

VIII - 2. 半導体物性グループ

教授 舛本 泰章

助教授 野村晋太郎

助手 池沢 道男

助手 富本 慎一

助手 阪東 一毅

助手 山本 貴一

助手 安坂 幸師

ベンチャービジネスラボラトリー 研究者 菅野敦史

日本学術振興会外国人特別研究員 Pal, Bipul

外国人研究員 (ベンチャービジネスラボラトリー) Verbin, Sergey

大学院生 (15名)

【1】半導体におけるフェムト秒、ピコ秒時間分解分光 (池沢道男、富本慎一、舛本泰章)

1) 量子ドットのフォノンと励起子-フォノン結合状態 (池沢道男、舛本泰章)

<CuBr 量子ドットのコヒーレントフォノンとラマン散乱> (池沢道男、菅野敦史、J. Zhao^A、舛本泰章^A現 Washington Univ.) [論文 7]

ガラスおよび NaBr 結晶中に成長させた、粒径が数 nm の CuBr 量子ドットについて、X 線小角散乱および、透過電子顕微鏡観測により、ドットのサイズを精密に計測しながらドットに閉じ込められた音響フォノンのコヒーレントフォノンを観測し (図 1)、またこの系で知られていた永続的ホールバーニング現象を利用したドットに閉じ込められた音響フォノンの観測を行い、それらの粒径依存性を明らかにした。最低振動数の $l=2$ のスフェロイダルモードがコヒーレントフォノン、永続的ホールバーニング両方で観測され、コヒーレントフォノンでは 1 つ上の $l=0$ の全対称なブリージングモードも観測された。研究成果は論文 7 として発表された。

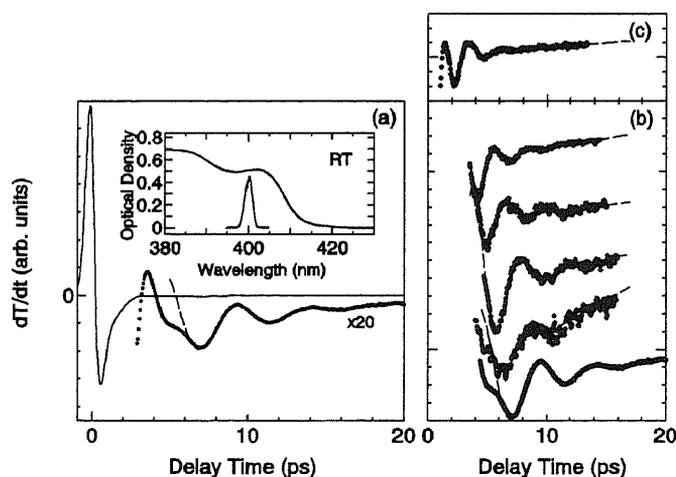


図 1 CuBr 量子点のコヒーレントフォノンの観測

2) 超高感度ヘテロダイン検出フォトンエコーの開発と単層量子ドットへの応用 (池沢道男、舛本泰章)

超高速レーザーパルスを用いたフォトンエコーは物質中の分極のコヒーレントな振る舞いを観測するのに極めて有用であり、物質中の励起子のコヒーレント緩和 (位相緩和) や電子波束のコヒーレントな振動を観測するのに最適である。図 2 に示すようなヘテロダイン検出フォトンエコー測定法を開発した。

この方法は、2光束のレーザーパルスに100MHz程度 of 2つの周波数が異なる高周波で変調をかけ、この周波数の結合周波数成分で光子エコー信号を検出する方式で従来の光子エコー測定に比べ1桁半の感度を有することが明らかになった。ヘテロダイン検出光子エコー測定法により、単層の量子井戸や積層された量子ドットの励起子の光子エコー信号が測定できるようになった。単層の歪み誘起 GaAs 量子ドットおよび電場をかけた単層の InP 量子ドットのヘテロダイン検出光子エコー測定に成功し、前者では量子井戸に比

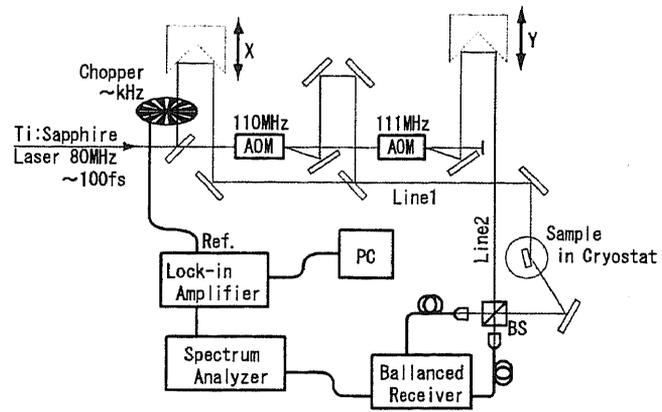


図2 超高感度ヘテロダイン検出光子エコー測定系

べ量子ドットでは励起子のコヒーレンス時間が長く、励起子分子の束縛エネルギーが増大することを明らかにし、後者では電場により電子のドーパ量を変えることで Pauli Blocking 効果、電場により正孔をトンネルで量子ドットから引き抜く過程による非マルコフ的減衰を初めて観測することに成功した。

<InP 単層量子ドットのヘテロダイン光子エコー> (須藤史敬、池沢道男、舛本泰章、相原正樹^A、内山智香子^B ^A奈良先端科学技術大学院大学、^B山梨大学医学工学総合研究部) [論文 6,12]

電場を加えられた InP 単層量子ドットにおいて共鳴光生成された正孔がトンネル効果で量子ドットから抜ける過程がヘテロダイン光子エコーの時間特性で観測され、ノンマルコフ過程の反映した特異な非指数関数的減衰を示すことが明らかにされた。また、電荷のドーパに伴うパウリブロッキングが光子エコー信号を消滅させることが明らかになった。研究成果は論文 6,12 として発表された。

<歪誘起 GaAs 量子ドットにおける励起子-励起子分子量子ビート> (池沢道男、舛本泰章) [論文 12,14]

半導体中の励起子や励起子分子のような準粒子の束縛エネルギーは、低次元構造では電子や正孔が空間的に閉じ込められることによって、バルク結晶の時より大きくなるのが予想される。量子井戸に局所的な歪 ($\phi \sim 90^\circ$) を加えることによって形成される歪誘起 GaAs 量子ドット試料を用いて、歪のない2次元的な GaAs 量子井戸における励起子分子と、歪によって形成された0次元量子ドット領域に閉じ込められた励起子分子の束縛エネルギーの直接的な比較を行った。図3(a)に示すように、これら2つの領域は同一の試料中に存在し、発光エネルギーによって区別する事が出来る。

励起子分子の束縛エネルギーは、量子ビートの周期から決定され、それはヘテロダイン検出を利用した高感度時間分解四光波混合システム

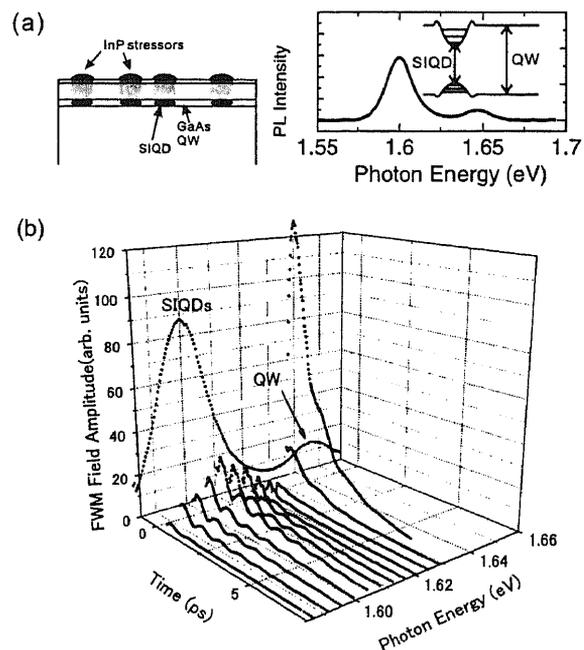


図3 単層 GaAs 量子井戸と歪み誘起量子ドットにおける光子エコー信号

の開発によって初めて可能になった。図(b)に、厚さ 3.8nm の井戸内に作られた歪み誘起量子ドット試料の四光波混合信号を示す。信号には励起子分子の束縛エネルギーを反映した顕著なビートがみられる。一見して分かるように、その振動周期は0次元領域 (SIQD) では、2次元領域 (QW) より短く、詳しく調べると振動数が 1.5 倍大きくなっている。この観測は、量子井戸の2次元閉じ込めに横方向の面内閉じ込めを付与された量子ドットで、束縛エネルギーが 1.5 倍に増大したことを最も直接的な形で示す。

3) フェムト秒時間分解発光分光 (富本慎一、舛本泰章)

<離散的な高さ分布をもつ InAs 量子ドット系の時間分解発光測定> (富本慎一、黒川篤、佐久間芳樹^A、舛本泰章^A物質・材料研究機構)

励起子のコヒーレンス広がりと同程度の大きさの半導体量子構造中に閉じ込められた励起子の自然放射寿命は、閉じ込め領域の寸法に強く依存することが知られている。特に量子井戸においては寿命が井戸厚に比例することが GaAs/AlGaAs 量子井戸において示されており、閉じ込めが3次元的な量子ドットにおいても類似の依存性が現れることが期待されている。高さが精密に制御された量子ドット試料において時間分解発光測定を行い、自然放射寿命がドットの高さによりにどのように依存するか調べている。

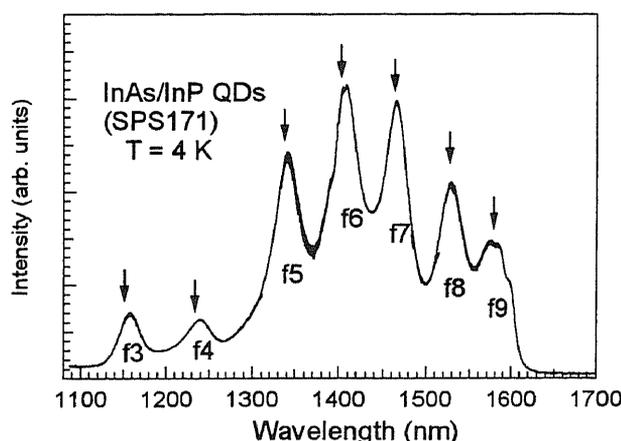


図 4 離散的な高さ分布をもつ InAs/InP 量子ドットの PL スペクトル (各ピークの番号はドット高さの原子層数を表す)

