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
講　師　　池沢　道男
助　手　　安坂　幸師
助　手　　冨本　慎一
助　手　　阪東　一毅
助　手　　山本　貴一
日本学術振興会外国人特別研究員　Pal, Bipul
外国人研究員(先端学際領域研究センター)　Kalevich, Vladimir
大学院生　　14（名）

【1】半導体におけるフェムト秒、ピコ秒時間分解分光（冨本慎一、舛本泰章）

＜ディスク状 InAs/InP 量子ドットにおける励起子輻射再結合過程の研究＞

（冨本慎一、黒川篤、佐久間芳樹[A]、舛本泰章、[A]物質・材料研究機構）

ディスク状量子ドットにおいて励起子のディスク面内方向の閉じ込めが輻射再結合寿命にどのような影響を与えているかを調べるため、InAs/InP 系のディスク状量子ドットと量子井戸の２種類の試料について、フォトルミネッセンス(PL)寿命の温度依存性の測定を行い比較した。これらの試料の PL スペクトルを図１に示す。平均積層厚２ ML の量子井戸試料が１つのピークのみを示すのに対して（図１(a)）、ディスク状量子ドット試料は分裂した複数のピーク（f3 ～ f9）を示している（同図(b)）。これは１原子層の厚みを単位とする離散的な量子ドットの高さ分布のためであり、f3～f9 のピークはそれぞれ３～９ML の高さに対応している。図２はこれらの試料についてアップ・コンバージョン法を用いて PL を時間分解測定した結果である。この図の曲線のように１成分の指数関数的な減衰を仮定して PL 寿命を求め、それを温度に対して調べ、PL 時間積分強度の温度依存性（図１）を考慮して、輻射再結合寿命を求めることができる。量子井戸中の励起子の輻射再結合寿命は強く温度に依存し、最低温部を除いて温度に比例するように増大しているが、これは GaAs/AlGaAs 系量子井戸などにおいて示されている結果と同様である。これに比べ、ディスク状量子ドットでは、温度依存性がかなり抑えられていることが分かった。これは量子ドットに固有の離散的なエネルギースペクトルを反映したものと考えられる。

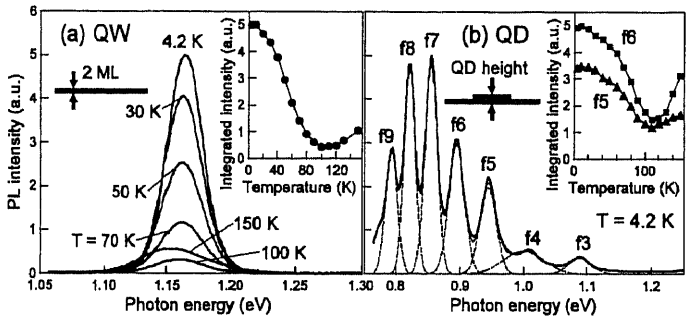

図１: (a) InAs/InP 量子井戸及び (b) ディスク状量子ドットの PL スペクトル。積分強度の温度依存性を各パネルの右上に示す。

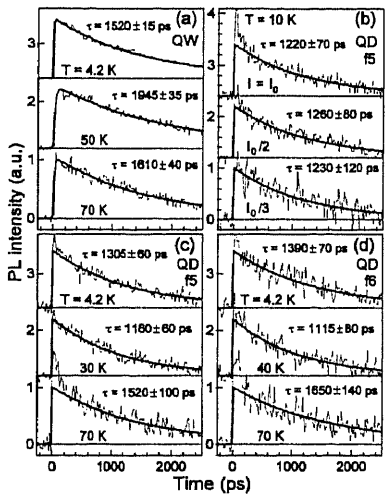

図２: 時間分解 PL の測定結果。(a) InAs/InP 量子井戸、(c)(d) ディスク状量子ドットの f5、f6 ピークにおける温度依存性。(b) は f5 ピークにおける励起密度依存性。

【2】半導体量子ドットのスピン光物性（舛本泰章、池沢道男）

<InP 量子ドットにおける動的核スピン分極>

（B.Pal、S. Verbin[A]、I. Ignatiev[A]、舛本泰章　[A] St. Petersburg State Univ.）[論文 12]

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、電子スピンが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3の様に± 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、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 3 は理解できる。図 3 の挿入図に示すように、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、$B_N \cong 6mT$ 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。

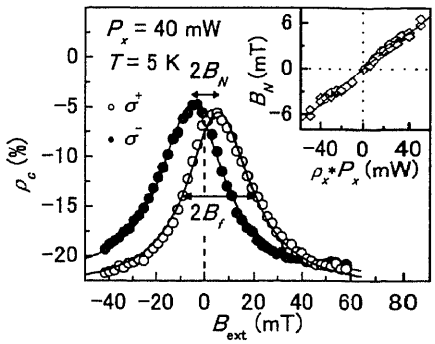

図3: 核スピン分極の効果

<チャージチューナブル InP 量子ドット中の電子スピンの緩和時間>

（舛本泰章、B. Pal、小口修平、池沢道男）[論文 10]

チャージチューナブル InP 量子ドットは、電気バイアスを-0.6V にすると中性、-0.1V にすると 1 電子がドープされ、+0.5V にすると 2 電子がドープされる。準共鳴励起で、Hanle 効果測定を行うと、1 電子ドープされた時のみ円偏光レーザー励起に対し負の円偏光度をゼロ磁場で示す発光を示す。Hanle 曲線は半値半幅 1.54T、128mT、4.6mT の 3 ローレンツ成分の和で構成される。4.6mT の幅の最も鋭いローレンツ成分は負で、トリオン量子ビートが観測される同じバイアスで現れるから、ドープされた 1 電子のスピン緩和によるものと同定できる。4.6mT から $gT_2^*=2.5$ ns が導かれ、InP 量子ドットの電子の g-因子は 1.5 なのでドープ電子のスピン緩和時間は $T_2^*=1.7$ ns と導かれる。この値は、超微細構造相互作用を通して、核スピン揺らぎが引き起こす電子スピン緩和として説明される。実際、核スピン揺らぎの有効磁場を円偏光度の縦磁場依存性から求めた値 15mT が引き起こす電子スピン緩和として比較的良い一致を示した。128mT の幅のローレンツ成分は、1 電子ドープに呼応して負になるので光励起電子・正孔対のスピンフリップによると同定されスピン緩和時間は T_2^* = 51 ps と導かれる。最も広い 1.54T の幅のローレンツ成分は、1 粒子正孔のスピン緩和と同定されスピン緩和時間は T_2^* = 29 ps と導かれる。ドットの発光ピーク波長における Hanle 効果はドープ電子数を変えると劇的に変化する。2 電子ドープの時には、Hanle 曲線は正の 2 成分ローレンツ関数の和から構成される。この場合、最も低い電子の量子状態は終始、上向きスピン、下向きスピンの 2 電子で占められているので、正孔のスピン緩和を反映している。中性の時は、 Hanle 曲線は 3 成分ローレンツ関数（2 つの正と 1 つの負）の和から構成される。

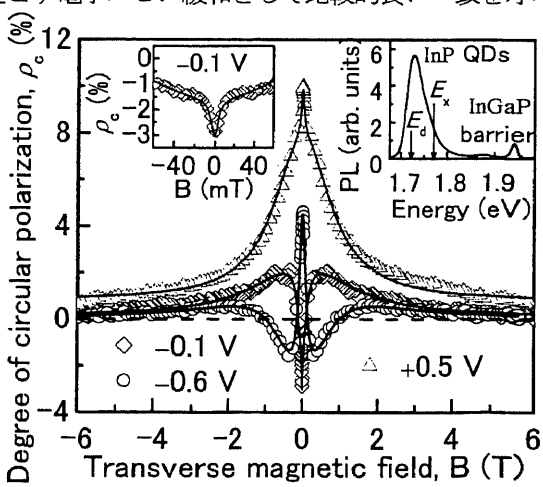

図 4: チャージチューナブル InP 量子ドットの Hanle 効果

<GaAsN 混晶のスピン緩和>

(V. Kalevich[A,B]、舛本泰章[A]、[A]先端学際領域研究センター、[B]Ioffe Physico-Technical Institute)

