IX - 2.　半導体物性グループ

教　授　　舛本　泰章
准教授　　野村　晋太郎、池沢　道男
助　教　　冨本　慎一
研究員　　後藤　健、伊藤　宙陛
大学院生　（１５名）

【１】　半導体量子ドットのスピン光物性（舛本泰章、冨本慎一）

（１）時間分解カー回転法による伝導電子のｇ因子の符号の決定
（冨本慎一、野澤伸介、舛本泰章）［論文 9, 16］

ポンプ・プローブ法による時間分解カー回転（TRKR）の観測において、半導体中の伝導電子のスピン歳差運動の方向を見出し、g因子の符号を決定する新しい方法を開発した。この方法は図1に示すように、試料表面に対して大きな入射角（～45°）をもつポンプ光を用いる。この場合、生成する電子のスピンは一般に図のように試料表面の法線方向（図１のｚ軸）からポンプ光軸の向きに少し傾いたものとなる。一方、プローブ光は試料に垂直に入射させ、ｚ軸方向のスピン成分の変化をTRKRで観察する。スピンは磁場に垂直な面内で歳差運動するが、その回転方向によって TRKR に現れる振動の初期位相が異なるので、そこからスピンの回転方向を判断することができる。実際の実験では、磁場方向を反転した２つの TRKR のデータを取得して比較し、それらの位相差の符号からｇ因子の符号を決定した。図２はCdTe/ZnTe量子井戸での実験結果である。ポンプ・プローブ光のエネルギーE を、励起子 PL バンドの高エネルギー側で2.27 eV から 2.31 eV まで変化させた時のデータを (a) から (d) までのパネルに示す。磁場Ｂ＝＋６Ｔ（実線）とＢ＝－６Ｔ（破線）の２つのデータの間に位相差が現れており、全てのエネルギーでＢ＝－６Ｔ（破線）の振動が遅れているのが分かる。これは電子のｇ因子が負であることを示している。位相差の大きさは2.28 eV と 2.29 eV の間で急激に変化しているが、これは2.29 eV 以上でライトホールバンドからの励起が起きるためである。同じ方法は、希薄磁性半導体において有効ｇ因子の符号を決定する際にも利用できる。我々は 1.3%の Cd を Mn で置換した量子井戸で同様の実験を行い、有効ｇ因子の符号が正であることを見出した。これは、この量子井戸内の Mn イオンの d 電子と伝導電子とのスピン間相互作用において、通常のポテンシャル交換相互作用が優勢であることを示している。

