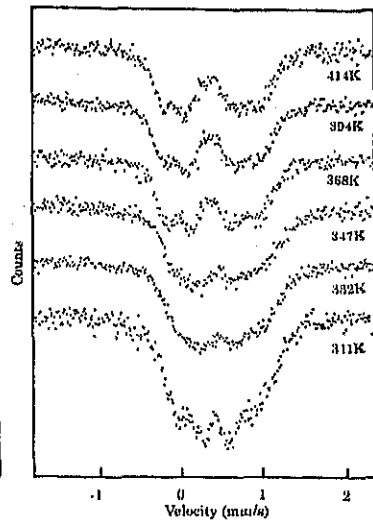


図 13

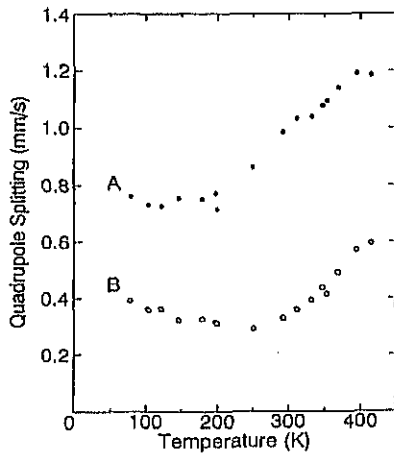


図 14

温度(K)	$\sigma$ (mm/s)	
	A	B
78	0.59	0.60
198	0.54	0.54
292	0.50	0.48
353	0.48	0.46

表 2 代表的温度でのアイソマシフト  
(対ステンレススチール)

しかし、 $\sigma$  (アイソマシフト) 実験結果 (表 2) から上記の可能性はなく、もっとも良く説明できる機構として、Haas and Marram の理論を適用するべきであるとの結論を得た。この理論は、もともと NMR (核磁気共鳴) の  $q$  の正の温度変化の実験結果を説明したものであり、メスバウアー効果によって観測された  $q$  の温度変化を説明できるはずである。それに依れば、 $q$  の温度変化は次式であらわされる。

$$\Delta q = 5V \frac{H_{12}}{E_1 - E_2} C_1^0 C_2^0 \left[ \frac{\hbar}{I\omega \exp(\hbar\omega / kT) - 1} \right] q_{01}$$

各パラメーターは Haas and Marram によるものと同じである。ここで重要なのは  $\hbar\omega$  であり、 $20\text{cm}^{-1}$  程度の格子振動が存在すれば定量的にも説明可能である。

<Eu<sup>151</sup> のメスバウアー効果.> (鈴木 隆司)

Eu は、その化合物中で原子価が 2+, 3+ になり、電子状態によりアイソマシフトの値が大きく異なり注目されてきた。観測する Eu の吸収スペクトルは一般に幅広の非対象なピーク (Eu 原子の占める site が複数あるか、電場勾配  $q$  が存在する) である。Eu のスペクトルでは  $q$  によって原理的には 12 本のピークに分かれ、スペクトルは複雑であるがその半値巾が大きいので、 $q$  の影響は無視されその中央

値でアイソマシフトが議論されてきた。従って、これまでのアイソマシフトのデータは精密さにおいて不十分である。

EuMn<sub>1-x</sub>Ca<sub>x</sub>O<sub>8</sub>(x=0, 0.3), EuPdInの実験で得られたスペクトルを、新しく導入したスペクトル解析ソフト MOSS WINN を支援ソフトとして、より精密なアイソマシフトおよび電場勾配 q の解析を行った。これらの結果から、ピークの内部構造を考慮しても意味のある解析が可能であることが分った。