$GaAs_{1-x}N_x$混晶は新しい近赤外域半導体材料として注目され、N を 1%~3.4%含む $GaAs_{1-x}N_x$混晶には歪みが内在し重い正孔と軽い正孔のバンド分裂をおこしている。N を 2.1~3.4%含む $GaAs_{1-x}N_x$混晶において観測された現象は、混晶中の深い常磁性センターの偏極と伝導電子のスピンに依存したトラップにより説明され、局在した電子のおそいスピン緩和時間は 1ns になることがハンレ効果によりすでに示した。より強い磁場領域のハンレ効果は電子の速いスピン緩和時間の成分の存在を示しこれを計測した。スピン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。

<チャージチューナブルInP 量子ドットにおけるスピン緩和と円偏光フォトルミネッセンス>

(利行 健、鈴木宰、池沢道男、舛本泰章)

準共鳴励起の下、量子ドット中の励起状態にアップ・ダウンスピンを等量生成し基底状態からの発光の円偏光度を検出することで量子ドットでの励起子の微細構造準位を明らかにした。チャージチューナブルInP 量子ドットでは、電圧を印加することでドット内の電子の数を操作する事ができる。量子ドット中に電子が1つドープされている時（図5上）では磁場の向きに合わせて円偏光度が単調に変化しており、これは活性な荷電励起子準位間の熱平衡化により理解できる。これとは対照的に中性の時（図5下）では円偏光度が1.5T と2.5T 付近に極値を持ち変化する。この２つのピークは横磁場下では現れず、縦磁場成分が大きくなるにつれて表れるようになる。また温度を上げていくとこの２つのピークは失われていく。これらの事からこの振る舞いは光学的に不活性と活性な励起子のゼーマン準位が交差・反交差することによると考えられる。2 つの異なる励起子の準位がエネルギー的に近くなると不活性励起子が活性励起子と混ざり発行するようになるからである。またこの２つのピーク間隔よりInP 量子ドットにおけるホールのg 因子を1.02 と求める事が出来た。InP 量子ドット中の励起子準位の計算結果を図6に示す。これは1.5T、2.5Tの磁場領域で確かに準位が交差しており実験結果を支持する。

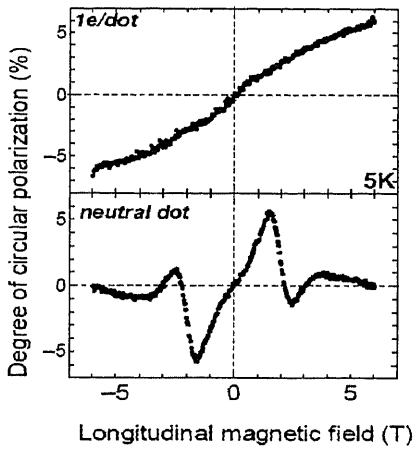

図 5: 縦磁場下での円偏光度

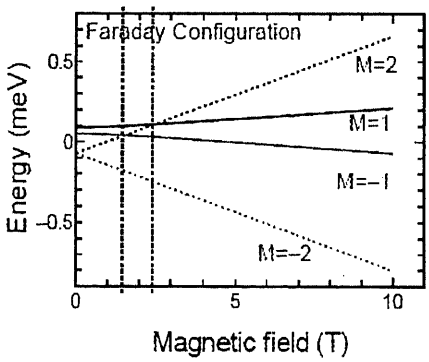

図 6 : 縦磁場下での励起子の準位

【３】単一量子ドットの分光研究 (舛本泰章、阪東一毅)

<InP/InAs/InP コアマルチシェル型ナノワイヤ光物性>

(後藤健、B. Pal、舛本泰章、P. Mohan[A]、本久順一[A], 福井孝志[A]、[A]北大量子集積エレクトロニクス研究センター)

InP/InAs/InP コアマルチシェル型ナノワイヤは InP ナノワイヤに内包された InAs 層が量子井戸となり、その層厚が 1 原子層ずつ変化するのに応じて発光波長が離散的に変化する。準共鳴励起下で数 ns までの時間領域をストリークカメラで数十 ns までの時間領域を単一光子係数法で発光の時間依存性を測定した。数 ns の時間領域では発光の重心が時間と共にゆっくりと低エネルギー側にシフトしていき、量子井戸中の低エネルギー領域へ励起子が移動していく過程が観測された。発光は数十 ns まで非指数関数型の裾をひき、タイプII型の量子井戸の特徴をもっていることが明らかになった。1～3 原子層量子井戸では、電子の波動関数が InP 層に大きく広がっていると考えられる。

＜単一InP 量子ドットの光スペクトル ― 偏光特性と磁場特性 ―＞（烏山陽子、阪東一毅、舛本泰章）

偏光特性及び磁場特性に注目して単一InPドット中の励起子のスピンに関わる物性を調べた。この目的のために、超伝導マグネットを用いた強磁場環境下で操作できる共焦点型の顕微分光測定システムを作成し、単一量子ドットからの発光の磁場特性を調べた。表面を光リソグラフィー技術により表面積$10^{-7}cm^2$のメサ構造に加工されたInP 量子ドット試料を用いて、ファラデー配置において0T から8T まで磁場を印加した時の、直線偏光励起における単一InP 量子ドットの発光スペクトルの磁場依存性の測定を行った。図7 にその結果を示す。ゼロ磁場における1724meV 付近、1725.5meV 付近の発光ピークはそれぞれ、荷電励起子(X^-)、励起子(X)からの発光に対応する。どちらの発光ピークも磁場を増大させるにつれ、カーブを描きながら高エネルギー側へシフトしていき、徐々に二つに分裂していく。$X_a^0(X_a^-)$, $X_b^0(X_b^-)$はそれぞれ分裂した発光ピークにおける低エネルギー側，高エネルギー側のピークを指し、ゼロ磁場において

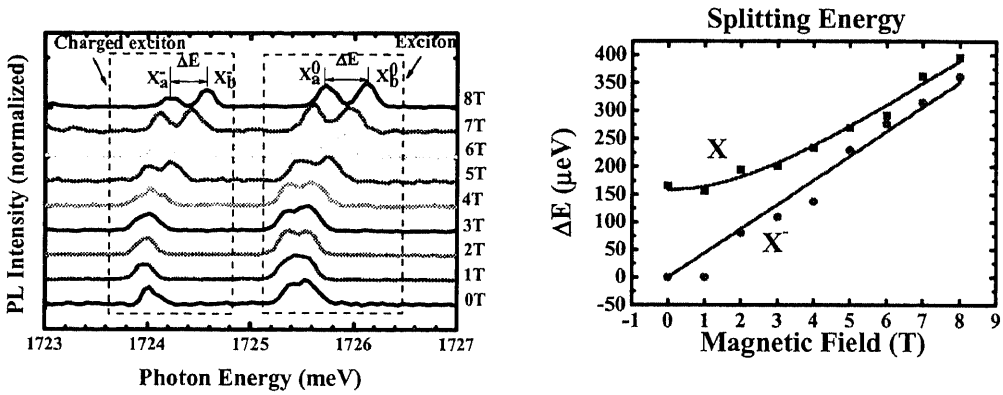

図 7: 縦磁場下、単一 InP 量子ドットの発光スペクトルと励起子、荷電励起子の振舞。

電子・正孔間の異方的交換相互作用で分離した励起子準位からの発光に対応する。

$$E(B) = E_0 \pm \frac{1}{2} g_{ex} \mu_B B + \gamma_2 B^2 \qquad (1)$$

$$\Delta E(B) = \sqrt{\delta_1^{\,2} + (g_{ex} \mu_B B)^2} \qquad (2)$$

E_0：ゼロ磁場における発光エネルギー (meV)
δ_1：ゼロ磁場における交換分離エネルギー
g_{ex}：Xのg因子
μ_B：ボーア磁子
γ_2：反磁性係数 ($\mu eV/T^2$)