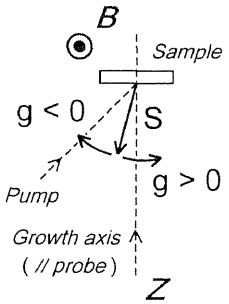

図１：試料と磁場（正方向）とポンプ・プローブ光軸の実験配置

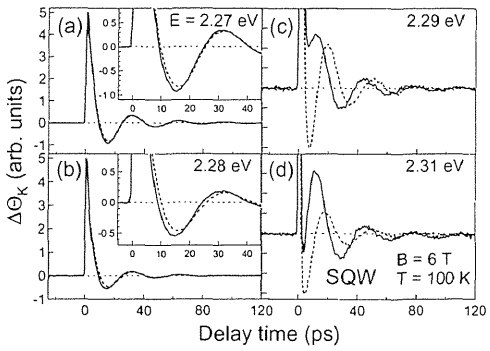

図２：CdTe/ZnTe量子井戸における TRKR の測定結果（T＝100 K）

（2）ZnO 薄膜における電子スピンダイナミクス（冨本慎一、野澤伸介、舛本泰章）［論文 11］

ウルツ鉱型結晶構造をもつ ZnO や GaN では、結晶場分裂がスピン・軌道相互作用に比べて大きいために、価電子帯の構造が閃亜鉛鉱型半導体とは異なる。そのため、バンド間遷移の光学選択則も異なったものとなる。ZnO における電子スピンの偏極と緩和のダイナミクスを TRKR 法によって調べた。試料は a 面サファイア基板上に MBE 成長した ZnO 薄膜であり、$6\times10^{17}$ $cm^{-3}$ の濃度で Ga をドープしたもの（厚さ 1.45 μm）とノンドープのもの（同 1.1 μm）の 2 種類である。これらの試料の低温（15 K）での PL スペクトルを図 3 に示す。波長 367.6 nm 付近に自由励起子によるピークが 2 種類の試料に共通して見られるが、Ga をドープした試料では 369.5 nm 付近にドナー束縛励起子による強いピークが現れている。この試料での TRKR の測定結果（温度 7 K、磁場 2 T）を図 4 に示す。ポンプ・プローブ光の波長が自由励起子ピークに共鳴している時（366 nm）、観測されるスピンビートの寿命は 2.5 ns 程度であった。ノンドープの試料でもこれに近い寿命の信号が同じ波長で観測された。一方、ポンプ・プローブ波長がドナー束縛励起子に共鳴している時（370 nm）、スピンビートの寿命は長くなり、レーザーパルスの繰り返し周期（13 ns）を超えている。この長寿命の信号はノンドープの試料では現れないため、中性ドナーに束縛されている電子によるものと考えられる。この電子のスピンコヒーレンスは励起子から移されたもので、Elliott-Yafet 機構などの通常の自由電子のスピン緩和メカニズムが効かないために寿命が非常に長くなっている。ビート周波数から g 因子は、自由電子・ドナー束縛電子の双方に対して 1.97 と求められた。これは、結晶軸に対する磁場の方向によらず等方的である。また、光生成電子のスピン偏極の方向は常に結晶の c 軸に平行であった。これは、偏極方向がポンプ光の入射角に依存する閃亜鉛鉱型半導体の場合とは対照的な結果であり、価電子帯構造の違いを反映したものである。

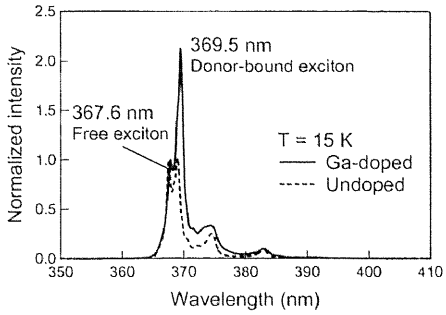


図 3：ZnO 薄膜の PL スペクトル

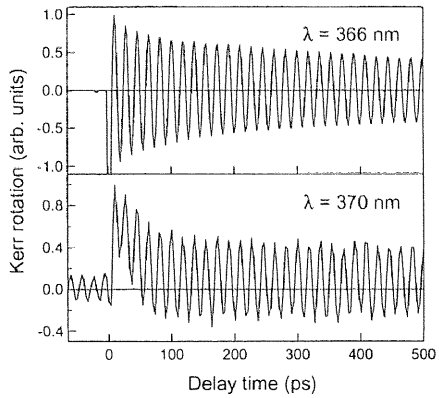


図 4：Ga をドープした ZnO 薄膜の TRKR データ（T=7 K、B=2 T）

（3）光パルスの強度・偏光による量子ドット中の電子スピンの制御
（冨本慎一、川名啓介、舛本泰章）［論文 4, 14］

1 個の電子がドーピングされた半導体量子ドットでは、トリオン（負の荷電励起子）への遷移に共鳴する光パルスの照射によって、電子（s = 1/2）の 2 つのスピン準位間にコヒーレンスを生成することが出来る。この状態は光の強度や偏光状態、バンド幅に敏感に依存し、これらのパラメータの調整によってスピン偏極の方向と大きさを制御できる。バイアス電圧の印加によって 1 個の電子がドーピングされた量子ドット（チャージチューナブル InP/InGaP 量子ドット）において時間分解磁気光学測定を行った。ピコ秒パルスレーザー光の照射によって電子スピンのコヒーレンスがどのように生成されるかを実験的に調べ（図 5）、その結果を密度行列を用いた理論計算によって説明した（図 6）。