<論文>

1. A.V. Fedorov, A.V. Baranov and Y. Masumoto: "Coherent Control of the Quasi-Elastic Resonant Secondary Emission: Semiconductor Quantum Dots", *Optics and Spectroscopy* **92**, 732 (2002). Translated from *Optika i Spektroskopiya* **92**, 797 (2002).
2. M. Sugisaki, H.-W. Ren, K. Nishi and Y. Masumoto: "Optical Properties of InP Self-Assembled Quantum Dots Studied by Imaging and Single Dot Spectroscopy", *Jpn. J. Appl. Phys.* **41**, 958 (2002); 13th Int. Conf. Indium Phosphide and Related Materials (Nara, 2001).
3. I.E. Kozin, V.G. Davydov, I.V. Ignatiev, A.V. Kavokin, K.V. Kavokin, G. Malpuech, H.-W. Ren, M. Sugisaki, S. Sugou and Y. Masumoto: "Zero-field spin quantum beats in charged quantum dots", *Phys. Rev. B* **65**, 241312(R) (2002).
4. I.A. Yugova, V.G. Davydov, I.Ya. Gerlovin, I.V. Ignatiev, I.E. Kozin, M. Sugisaki and Y. Masumoto: "Spin Quantum Beats in the Stokes Shifted Photoluminescence of InP Quantum Dots", *physica status solidi (a)* **190**, 547 (2002).
5. 舛本泰章: "量子ドットの分光学" *分光研究* **51**, 188 (2002).
6. T. Okuno, Y. Masumoto, S. Kadono, S. Kitade, H. Bando and H. Okamoto: "Ultrafast and Wideband Response in Optical Nonlinearity of Molecular-Beam-Epitaxy-Grown GaAs", *Jpn. J. Appl. Phys.* **41**, L745 (2002).
7. A.V. Baranov, V. Davydov, A.V. Fedorov, M. Ikezawa, H.-W. Ren, S. Sugou and Y. Masumoto: "Interferometric coherence measurement of stress-induced In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs quantum dots at the resonant-luminescence phonon sideband", *Phys. Rev. B* **66**, 075326 (2002).
8. M. Ikezawa, K. Takemoto and Y. Masumoto: "Coherent acoustic phonons in quantum dots", *Proc. 26th Int. Conf. Physics of Semiconductors (Edinburgh, 2002)*.
9. K. Takemoto, M. Ikezawa and Y. Masumoto: "Residual Dephasing mechanism at low temperature in semiconductor quantum dots", *Proc. 26th Int. Conf. Physics of Semiconductors (Edinburgh, 2002)*.
10. I.V. Ignatiev, I.Ya. Gerlovin, V.K. Kalevich, K.V. Kavokin, S.Yu. Verbin, I.A. Yugova and Y. Masumoto: "Spin dynamics in charged InP quantum dots", *Proc. 26th Int. Conf. Physics of Semiconductors (Edinburgh, 2002)*.
11. K. Nishibayashi, T. Okuno, I.V. Ignatiev, S. Verbin and Y. Masumoto: "Quantum beat of strain-induced GaAs quantum dots", *Proc. 26th Int. Conf. Physics of Semiconductors (Edinburgh, 2002)*.
12. Y. Masumoto, J.L. Zhao, K. Takemoto and M. Ikezawa: "Excited state LO phonons in quantum dots", *Proc. 26th Int. Conf. Physics of Semiconductors (Edinburgh, 2002)*.
13. Y. Masumoto, M. Nomura, T. Okuno, Y. Terai, S. Kuroda and K. Takita: "Highest-order optical phonon-mediated relaxation in CdTe/ZnTe quantum dots", *J. Lumin* **102-103**, 623 (2003); *Int. Conf. on Luminescence and Optical Spectroscopy of Condensed Matter (ICL '02) (Budapest, 2002)*.