試料は InP(001)基板上に MOCVD 成長した InAs/InP 量子ドットであり、ダブルキャップ法を用いることでドットの高さを数原子層程度に抑えている。この試料の PL スペクトルを図 4 に示す。原子層の厚みの整数倍のみが許される離散的な量子ドットの高さ分布に応じて、明確に分裂した複数のピーク (f3~f9) を示している。この各ピークに対する PL の時間分解測定を赤外領域で高感度であるアップ・コンバージョン法を用いて行った (図 5)。PL の時間発展は 2 つの指数関数的減衰成分により表され、このうち短寿命成分 (100 ps ~ 1 ns) の寿命はドットの高さに対して単調に増大していることが分かった。これが量子ドットの高さによって決まる自然放射寿命を与え、長寿命成分は障壁層 (InP) からのフォトキャリアの流入

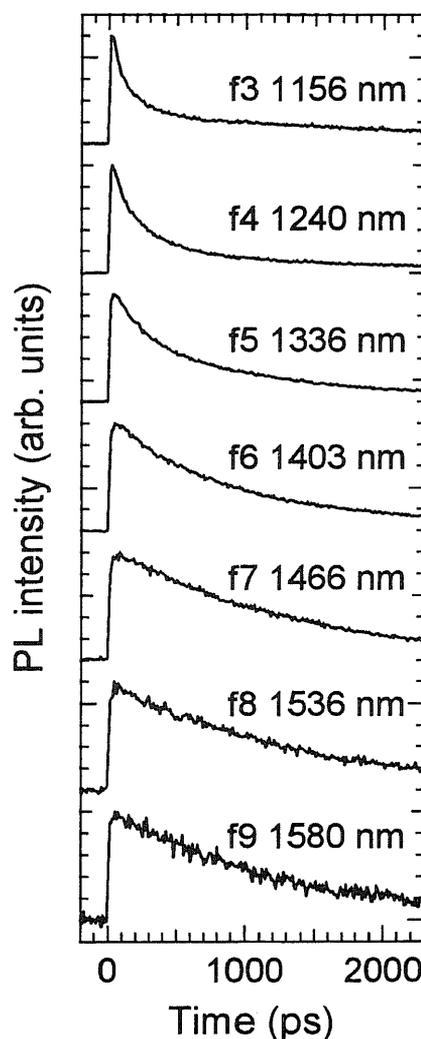


図 5 図 4 に示す各ピーク位置での PL の時間発展 (T = 4 K)

によって生じていると推測することも出来る。このアサインメントの確定のため今後より詳細な実験を行う予定である。

<光による希薄磁性半導体の磁化制御の可能性探索とその観測手段としての時間分解磁気光学測定系の構築> (冨本真一、舛本泰章、黒田真司^A、瀧田宏樹^A ^A物性・分子工学専攻)

III-V族希薄磁性半導体 (DMS) における強磁性相の発現には化学的にドーピングされたキャリア (ホール) が深く関与していることが知られている。磁性の光制御の観点から、光キャリア注入によっても同様の局在スピン間の強磁性的相互作用の増強・抑制が行えないか興味を持たれているが、研究事例はまだ少なく特殊なヘテロ構造を持った系に限られている。より一般的な DMS 試料において光キャリア注入の効果を評価し、局在スピンのダイナミクスを観測するためには、磁気光学効果の時間分解測定を行うことが有効である。試料の温度上昇を避けながら 10^{19} cm^{-3} 程度の高密度の光キャリアを注入出来るようにするため、低繰り返し (1 kHz) のパルスレーザー光 (チタンサファイアレーザー再生増幅器) を用いた時間分解磁気光学測定系を作成した。図 6 は GaAs 基板上に MBE 成長した $\text{Zn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{Te}$ 薄膜の Kerr 回転角スペクトルである。この薄膜は Cr 濃度 x を高めると室温に及ぶ高い強磁性転移温度を持つことが知られている。400 nm 付近の分散型の構造は Γ 点における split-off 帯から伝導帯への遷移に対応している。このバンドの Kerr 回転角をモニターとして上記の時間分解磁気光学測定を行い、この DMS 薄膜における光キャリア注入の磁化への効果を調べている。

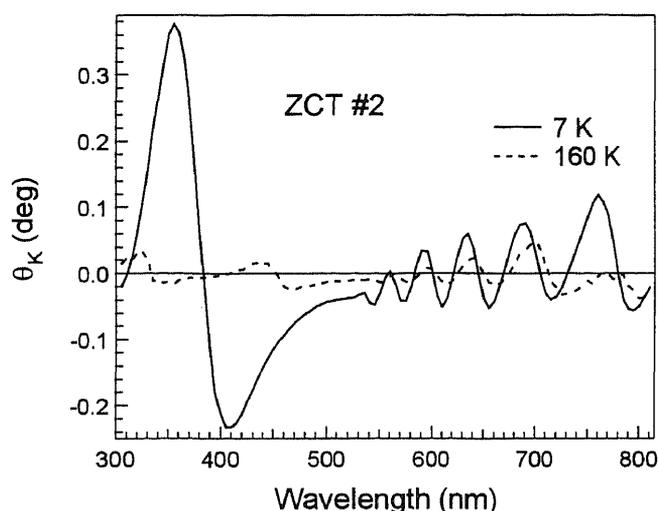


図 6 $\text{Zn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{Te}$ 薄膜の Kerr 回転角スペクトル ($x = 0.077, H = 0.3 \text{ T}$)

【2】半導体量子ドットのスピン光物性 (舛本泰章、池沢道男)

<2個の電子または正孔をドーピングされた InAs 量子ドット中のスピン緩和> (V. Kalevich^A、舛本泰章^A Joffe Physico-Technical Institute) [論文 1]

2個の電子、または2個の正孔をドーピングされた InAs 量子ドットを含む GaAs 障壁層を円偏光光励起すると、電子がドーピングされているときには負の円偏光度をもつ量子ドット発光、正孔がドーピングされているときには正の円偏光度をもつ量子ドット発光を示す。円偏光度の励起強度依存性、縦磁場依存性ともに、電子がドーピングされているときと正孔がドーピングされているときとで異なった特異な変化を示した。0.5T 以下の弱磁場領域の円偏光度の縦磁場依存性はランダムに分布した核スピンによる超微細相互作用により電子におよぼす有効磁場により、電子スピンの緩和が支配されていることを示し、円偏光度の励起強度依存性はテトラオン (電子 3(1)個と正孔 1(3)個の複合系) の発光寿命に影響しているとして理解される。

<電子ドーピング InP 量子ドット中のサブミリ秒の電子スピン緩和時間> (池沢道男、B. Pal、S. Verbin^{A,B}、I. Ignatiev^B、舛本泰章 ^A筑波大 VBL、^BSt. Petersburg State Univ.) [論文 11,15]

量子情報処理には、光との整合性が良い III-V 族半導体量子ドット中の長いスピン緩和時間を持つ電子スピンの最も有用であろう。ナノ秒程度の発光寿命により時間の制約を受ける光生成電子に比べ、ドー

プされた電子のスピンを光によりそろえることができれば発光寿命がないので長いスピン寿命という点で有利である。実際、電子を1個ドーブした InP 量子ドットの発光の円偏光度を計測し、電子のスピンの偏極がサブミリ秒からミリ秒に達する寿命をもつことを見いだした。チャージチューナブル自己形成 InP 量子ドットを円偏光ピコ秒レーザーパルスにより準共鳴励起し、ファラデー配置で縦磁場を加え、偏光フォトルミネッセンスおよびその時間分解を系統的に研究した。原子核スピンの揺らぎの効果を抑えられる 0.1T の縦磁場下で、InP 量子ドットの発光帯を円偏光で準共鳴励起すると、励起光エネルギーからストークスシフトが大きいエネルギー領域では、負の円偏光度 (NCP) をもつ発光となる。発光ポンプ・プローブ法を用いた時間分解測定により、負の円偏光度 A_{NCP} は、数百マイクロ秒の緩和時間で緩和していくことが明らかになった。減衰カーブは単純な指数関数ではないが、少なくとも 100 μ s もの長い時間経過後でも co-pump と cross-pump の間に相当の差がある。

その後の研究で電子スピン偏極は 1ms 程度まで保たれていることが示された。負の円偏光度は温度や磁場に依存し、磁場の増加、温度の上昇とともに緩和時間が短くなっていくのが明らかとなった。

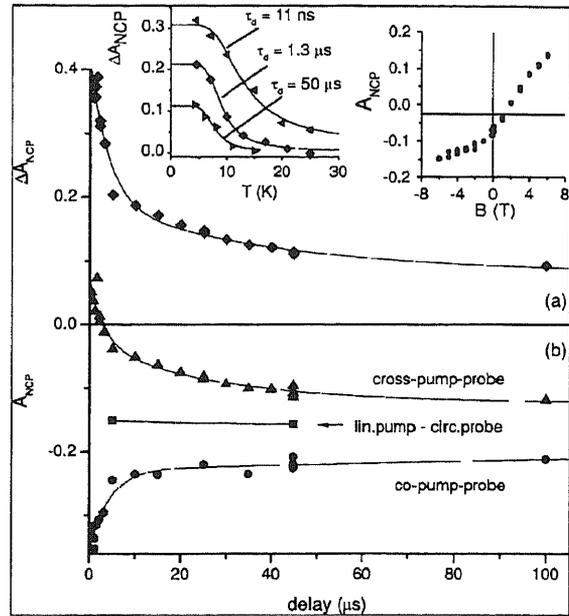


図7 電子がドーブされた InP 量子ドット中の発光の負の円偏光成分の時間依存性、温度依存性と磁場依存性

<InP 量子ドットにおける動的核スピン分極> (B. Pal, S. Verbin^{A,B}, 舛本泰章^A筑波大 VBL, ^BSt. Petersburg State Univ.)