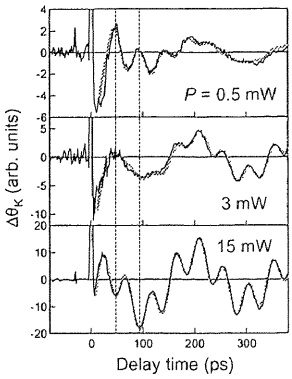


図5：InP 量子ドットにおける時間分解カー回転の測定結果（励起強度依存性）。励起強度の違いによるスピン偏極方向の反転が、逆位相の振動として現れている。

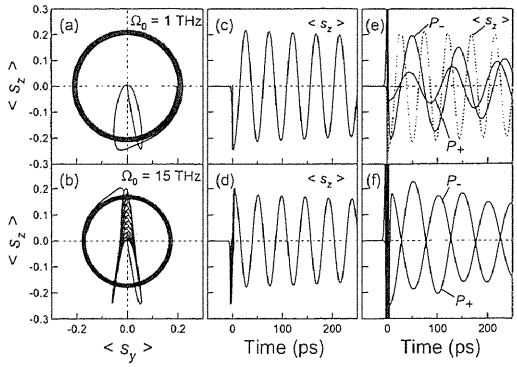


図6：共鳴パルス光を照射した電子・トリオン4準位系の密度行列計算の例（光強度 $\Omega_0$= 1 THz 及び 15 THz の場合）。（左）磁場に垂直な面内で電子スピンが描く軌道。（中）電子スピンの光軸（z 軸）方向成分の時間発展。実験で観測された逆位相の振動を再現している。（右）電気分極の2つの回転成分の時間発展。

## 【2】単一量子ドットの分光研究（池沢道男、舛本泰章）

### （1）単一 GaP:N 等電子トラップの磁気分光

（池沢道男、濱野毅信、佐久間芳樹[A]、舛本泰章　[A]物質・材料研究機構）

窒素ドープしたリン化ガリウム(GaP:N) 結晶中に形成される NN ペア等電子発光中心を、単一発光中心の磁場中発光によって調べた。NN ペアは2つの窒素原子が近接するリン原子2つを置換することによって形成され、エネルギーの揃った単一光子源として有用であるが、NN ペアの周りに生じる異方的な結晶場のために、励起子準位が原子配置に依存した微細分裂を示す。このような NN ペアの微細分裂を制御したり、原子配置に関する新たな知見を得るために、向きを特定した NN ペアに対して磁場を様々な方向から印加して発光スペクトルを測定した。

ここでは、二軸異方性($C_{2v}$)を持つ $NN_4$ 発光中心を取り上げる。これまでの我々の研究で、$NN_4$ は[0,0,0]-[4,4,0]というリン原子の面心立方副格子位置を置換した窒素原子対であることが分かっている。図7(a) は、観測方向に垂直な(001)結晶面内に形成された単一 $NN_4$ 発光スペクトルの磁場依存性である。ゼロ磁場においても、前述の局所的な結晶場と電子正孔交換相互作用のために、励起子状態が分裂している。高エネルギー側の2つのピークが、全角運動量 J=1 に対応する bright 励起子状態であり、低エネルギー側に

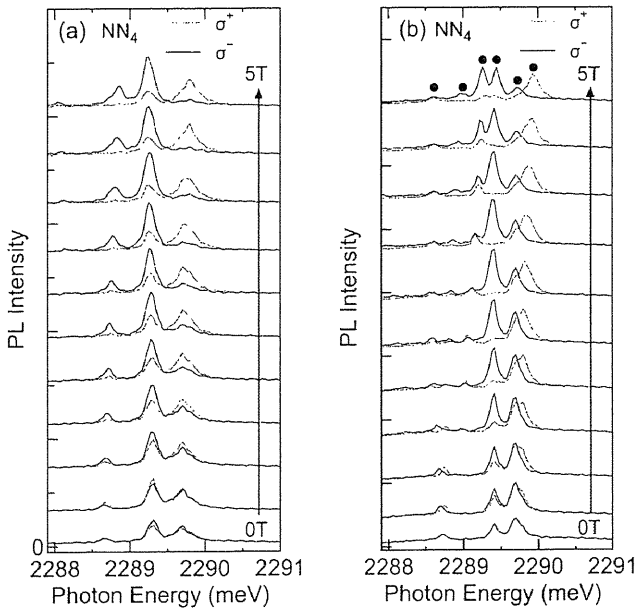


図7：単一 $NN_4$ の磁場中の励起子微細構造（Faraday 配置）。(a) は、一原子層のみのドープを行った試料で観測される分裂パターン。(b) は、複数層のドープを行った試料で時折観測される分裂パターン。これらはそれぞれ、偏光異方性からドープ面 (001) 内形成される $NN_4$ と、ドープ面に垂直な面内 (100) や (010) に形成される $NN_4$ と考えられている。

見られる弱いピークが J=2 の dark 励起子状態の一つである。このような $NN_4$ に Faraday 配置で磁場を印加すると、N-N 軸と直交する方向($C_2$ 回転軸)に磁場を印加することになる。磁場印加に伴って、bright 励起子の分裂幅が増大すると共に、dark 励起子ピーク強度が増大しているのが分かる。観測されたピークエネルギーの磁場依存性を図 8(a) に示した。複数層のドープを行うと、ドープ面に垂直な面内に $NN_4$ が形成されるようになるが、これは偏光方向で見分けることが出来る。その磁場依存性を図 7(b) に示した。ゼロ磁場でのスペクトルは図 7(a) にかなり近いが、磁場依存性はまったく異なっており、磁場印加と共に新しいピークが現れ、5T では合計 6 本のピークが観測される（図 8(b)）。