14. Y. Masumoto, F. Naruse and A. Kanno: "Photoinduced electric dipole in CuCl Quantum dots", *J. Lumin* 102-103, 629 (2003); *Int. Conf. on Luminescence and Optical Spectroscopy of Condensed Matter (ICL'02) (Budapest, 2002)*.
15. Y. Masumoto, I.V. Ignatiev, I.E. Kozin, K. Nishibayashi, T. Okuno and S.Yu. Verbin: "Luminescence quantum beats of semiconductor quantum dots", *Abstracts of 2nd Int. Workshop on Quantum Nonplanar Nanostructures & Nanoelectronics '02*, p. 81 (Tsukuba, 2002). // INVITED PAPER//
16. Y. Masumoto: "Coherent spectroscopy of semiconductor quantum dots", *J. Lumin.* 100, 191 (2002).
17. M. Sugisaki, H.-W. Ren, S.V. Nair, K. Nishi, H.E. Ruda and Y. Masumoto: "Relationship between InP quantum dots and their environment", to be published in *phys. stat. sol.; Proc. 2nd Int. Conf. on Semiconductor Quantum Dots (Tbkyo, 2002)*.
18. Y. Masumoto, I.Ya. Gerlovin, M. Ikezawa, I.V. Ignatiev, T. Okuno, S.Yu. Verbin and I.A. Yugova: "Spin relaxation in InP quantum dot", to be published in *phys. stat. sol.; Proc. 2nd Int. Conf. on Semiconductor Quantum Dots (Tbkyo, 2002)*.
19. A.V. Fedorov, A.V. Baranov and Y. Masumoto: "Coherent control of resonant secondary emission of semiconductor quantum dots", to be published in *phys. stat. sol.; Proc. 2nd Int. Conf. on Semiconductor Quantum Dots (Tbkyo, 2002)*.
20. K. Takemoto, J. Zhao, M. Ikezawa and Y. Masumoto: "Low-Temperature Dephasing Mechanism of Very Small Quantum Dots: The Role of Confined Phonons and Surrounding Matrices", to be published in *phys. stat. sol.; Proc. 2nd Int. Conf. on Semiconductor Quantum Dots (Tbkyo, 2002)*.
21. A.V. Baranov, A.V. Fedorov, I.D. Rukhlenko and Y. Masumoto: "New Mechanism of Intraband Carrier Relaxation in Quantum Dot", to be published in *phys. stat. sol.; Proc. 2nd Int. Conf. on Semiconductor Quantum Dots (Tbkyo, 2002)*.
22. V.K. Kalevich, M. Ikezawa, T. Okuno, A.Yu. Shiryaev, A.E. Zhukov, V.M. Ustinov, P.N. Brunkov and Y. Masumoto: "Optical spin polarization in negatively charged InAs self-assembled quantum dots under applied electric field", to be published in *phys. stat. sol.; Proc. 2nd Int. Conf. on Semiconductor Quantum Dots (Tbkyo, 2002)*.
23. A.V. Fedorov, A.V. Baranov and Y. Masumoto: "Coherent Control of Thermalized Luminescence in Semiconductor Quantum Dots", *Optics and Spectroscopy* 93, 555 (2002). Translated from *Optika i Spektroskopiya* 93, 604 (2002).
24. A.V. Fedorov, A.V. Baranov and Y. Masumoto: "Coherent Control of the fundamental transition in a single quantum dot", *Solid State Commun.* 124, 311 (2002).
25. V.S. Dneprovskii, E.A. Zhukov, O.A. Shalygina, V.L. Lyaskovskii, E.A. Muljarov, S.A. Gavrilov and Y. Masumoto: "Excitons in CdS and CdSe Semiconducting Quantum Wires with Dielectric Barriers", *J. Experimental and Theoretical Physics* 94, 1169 (2002). Translated from *Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki* 121, 1362 (2002).
26. M. Sugisaki, H.-W. Ren, S.V. Nair, K. Nishi and Y. Masumoto: "External-field effects on the optical spectra of self-assembled InP quantum dots", *Phys. Rev. B* 66, 235309 (2002).
27. I.A. Yugova, I. Ya. Gerlovin, V.G. Davydov, I.V. Ignatiev, I.E. Kozin, H.W. Ren, M. Sugisaki, S. Sugou and Y. Masumoto: "Fine structure and spin quantum beats in InP quantum dots in a magnetic field", *Phys. Rev. B* 66, 235312 (2002).
28. T. Okuno, M. Nomura, Y. Masumoto, Y. Terai, S. Kuroda and K. Takita: "Optical Study of