動的核スピン分極が InP 量子ドットにおいて起こっていることを2個の電子と1個の正孔からなるトリオンの負の円偏光発光を縦磁場下で観測することで確認できる。動的核スピン分極がおこると、電子スピンの感じる有効外部磁場 B_{eff} は外部磁場 B と有効核磁場 B_N の和として $B_{eff} = B + B_N$ と表わされる。右(左)円偏光励起下でトリオンの発光の円偏光度を外部磁場 B の関数として測定すると、図 8(a) の様に $\pm B_N$ (励起強度 40 mW のとき ~ 4.5 mT) で負の円偏光度が鋭く減少する半値半幅 15 mT の Lorentz 型の磁場依存性が得られる。右(左)円偏光で負の円偏光度が最小になる外部磁場が $- (+)$ にシフトすることから、

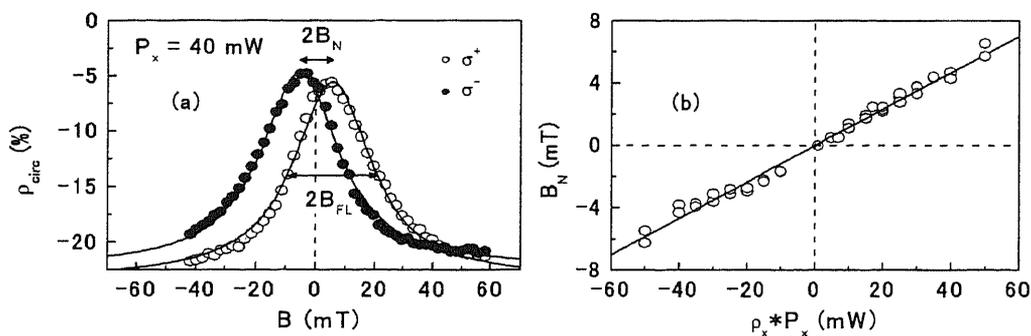


図8 核スピン分極の効果

有効核磁場 B_N を相殺する外部磁場のとき、すなわち有効外部磁場が 0 のとき、負の円偏光度が最小になり、核スピンのゆらぎによる核磁場が 15mT であるとして図 8(a) は理解できる。図 8(b) に示すように、光照射強度の増加に比例して有効核磁場 B_N は線形に増加し、比較的励起強度の強い 50mW でも、 $B_N \approx 6mT$ であることは、InP 量子ドットにおける超微細相互作用は比較的弱いことを示している。

<電子ドープ InP 量子ドット中の電子スピンのコヒーレンス時間> (小口修平、池沢道男、舛本泰章)

電子スピンのコヒーレンス時間は、ハンレ効果測定 (横磁場下における円偏光度の磁場依存性) により求めた。光弾性変調器を用い円偏光度を 0.1% の精度で測定できるシステムを構築し、電子がドープされた InP 量子ドットにおいて準共鳴励起のもと、ハンレ効果測定を行った。図 9a は、準共鳴励起における発光スペクトル (実線は I_+ 、破線は I_- を表す) と発光の円偏光度の検出波長依存性 (●印) を示す。InGaP バリア層での励起では量子ドットの発光ピークにおいて 3.8% と正の円偏光度を示すが準共鳴励起では励起エネルギーからストークスシフト 60 meV 付近でレーザーの偏光度に対し負の円偏光度 (NCP) を示す。また図 9b は、量子ドット発光ピーク波長におけるハンレ効果測定の結果を示す。ローレンツ型関数 $\rho(B) = \rho(0) / \{1 + (\omega_L T_2^*)^2\}$ (ラーモア周波数 $\omega_L = \mu_B g B / \hbar$ 、 T_2^* : スピン緩和時間、 g : ランデの g 因子) を用いて、2成分ローレンツ・フィッティングを行なった。ハンレ曲線の半値全幅より見積もって、速い成分では $gT_2^* = 190$ ps、弱磁場領域の遅い (鋭い) 成分では 2.1 ns と求まった。速い成分の起源はホールのスピン緩和又は電子 2 つと正孔 1 つから構成されるトリオンの発光寿命によるもの、また遅い成分はドープされた電子のスピン緩和によるものと考えられる。図 9c の電圧依存性はこの鋭い NCP の成分とトリオン量子ビートの振幅が同じバイアスで起きていることを示し、量子ドットが電子を 1 個ドープされると、鋭い NCP が現れ、それがドープされた電子のスピン緩和によるものと同定できる。InP 量子ドットの電子の g -因子は 1.5 なので、 $T_2^* = 1.4$ ns と導かれる。

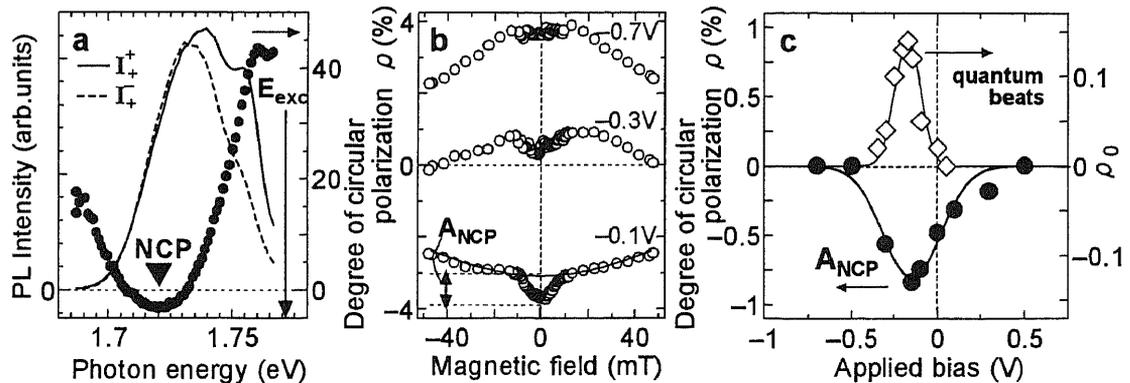


図9 チャージチューナブル InP 量子ドットの発光の負の円偏光度とハンレ効果

<超高分解能時間分解光誘起カー回転測定法の開発と単層量子ドット中のスピンドイナミクスの研究> (菅野敦史、舛本泰章) [論文 5,13]

単層量子ドット中の電子や正孔のスピンドイナミクスの研究を行うため、光弾性変調器、光ブリッジ型平衡フォトダイオードおよびロックイン増幅器を二段に直列に使うことにより、 5×10^3 度の角度分解能をもつ世界最高感度の時間分解カー回転測定系の建設に成功した。この測定系を単層の歪み誘起 GaAs 量子ドットにおいて、電子スピンのラーモア歳差運動が観測された。歳差運動周期から得られた g 因子 $|g| \approx 0.25$ は、すでに同一試料において報告のある発光量子ビート測定による結果と矛盾しない。また量子井戸におけるスピン緩和寿命よりも長い量子ドットのスピン緩和寿命が観測された。これは

D'yakonov-Perel機構の抑制によりスピン緩和が抑制されたと考えることが出来る。n-GaAs 基板に作成された自己組織化 InP 量子ドットを用いた測定においては、観測されたラーモア才差運動の同期から $|g| \sim 0.052$ という正孔によると考えられる振動成分の観測に成功した。研究成果は論文 5,13 として発表した。

<GaAsN 混晶のスピン依存発光> (V. Kalevich^A, B. Pal, 舛本泰章 ^A Joffe Physico-Technical Institute) [論文 18,19]

GaAs_{1-x}N_x 混晶は新しい近赤外域半導体材料として注目されている。N を 1%~3.4% 含む GaAs_{1-x}N_x 混晶には歪みが内在しており、これが重い正孔と軽い正孔のバンド分裂をおこしている。重い正孔と軽い正孔が電子と結合再発光するときの円偏光度発光スペクトルを調べることで重い正孔(正の円偏光度)と軽い正孔(負の円偏光度)の分離を明確にして、歪みを正しく評価した。

次に、N を 2.1~3.4% 含む GaAs_{1-x}N_x 混晶において、バンド端発光が励起光を円偏光から直線偏光に変えたり、横磁場を 300G 加えると 1/3 になる現象を観測した。図 10 は GaAs_{0.979}N_{0.021} 混晶の発光スペクトルである。1, 2, 3 はそれぞれ、(円偏光励起、無磁場)、(直線偏光励起、無磁場)、(円偏光励起、300G の横磁場) の励起下での発光スペクトルに対応する。白い丸は円偏光度スペクトルを示す。円偏光励起によるバンド間吸収は、電子スピンを偏極させポンピング強度を上げると偏極度は 35% にも達する。観測された現象は、混晶中の深い常磁性センターの偏極と伝導電子のスピんに依存したトラップにより説明され、電子のスピン緩和時間は 1ns になることがハンレ効果により示された。局在した電子のおそいスピン緩和時間がスピんに依存した GaAs_{1-x}N_x 混晶のバンド端発光を説明している。スピんに依存した近赤外域の発光は応用上重要な特性であり、応用が期待される。

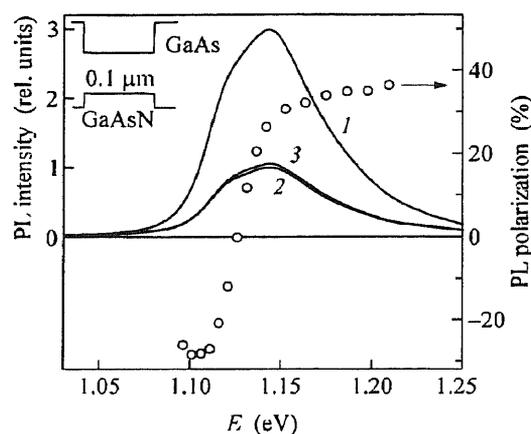


図 10 GaAs_{0.979}N_{0.021} 混晶の発光スペクトル

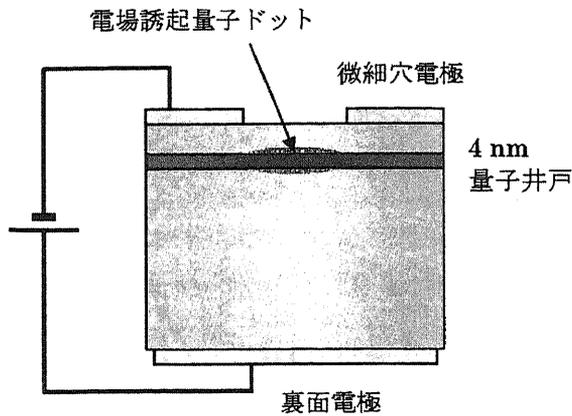
<半導体試料表面上のナノスケール構造電極の作製> (菅野敦史, 利行健, 舛本泰章)

新たに、電子をドーピングされた GaAs 量子井戸に微細加工された不均一電場をかけ面内方向に電子をドーピングされた GaAs 量子ドットを形成する電場誘起量子ドットの作製を試みた。量子井戸中の電子のスピン緩和時間が量子ドットに比べて短いことから、電圧バイアスによる量子ドット・量子井戸構造スイッチングによるスピンメモリー動作が期待される。微細構造電極の構造や量子井戸厚などの調整により長いスピン緩和時間を持つ電子スピンを探したり、スピン緩和機構を明らかにする研究を展開することが本研究の目的である。

試料は 40Å 厚の GaAs 単層量子井戸を用い、表面電極の微細加工を、産総研ナノプロセッシング施設 NPF の電子線描画装置、真空蒸着装置を用いて作製した。

試料表面にはナノスケールの穴を開けた電極を作製する。また穴は三角格子状に並べホールアレイとし、表面電極と試料裏面の電極に電圧バイアスを印可することにより、量子井戸活性層内に電場ポテンシャルを誘起する。成長軸方向の量子井戸による閉じこめと、面内方向の電場ポテンシャルによる閉じこめを組み合わせることにより、表面電極の穴の直下部に疑似量子ドットを誘起する(図 11)。