図7の結果から発光ピークエネルギーのシフトは式(1)の第二項の「ゼーマン分裂」、第三項の「反磁性シフト」に起因していることが分かる。発光ピークエネルギーの分離幅は、「ゼロ磁場における異方的交換相互作用に起因するエネルギーの分離」と「磁場印加によるゼーマン分裂」に起因していることが分かる。Xの発光はゼロ磁場においても分裂しているのに対しX^-の発光はδ_1=0 で、ゼロ磁場においてクラマース縮重によりピークの分裂が起こっていないことが確認できる。フィッティング結果から、単一InP 量子ドットの X, X^-におけるg_{ex}とγ_2の値を求めることができた。X における値は、g_{ex} = 0. 77±0.02、γ_2=7.50±0.64μeV/T^2、X^-における値は、$g_{ex}^{X^-}$=0 .76±0.03、γ_2=6.35±0.44μeV/T^2となり、誤差の範囲内でX, X^-におけるg_{ex}とγ_2の値はほぼ一致した。InP 量子ドットにおいて電子のg 因子はg_e=1.5より、正孔のg 因子が求められ、$g_h = g_e - g_{ex} \approx 0.73$という結果を得た。単一InP 量子ドットにおける偏光特性と磁場特性について述べた。またX, X^-の特徴の違いも明確にし、X^-におけるg 因子やγ_2の値を得ることができた。

＜GaP:N 等電子トラップからの単光子発生＞

（池沢道男、舛本泰章、佐久間芳樹[A]、[A]物質・材料研究機構）

III-V 族半導体にドープ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出光を単一光子発生に利用する可能性を明らかにするため、リン化ガリウム（GaP）中にドープされた窒素原子（N）による等電子トラップに着目した研究を行った。

体積あたりの等電子トラップ数を減らすために窒素を 1~2 原子層だけドープした GaP:N 試料を有機金属気相成長法（MOCVD）で作製した。さらに、孤立窒素原子ではなく、近接する窒素原子が２つペアになった NN と呼ばれる束縛準位を用いることにより、さらに約３桁ほどトラップの面内数密度を下げる事が出来るので、通常の顕微分光の分解能の範囲に含まれるトラップの数は数個程度に抑えられ、単一トラップの検出も可能になる。例えば、後述する NN_3 や NN_4 は１つの窒素原子が原点(000)に存在するとした時に、もう一つの窒素原子がそれぞれ(211)と(220)の位置にあるときに形成される束縛準位である。

不純物の面内分布の様子を得るために、顕微鏡下の試料の発光イメージを分光器スリットに結像する方法で得られた結果を図 8 に示す。(a)は分光器に取り付けられた２次元検出器上の光強度分布であり、縦方向が試料上の位置に直接対応する。横方向は分光器で分光された波長である。観測される試料上の領域は、横方向は分光器の入射スリットによって制限されるが、顕微鏡で拡大されているので試料上では 1μm 以下の幅に対応する。検出器の縦方向の大きさは、試料上では約 43μm である。強度分布には NN_3 および NN_4 の波長に輝点が何点か観測されている。これら１つ１つの点が単一の NN_3 および NN_4 からの発光であると思われる。発光強度を位置に対してプロットすると、NN_3 については図 8(b)の薄い線のようになるが、長波長側にあるバックグラウンド発光の裾の上に明瞭な数個のピークがある事が分かる。さらに、それらのピークの幾つかは同じ発光強度を示していることから、これらが単一 NN_3 トラップ発光である可能性が極めて高い。約２倍の強度を持つ大きなピークは隣接した２つの NN_3 によるものであろう。同じ事は NN_4 についても言える。他方、同様のプロットを孤立窒素原子によるピーク A に対して行うと、同図中の青線のようになり、こちらには全く構造が観測されない。これは、孤立 N 原子は NN ペアの数よりも数千倍多く均一に存在している事を考えれば理解できる。

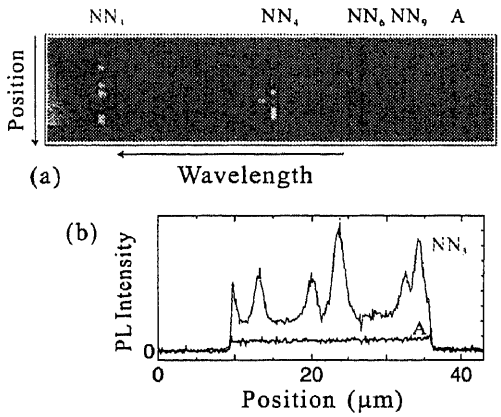

図 8: 希薄な GaP:N 試料の不純物分布の様子。
(a)試料上の一次元的な位置と波長の関係を示す。
NN_3 と NN_4 の発光波長で数個の明るい点が観測された。
(b)NN_3 と A について明るさを位置に対してプロットしたもの。NN_3 については明瞭なピークがある一方、Aには何も構造はない。１つ１つのピークが単一（または２個の）NN_3 に対応する。

これらの輝点が単一のトラップセンターによるものかどうかは、Hanbury-Brown Twiss 型の強度相関測定を行うことによって確認される。図 9 は同試料に対してピンホールを用いて数ミクロンサイズの領域からの発光を選択し、狭帯域フィルターで NN_4 に相当する波長だけを切り出して得られた二次の相関関数である。遅延時間 0 ns の位置に明瞭なディップが観測されている。バックグラウンド成分を含んでいるためゼロまでは落ちていないものの、単一トラップセンターからの単一光子の発生を強く示唆する結果と言える。これまで III-V 族半導体中の等電子トラップによる単一光子発生は報告が無く、本研究により初めて実現された。

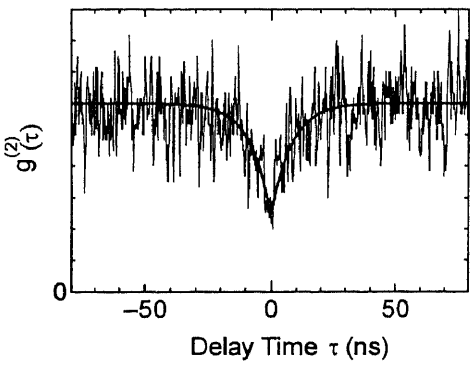

図9: GaP:N 中の単一 NN_4 トラップセンターについて初めて観測されたアンチバンチング。

＜単一半導体量子ドットの発光自己相関測定による位相緩和過程の観測＞（阪東一毅，舛本泰章）

単一量子ドットにおける励起子状態は単一光子源や、長い励起子位相緩和時間を用いた量子ゲート操作など、量子情報処理への応用が期待されている。励起子位相緩和時間の測定は非線形分光法を用いるのが一般的であるが、信号が微弱なため単一ドットでの測定は極めて困難である。しかし、単一量子ドットから発光により生じる単一光子は高感度な検出が可能であり、それを自己相関測定することによって位相緩和過程の測定が可能となる。GaInP マトリックス中に成長された InP 量子ドットでは構造非対称性及びトラップキャリアなどの周囲の環境からの影響が個々の量子ドットによって異なり、個々の光学的特徴が現れてくる。この InP 量子ドットについて、単一ドット中の励起子の位相緩和過程を調べるために発光の自己相関測定を行った。

試料は基板上にメサ構造が微細加工されたものを用い、低温下での単一 InP 量子ドットからの発光を観測した。CW グリーンレーザー(532nm)によって障壁層をバンド間励起し、顕微分光によって得られた発光をマイケルソン干渉計に導入し、一方の光路に光学遅延を設けて干渉させる。この干渉計からの出力を分光器に通し CCD 検出した。図 10 は 10K での単一量子ドットからの発光スペクトルであり、励起子による発光(A)と荷電励起子による発光(B)が観測されている。これらの干渉信号の振幅を干渉計の遅延時間に対してプロットしたものが図 11 である。二つの発光ピーク A,B に対する遅延時間依存性は明らかに位相緩和の振る舞いが異なり、B では~40ps の長い位相緩和時間を示した。さらに特徴的なことは通常の位相緩和過程において見られる指数関数的な減衰ではなく、非指数関数的な振る舞いを示していることである。これはドットの周囲にトラップされたキャリアによるものと考えられ、そのようなトラップキャリアが生成と消滅を比較的ゆっくりした時間スケールで繰り返すために、ドットに対してその時間スケールを反映したエネルギー変調が生じ、非指数関数的な振る舞いを示すと考えられる。