- Phonon-Mediated Carrier Relaxation in CdTe/ZnTe Self-Assembled Quantum Dots", *J. Phys. Soc. Jpn.*, 71, 3052 (2002).
29. Y. Masumoto: "Optical Coherence in Semiconductor Quantum Dots", Digest of 8th Int. Symp. on Advanced Physical Fields, p.17 (Tsukuba, 2003). // INVITED PAPER//
  30. K. Takemoto, B.-R. Hyun, M. Furuya, M. Ikezawa, J. Zhao and Y. Masumoto: "Universal Dephasing Mechanism in Semiconductor Quantum Dots Embedded in a Matrix", *J. Phys. Soc. Jpn.* 72, 249 (2003).
  31. T. Okuno, M. Ikezawa, Y. Masumoto, G.R. Hayes, B. Deveaud and A.A. Lipovskii: "1.5- $\mu$ m Intraband Transitions in PbSe Quantum Dots", *Jpn. J. Appl. Phys.* 42, L123 (2003).
  32. S. Nomura, and Y. Aoyagi, "Density of states of a quantum dot array probed by photoluminescence spectra", *Surface Science*, 529 171-179 (2003).
  33. K. Matsuda, T. Saiki, S. Nomura, M. Mihara, and Y. Aoyagi, "Near-field photoluminescence imaging of single semiconductor quantum constituents with a spatial resolution of 30 nm", *Appl. Phys. Lett.* 81 (12) 2291-2293 (2002).
  34. S. Nomura, K. Matsuda, T. Saiki, and Y. Aoyagi, "Near-Field Scanning Optical Microscopy of Quantum Dot Arrays", *Jpn. J. Appl. Phys.* 41 2668-2670 (2002).
  35. K. Hammura, S. Nomura, and Y. Aoyagi, "Time-resolved photoluminescence near Fermi level in a field-induced quantum dot lattice", *Physica E* 13 (2-4) 251-254 (2002).
  36. T. Suzuki and N. Okubo: "Positive Temperature Dependence of Quadrupole Splitting in Mössbauer Spectra of  $\text{Fe}_{1.33}\text{Nb}_{2.67}\text{Se}_{10}$ ", *Z. Naturforsch.* 57a 627(2002)

<著書>

1. Y. Masumoto: "Persistent Spectral Hole Burning in Semiconductor Quantum Dots" in "Semiconductor Quantum Dots - Physics, Spectroscopy and Applications" eds. Y. Masumoto and T. Takagahara p.209-p.244 (Springer-Verlag, 2002).
2. Y. Masumoto: "Homogeneous Width of Confined Excitons in Quantum Dots - Experimental" in "Semiconductor Quantum Dots - Physics, Spectroscopy and Applications" eds. Y. Masumoto and T. Takagahara p.325-p.351 (Springer-Verlag, 2002).
3. 舛本泰章: 人工原子, 量子ドットとは何か (pp.129-204) (『現代物理最前線 6』大槻義彦編、共立出版、2002)

<国際会議>

1. M. Sugisaki, H.-W. Ren, K. Nishi and Y. Masumoto: "Optical Properties of InP Self-Assembled Quantum Dots Studied by Imaging and Single Dot Spectroscopy", *Jpn. J. Appl. Phys.* 41, 958 (2002); 13th Int. Conf. Indium Phosphide and Related Materials (Nara, 2001).
2. M. Ikezawa, K. Takemoto and Y. Masumoto: "Coherent acoustic phonons in quantum dots", *Proc. 26th Int. Conf. Physics of Semiconductors* (Edinburgh, 2002).
3. K. Takemoto, M. Ikezawa and Y. Masumoto: "Residual Dephasing mechanism at low temperature in semiconductor quantum dots", *Proc. 26th Int. Conf. Physics of Semiconductors* (Edinburgh, 2002).
4. I.V. Ignatiev, I.Ya. Gerlovin, V.K. Kalevich, K.V. Kavokin, S.Yu. Verbin, I.A. Yugova and Y. Masumoto: "Spin dynamics in charged InP quantum dots", *Proc. 26th Int. Conf. Physics of Semiconductors* (Edinburgh, 2002).
5. K. Nishibayashi, T. Okuno, I.V. Ignatiev, S. Verbin and Y. Masumoto: "Quantum beat of