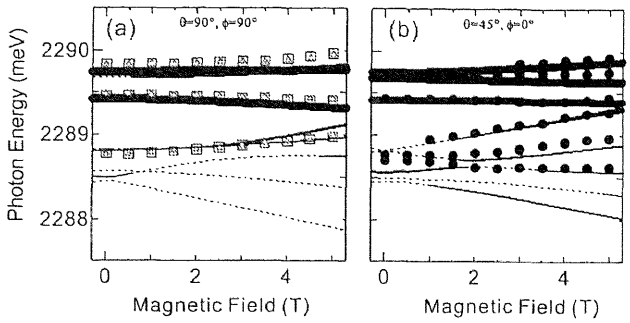


図 8: $NN_4$ に束縛された励起子状態についての計算結果。(a) がドープ面内に存在する $NN_4$ について、(b) がドープ面に垂直な面内の $NN_4$ について。観測された磁場依存性は定性的にはほぼ再現されている。

観測された磁場依存性を説明するために、ハミルトニアンに Zeeman 相互作用の項を加え、重い正孔と軽い正孔と電子スピンの向きを考慮した合計 8 つの基底を用いて、磁場中のエネルギー固有値と固有状態を計算した。図 8 の点線がエネルギー固有値の磁場依存性を表す。線の太さが、その状態に含まれる bright 励起子成分に比例するように描いてある。図 8(a) と (b) の計算では同じ物質パラメータを用いて磁場の方向だけを変えているが、実験データの特徴はほぼ再現できている。これ以外にも、Voigt 配置で可能な 2 つの磁場方向に関しても同様に実験と計算の一致が得られており、$C_{2v}$ 対称性を持つ NN ペアの磁場中の振る舞いについてほぼ理解できたと言える。

直接遷移型のバンド構造を持つヒ化ガリウム (GaAs) 結晶中の窒素等電子発光中心について、単一光子源としての観点から調べた。これまで、等電子発光中心として広く知られるリン化ガリウム中の NN ペア発光中心について、単一光子発生の実証や NN 原子配置の特定を報告してきたが、より高い発光レートが期待できる、直接遷移型の GaAs に窒素をドープした GaAs:N 中に形成される発光中心を研究した。窒素の希薄ドープによって、バンドギャップエネルギー中に鋭い輝線スペクトルから成る発光帯が現れる（図 9(a)）。発光は空間的に局在した状態から起こっていることが分かっており、また輝点の濃度が二次イオン質量分析法で調べた窒素濃度（$[N]=3\times10^{12}/cm^2$）よりずっと低いことから、単一の窒素原子ではなく NN ペアのような複数の窒素または、窒素と他の希薄不純物や欠陥との複合的な発光中心であると考えられる。その発光寿命は短いものでは 1ns を切り、期待したように GaP:N 中の NN 発光中心の数十倍の発光レートを示した。この明るい発光中心を用いて、Hanbury Brown and Twiss (HBT) 相関計で単一光子発生の検証を行い、図 9(b) のように 50MHz の高繰り返し光パルス励起下でも明確なアンチバンチングを観測した。GaAs 中の不純物発光中心からの単一

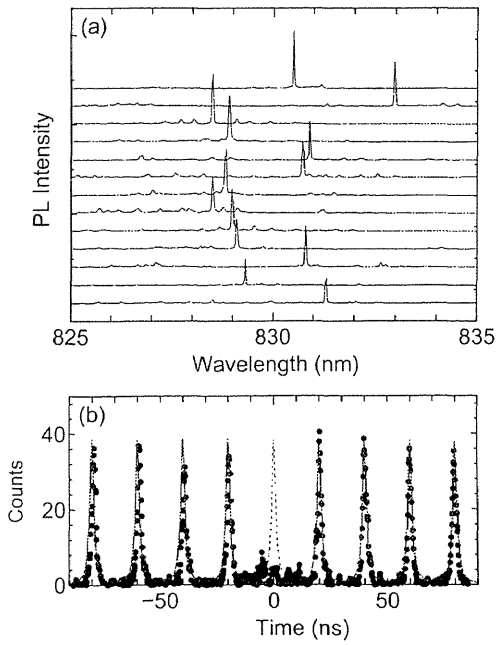


図 9 : (a) GaAs:N で見られる発光中心のスペクトル分布。830nm 付近に鋭い輝線スペクトルを持つ発光中心が多数観測される。(b) 単一発光中心からの単一光子発生を示す HBT 強度相関信号。中央ピークの消失から単一光子発生が確認できる。