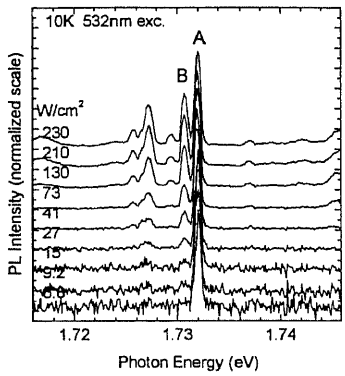

図 10: 単一 InP 量子ドットの発光スペクトル

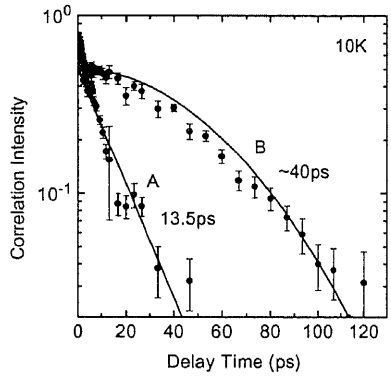

図 11: 単一 InP 量子ドットの励起子と荷電励起子発光の自己相関強度

【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リング状マイクロレーザー>

（藤原聖士，阪東一毅，舛本泰章，佐々木史雄[A]，小林俊介[A]，原市聡[B]，堀田収[C]，産総研光技術[A]，産総研エレ[B]，京工繊大繊維[C]）

（チオフェン/フェニレン）コオリゴマー（TPCO）結晶は π 共役系の新規有機半導体材料であり、室温において優れた発光効率・電気特性を示し、高密度励起を行なうことにより、バルク結晶や薄膜結晶でも、自然放射増幅光が観測されている。また電界発光も観測されており、電流注入型有機半導体レーザーへの応用が期待されている。この研究では TPCO である Biphenylyl-X-Thiophene (X=1-4)のうち、1 個のチオフェン環を持つ BP1T の薄膜結晶を用いてマイクロサイズの光閉じ込め構造を作製し、光励起下で共振器モードによるレーザー発振を実現した。励起光源としてチタンサファイアレーザー増幅器の第二高調波(3.12eV)を用い、半導体プロセス加工によって形成された直径 10−40μm のマイクロリ

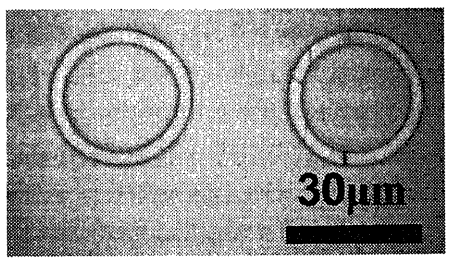

図 12: マイクロリング構造のレーザー顕微鏡像

ング及びマイクロディスク構造からの発光を観測した。マイクロリング及びマイクロディスク構造は Si 基板上に BP1T 薄膜を蒸着・アニールし結晶化させた後、電子ビーム露光と反応性イオンエッチングによって作製された。図 12 はマイクロリング構造のレーザー顕微鏡像である。マイクロリング構造からの発光スペクトルは図 13 に示されている。(a),(b),(c),(d)は直径 Φ とリング幅 d が異なる 4 種類のマイクロリング構造によるものである。図13からわかるようにマイクロリング構造の共振器モードを反映したレーザー発振が観測された。バルク薄膜とマイクロリング構造のレーザー発振閾値を比較すると、マイクロリング構造の場合 1/7 程度の低減があることがわかった。またスペクトルに見られる共振器モードを反映したモード間隔はリングの円周長の逆数に比例することがわかった。共振器長は円周長に対応することから円周上に分布した周回モードであることが分かる。このような振る舞いはマイクロディスク構造でも同じように観測できた。

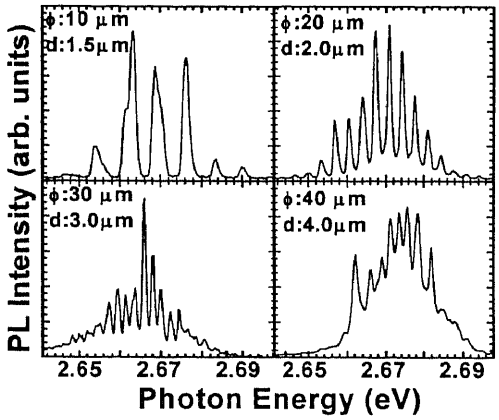

図 13: マイクロリング構造の発光スペクトル

<フラーレンナノカプセルの合成と力学特性解析>（安坂幸師）

最近、フラーレンナノカプセルの集合体からなるウィスカーの合成法を見出した。本研究では、フラーレンナノカプセル個々を透過電子顕微鏡内部で変形させて、構造観察すると同時に力を測定し、ナノカプセルの力学特性を解析した。

複合型顕微鏡内部で 1373 K で 30 分間真空中熱処理したフラーレンナノウィスカーの両端に電圧を印加し、フラーレンナノカプセルを合成した。表面に金を蒸着した原子間力顕微鏡用カンチレバーチップを用いて、ナノカプセルの一つを金基板上に移動させた後、変形させた。その形状変化を TV カメラと VTR を用いてその場観察し、力の変化を像の観察時間と同期させて記録した。

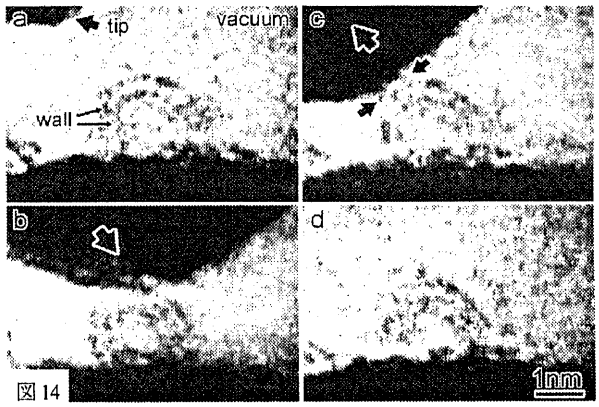

図 14

図 14 に、フラーレンナノカプセルの変形過程を観察した透過電子顕微鏡像を示す。このナノカプセルの直径は 2.50 ± 0.06 nm である(図 14(a))。カンチレバーチップをナノカプセルに接触させ、4.5 ± 0.5 nN の力で押し付けると、ナノカプセルは弾性的に約 6 %圧縮される(図 14(b))。この結果から、ナノカプセルのバネ定数を 40 ± 20 N/m と見積もった。その後、チップをナノカプセルから引き離すと、チップと接触しているナノカプセル表面の炭素原子はチップに付着し(図 14(c)小矢印)、負の力 5.5 ± 0.5 nN が測定された。つまり、ナノカプセルと金との間に強固な接合が生じていることが明らかになった。

【5】強磁場中空間分解分光システムを用いた研究
（野村晋太郎、大塚洋一[A]、[A]物理学専攻）

<ヘリウム３温度近接場光学顕微鏡の開発>
（伊藤、近江、野村晋太郎）

科学研究費補助金の交付を受けて、図１５に示す極低温強磁場下近接場光学顕微鏡を用いた空間分解分光測

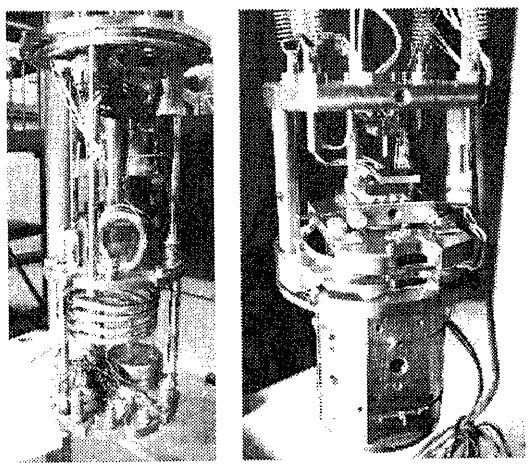

図 15: ホームメード希釈冷凍機[設計、大塚]（左）および近接場顕微鏡ユニット（右）。

定システムの運用を開始した。試料温度 300 mK、最大印加磁場 5 T、空間分解能 100 nm を目標としているが、混合器の最低到達温度 70mK を得ることができた。単一モード光ファイバーを導入し、電子線リソグラフィー法により作製した量子ポイントコンタクトの光応答に関する測定を実施した。本研究は低温物性グループの大塚教授の協力を得て極低温クライオスタットの設計と製作を行った。

＜二次元電子系端状態のイメージング＞　（林、津村公平、野村晋太郎）[国際会議 2, 4]

二次元電子系に磁場を印加した際に試料端に形成される状態（端状態）は、外部ポテンシャルによりそのスピン偏極度を制御可能なこと、長距離にわたって量子コヒーレンスを保つ状態であることから、注目を集めている。従来、二次元電子系端状態のイメージングに関しては走査型単一電子トランジスタ法やカー回転法が用いられてきた。本研究では局所的に光共鳴励起することにより試料に電子を注入し電圧プローブにより検出する手法を新たに提案した。この手法は高空間分解能が得やすいこと、円偏光を用いることによりスピン流を注入可能であることに特徴がある。