- strain-induced GaAs quantum dots", Proc. 26th Int. Conf. Physics of Semiconductors (Edinburgh, 2002).
6. Y. Masumoto, J.L. Zhao, K. Takemoto and M. Ikezawa: "Excited state LO phonons in quantum dots", Proc. 26th Int. Conf. Physics of Semiconductors (Edinburgh, 2002).
  7. Y. Masumoto, M. Nomura, T. Okuno, Y. Terai, S. Kuroda and K. Takita: "Highest order optical phonon mediated relaxation in CdTe/ZnTe quantum dots", *J. Lummin* 102-103, 623 (2003); Int. Conf. on Luminescence and Optical Spectroscopy of Condensed Matter (ICL '02) (Budapest, 2002).
  8. Y. Masumoto, F. Naruse and A. Kanno: "Photoinduced electric dipole in CuCl Quantum dots", *J. Lummin* 102-103, 629 (2003); Int. Conf. on Luminescence and Optical Spectroscopy of Condensed Matter (ICL '02) (Budapest, 2002).
  9. Y. Masumoto, I.V. Ignatiev, I.E. Kozin, K. Nishibayashi, T. Okuno and S.Yu. Verbin: "Luminescence quantum beats of semiconductor quantum dots", Abstracts of 2nd Int. Workshop on Quantum Nonplanar Nanostructures & Nanoelectronics '02, p. 81 (Tsukuba, 2002). // INVITED PAPER//
  10. M. Sugisaki, H.-W. Ren, S.V. Nair, K. Nishi, H.E. Ruda and Y. Masumoto: "Relationship between InP quantum dots and their environment", to be published in *phys. stat. sol.*; Proc. 2nd Int. Conf. on Semiconductor Quantum Dots (Tbkyo, 2002).
  11. Y. Masumoto, I.Ya. Gerlovin, M. Ikezawa, I.V. Ignatiev, T. Okuno, S.Yu. Verbin and I.A. Yugova: "Spin relaxation in InP quantum dot", to be published in *phys. stat. sol.*; Proc. 2nd Int. Conf. on Semiconductor Quantum Dots (Tokyo, 2002).
  12. A.V. Fedorov, A.V. Baranov and Y. Masumoto: "Coherent control of resonant secondary emission of semiconductor quantum dots", to be published in *phys. stat. sol.*; Proc. 2nd Int. Conf. on Semiconductor Quantum Dots (Tbkyo, 2002).
  13. K. Takemoto, J. Zhao, M. Ikezawa and Y. Masumoto: "Low-Temperature Dephasing Mechanism of Very Small Quantum Dots: The Role of Confined Phonons and Surrounding Matrices", to be published in *phys. stat. sol.*; Proc. 2nd Int. Conf. on Semiconductor Quantum Dots (Tbkyo, 2002).
  14. A.V. Baranov, A.V. Fedorov, I.D. Rukhlenko and Y. Masumoto: "New Mechanism of Intraband Carrier Relaxation in Quantum Dot", to be published in *phys. stat. sol.*; Proc. 2nd Int. Conf. on Semiconductor Quantum Dots (Tbkyo, 2002).
  15. V.K. Kalevich, M. Ikezawa, T. Okuno, A.Yu. Shiryaev, A.E. Zhukov, V.M. Ustinov, P.N. Brunkov and Y. Masumoto: "Optical spin polarization in negatively charged InAs self-assembled quantum dots under applied electric field", to be published in *phys. stat. sol.*; Proc. 2nd Int. Conf. on Semiconductor Quantum Dots (Tbkyo, 2002).
  16. Y. Masumoto: "Optical Coherence in Semiconductor Quantum Dots", Digest of 8th Int. Symp. on Advanced Physical Fields, p.17 (Tsukuba, 2003). // INVITED PAPER//
  17. T. Okuno, Y. Masumoto, S. Kadono, S. Kitade, H. Bando, H. Okamoto: "Ultrafast response in optical nonlinearity of MBE grown GaAs/AlAs MQW and bulk GaAs", The 22nd Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2002) Long Beach, California, USA May 19-24, 2002 CTuK45, Technical Digest pp.226-227.
  18. T. Okuno, Y. Masumoto, S. Kadono, S. Kitade, H. Bando, H. Okamoto: "High repetition operation of wideband and ultrafast optical nonlinearity of low-temperature grown Be-doped GaAs", The 9th International Workshop on Femtosecond Technology (FST2002) Tsukuba,

Japan June 27-28, 2002 Abstracts p.145.