光子発生が初めて達成された。

【3】新しい半導体ナノ構造（舛本泰章、後藤健、池沢道男、冨本慎一）

（1）通信波長帯に近いInAs/InP量子ドットの励起子分子の大きな束縛エネルギー
（舛本泰章、吉田清太郎、池沢道男、佐久間芳樹[A]、冨本慎一 [A]物質・材料研究機構）
［論文13, 15］

量子ドット中の励起子分子は励起子微細構造（分裂）が小さいと、もつれあい光子対を発生するので、温度安定性の指標となる励起子分子の束縛エネルギーは大きいことが実用上重要である。大きな束縛エネルギーを生み出す戦略を明らかにする目的で、単一量子ドット分光に比べて格段に効率的に励起子分子の束縛エネルギーを決定できるマクロ測定である時間領域からの量子ビート測定を用いて、通信波長帯に近い InAs/InP 量子ドットを対象に、時間領域から量子ドットの励起子分子の束縛エネルギーを決定した。超高感度ヘテロダイン検出フォトンエコー法による量子ビート測定を用いて、歪みが極小化されたディスク状 InAs/InP 量子ドットの励起子分子の束縛エネルギーを計測した。

1.1～1.36μm で発光する 1 原子層（ML）単位で精密に制御された数原子層のディスク状 InAs/InP 量子ドットを対象として、光ヘテロダイン検出フォトンエコーにより、励起子の位相緩和時間 $T_2$ と励起子分子束縛エネルギー$E_B$が調べられた。2K における $T_2$は、3ML、4ML の高さの量子ドットにおいてそれぞれ 31ps(3ML)、41ps(4ML)と見積もられた。フォトンエコー信号の初期時間領域に励起子-励起子分子遷移による量子ビートが観測され、その振動周期から励起子分子束縛エネルギー$E_B$ を $E_B$(3ML) = 3.4meV、$E_B$(4ML)＝4.1meV と見積もられた。これは、1.1～1.36μm の近赤外域で発光する量子ドットとして最大である。ディスク形状のため歪が極小化されることが最大の励起子分子束縛エネルギーを持つ理由と考察した。

（2）ウルツ鉱型 InP/InAs/InP コアマルチシェルナノワイヤの光学的性質
（後藤健、舛本泰章、吉田清太郎、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）［論文3,7］

ウルツ鉱型 InP/InAs/InP コアマルチシェルナノワイヤは、長さが 2 μm、幅が 140 nm の六角柱状のナノワイヤであり、InP の核と外殻によって InAs が挟まれた構造をしている。表面の被覆により外気に対して不活性化された InAs は、六角ナノチューブとしての性格を持っており、側面と角の領域はそれぞれ量子井戸と量子細線の性質を有している。また、InAs および InP の a 軸（c 軸）方向の格子定数は、それぞれ 4.2 Å（6.9 Å）、4.0 Å（6.6 Å）であり、内包されている InAs 層は約 4 %の格子定数の違いによる三次元歪み（静水圧歪み）を受けている（図 10(a)）。この大きな圧縮歪みが InAs の伝導帯を引き上げ、タイプ II 型量子井戸のバンド構造を形成することが Model-solid theory から示唆される。タイプ II 型バンド構造においては、電子と正孔の空間的な分離により波動関数の重なりが減少するために再結合寿命が長く、100ns 以上まで発光が持続することが確認できる（図 10(c)）。

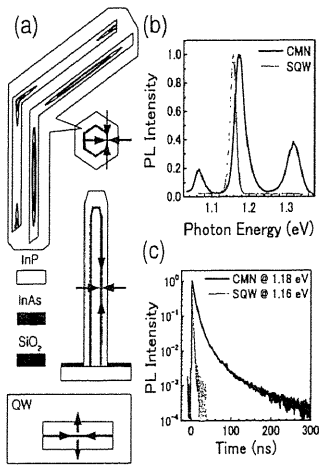

図 10：(a) コアマルチシェルナノワイヤの断面図。角および側面に局在した正孔の波動関数。(b) コアマルチシェルナノワイヤおよび単一量子井戸の発光スペクトルと(c) 発光減衰。