図 16 に示すようにホールバー型の試料の端近傍で強いシグナルが得られた。これは光励起された電子が量子ホール系のバルク状態を介して端状態に流れ込み、光電流としての寄与がホール電圧の増加として観測されることにより理解される。この手法を用いて、ソース、ドレイン電極近傍でのポテンシャル分布や非局所伝導についての知見を得ることが可能となった。さらに、円偏光励起により円偏光度のイメージの観測を行い、電子スピン偏極度と対応するものと考えられるイメージを取得した。

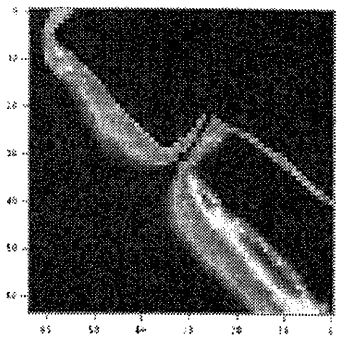

図 16: 顕微局所光励起による磁場中二次元電子系の試料の端状態のイメージング。

【6】半導体ナノメートル構造の光物性

＜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、赤崎達志[A]、平山祥郎[B]、[A]NTT 物性科学基礎研究所、[B]東北大学）[論文 22, 26]

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ことが理論的に示されてきた。

昨年度までに研究を進めていた試料も電子密度の制御性に関してはすでに世界でも最高水準の試料であったが、さらに低い電子密度まで二次元性を示すように非ドープ量子井戸試料構造を改良した。その結果、$8.6\times10^{9}\mathrm{cm}^{-2}$ の二次元電子密度において、電子占有数 $\nu=1$ での異常を観測することに成功した。この試料を用いて、複数のランダウ準位に起因する発光ピークから電子有効質量、正孔有効質量の電子密度依存性を評価した。得られた有効質量はいずれも電子密度の低下に伴い増大を示した。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。

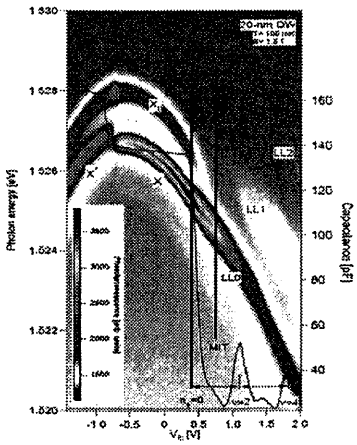

図 17: 発光スペクトル（カラーイメージ）と表面-裏面ゲート間のキャパシタンスのバイアス電圧依存性。

＜ゲート付き非ドープ量子井戸からの発光の観測による金属—絶縁体転移に関する研究＞

（野村晋太郎、赤崎達志[A]、平山祥郎[B]、[A]NTT 物性科学基礎研究所、[B]東北大学）[論文 24]

裏面ゲートに加えて表面ゲートを形成した非ドープ量子井戸を用いて発光スペクトルとキャパシタンススペクトルのゲート電圧依存性を調べた。キャパシタンススペクトルは電子系の圧縮率と相関があり、量子ホール状態の局在状態・非局在状態に対応して、ピークを示す。電場の遮蔽に関連する量であるため、0磁場においても電子系が局在しているか広がっているかについての知見を得ることが可能である。電子密度を連続的に低下させてキャパシタンススペクトル測定を行った結果、金属絶縁体転移点の直前に電子圧縮率の異常を観測した。この点を境に発光スペクトルが二次元電子系発光から荷電励起子発光へと移り変わっていることが観測された。この結果はEfros等のパーコレーション転移モデルで説明されることが示された。

＜超伝導体・半導体接合の顕微光照射によるイメージング＞

（津村公平、野村晋太郎、高柳英明[A]、赤崎達志[B]、[A]東京理科大学、[B]NTT物性科学基礎研究所）

[国際会議 5, 7]

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。本研究では、この超伝導体・半導体接合の顕微光照射によるイメージングを行い、図18に示すような各点に光照射した際の電圧変化のイメージが得られた。接合部分で大きなシグナルが得られていることがわかる。さらに詳細な測定を行った結果、界面で大きなシグナルが得られる場合と界面に挟まれた半導体部分で大きなシグナルが得られる場合があることが見いだされた。本研究は電子スピン偏極度とアンドレーフ反射確率との関連についての知見に寄与すると考えられる。

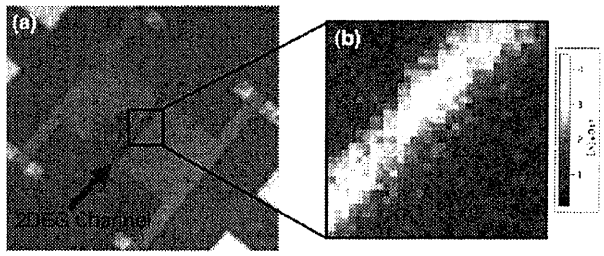

図18: (a) 超伝導ー半導体接合試料構造、(b) 各点に光照射した際の電圧変化のマッピング。

＜量子チューブ中荷電励起子のアハロノフ-ボーム効果＞

（津村公平、野村晋太郎、福井孝志[A]、本久順一[A]、[A]北海道大学大学院）[論文 19, 20]

最近、量子リング中励起子のアハロノフボーム効果の検出の可能性について議論がされている。そこでは実験的観測のためにはリングが細くかつ半径が小さいことが必要とされている。しかしながら、細い量子リングは一次元系であり励起子束縛エネルギーが発散するため、アハロノフボーム効果は消える。そこで、我々は二次元系である量子チューブに注目し、励起子のアハロノフボーム効果の検出を試みた。北海道大学において作製された半径35nmのInPコアの側面にInAs量子井戸を形成した特異な形状の量子チューブ試料を用いて、磁場中顕微フーリエ変換赤外分光測定を行った。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て振動的なエネルギーシフトすることが見いだされた。

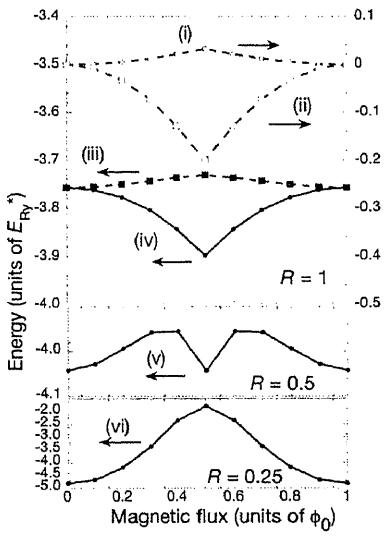

図19: 量子チューブ中荷電励起子の(i)重心運動、(ii)終状態の一電子、(iii)相対運動、(iv)$R=a_B^*$ (v)$R=0.5\ a_B^*$ (vi)$R=0.25\ a_B^*$の光遷移の各エネルギーの磁束依存性。

この結果の物理的要因を探るために、磁場中に平行に置かれた量子チューブの中性励起子と荷電励起子のエネルギーを有効質量近似により求めた。量子チューブの半径(R)が励起子ボーア半径(a_B^*)と比べてあまり小さくなければ、二次元系となり励起子束縛エネルギーは有限である。Rを固定して量子チューブ

の長さ(L)の関数でAB振動の振幅を求めると、量子チューブが短い領域では振幅はLに比例して増大し、中性励起子の場合は$L>4a_B^*$、荷電励起子では$L>5a_B^*$でほぼ一定となることが示された。AB振動は中性励起子の場合、磁束量子の半整数倍の磁束で上に凸のピークを常に示す。一方、荷電励起子の場合は、相対運動、重心運動、終状態の電子のそれぞれのエネルギーが磁束に対して振動する。従って、図に示すように、半径を小さくするに従い、下に凸($R=a_B^*$)から上に凸($R=0.25a_B^*$)のAB振動に移り変わることが示された。これらの研究により、励起子遷移エネルギーのAB振動の観測のためには量子チューブの半径がa_B^*と比べて小さいことが必要であり、長距離クーロン力に起因する一次元励起子の束縛エネルギーの発散を回避するためには、量子チューブを用いることが有効であることが示された。