19. T. Okuno, Y. Masumoto, S. Kadono, S. Kitade, H. Bando, H. Okamoto: "Ultrafast and wideband response of optical saturable absorption in LT-grown and Be-doped GaAs", 4th Symposium on Non-Stoichiometric III-V Compounds Asilomar, California, USA October 2-4, 2002 Proceedings pp.49-54 (invited).
20. (invited) Y. Kurokawa, S. Nomura, T. Takemori, Y. Aoyagi, "Fast algorithm for calculating nonlinear response functions of large quantum systems and its application in TPA spectra", the International Symposium on Optical Science and Technology, SPIE's 47th Annual Meeting, (7-11 July 2002, Seattle).
21. K. Matsuda, T. Saiki, S. Nomura, M. Mihara, and Y. Aoyagi, "Real-space mapping of exciton and biexciton wave function of GaAs quantum dot by near-field scanning optical spectroscopy", the 26 th International Conference on Physics of Semiconductors (ICPS26), (July 29 - August 2 2002, Edinburgh).
22. S. Nomura and Y. Aoyagi, "Density of states and spin states of electrons in quantum dots revealed by photoluminescence", Second International Workshop in Quantum Nonplaner Nanostructures and Nanoelectronics", (9-11 Sep., 2002, Tsukuba).
23. S. Nomura and Y. Aoyagi, "Spin polarization of electrons in quantum dots from circular polarization dependent photoluminescence spectroscopy", Second International Conference on Semiconducter Quantum Dots (QD2002), (30 Sep. - 3. Oct, 2002, Tokyo).
24. K. Matsuda, T. Saiki, S. Nomura, M. Mihara, and Y. Aoyagi, "Real-space mapping of exciton wave function in a GaAs quantum dot by near-field optical imaging spectroscopy", Second International Conference on Semiconducter Quantum Dots (QD2002), (30 Sep. - 3. Oct, 2002, Tokyo).
25. S. Nomura and Y. Aoyagi, "Photoluminescence specroscopy applied for detecting spin polarization of electrons in quantum dot arrays", International Symposium on Carrier Interactions and Spintronics in Nanostructures 2003, (10-12 Mar. 2003, Atsugi).

<学位論文>

物理学研究科博士論文

1. 久保敦: Kinetics and Dynamics of Hydrogen Interaction with the Silicon Surface
2. 竹本一矢: Exciton Dephasing Mechanism of CdSe and CuBr Quantum Dots Embedded in Matrix

数理物質科学研究科物質創成先端科学専攻修士論文

1. 大野善幸「金属ナノホールアレーの光透過スペクトル」(修士(理学)、筑波大学数理物質科学研究科物質創成先端科学専攻、2003年3月)

<講演>

1. M. Ikezawa, V.K. Kalevich, A.E. Zhukov, V.M. Ustinov, Y. Masumoto: "Optical spin polarization in n-i-n structure with InAs self-assembled quantum dots" 日本物理学会 (2002年9月)
2. 舛本泰章, I.V. Ignatiev, I.A. Yugova, S.Yu. Verbin, 西林一彦, 奥野剛史: "量子ドットの発光の示す4種類の量子ビート" 日本物理学会 (2002年9月)