長い発光持続時間は、コアマルチシェルナノワイヤにおける側面（量子井戸）領域から角（量子細線）領域への励起子の移動が観測を可能にする。励起強度 61pJ の下で、ストリークカメラおよび単一光子計測法を用いて時間分解発光測定を行った。発光スペクトルが時間の経過に伴い低エネルギー側にシフトする、スペクトル拡散が明らかにされた。発光スペクトルの平均

値エネルギーをプロットすると、およそ 10ns で 15 meV レッドシフトした後、拡散速度が遅くなることが見出された(図 11(a))。この拡散速度の変化は、励起子がコアマルチシェルナノワイヤの側面である量子井戸領域から角の量子細線領域に移動したことを示している。双極子-双極子相互作用によって励起子が移動するモデルを考え、量子井戸（二次元）および量子細線（一次元）領域中の励起子について計算した結果、閉じ込め領域の次元の減少に従って、拡散速度が遅くなることが示された。発光線幅（42meV）やコアマルチシェルナノワイヤの側面領域と角領域それぞれに局在した正孔の閉じ込めエネルギー（3meV：有限要素法により計算）をパラメータとして分布関数を与えると、測定結果とも良くフィッティングする（図 11(a)）。従って、励起子がコアマルチシェルナノワイヤ中の量子井戸（側面）領域から量子細線（角）に移動することによって、10ns までは早い拡散が、10ns 以降は遅い拡散がそれぞれ生じることを見出した。

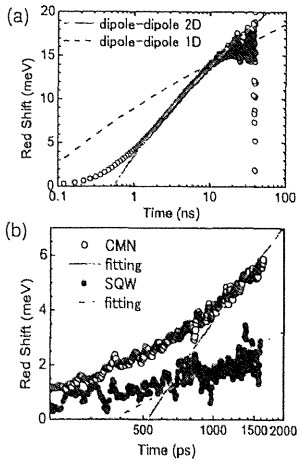


図 11：(a) 発光の平均エネルギーのレッドシフト。(b) コアマルチシェルナノワイヤおよび単一量子井戸の発光平均エネルギーのレッドシフト。

双極子-双極子相互作用による励起子移動は、タイプ I 型およびタイプ II 型バンド構造中のどちらの励起子についても、試行関数が同じであるために相互作用ハミルトニアンの表式に違いはなく、タイプ I 型・II 型とも同じモデルを用いた議論に問題がないことを示した。その上で、タイプ I 型バンド構造を有する閃亜鉛鉱型 InP/InAs 単一量子井戸との比較を行った。InP/InAs 単一量子井戸の発光線幅は、InP/InAs/InP コアマルチシェルナノワイヤに比べて約半分（19meV）と狭く、スペクトル拡散の速度が遅いことも観測された（図 11(b)）。これは、上記の双極子-双極子相互作用による励起子移動モデルを用いて良く再現され、同一次元内においては発光線幅が狭いほど拡散速度が遅くなることがわかった。

（3）単一ウルツ鉱型 InP/InAs/InP コアマルチシェルナノワイヤーの偏光ルミネッセンス（舛本泰章、平田裕基、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）
［論文 17］

新しいナノ構造であるウルツ鉱型 InP/InAs/InP コアマルチシェルナノワイヤーは単原子層から 4 原子層の厚みを持つ InAs 層の六角チューブを内側と外側から InP 層ではさむ構造であり、InAs 層の六角チューブの側面が InAs 量子井戸、側線が量子細線というように 1 つのナノワイヤーの中に 2 つの量子構造を含んでいる。ナノワイヤーの長軸の長さ 2000nm は六角の対角線の長さ 140nm に比べて一桁以上長い。この単一の InP/InAs/InP コアマルチシェルナノワイヤーの発光の偏光