＜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]理化学研究所戎崎計算宇宙物理研究室)

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我々の開拓したオリジナルの手法(CPE-TDM法)である。計算量が原子数Nに比例するため、大規模な量子系で特に優位となり、これまでにSi原子数約3万個の電子状態計算が可能であることが示されてきた。しかしながら、計算は経験的擬ポテンシャルを用いたものであり、適用範囲をさらに拡げ、従来の計算手法と完全に置き換えるためには、第一原理に基づく非経験的な擬ポテンシャルに基づく計算が望まれていた。このような計算がオーダーNで計算可能となれば量子ドット等のスピン系の固体物性計算に限らず、特に関係する原子数が多い、有機分子-金属複合素子や生体分子を利用した素子等のより複雑な系の物性評価に寄与するものであると考えられる。本年度は、本計算方法に必然的に現れるポテンシャルゆらぎと乱数位相ベクトルの数との関連を調べた。GaAs量子ドットの電子状態の計算を局所密度汎関数法に基づく有効質量近似を用いて行った。電子数は77である。図20にCPE-TDMによるポテンシャルと共役勾配法により求めたポテンシャルの差の自己無撞着ループあたりのランダムベクトル数依存性とCPE-TDMによるポテンシャルのゆらぎの標準偏差のランダムベクトル数依存性を示す。自己無撞着ループあたりのランダムベクトル数が増加するに従い、ポテンシャルの揺らぎが小さくなっていることがわかる。

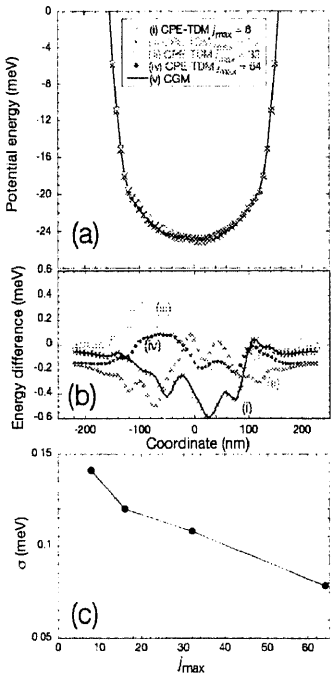

図20: (a) CPE-TDMに基づく計算方法で求めたポテンシャルの自己無撞着ループあたりのランダムベクトル数依存性。jmax= (i) 8, (ii) 16, (iii) 32, (iv) 64の場合のポテンシャルおよび(v)共役勾配法により求めたポテンシャル。(b)CPE-TDMによるポテンシャルと共役勾配法により求めたポテンシャルの差の自己無撞着ループあたりのランダムベクトル数依存性。jmax= (i) 8, (ii) 16, (iii) 32, (iv) 64。(c) CPE-TDMによるポテンシャルのゆらぎの標準偏差のランダムベクトル数依存性。

【7】メタマテリアルの光学特性

＜左手系メタマテリアルを使用した光導波路中の光伝搬特性＞ (山本貴一、野村晋太郎) [論文27]

微細加工技術を駆使して、物質固有のパラメタである誘電率および透磁率を、有効媒質近似の範囲内で制御した人工物質、電磁メタマテリアルを設計・作成し、有用な光学的性質を開拓しようとする動きが近年活発になっている。我々が進めているのは、左手系メタマテリアル(left-handed metamaterial: LHM)を含む光導波路を用いて「遅い光」を実現するための条件を求めることである。光信号の伝搬速度を、信号処理が行える時間程度まで遅くする技術は全光通信・計算素子の実現に不可欠である。LHMを含む光導波路中の「遅い光」を実証するための下準備として、実験条件下に近い物質パラメタ等を用いた計算シミュレーションを行い以下のような成果を得た。

(i) LHM/RHM 複合導波路中の光モードへの損失補償メカニズムの提案

LHM/RHM 複合導波路中の光モードの群速度が 0 になる条件は昨年度確認したが、実験を行う上で克服せねばならない問題点は、導波路中の光がすぐに減衰してしまうことである。これは LHM が通常損失性媒質であることに原因がある。この問題点を克服するため、我々は誘導ラマン散乱(SRS)過程を用いて減衰分を補償するエネルギーを信号光に供給することを提案した。図 21 挿入図のようなスラブ型導波路構造中の導波モードは RHM/LHM 界面モードであり、図21 のような伝搬係数(h)-角周波数(ω)分散関係をもつ。分散曲線に見られる 2 本の TE モードのうち片方(TE_1)をポンプ光として使用することでもう片方(TE_2)の信号光にエネルギーを供給できることを、解析計算を主に用いて示した結果が図 22 である。図 22 は信号光の電場強度の分布を示しており、図 22(a)がポンプ光無しの場合、図 22(b)が適当な強度のポンプ光がある場合である。ポンプ光が無い場合は伝搬方向(x)に 2 波長分程度しか広がっていない光電場が、ポンプ光の存在により計算限界である 10 波長程度まで広がっており、SRS 過程による信号光へのエネルギー補償が有効であることが分かる。

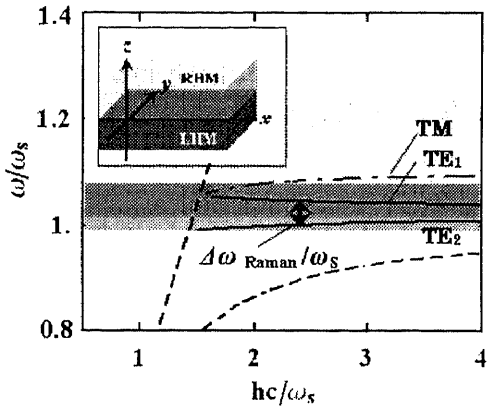

図 21: 解析に用いた LHM/RHM 複合光導波路構造(インセット)および導波路に現れる光モードの伝搬係数-角周波数分散関係

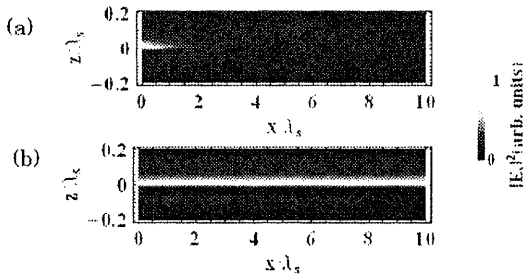

図22: 信号光電場の光伝搬方向(x)への広がりのポンプ光依存性：(a)ポンプ光無し(b)ポンプ光有り

(ii) LHM/RHM 複合導波路中の光モードへの損失補償メカニズムの効率化

LHM/RHM 複合導波路中の信号光への SRS 過程を使用したエネルギー補償効率を、信号光の伝搬速度が減少するのに伴い増大させることが出来る可能性がある。この性質を用いればラマン効率の小さい材料(LHM を作成する際用いる基板材料を念頭に置いている)でも SRS エネルギー補償過程を用いることが出来るようになると期待でき、実験を行う上で有用である。特定の導波路構造を使えば「遅い光」を実現する条件と SRS 過程を使用した信号光へのエネルギー補償過程とを両立させることができることを、主に解析計算により確認した。

<論文>

1. 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).
2. 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).
3. 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).
4. 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).