3. 阪東一毅、沢辺大樹、舛本泰章：“ZnO 単一ナノワイヤーの光学的特性” 日本物理学会 (2002 年 9 月)
4. 三上紋、丸山理、舛本泰章：“自己形成 InP 量子ドットの非線形発光” 日本物理学会 (2002 年 9 月)
5. 丸山理、舛本泰章：“歪誘起 InGaAs 量子ドットの非線形発光” 日本物理学会 (2002 年 9 月)
6. 菅野敦史、舛本泰章：“銅ハライド量子点における LO フォノンのソフトニング” 日本物理学会 (2002 年 9 月)
7. 池沢道男、舛本泰章：“ガラス中の半導体量子点における LO フォノンのソフトニング” 日本物理学会 (2002 年 9 月)
8. 鶴殿治彦、菊間勲、奥野剛史、舛本泰章：“ $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> ナルク単結晶の光吸収測定 (II)” 応用物理学会 (2002 年 9 月)
9. 坂東弘之、神園利成、岡本紘、奥野剛史、舛本泰章：“低温 MBE 成長 Be ドープ GaAs 薄膜におけるアンチサイト As 濃度” 応用物理学会 (2002 年 9 月)
10. 北出晋介、坂東弘之、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パルス幅依存性” 応用物理学会 (2002 年 9 月)
11. 奥野剛史、池沢道男、舛本泰章：“半導体量子ドットにおける光非線形性の高速緩和” 第 1 回ナノテクノロジー総合シンポジウム (JAPAN NANO 2003) 東京都有明 2003 年 2 月 3, 4 日 講演予稿集 pp.130-131.
12. 樋口彰、坂東弘之、岡本紘、奥野剛史、舛本泰章：“低温 MBE 成長 Be ドープ GaAs 薄膜における Be<sup>-</sup>AsCa<sup>+</sup> 複合欠陥による発光再結合の調査” 応用物理学会 (2003 年 3 月)
13. 桜井あやの、樋口彰、坂東弘之、岡本紘、奥野剛史、舛本泰章：“In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/AlAs 歪量子井戸構造における光吸収飽和特性” 応用物理学会 (2003 年 3 月)
14. 藤谷諭、吉野英生、吉成伸夫、坂東弘之、岡本紘、奥野剛史、舛本泰章：“In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/In<sub>0.52</sub>Al<sub>0.48</sub>As 歪量子井戸構造の吸収飽和過渡特性” 応用物理学会 (2003 年 3 月)
15. 阪東一毅、沢辺大樹、舛本泰章：“ZnO 単一ナノベルトの室温レーザー発振” 日本物理学会 (2003 年 3 月)
16. 西林一彦、奥野剛史、I.V. Ignatiev、舛本泰章：“歪み誘起 GaAs 量子ドットにおける量子ビートの研究” 日本物理学会 (2003 年 3 月)
17. 菅野敦史、池沢道男、舛本泰章：“歪み誘起 GaAs 量子ドットの四光波混合” 日本物理学会 (2003 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円偏光発光分光、日本物理学会秋季大会、春日井市、2002 年 9 月。
19. 松田一成、齋木敏治、野村晋太郎、三原勝、青柳克信、高分解能近接場光学顕微鏡による GaAs 量子ドットの励起子波動関数イメージング、日本物理学会秋季大会、春日井市、2002 年 9 月。
20. 野村晋太郎、量子ドットアレー中電子系のスピン偏極、ナノサイエンス特別プロジェクト研究成果発表会、つくば市 2003 年 3 月。
21. 松田一成、齋木敏治、野村晋太郎、三原勝、青柳克信、高河原俊秀、S. Nair、GaAs 量子ドットの励起子と励起子分子の発光空間プロファイルの違い、第 50 回応用物理学関係連合講演会、横浜市、2003 年 3 月。
22. 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円偏光発光分光 II、日本物理学会年次大会、仙台市、2003 年 3 月。
23. 松田一成、齋木敏治、野村晋太郎、三原勝、青柳克信、高河原俊秀、S. Nair、高分解能近接場顕微鏡による GaAs 量子ドットの励起子波動関数イメージング II、日本物理学会年次大会、仙台市、2003 年 3 月。

24. 今井剛、野村晋太郎、規則ポラス構造を用いた量子ドットアレーの発光分光、日本物理学会年次大会、仙台市、2003年3月。