微細パターン描画を電子線描画装置で行い、表面電極 Ti/Au を真空蒸着装置で成膜した後、リフトオフ作業により微細構造電極を作製した(図 12)。直径 240nm の穴が 1μm 間隔の三角格子状に並んでいることがわかり、ほぼ仕様通りの電極作製が可能であることがわかった。



の模式図

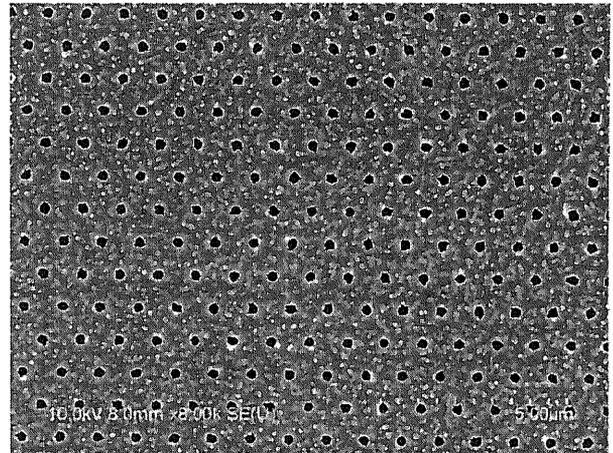


図 12 表面微細穴電極の電子顕微鏡写真

本研究の一部は、文部科学省のナノテクノロジー総合支援プロジェクトの支援を受けて、(独) 産業技術総合研究所ナノプロセッシング施設において実施された。

【3】単一量子ドットの分光研究

<等電子トラップによる単一光子源の研究> (池沢道男、佐久間芳樹^A、舛本泰章^A 物質材料研究機構)

研究の目的は、III-V 族半導体にドーパした光学活性な等電子トラップ不純物を究極の量子ドットと見なして、1 個の不純物原子あるいは不純物原子ペアに束縛された励起子に着目し、これら単一の不純物準位からの自然放光を単一光子発生に利用する可能性を明らかにする事である。特に窒素原子による等電子トラップに着目した研究を行っている。母結晶としてリン化ガリウム (GaP) を用いて、窒素 (N) を希薄にドーパした試料を作製する事から始めた。GaP:N では P 原子のごく一部を周期律表の同じ族で等電子配置を持つ N が置換する事によって、その周りに電子が捕獲されるような束縛ポテンシャルが形成される (等電子トラップ)。束縛された電子が正孔にクーロン力を及ぼして励起子の束縛状態が形成され、高効率の発光を示す。

GaP:N の結晶成長は減圧 MOCVD 法を用いて行った。N の添加量で発光スペクトルがどのように変わるかを調べることを目的に、成長中の窒素原料ガスの流量を変えて試料を作製した。図 13 中に点線で示すように、GaP は間接遷移であるので N を添加していないエピ層は殆ど光らない。(a) は N 不純物を多く含む試料の発光スペクトルで、等電子トラップによる高効率のブロードな緑色の発光が観測される。(b) は窒素原料ガスの流量を 30 分の 1 に減らした時の発光スペクトルを示す。このように希薄な N 添加の場合には鋭い発光線が見られる。これらの輝線は、再近接窒素原子ペアが作る束縛準位 NN_1 と、少し離れたペアが作る束縛準位 NN_3 による等電子トラップ発光、及びそれらのフォノンレプリカと考えられる。NN 対間の距離が短いほど強く励起子を束縛するので NN_1 の方が低エネルギー側に位置している。これらを一つだけ

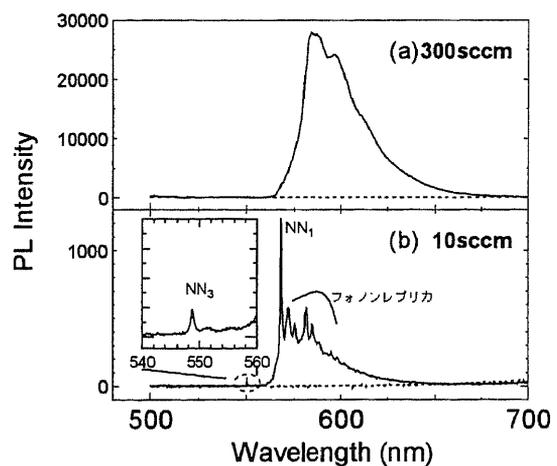


図 13 窒素ドーパ量の異なる GaP:N の 77K における発光スペクトル

取り出すことが出来れば、単一光子源として利用出来る可能性があり、研究の次のステップとしては、単一の不純物トラップ発光について、後述する光子相関測定を行う事である。現段階では多数のトラップからの発光を観測しているにもかかわらず、このように非常にシャープで離散的な発光スペクトルを示す事は、発光エネルギーの不均一広がり避けにくい通常の量子ドットと比べた時に、例えば特定の波長を持つ単一光子源への応用などにおいて有利な点と言える。現在の試料は、窒素原子を一様にドーピングしているが、単一不純物準位の発光観測のために一原子層のみに不純物ドーピングを行う事を目指す。

単一等電子トラップからの発光が単一光子源として利用出来るかどうかを評価するためには、放射される光子の統計性を測定し、アンチバンチング的な振る舞いを確認する事が必要である。そのため、微小領域から放射される光子の強度干渉を測定出来るような光子相関測定システムを構築した(図14)。装置は、クライオスタット、顕微鏡、分光器、ハンブリーブラウン=トウイス型の強度干渉計によって構成される。単一光子の検出器としては、電子冷却型のアバランシェフォトダイオード(APD)を内蔵したシングルフォトンカウンティングモジュールを用いている。単一不純物に適用する前に、システムを評価するためにこれまでに単一光子発生の報告がある半導体量子ドット

(InP QDs)を用いて、検出系の調整および評価を行っている。10Kにおいて、弱励起の条件下で図14下のようなアンチバンチング的信号が観測されたが、時間原点でのディップの深さに理想値からのズレがあり、現在高効率化に向けて改良中である。

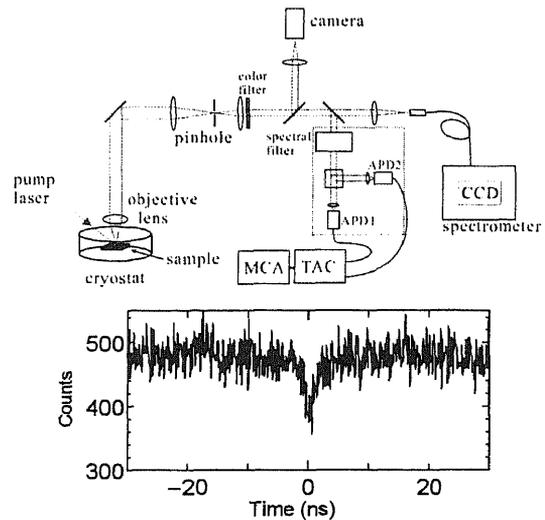


図14 上：単一不純物準位からの発光観測および光子相関測定のためのセットアップ。下：InP量子ドットを用いた光子相関測定結果。

<InP 単一量子ドットの励起子・励起子分子の光学異方性> (阪東一毅, 烏山陽子, 舛本泰章) [論文3]

自己形成したInP量子ドットはサイズの不均一性を持ち、多数の量子ドットからのマクロな光学スペクトル測定では、個々の量子ドットが持つ微細なエネルギー構造を測定することはできない。InAs量子ドットでは、単一量子ドット分光で得られる偏光依存性が $[110]$, $[1\bar{1}0]$ 方向にあるのに対し、InP量子ドットでは母体であるGaInPのオーダーを反映して個々に偏光方向が異なることが報告されている。InP単一量子ドットの個々の特徴をとらえ光学異方性を調べるため、単一量子ドットにおける光学スペクトル測定を行った。

図15は10KにおけるInP単一量子ドットの励起子・励起子分子の発光強度の偏光依存性を極座標プロットしたものである。励起子と励起子分子が同じ偏光依存性を示した。偏光方向が $[110]$, $[1\bar{1}0]$ 方向とはずれているのが分かる。

図16は図15における発光強度が(a)最大(124°), (b)最小(34°)となる偏光方向に対する発光スペクトルを示している。白丸は測定結果、実線はローレンツ関数によるフィットの結果を示す。最大の時は最小の時に比べ、励起子分子の発光ピーク(XX)は低エネルギー側へ、励起子の発光ピーク(X)は高エネルギー側へシフトしている様子が分かる。これは励起子中の電子と正孔間の交換相互作用により励起子のエネルギー準位が分裂し、そのエネルギー準位のうち、 124° (34°)の時高い(低い)準位の励起子が発光する一方、励起子分子は高い(低い)励起子を残して発光することに起因している。

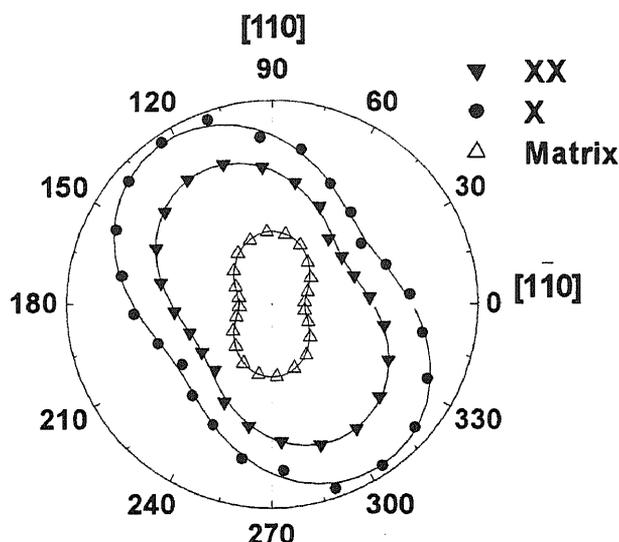


図 15 InP 単一量子ドットの励起子・励起子分子発光強度の偏光角依存性

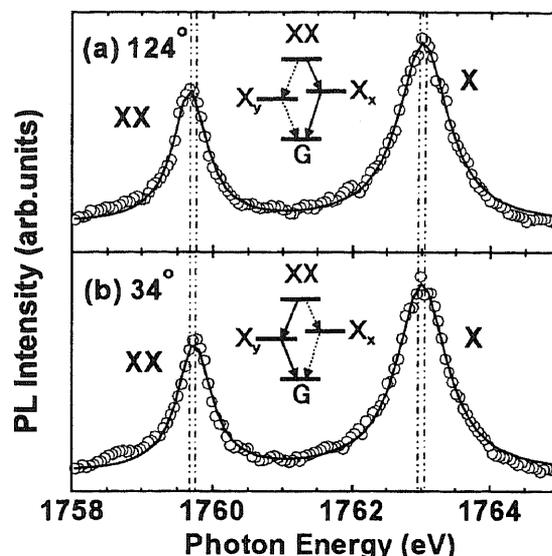


図 16 InP 単一量子ドットの発光スペクトル偏光依存性

【4】新しいナノ構造の探求 (阪東一毅、安坂幸師、舛本泰章)