5. Y. Masumoto: "Spin relaxation in charge tunable quantum dots", Abstracts of the 4th NIMS Int. Conf. on Photonic Processes in Semiconductor Nanostructures (2nd Int. Symp on Functionality of Organized Nanostructures), p.27 (Tsukuba, 2006).
6. A.Yu. Egorov, V.K. Kalevich, M.M. Afanasiev, A.Yu.Shiryaev, V.M. Ustinov, M. Ikezawa and Y. Masumoto: "Spin relaxation in charge tunable quantum dots", Proc. Ioffe Institute 14th Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology", p.158 (St. Petersburg, 2006).
7. V.K. Kalevich, E.L. Ivchenko, M.M. Afanasiev, A.Yu. Egorov, A.Yu. Shiryaev, V.M. Ustinov, B. Pal and Y. Masumoto: "Optical pumping and spin-dependent recombination in GaAsN alloys", Proc. Ioffe Institute 14th Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology", p.59 (St. Petersburg, 2006).
8. Y. Masumoto, B. Pal, S. Oguchi and M. Ikezawa: "Spin lifetime in electron-doped InP quantum dots", Proc. 28th Int. Conf. Physics of Semiconductors, pp. 369-370 (Vienna, 2006).
9. S.Yu. Verbin, B. Pal, M. Ikezawa, I.V. Ignatiev and Y. Masumoto: "Nuclear spin effects in negatively charged InP quantum dots", Proc. 28th Int. Conf. Physics of Semiconductors, p. 233 (Vienna, 2006).
10. Y. Masumoto, S. Oguchi, B. Pal, M. Ikezawa: "Spin dephasing of doped electrons in charge-tunable InP quantum dots: Hanle-effect measurements", Phys. Rev. B 74, 205332 (2006).
11. M. Sugisaki, H.-W. Ren, S.V. Nair, E. Tokunaga, K. Nishi, Y. Masumoto and H.E. Ruda: "Anisotropic optical response of InP self-assembled quantum dots studied by pump-probe spectroscopy", Phys. Rev. B 75, 125315 (2007).
12. B. Pal, S.Yu. Verbin, I.V. Ignatiev, M. Ikezawa, Y. Masumoto: "Nuclear-spin effects in singly negatively charged InP quantum dots", Phys. Rev. B75, 125322 (2007).
13. Y. Masumoto, K. Mizuochi, K. Bando and Y. Karasuyama: "Optical anisotropy of excitons and biexcitons in InP quantum dots", J. Lumin. 122-123, 424 (2007); Int. Conf. on Luminescence and Optical Spectroscopy of Condensed Matter (ICL'05) (Beijing, 2005).
14. 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", J. Lumin. 122-123, 730 (2007); Int. Conf. on Luminescence and Optical Spectroscopy of Condensed Matter (ICL'05) (Beijing, 2005).//INVITED PAPER//
15. 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).
16. S. Tomimoto, M. Matsubara, T. Ogasawara, H. Okamoto, T. Kimura and Y. Tokura: "Optical control of the magnetic anisotropy of ferromagnetic bilayered manganites", Phys. Rev. Lett. 98(1), 017402-1-4 (2007).
17. K. Tsumura, S. Nomura, P. Mohan, J. Motohisa, and T. Fukui:"Aharonov-Bohm oscillations in photoluminescence from charged exciton in quantum tubes", Jpn. J. Appl. Phys. 46 (18) L440 - L443 (2007).
18. S. Nomura and K. Tsumura:"Neutral and charged excitons in a quantum tube", Surf. Sci. 601 (2) 441-449 (2007).
19. H. Ito and S. Nomura, "Fabrication of highly ordered arrays of nanoparticles by mechanical process", Jpn. J. Appl. Phys. 45, (11) 8997-8999 (2006).
20. M. Yamaguchi, S. Nomura, T. Akazaki, H. Tamura, H. Takayanagi, "Controlling electric field and elecrtron density in a double-gated GaAs/AlGaAs quantum well", J. Appl. Phys. 100, 113523 (2006)
21. H. Tamura, S. Nomura, M. Yamaguchi, T. Akazaki, H. Takayanagi, P. Mohan, J. Motohisa, and T. Fukui, "Magneto-optical properties of electron-hole states in GaAs quantum wires", J. Phys. 38 130-133 (2006).
22. 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 34, 292 (2006).

23. 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 34, 315 (2006).
24. M. Yamaguchi, S. Nomura, K. Miyakoshi, T. Akazaki, H. Tamura and H. Takayanagi, "Electric-field control of electron–hole wave functions in a wide quantum well", Physica E 34, 300 (2006).
25. K. Yamamoto and S. Nomura, "Energy compensated mode in a waveguide composed of lossy left-handed metamaterial", Opt. Commun. xxxx (2007) doi:10.1016/j.optcom. 2007.04.005.

＜国際会議＞

1. A.Yu. Egorov, V.K. Kalevich, M.M. Afanasiev, A.Yu.Shiryaev, V.M. Ustinov,M. Ikezawa and Y. Masumoto: "Spin relaxation in charge tunable quantum dots", Proc. Ioffe Institute 14th Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology", p.158 (St. Petersburg, 2006).
2. V.K.Kalevich, E.L. Ivchenko, M.M. Afanasiev, A.Yu. Egorov, A.Yu. Shiryaev, V.M. Ustinov, B. Pal and Y. Masumoto: "Optical pumping and spin-dependent recombination in GaAsN alloys", Proc. Ioffe Institute 14th Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology", p.59 (St. Petersburg, 2006).
3. Y. Masumoto, B. Pal, S. Oguchi and M. Ikezawa: "Spin lifetime in electron-doped InP quantum dots", presented at 28th Int. Conf. Physics of Semiconductors, (Abstract p. 369) (Vienna, 2006).
4. Yu. Verbin, B. Pal, M. Ikezawa, I.V. Ignatiev and Y. Masumoto: "Nuclear spin effects in negatively charged InP quantum dots", presented at 28th Int. Conf. Physics of Semiconductors, (Abstract p. 233) (Vienna, 2006).
5. K. Tsumura, S. Nomura, T. Akazaki and H. Takayanagi,, "Optical effects on transport phenomena in superconductor-normal metal-superconductor junctions", First International Symposium on Atomic Technology (ISAT-2007), (16-17, Mar. 2007, Tsukuba).
6. N. Hayashi, K. Tsumura, S. Nomura, M. Yamaguchi, H. Tamura, T. Akazaki, Y. Hirayama, "Mapping of two-dimensional electrons system in magnetic fields by local optical excitations", First International Symposium on Atomic Technology (ISAT-2007), (16-17, Mar. 2007, Tsukuba).
7. K. Tsumura, S. Nomura, T. Akazaki and H. Takayanagi, "Optically Modulated Transport Properties of Superconductor-Normal Metal-Superconductor Junctions", International Conference on Nanoelctronics, Nanostructures and Carrier Interactions 2007 (20 - 23 Feb. 2007, Atsugi).
8. N. Hayashi, K. Tsumura, S. Nomura, M. Yamaguchi, H. Tamura, T. Akazaki, Y. Hirayama, "Conductance Measurement on GaAs/AlGaAs Heterostructure under Local Optical Excitations", International Conference on Nanoelctronics, Nanostructures and Carrier Interactions 2007 (20. - 23 Feb. 2007, Atsugi).
9. M. Yamaguchi, S. Nomura, T. Maruyama, S. Miyashita, Y. Hirayama, H. Tamura, T. Akazaki, "Simultaneous Measurement of Photoluminescence and Capacitance Spectra in GaAs QW", International Conference on Nanoelctronics, Nanostructures and Carrier Interactions 2007 (20 - 23 Feb. 2007, Atsugi).
10. S. Nomura, K. Tsumura, P. Mohan, J. Motohisa and T. Fukui, "Aharonov-Bohm Effect of an Electron-Hole Composite System in Quantum Tubes", International Conference on Nanoelctronics, Nanostructures and Carrier Interactions 2007 (20 - 23 Feb. 2007, Atsugi).
11. S. Nomura, K. Tsumura, J. Motohisa and T. Fukui, "Aharonov-Bohm oscillation of a charged exciton in a quantum tube", 12th Advanced Heterostructure Workshop (4 - 8 Dec. 2006, Hawaii).
12. M. Yamaguchi, S. Nomura, K. Miyakoshi, Hiroyuki Tamura, T. Akazaki, H. Takayanagi, "Controlling electric field and electron density in a double-gated GaAs/AlGaAs quantum well", 12th Advanced Heterostructure Workshop (4 - 8 Dec. 2006, Hawaii).

13. K. Tsumura, S. Nomura, T. Akazaki and H. Takayanagi, "Optical modulation of transport properties of superconductor-normal metal-superconductor junction", International Autumn Seminar on Science and Engineering in Superconductivity for Young Scientists, (23-29, Nov. 2006, Higashi-Izu).
14. S. Nomura, M. Yamaguchi, T. Akazaki, K. Miyakoshi, H. Tamura, H. Takayanagi, and Y. Hirayama, "Enhancement of electron effective mass and reduced mass in a dilute electron density regime", 28th International Conference on Physics of Semiconductors (ICPS28), (24-28 July, 2006, Wien).
15. S. Nomura and T. Iitaka, "Order-N electronic structure calculation of n-type GaAs quantum dots" , 28th International Conference on Physics of Semiconductors (ICPS28), (24-28 July, 2006, Wien).