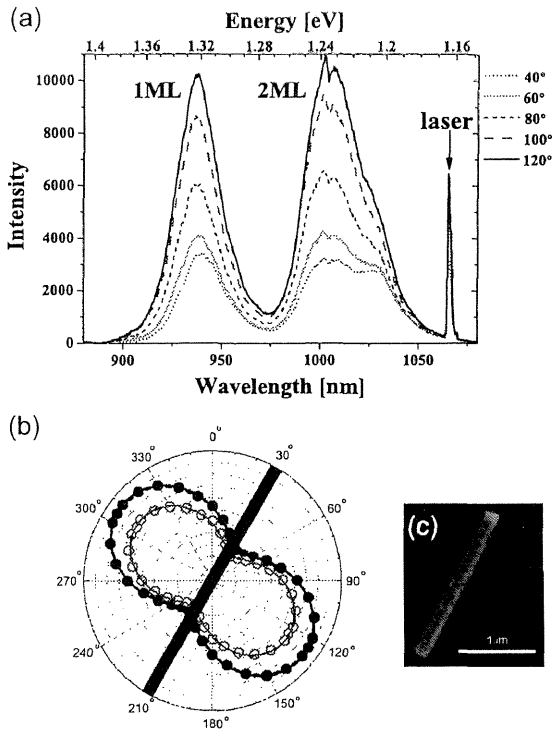


図 12: (a) 単一 InP/InAs/InP コアマルチシェルナノワイヤーの直線偏光発光スペクトル。(b) 一原子層 InAs からの直線偏光発光バンドと二原子層 InAs からの直線偏光発光バンドの積分強度の角度依存性（●：一原子層、○：二原子層）。(c) 単一 InP/InAs/InP コアマルチシェルナノワイヤーの走査電子顕微鏡像。

特性を、顕微分光手法を用いて詳しく調べた。六角のナノワイヤーを円柱と近似し、光の波長に比べて円柱の半径が短いとき、電磁波の真空と誘電体円柱との境界条件からナノワイヤーの長軸に強く偏光した光がナノワイヤーに侵入し、またナノワイヤーから放出されることになるが、単一の InP/InAs/InP コアマルチシェルナノワイヤーの発光の直線偏光特性は、ウルツ鉱型構造による光遷移の偏光選択則から、c - 軸方向に向いたナノワイヤーの長軸と垂直方向に強く偏光していることが明らかにされた（図 12 (a), (b), (c) 参照）。単原子層 InAs ナノチューブからの円偏光度は平均 - 0.41、2 原子層 InAs ナノチューブからの円偏光度は平均 - 0.44 となり、遷移の双極子がナノワイヤーの短軸に完全にそろっていると仮定して得られる - 0.5 にきわめて近くほぼ完全なウルツ鉱型を持っていると結論される。InAs 価電子帯の対称性（$\Gamma_9$ または $\Gamma_7$）に応じた直線偏光特性を生じている。

（4）（チオフェン/フェニレン）コオリゴマー結晶を用いたマイクロレーザー作製プロセスの研究

（井門靖樹、舛本泰章、佐々木史雄[A]、原市　聡[A]、堀田　収[B]　[A]産総研光技術, [B]京工繊大繊維）

[論文 8, 10]

（チオフェン/フェニレン）コオリゴマー [2,5-Bis(4-biphenylyl)oligothiophenes (BP*n*T)] 結晶は、π 電子共役系化合物で室温において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、先に BP1T の薄膜結晶を用いたマイクロサイズの光閉じ込め構造において、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事を受けて、結晶成長方法と共振器作製方法のプロセスを研究し、閾値の低下を試みた。試料は結晶性の高い BP1T を用いた。

薄膜結晶作製方法としては、$SiO_2$/Si 基板に真空蒸着した後アニールして結晶化させる方法と、基板を加熱しながら蒸着して薄膜結晶を徐々に成長させる加熱蒸着法を比較し、加熱蒸着法の方が粒界が低減し、クラックが少ない良質の膜を作製することができることを明らかにした。そこで加熱蒸着法を用いて共振器作製プロセスを行い、閾値の改善を期待した。共振器作製プロセスとしては、埋め込み型と切り取り型を比較し、$O_2$ リアクティブイオンエッチングに優れた耐性を持つ Ti 膜を用いてリフトオフをすることで数ミクロンメートルの円形ディスクにおいて、32μJ/cm$^2$ の閾値を示す高効率の共振器作製に成功した。なお、この閾値は先に報告したアニール薄膜結晶の切り取り型マイクロディスクの閾値 200 μJ/cm$^2$ の 1/6 である。