〈(チオフェン/フェニレン) コオリゴマー結晶の励起子光学遷移〉 (阪東一毅, 中村俊輝, 藤原聖士, 舛本泰章, 小林俊介^A, 佐々木史雄^A, 堀田収^B, 産総研光技術^A, 京工繊大繊維^B) [論文 20]

π 電子共役系化合物は有機電界発光(EL)素子などの発光デバイスへの応用や、その優れた電気的特性より有機薄膜 FET への応用が期待されている。特に (チオフェン/フェニレン) コオリゴマー [2,5-Bis(4-biphenyl)oligothiophenes (BPnT)] 結晶は室温において非常に高い発光量子効率を有するうえ、光強励起下で自然放射増幅光(ASE)を発生することが報告されており、有機半導体レーザーなどへの応用が期待される。しかし、それらの詳細な基礎光学遷移についてはほとんど理解されていない。

BPnT($n=1-4$)単結晶はそれぞれほぼ同じ分子振動モードを持っているため、発光及び吸収スペクトルにそれらの結合モードが生じ、ほぼ同じエネルギー間隔で光学遷移のピークが現れることが確認されてきた。しかし、振動モードを介さない0-0遷移に関しては $n=2-4$ のBPnT結晶では明瞭な吸収ピークが観測されていたが、BP1T結晶のみ発光、吸収ともに0-0遷移に対応するピークが観測できなかった。結晶構造中での分子配列の様子から、この振る舞いは各分子の遷移双極子モーメントの向きが電子的に結合している隣接分子の遷移双極子モーメントの向きとの間の関係によることがわかった。BP1T結晶では各分子の遷移双極子モーメントの向きがほぼ平行に配列しているため、H 会合のよ

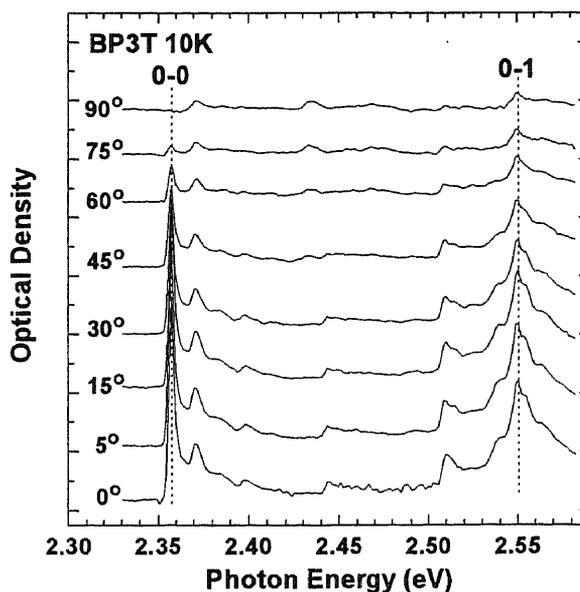


図 17 BP3T 結晶の吸収スペクトルの偏光依存性

うな光学遷移の振る舞いを示し、禁制遷移となるためであると考えられる。また、これらの結晶で 0-0 遷移ピーク付近における吸収スペクトルの偏光依存性を調べたところ、明らかな異方性が見られた。図 17 は BP3T 結晶の吸収スペクトルで、ab 面内における b 軸方向からの偏光角度依存性を示したものである。0-0, 0-1 遷移ともに b 軸方向に強く偏光していることがわかる。これは各分子がお互い平行な配列方向からわずかに傾いており、結晶 b 軸方向には遷移双極子モーメントの位相が合うため光学遷移が生じると解釈できる。このような偏光異方性は BP2T 結晶でも同様に見られるため、BPnT 結晶(n=1-4)の光学遷移の振る舞いは結晶構造中の分子間の遷移双極子モーメントの向きに大きく支配されていることがわかる。

また、真空蒸着とレーザーアニールによる薄膜 BP1T 結晶の作成を行い誘導発光の観測に成功している。

<カーボンナノカプセルのその場電子顕微鏡観察> (安坂幸師)

C₆₀分子からなる結晶性繊維物質(C₆₀ ナノウィスカー)を 1373 K での 30 分間真空中熱処理すると、C₆₀ ナノウィスカーは非晶質カーボンに変化し、その電気抵抗率は 10⁵ Ω・cm から 0.04 Ω・cm まで低下する。非晶質カーボンナノウィスカーの両端に電圧を印加し、電流を測定すると同時に、その構造の変化をその場観察した。

高分解能透過電子顕微鏡の試料室に、走査プローブ顕微鏡の機能を備えた複合型顕微鏡を用いた。この顕微鏡内で、原子間力顕微鏡用カンチレバーチップを、非晶質カーボンナノウィスカーに接触させて、電圧を印加した。このときのナノウィスカーの構造変化を TV カメラと VTR を用いて動的に観察し、像の観察時間と同期させて電圧および電流の変化を記録した。

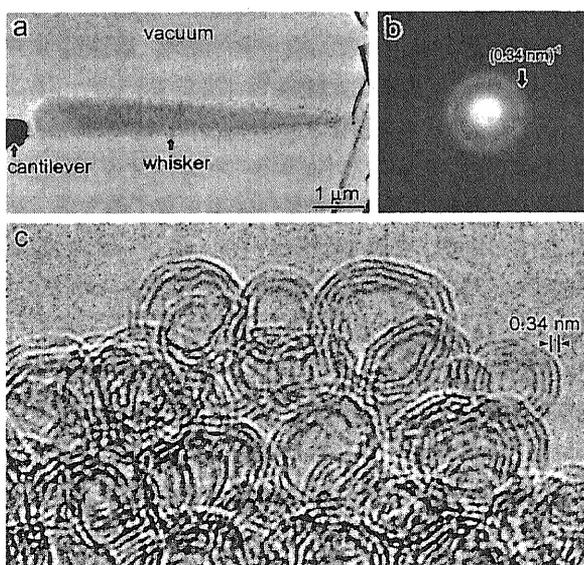


図 18 通電後、破断したナノウィスカーの(a) 電子顕微鏡像、(b) 電子回折図形、(c) 高分解能電子顕微鏡像

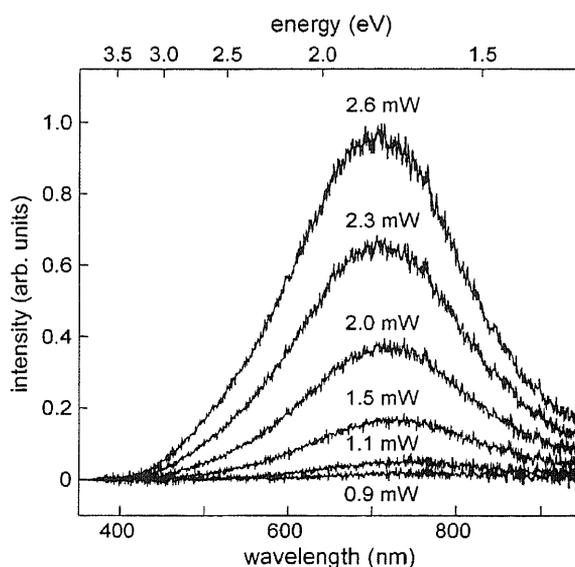


図 19 多層カーボンナノカプセルの発光スペクトル

直径 1.0 μm、長さ 9.3 μm の非晶質カーボンナノウィスカーに電圧を印加すると、電流は 0 から 3.5 V まで単調に増加した。このときの電気抵抗率は 10 kΩ・cm であった。4 V 印加したところで、電流は急激に増加し、その後 4.5 V で破断した。図 18(a)と 18(b)に、それぞれ破断後に観察したナノウィスカーの電子顕微鏡像と電子回折図形を示す。図 18(a)の左側の黒い領域は、カンチレバーの先端であり、ナノウィスカーの一端と接触している。ナノウィスカーのもう一端は細くなり、破断している。図 18(b)の電子回折図形から、ナノウィスカーの一部がグラファイト化したことがわかる。図 18(c)に、図 18(a)のナノウィ

スカー表面を観察した高分解能電子顕微鏡像を示す。ナノウイスカーは、非晶質カーボンから直径数 nm の中空状多層カーボンナノカプセルの集合体に変化している。4 V 付近での電流の急激な増加は、このナノウイスカーの構造変化と対応している。さらに、このカーボンナノカプセル集合体に通電すると、発光した。様々な電力に対する発光スペクトルの変化(図 19)から、発光ピークが 1.7 eV 付近に現れることが明らかになった。

【5】磁場中空間分解分光システムの開発 (野村晋太郎)

<中赤外顕微分光システムの開発> (津村公平、小野絢哉、野村晋太郎)

InAs 等の化合物半導体がスピン軌道相互作用の大きい材料として注目を集めている。これらの化合物半導体を用いたナノメートル構造の磁気光学特性の評価のために中赤外線領域 (現状では $\lambda \sim 2\mu\text{m}$ 、将来的には $\lambda \sim 8\mu\text{m}$) での磁場中顕微分光システムを開発した。仕様は、空間分解能 1~2 μm 、最大印加磁場 5 T、試料温度 4 K である。試料はステップモーター制御の XY ステージ上に設置して、コンピュータ制御により走査することを可能とした。

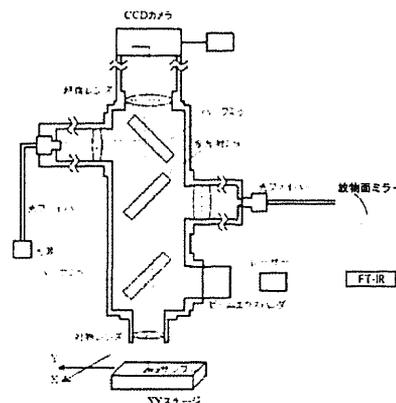


図 20 ヘリウム4温度磁場中顕微中赤外分光システムの概略図。

<ヘリウム3温度近接場光学顕微鏡の開発> (伊藤宙陸、野村晋太郎、大塚洋一^A ^A物理学専攻)

極低温強磁場下において近接場光学顕微鏡を用いて空間分解分光測定をするための装置の開発を開始した。仕様は、試料温度 300 mK、最大印加磁場 5 T、空間分解能 100 nm を目標としている。本装置を用いて極低温下の配列半導体ナノ構造試料の電子密度分布、スピン密度分布を測定する予定である。平成 17 年度は装置の設計を行い、装置の AFM としての動作の確認と関連する光弾性変調器の製作を行った。