＜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（2007 年 3 月）

1. 烏山陽子: "単一 InP 量子ドットの光スペクトル— 偏光特性と磁場特性 —"
2. 黒川篤: "離散的高さの InAs 量子ディスクの時間分解発光分光"
3. 利行健: "チャージチューナブル InP 量子ドットにおけるスピン緩和と円偏光フォトルミネッセンス"
4. 藤原聖士: "(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とマイクロレーザー"
5. 渡辺伸人: "ZnP2 単結晶中の超短パルス伝播"
6. 姜承求: "二つの半導体量子ドットの電子フォーカシングによる結合の研究"
7. 林伸明: "空間分解局所光励起下での GaAs/AlGaAs 単一ヘテロ構造の伝導測定"
8. 小野絢哉: "走査型近接場顕微鏡を用いたナノスケール半導体の発光空間分布に関する研究"

＜講演＞

1. 後藤健, パル ビプル, 舛本泰章, モハン プリミーラ , 本久順一, 福井孝志: "InP/InAs/InP コアマルチシェル型ナノワイヤの時間分解発光スペクトル" 日本物理学会（2006 年 9 月）
2. 黒川篤,冨本慎一, 佐久間芳樹,臼杵達哉, 舛本泰章: "原子層レベルの離散的高さ分布を持つディスク状 InAs 量子ドットの時間分解発光分光" 日本物理学会（2006 年 9 月）
3. 阪東一毅,舛本泰章: " InP 単一量子ドットの発光干渉測定" 日本物理学会（2006 年 9 月）
4. 藤原聖士, 阪東一毅, 舛本泰章, 佐々木史雄, 小林俊介, 原市聡, 堀田収: "(チオフェン・フェニレン)コオリゴマー結晶のリング状マイクロレーザー" 日本物理学会（2006 年 9 月）
5. 後藤健, パル ビプル , 舛本泰章, モハン プリミーラ , 本久順一, 福井孝志: "InP/InAs/InP コアマルチシェル型ナノワイヤの時間分解発光スペクトルII" 日本物理学会（2007 年 3 月）
6. 藤原聖士, 阪東一毅, 舛本泰章, 佐々木史雄, 小林俊介, 原市聡, 堀田収: "(チオフェン・フェニレン)コオリゴマー結晶のリング状マイクロレーザーII" 日本物理学会（2007 年 3 月）
7. 阪東一毅, 舛本泰章: "InP 単一量子ドットにおける励起子の発光自己相関測定" 日本物理学会（2007 年 3 月）
8. 利行健, 鈴木宰, 池沢道男, 舛本泰章: "チャージチューナブル InP 単一量子ドットにおけるスピン緩和" 日本物理学会（2007 年 3 月）
9. 舛本泰章, 小口修平, パル ビプル, 池沢道男: "InP 単一量子ドットにおけるドープ電子のスピン緩和" 日本物理学会（2007 年 3 月）
10. 阪東一毅, 中村俊輝, 藤原聖士, 舛本泰章,小林俊介, 佐々木史雄, 下位幸弘, 堀田収: "(チオフェン・フェニレン)コオリゴマー結晶の励起子遷移における会合体的性質" 日本物理学会（2007 年 3 月）
11. 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

マー結晶の光学遷移における会合体的性質" 第67回応用物理学会（2006年9月）

12. 冨本 慎一, 黒川 篤, 佐久間 芳樹, 臼杵 達哉, 舛本 泰章: "原子層数で決まる離散的な高さ分布を持つディスク状InAs量子ドットの発光寿命測定" 第67回応用物理学会（2006年9月）
13. 佐々木史雄、小林俊介、原市聡、藤原聖士、阪東一毅、舛本泰章、堀田収: "（チオフェン/フェニレン）コオリゴマー(TPCO)薄膜におけるマイクロレーザー発振" 平成 18 年度ナノサイエンス特別プロジェクト研究成果発表会（2007年3月）
14. 後藤健、パル ビプル、舛本泰章、モハン プリメーラ、本久順一、福井孝志: "InP/InAs/InPコアマルチシェル型ナノワイヤにおける励起子緩和過程" 平成 18 年度ナノサイエンス特別プロジェクト研究成果発表会（2007年3月）
15. 利行健、鈴木宰、池沢道男、舛本泰章: "チャージチューナブルInP量子ドットにおける励起子準位の交差・反交差" 平成18年度ナノサイエンス特別プロジェクト研究成果発表会（2007年3月）
16. 渡辺伸人、池沢道男、舛本泰章: "ZnP2単結晶中の超短パルス伝播" 平成18年度ナノサイエンス特別プロジェクト研究成果発表会（2007年3月）
17. 冨本慎一、黒川篤、佐久間芳樹、臼杵達哉、舛本泰章: "ディスク状InAs量子ドットにおける励起子再結合寿命の測定" 平成18年度ナノサイエンス特別プロジェクト研究成果発表会（2007年3月）
18. Shinichi Tomimoto, Atsushi Kurokawa, Yoshiki Sakuma, Tatsuya Usuki, Yasuaki Masumoto: "Recombination lifetime measurements of excitons confined in ultrathin disk-shaped InAs quantum dots" 第1回アトミックテクノロジー国際シンポジウム（2007年3月）
19. 野村晋太郎, 津村公平: "量子チューブにおける荷電励起子エネルギーの AB 振動" 日本物理学会（2007年3月）
20. 山本貴一, 野村晋太郎: "負の屈折率をもつ物質を使用した光導波路中における"遅い光"へのエネルギー損失補償" 日本物理学会（2007年3月）
21. 林伸明,津村公平, 野村晋太郎, 山口真澄, 田村浩之, 赤崎達志, 平山祥郎: " 空間分解局所光励起下でのGaAs/AlGaAs単一ヘテロ構造の伝導測定" 日本物理学会（2007年3月）
22. 津村公平, 野村晋太郎, 赤崎達志, 高柳英明: " 超伝導体・半導体接合の顕微光照射によるイメージング" 日本物理学会（2007年3月）
23. 山口真澄, 野村晋太郎, 丸山達朗, 赤崎達志, 田村浩之, 高柳英明, 宮下宣, 平山祥郎: "非ドープGaAs量子井戸におけるキャパシタンスと荷電励起子発光の対応" 日本物理学会（2007年3月）
24. 赤崎達志, 山口真澄, 津村公平, 野村晋太郎, 高柳英明: " InAlAs/InGaAsヘテロ構造における負の光伝導" 日本物理学会（2007年3月）
25. 野村晋太郎: " 二次元電子系低電子密度領域の発光分光による研究" 平成18年度ナノサイエンス特別プロジェクト研究成果発表会（2007年3月）
26. 津村公平, 野村晋太郎, 赤崎達志, 高柳英明: " 半導体２次元電子ガスを用いた超伝導体・常伝導金属接合の光応答" 平成18年度ナノサイエンス特別プロジェクト研究成果発表会（2007年3月）
27. 山本貴一, 野村晋太郎: " 損失性媒質左手系メタマテリアルを使用した光導波路中において「遅い光」を実現する方法" 平成18年度ナノサイエンス特別プロジェクト研究成果発表会（2007年3月）
28. 野村晋太郎: " 量子チューブ中荷電励起子のアハロノフボーム効果" 東北大プロジェクト研究会「ナノ半導体物理の構築とその作製・計測技術の開拓」(2006年11月)
29. 津村公平, 野村晋太郎, 本久順一, 福井孝志: "量子チューブ中アハロノフーボーム効果の光学検出" 日本物理学会 (2006年9月)
30. 林伸明, 津村公平, 野村晋太郎, 山口真澄, 田村浩之, 赤崎達志: " n型量子井戸の空間分解光伝導測定" 日本物理学会 (2006年9月)

31. 野村晋太郎, 飯高敏晃: "n 型量子ドットのオーダーN 電子状態計算" 日本物理学会 (2006 年 9 月)
32. 赤崎達志, 山口真澄, 津村公平, 野村晋太郎, 高柳英明: " 超伝導体／半導体接合への光照射の影響" 第 67 回応用物理学会 (2006 年 9 月)

国際特許出願

"Process of producing microparticles and nanostructures by using nanoporous material", 指定国　US, Canada, EP, JP, 国際出願番号PCT/JP2005/009990, 特願2006-514010(2006/11/01)発明者　野村晋太郎, 伊藤宙陛　出願人独立行政法人科学技術振興機構