【6】半導体ナノメートル構造の光物性 (野村晋太郎)

<ゲート付き非ドープ量子井戸構造における有効質量の電子密度依存性> (野村晋太郎、高柳英明^A、平山祥郎^B ^A NTT 物性科学基礎研究所・現東京理科大学、^BNTT 物性科学基礎研究所) [国際会議 15]

バックゲート付き非ドープ量子井戸試料はドーパントイオンによる散乱がないため電子移動度を高く保ちつつ極低電子密度領域から電子密度を制御可能であり、低電子密度領域での二次元電子系の物性を調べるために適した特徴をもつ試料である。二次元電子系において、電子密度が低くなるに従いスピン感受率や有効質量に異常が起こりうる事が理論的に示されてきた。本研究では有効質量の電子密度依存性に着目した。

シュブニコフ・ドハース(SdH)振動の温度依存

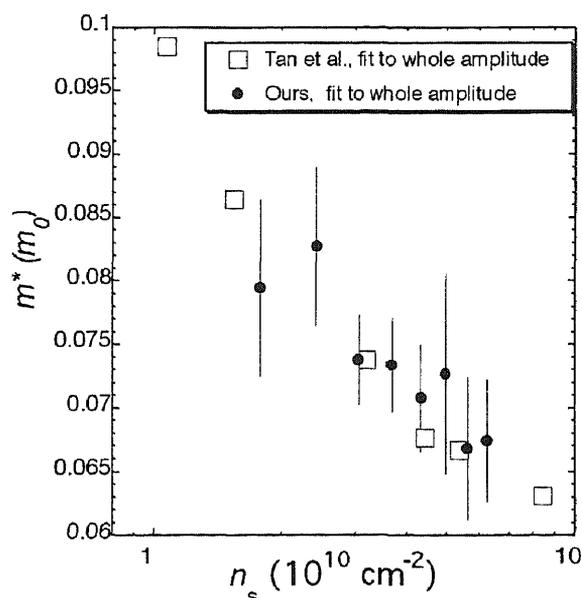


図 21 SdH 振動により求めた電子有効質量(黒丸)および、文献値[Y.-W. Tan *et al.*, Phys. Rev. Lett. 94, 016405] (四角)。

性を基本振動成分へフィットすることにより求めた電子有効質量の二次元電子密度依存性の結果と Tan 等による文献値を図 21 に示す。低電子密度領域での有効質量がバンド有効質量から増大することが観測された。さらに、発光エネルギーの磁場依存性から、電子-正孔換算質量と電子有効質量の電子密度依存性を求めた。この方法でも低電子密度領域で有効質量の増大が観測された。これらの増大は電子間相互作用に起因するものであると考えられる。

<ゲート付き非ドープ量子井戸構造における分数量子効果の観測> (野村晋太郎、高柳英明^A、平山祥郎^B
^ANTT 物性科学基礎研究所・現東京理科大学、^BNTT 物性科学基礎研究所) [論文 28, 国際会議 7-9]

バックゲート付き非ドープ量子井戸試料を用いて、磁場下で発光スペクトルの電子密度依存性を測定することにより、分数占有率において発光ピークエネルギーに異常が見られることを示した。分数量子ホール効果が 5 T と比較的低磁場において観測されたことは、我々の試料が低電子密度領域でも十分高い電子移動度を持っている証である。この結果はこの新たに観測されたピークが分数電荷荷電励起子であることを示唆している。

<超伝導-半導体接合への光照射効果> (津村公平、野村晋太郎、高柳英明^A、赤崎達志^B ^ANTT 物性科学基礎研究所・現東京理科大学、^BNTT 物性科学基礎研究所)

超伝導(S)-金属(N)接合界面において N として高品質な二次元電子系を用いた場合、二つの S-N 接合界面で繰り返す多重アンドレーフ反射により準調和エネルギーギャップ構造が観測されることが知られている。この準調和エネルギーギャップ構造に対する光照射効果を観測した。図 22 に示すように、照射レーザー強度に依存して準調和エネルギーギャップ構造が不鮮明になっていくことが示された。

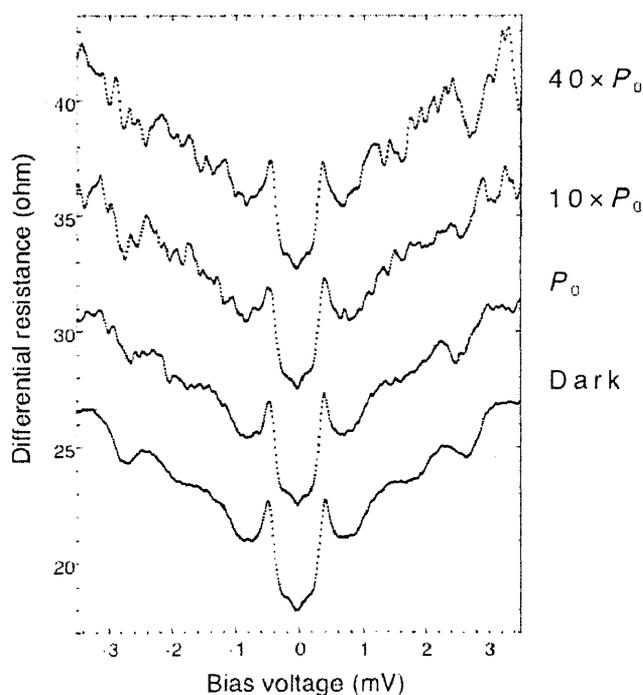


図 22 超伝導-半導体接合試料の dV/dI - V 特性の照射レーザー強度依存性。

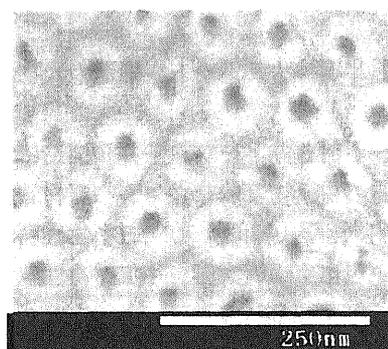


図 23 押圧法により作製されたナノリングアレーの走査電子顕微鏡像。

<押圧法によるナノリングアレーの作製> (伊藤宙陸、野村晋太郎) [論文 30]

ポーラス構造の鋳型基板表面の微細孔に微粒子材料を「押圧」という新たに開発した手法を用い

て、サイズ、配置のそろったナノ微粒子の作製を行ってきた。ナノ粒子が形成される条件に化学的な制約が入ってこないために適用できる材料のバリエーションが多く、幅広い分野に応用が期待される。新たにこの手法を用いて、ナノリングアレーを1プロセスで生成することに成功した。図23、押圧法により作製されたナノリングアレーの走査電子顕微鏡像を示す。本研究により、「押圧法」も用いた微細加工の制御性の高さが示された。

<InAs 量子チューブ中電子—正孔系のアハロノフ-ボーム効果> (津村公平、野村晋太郎、福井孝志^A
^A北海道大学)

InAs 量子チューブは半径数 10nm の InP コアの側面に InAs 量子井戸を形成した特異な形状をもつ。コアを貫く磁束に依存した量子干渉効果により磁場に対して振動的な光学応答をすることが期待され、注目を集めている。この試料に対して、顕微磁気中赤外発光測定を行った。その結果、発光ピークが量子チューブを貫く磁束量子の本数に依存した振動的なエネルギーシフトを示すことを見いだした。これは、量子チューブ中の電子—正孔系のアハロノフ-ボーム効果を観測したものと考えられる。

【7】チェビシェフ展開法を用いた電子状態オーダー N 計算法の開発 (野村晋太郎、飯高敏晃^A ^A理化学研究所)

チェビシェフ展開法に基づく電子状態計算法は、量子系のある物理量を計算するにあたって固有状態を求めることなく計算することを可能とする手法である。計算量が系の大きさ N に比例するため大規模な量子系で特に優位となる。これまでに我々は Si 原子数約 3 万個の一電子状態計算が可能であることを示してきた。この手法を局所密度汎関数法に基づく計算に拡張し、一例として、 n 型量子ドットの電子状態を計算した。その結果、チェビシェフ展開法に基づく我々の手法が局所密度汎関数法に適用可能であることが示された。

【8】負の屈折率を持つ物質で結合した光導波路中の光伝搬特性 (山本貴一、野村晋太郎)

周波数分散をもつ比誘電率と比透磁率を有し、特定周波数領域の光に対しそれらの値が(有効媒質近似の範囲で)同時に負になる、いわゆる「負の屈折率を持つ物質(NIM)」と呼ばれる人工規則構造物を用いて有用な光学的性質を開拓しようと試みている。NIM を用いて光導波路を作成した場合に導波路中の光モードの群速度を 0 にできる可能性があることが理論的に示唆されている。この性質を用いた光閉じ込め、あるいは光モードの群速度制御を念頭に置いた実験を行う指針を得るべく数値計算シミュレーションを行っている。

まず、誘電体/NIM/誘電体という構造のスラブ型導波路中の光パルス伝搬の様子を FDTD 計算により求めた。その光モードの電場振幅の時間依存性を図 24 に示す。図横軸 0.025m に対応する箇所が光パルスを与えた箇所に相当する。1.2 ナノ秒後も光電場振幅のピーク位置は光パルスで励振直後とほとんど変わっていないことから実際に NIM を用いた光導波路中で光モードの群速度を 0 近くにすることができることを数値計算上は確認できたと考えている。この光モ

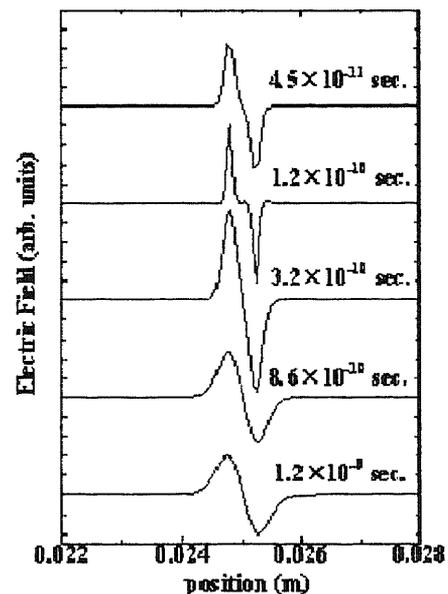


図 24: NIM を用いた光導波路中の光モード電場振幅の時間依存性

一ドの群速度は、比誘電率と比透磁率の緩和周波数に大きく依存する。図 25 に、導波路内光モードの群速度 (v_g) の比誘電率と比透磁率の緩和周波数(それぞれ γ, Γ) 依存性を示す。緩和周波数の値が大きくなるにつれて 0 に近かったモードの群速度が有限の値を持つようになると同時にさらに大きな群速度を持つモードが出現するようになることが分かる。

今後は、NIM 中での光モードエネルギーの散逸の克服法に重点をおいて、より実験配置に近い形で NIM を用いた光閉じ込め、光モードの群速度制御の可能性などに検討を加える予定である。

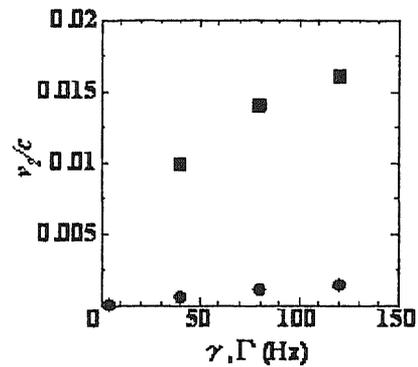


図 25 : NIM を用いた光導波路内光モードの群速度(真空中の光速 c で規格化)の比誘電率と比透磁率の緩和周波数依存性

<論文>

1. V.K. Kalevich, I.A. Merkulov, A.Yu. Shiryayev, L.V. Kavokin, M. Ikezawa, T. Okuno, P.N. Brunkov, A.E. Zhukov, V.M. Ustinov and Y. Masumoto: "Optical spin polarization and exchange interaction in doubly charged InAs self-assembled quantum dots", Phys. Rev. B **72**, 045325 (2005).
2. A.V. Maleev, U.V. Ignatiev, I.Y. Gerlovin, I.E. Kozin and Y. Masumoto: "Temperature behavior of hot carrier dynamics in InP quantum dots", Phys. Rev. B **71**, 195323 (2005).
3. Y. Masumoto, K. Mizuochi, K. Bando and Y. Karasuyama: "Optical anisotropy of excitons and biexcitons in InP quantum dots", To be published in J. Lumin.; Int. Conf. on Luminescence and Optical Spectroscopy of Condensed Matter (ICL'05) (Beijing, 2005).
4. M. Ikezawa, S.V. Nair, F. Suto, Y. Masumoto, C. Uchiyama, M. Aihara and H. Ruda: "Photon echo study of excitons and excitonic complexes in self-assembled quantum dots", To be published in J. Lumin.; Int. Conf. on Luminescence and Optical Spectroscopy of Condensed Matter (ICL'05) (Beijing, 2005).//INVITED PAPER//
5. A. Kanno and Y. Masumoto: "Highly sensitive time-resolved Kerr rotation measurements on single-layer quantum dots", J. Lumin. **119-120**, 178 (2006); 15th Int. Conf. on Dynamical Processes in Excited States of Solids (DPC'05), (Shanghai, 2005).
6. Y. Masumoto, F. Suto, M. Ikezawa, C. Uchiyama and M. Aihara: "Non-Markovian tunneling induced dephasing in InP quantum dots", J. Phys. Soc. Jpn. **74**(11), 2933-2936 (2005).
7. M. Ikezawa, J. Zhao, A. Kanno, and Y. Masumoto: "Confined Acoustic Vibration Modes in CuBr Quantum Dots", J. Phys. Soc. Jpn. **74**(11), 3082-3087 (2005).
8. P.-F. Braun, X. Marie, L. Lombez, B. Urbaszek, T. Amand, P. Renucci, V.K. Kalevich, K. V. Kavokin, O. Krebs, P. Voisin and Y. Masumoto: "Direct observation of the electron spin dephasing induced by nuclei in InAs/GaAs quantum dots", Proc. Ioffe Institute 13th Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology", p.45 (St. Petersburg, 2005).
9. I.V. Ignatiev, I.Ya. Gerlovin, S.Yu. Verbin, W. Manuyama and Y. Masumoto: "Effect of nuclear spins on the electron spin dynamics in negatively charged InP quantum dots", Proc. Ioffe Institute 13th Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology", p.47 (St. Petersburg, 2005).
10. I.Ya. Gerlovin, I.V. Ignatiev, B. Pal, S.Yu. Verbin and Y. Masumoto: "Spin relaxation in magnetic field for InP quantum dots", Proc. Ioffe Institute 13th Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology", p.63 (St. Petersburg, 2005).
11. M. Ikezawa, B. Pal, Y. Masumoto, I.V. Ignatiev, S.Yu. Verbin and I.Ya. Gerlovin: "Submillisecond electron spin

- relaxation in InP quantum dots”, *Phys. Rev. B* 72, 153302 (2005).
12. M. Ikezawa, F. Suto, Y. Masumoto and H.-W. Ren: "Detection of four-wave mixing signal from single layer quantum dots", in "Ultrafast Phenomena XIV" ed. T. Kobayashi, T. Okada, T. Kobayashi, K.A. Nelson and S. De Silvestri (Springer 2005) p.301-p.303; Proc. 14th Int. Conf. on Ultrafast Phenomena, (Niigata, 2004).
 13. A. Kanno and Y. Masumoto: "Spin relaxation mechanism of strain-induced GaAs quantum dots studied by time-resolved Kerr rotation", *Phys. Rev. B* 73, 073309 (2006).
 14. M. Ikezawa, S.V. Nair, H.-W. Ren, Y. Masumoto and H. Ruda: "Biexciton binding energy in parabolic GaAs quantum dots", *Phys. Rev. B* 73, 125321 (2006).
 15. B. Pal, M. Ikezawa, Y. Masumoto and I.V. Ignatiev: "Millisecond-range electron spin memory in singly-charged InP quantum dots", *J. Phys. Soc. Jpn.* 75, 054702 (2006).
 16. T. Okuno, Y. Masumoto, A. Higuchi, H. Yoshino, H. Bando and H. Okamoto: "Absorption Saturation Energy Density of InGaAs-InAlAs Multiple Quantum Well under Tensile and Compressive Strain", *Jpn. J. Appl. Phys.* 44, L558 (2005).
 17. H. Bando, M. Kosuge, K. Ban, H. Yoshino, R. Takahashi, H. Okamoto, T. Okuno and Y. Masumoto: "Crosshatch observation in MBE-grown Be-doped InGaAs epilayer on InP", *J. Cryst. Growth* 278, 610 (2005).
 18. A.Yu. Egorov, V.K. Kalevich, M.M. Afanasiev, A.Yu. Shiryayev, V.M. Ustinov, M. Ikezawa and Y. Masumoto: "Determination of strain-induced valence-band splitting in GaAsN thin films from circularly polarized photoluminescence", *J. Appl. Phys.* 98, 013539 (2005).
 19. V.K. Kalevich, E.L. Ivchenko, M.M. Afanasiev, A.Yu. Egorov, A.Yu. Shiryayev, V.M. Ustinov, B. Pal and Y. Masumoto: "Spin-dependent recombination in GaAsN alloys", *JETP Letters*, 82, 455 (2005).
 20. K. Bando, T. Nakamura, Y. Masumoto, F. Sasaki, S. Kobayashi and S. Hotta: "Origin of the amplified spontaneous emission from thiophene/phenylene co-oligomer single crystals: Towards co-oligomer lasers", *J. Appl. Phys.* 99, 013518 (2006).
 21. K. Matsuda, T. Saiki, S. Nomura, and Y. Aoyagi, "Local density of states mapping of a field-induced quantum dot by near-field photoluminescence microscopy", *Appl. Phys. Lett.* 87, (4) 043112 (2005).
 22. M. Yamaguchi, S. Nomura, D. Sato, T. Akazaki, H. Tamura, H. Takayanagi, "Photoluminescence measurements in Be- δ -doped back-gated quantum well", *Surf. Science*, 583, (1) 94-99 (2005).
 23. S. Nomura, "Detecting spin polarization of electrons in quantum dot edge channels by photoluminescence", in "Realizing Controllable Quantum States", eds. H. Takayanagi and J. Nitta, (World Scientific Publishing, New Jersey, 2005) pp. 457.
 24. S. Nomura, M. Yamaguchi, D. Sato, T. Akazaki, H. Tamura, H. Takayanagi, T. Saku, and Y. Hirayama, "Negatively charged excitons in a back-gated undoped heterostructure", *Physics of Semiconductors*, Ed. J. Menendez, and C.G Van de Walle, (American Institute of Physics, New York, 2005) pp. 1162.
 25. S. Nomura and Y. Aoyagi, "Optical detection of spin polarization of electrons in quantum dot edge channels", *Physics of Semiconductors*, Ed. J. Menendez, and C.G Van de Walle, (American Institute of Physics, New York, 2005) pp. 571.
 26. M. Yamaguchi, S. Nomura, D. Sato, T. Akazaki, H. Tamura, and H. Takayanagi, "Magneto-optics in Be- δ -doped GaAs quantum wells with a back gate", *Physics of Semiconductors*, Ed. J. Menendez, and C.G Van de Walle, (American Institute of Physics, New York, 2005) pp. 397.
 27. H. Tamura, M. Yamaguchi, S. Nomura, T. Akazaki, H. Takayanagi, P. Mohan, J. Motohisa, T. Fukui, "Magneto-optical properties of electron-hole states in GaAs quantum wires", *Journal of Physics*, (in press).
 28. S. Nomura, M. Yamaguchi, T. Akazaki, H. Tamura, H. Takayanagi, and Y. Hirayama, "Electron-hole states in the fractional quantum Hall regime probed by photoluminescence", *Physica E* (in press).
 29. K. Tsumura, S. Nomura, T. Akazaki, and J. Nitta, "Infrared magneto-photoluminescence spectra and

- electron-hole g -factor of an InAs-inserted-channel InGaAs/InAlAs heterostructure", *Physica E* (in press).
30. H. Ito and S. Nomura, "Fabrication of highly ordered arrays of nanoparticles by mechanical process", *Nano Lett.*, (submitted).

<国際会議>

1. Y. Masumoto, K. Mizuochi, K. Bando and Y. Karasuyama: "Optical anisotropy of excitons and biexcitons in InP quantum dots", To be published in *J. Lumin.*; Int. Conf. on Luminescence and Optical Spectroscopy of Condensed Matter (ICL'05) (Beijing, 2005).
2. M. Ikezawa, S.V. Nair, F. Suto, Y. Masumoto, C. Uchiyama, M. Aihara and H. Ruda: "Photon echo study of excitons and excitonic complexes in self-assembled quantum dots", To be published in *J. Lumin.*; Int. Conf. on Luminescence and Optical Spectroscopy of Condensed Matter (ICL'05) (Beijing, 2005).//INVITED PAPER//
3. A. Kanno and Y. Masumoto: "Highly sensitive time-resolved Kerr rotation measurements on single-layer quantum dots", To be published in *J. Lumin.*; 15th Int. Conf. on Dynamical Processes in Excited States of Solids (DPC'05), (Shanghai, 2005).
4. P.-F. Braun, X. Marie, L. Lombez, B. Urbaszek, T. Amand, P. Renucci, V.K. Kalevich, K.V. Kavokin, O. Krebs, P. Voisin and Y. Masumoto: "Direct observation of the electron spin dephasing induced by nuclei in InAs/GaAs quantum dots", Proc. Ioffe Institute 13th Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology", p.45 (St. Petersburg, 2005).
5. I.V. Ignatiev, I.Ya. Gerlovin, S.Yu. Verbin, W. Maruyama and Y. Masumoto: "Effect of nuclear spins on the electron spin dynamics in negatively charged InP quantum dots", Proc. Ioffe Institute 13th Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology", p.47 (St. Petersburg, 2005).
6. I.Ya. Gerlovin, I.V. Ignatiev, B. Pal, S.Yu. Verbin and Y. Masumoto: "Spin relaxation in magnetic field for InP quantum dots", Proc. Ioffe Institute 13th Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology", p.63 (St. Petersburg, 2005).
7. S. Nomura, M. Yamaguchi, T. Akazaki, H. Tamura, H. Takayanagi, Y. Hirayama, "Electron-hole complexes in a back-gated quantum well in the fractional quantum Hall regime", 351. WE-Heraeus-Seminar, "Electron-Exciton Interactions in Semiconductor Nanostructures" (29 May - 1 June 2005, Bad Honnef) (invited).
8. M. Yamaguchi, S. Nomura, T. Akazaki, H. Tamura, H. Takayanagi, Y. Hirayama, "Charged excitons in a back-gated undoped quantum well in the integer and the fractional quantum-Hall regimes", IQEC/Pacific Rim 2005 (11 - 15 July. 2005, Tokyo).
9. S. Nomura, M. Yamaguchi, T. Akazaki, H. Tamura, H. Takayanagi, Y. Hirayama, "Electron-hole states in the fractional quantum Hall regime probed by photoluminescence", The 15th International Conference on the Electronic Properties of Two-Dimensional Systems, (11 July ~ 15 July 2005, Albuquerque).
10. K. Tsumura, S. Nomura, T. Akazaki, and J. Nitta, Infrared magneto-photoluminescence spectra and electron-hole g -factor of InAs-inserted-channel InGaAs/InAlAs heterostructure", The 15th International Conference on the Electronic Properties of Two-Dimensional Systems, (11 July ~ 15 July 2005, Albuquerque).
11. M. Yamaguchi, S. Nomura, K. Miyakoshi, T. Akazaki, H. Tamura, H. Takayanagi, "Electric-field control of electron-hole wave functions in a wide quantum well", The 15th International Conference on the Electronic Properties of Two-Dimensional Systems, (11 July ~ 15 July 2005, Albuquerque)
12. M. Yamaguchi, S. Nomura, T. Akazaki, H. Tamura, H. Takayanagi, P. Mohan, J. Motohisa, and T. Fukui, "Magneto-optics of GaAs quantum wire lattices grown by selective-area MOVPE", The 15th International Conference on the Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (11 July ~ 15 July 2005, Albuquerque)
13. H. Tamura, M. Yamaguchi, S. Nomura, T. Akazaki, H. Takayanagi, P. Mohan, J. Motohisa, T. Fukui,

"Magneto-optical properties of electron-hole states in GaAs quantum wires", Seventh International Conference on New Phenomena in Mesoscopic Structures, (Nov. 27-Dec. 2, 2005, Maui, Hawaii).

14. M. Yamaguchi, S. Nomura, K. Miyakoshi, H. Tamura, T. Akazaki, T. Maruyama, S. Miyashita, Y. Hirayama, and H. Takayanagi, "Photoluminescence measurements on a GaAs quantum well in a modulated potential with a square lattice structure", Feb. 27, 2006, International Symposium on Mesoscopic Superconductivity and Spintronics 2006, NTT R&D Center, Atsugi, Kanagawa, Japan.
15. S. Nomura, M. Yamaguchi, T. Akazaki, K. Miyakoshi, H. Tamura, H. Takayanagi, and Y. Hirayama, "Density dependent electron effective mass in a back-gated quantum well", Feb. 27, 2006, International Symposium on Mesoscopic Superconductivity and Spintronics 2006, NTT R&D Center, Atsugi, Kanagawa, Japan.
16. S. Nomura and T. Iitaka, "Chebyshev polynomial expansion method for calculating electronic states in n-type GaAs quantum dots", Feb. 28, 2006, International Symposium on Mesoscopic Superconductivity and Spintronics 2006, NTT R&D Center, Atsugi, Kanagawa, Japan.

< 学位論文 >

数理物質科学研究科物質創成先端科学専攻修士論文 (2006年3月)

1. 小口修平: "Study of spin relaxation in charge tunable InP quantum dots by Hanle effect"
2. 須藤史敬: "フォトンエコーによるチャージチューナブル InP 量子ドットの研究"
3. 中村俊輝: "有機化合物半導体チオフェン/フェニレン・コオリゴマー結晶の光物性"
4. 藤井俊輔: "アルカリハライド中 ZnO 微結晶の発光特性"
5. 津村 公平: "狭ギャップ半導体量子井戸中の 2次元電子ガスチャネルに対する赤外磁気光学効果と輸送現象に対する光照射効果"

< 講演 >

1. 阪東一毅、中村俊輝、舛本泰章、小林俊介、佐々木史雄、堀田収: "(チオフェン/フェニレン) コオリゴマー結晶の吸収端近傍における光学遷移" 日本物理学会 (2005年9月)
2. 菅野敦史、舛本泰章: "半導体ナノ構造の光誘起カー回転III" 日本物理学会 (2005年9月)
3. 藤原聖士、阪東一毅、舛本泰章、佐々木史雄、小林俊介、堀田収: "高密度励起下における(チオフェン/フェニレン) コオリゴマー結晶の時間分解分光" 日本物理学会 (2005年9月)
4. 池沢道男、大島隆治、舛本泰章、岡田至崇: "InGaAs 量子ドットにおけるフォトンエコー" 日本物理学会 (2005年9月)
5. B. Pal、池沢道男、舛本泰章、I.V. Ignatiev: "Very long spin memory in InP quantum dots observed in pump-probe photoluminescence spectroscopy" 日本物理学会 (2005年9月)
6. 鳥山陽子、水落清、阪東一毅、舛本泰章: "InP 単一量子ドットの励起子・励起子分子の光学異方性" 日本物理学会 (2005年9月)
7. 小口修平、池沢道男、舛本泰章: "InP 量子ドットにおけるスピン緩和2" 日本物理学会 (2005年9月)
8. 舛本泰章: "半導体量子ドット中のキャリア間相互作用の時間分解測定" 日本物理学会 (2006年3月)
9. 舛本泰章、須藤史敬、池沢道男: "チャージチューナブル InP 量子ドットのフォトンエコー" (2006年3月)
10. 藤原聖士、阪東一毅、舛本泰章、佐々木史雄、小林俊介、堀田収: "高密度励起下における(チオフェン/フェニレン)コオリゴマー結晶の時間分解分光II" 日本物理学会 (2006年3月)
11. 坂東弘之、杉山将三、松末俊夫、奥野剛史、舛本泰章: "In_xGa_{1-x}As 薄膜および InP における 2 光子

- 吸収の波長依存性” 応用物理学会 (2006年3月)
12. 野村晋太郎、シンポジウム企画の趣旨、領域4、領域5合同シンポジウム「光学測定による半導体中のキャリア間相互作用研究の新展開」日本物理学会第61回年次大会、松山市、2006年3月。
 13. 野村晋太郎、山口真澄、宮越賢治、赤崎達志、田村浩之、高柳英明、平山祥郎、バックゲート付き量子井戸における極低電子密度領域での電子有効質量、日本物理学第61回年次大会、松山市、2006年3月。
 14. 山本貴一、野村晋太郎、負の屈折率をもつ物質で結合した光導波路中のモード解析、日本物理学会第61回年次大会、松山市、2006年3月。
 15. 野村晋太郎、飯高敏晃、チェビシェフ展開法を用いた量子ドット電子状態の計算、第53回応用物理学関係連合講演会、東京都世田谷区、2006年3月。
 16. 伊藤宙陸、野村晋太郎、メカニカルプロセスによる高規則ナノリングアレーの作製、第53回応用物理学関係連合講演会、東京都世田谷区、2006年3月。
 17. 津村公平、野村晋太郎、P. Mohan、本久順一、福井孝志、InP/InAs コアマルチシェルナノワイヤの磁気光学効果、第53回応用物理学関係連合講演会、東京都世田谷区、2006年3月。
 18. 本久順一、P. Mohan、津村公平、野村晋太郎、福井孝志、InP/InAs コアマルチシェルナノワイヤの発光特性と電子状態、第53回応用物理学関係連合講演会、東京都世田谷区、2006年3月。
 19. 野村晋太郎、飯高敏晃、GaAs 量子ドットのチェビシェフ展開法による自己無撞着電子状態計算、筑波大学ナノサイエンス特別プロジェクト平成17年度研究成果発表会(つくばワークショップ)、筑波大学、2006年3月9日。
 20. 野村晋太郎、山口真澄、赤崎達志、宮越賢治、田村浩之、高柳英明、平山祥郎、極低電子密度領域における有効質量の増大の検出、筑波大学ナノサイエンス特別プロジェクト平成17年度研究成果発表会(つくばワークショップ)、筑波大学、2006年3月9日。
 21. 山本貴一、野村晋太郎、負の屈折率を持つ物質を用いた光導波路中の光伝搬特性、筑波大学ナノサイエンス特別プロジェクト平成17年度研究成果発表会(つくばワークショップ)、(筑波大学 2006年3月9日)。
 22. 野村晋太郎、格子型ゲートによる量子ドット列とその近接場光イメージング、領域4、領域5合同シンポジウム「半導体物性研究におけるイメージング計測の現状」日本物理学会秋季大会、京田辺市、2005年9月。
 23. 山口真澄、野村晋太郎、宮越賢治、小野絢哉、丸山達朗、宮下宣、赤崎達志、高柳英明、平山祥郎、表面ゲートによって形成される量子ドット列における発光測定、日本物理学会秋季大会、京田辺市、2005年9月。
 24. 山口真澄、田村浩之、野村晋太郎、宮越賢治、赤崎達志、高柳英明、アクセプターを δ ドープした80nm 量子井戸におけるゲートによる電荷誘起と電場効果、日本物理学会秋季大会、京田辺市、2005年9月。
 25. 津村公平、野村晋太郎、赤崎達志、高柳英明、超伝導・半導体接合への光照射効果、日本物理学会秋季大会、京田辺市、2005年9月。