（5）（チオフェン/フェニレン）コオリゴマー分子を用いた微少共振器の研究

（森田孝裕、舛本泰章、佐々木史雄[A]、原市　聡[A]、堀田　収[B]　[A]産総研光技術, [B]京工繊大繊維）

チオフェン環とフェニレン環から構成された新規有機化合物分子 BPnT は、高い発光効率を持ち、有機半導体レーザーへの応用が期待されている。微小円筒共振器内とプラナー型微小共振器内に組み込まれた BP1T の光学特性の解明を行った。BP1T 分子を PMMA（ポリメチルメタクリレート）中に分散させ、BP1T 分子を発光媒体、PMMA を共振器媒体として微小円筒共振器を作成し、室温で Nd:YAG レーザーの二倍波 532nm で励起すると、等間隔のピークからなる発光スペクトルが確認でき、光が屈折率の高い共振器内部と大気との境界面で全反射しながら周回する際に生じる、ウィスパリングギャラリーモード（Whispering Gallery Mode）であることが、波動方程式の固有値問題の解との比較の結果、明らかにされた。次に、BP1T 分子を分散させた PMMA 膜を両側から銀膜を反射鏡としてはさんだプラナー型微小共振器と誘電体多層膜を反射鏡としてはさんだプラナー型微小共振器を作成し、いずれの場合も反射スペクトルと発光スペクトルにそれぞれ共振器ディップと共振器ピークを見いだした。

（6）伝導性ポリマーから CdSe コアシェル量子ドットへのエネルギー移動

（P. Jing[A]、X. Yuan[A]、W. Ji[A]、池沢道男、Y. A. Wang[B]、X. Liu[A]、L. Zhang[A]、J. Zhao[A]、舛本泰章 [A]中国科学院長春光学精密機器物理研究所、[B]Ocean NanoTech, USA）［論文 1］

化学的手法で作製した CdSe コア・シェル量子ドットを含む電子伝導性ポリマー [1,3,5-Tris(N-phenylbenzimidazol-2-yl)benzene (TPBI)] を用いて、量子ドットとポリマーとの間にエネルギー移動を観測した。CdSe/CdS、CdSe/ZnS および CdSe/Multi-shell コア・シェル量子ドットを TPBI にドープすると、そのいずれに対しても発光の励起スペクトルと、発光の時間応答に TPBI（ドナー）と量子ドット（アクセプター）間のエネルギー移動があることが明らかになった。Förster 共鳴エネルギー移動機構による計算での実験データーへのフィッティングからエネルギー移動速度が 0.07 $ns^{-1}$ と求まった。量子ドットを TPBI に十分ドープすると、エネルギー移動の効率は 60% を超えドープ比、量子ドットのシェルの種類や厚みに大きく依存することが明らかにされた。量子ドットで光生成された励起子のエネルギーを導電性ポリマーに、このエネルギー移動機構により移動させ電流・電圧として取り出せると考えられる。今後、量子ドットの種類、シェル構造、界面制御や伝導性ポリマーの選択、量子ドットのポリマーへのドープを工夫しながら、この効率の向上をはかり、さらにポリマー膜形成、ポリマーへの透明電極形成、電極形成などのプロセス技術を用いて、量子ドット・ポリマーハイブリッド太陽電池セルの作製とその性能評価・向上につなげる。

（7）MnS/ZnS コア/シェル量子ドット中の $Mn^{2+}$ イオンの高効率発光

（P. Jing[A]、J. Zheng[A]、池沢道男、X. Liu[A]、S. Lv[A]、X. Kong[A]、J. Zhao[A]、舛本泰章 [A]中国科学院長春光学精密機器物理研究所）［論文 6］

MnS/ZnS コア/シェル量子ドットを化学的に合成し、厚い ZnS シェルを用いると 35%を越える量子効率をもつ $Mn^{2+}$ イオンの高効率発光を達成した。140~300K の間で温度上昇をともに MnS コアと ZnS シェルの間の界面に局在した電子・正孔の熱活性により発光が増加する。量子ドット中の $Mn^{2+}$ イオンの発光減衰は 1~2ms、数 100μs と数 10μs の 3 つの指数関数成分からなる。おどろくべきことに、$Mn^{2+}$ イオンの発光寿命はシェルの厚さにほんのわずかに依存するだけで、量子ドットの発光の量子効率と明らかに異なる。実験結果から、MnS/ZnS 量子ドットの発光量子効率の改善の機構は ZnS シェルから $Mn^{2+}$ イオンへのエネルギー移動が増加し、厚い ZnS シェルで量子ドットの表面を覆うことで $Mn^{2+}$ イオンから ZnS シェルの表面トラップへの非輻射緩和がわずかに減少することで理解できる。

【4】半導体ナノメートル構造の光物性（野村晋太郎）

（1）希釈冷凍機温度近接場光学顕微鏡を用いた量子ホール端状態空間分解測定

（伊藤宙陛、柴田佑輔、古谷景佑、野村晋太郎）［論文 21］

近接場光学顕微鏡を用いた局所的光励起と輸送測定の組み合わせは二次元電子系の端状態の空間分布を調べるのに有用な手段である。端状態の観測のためには、高い空間分解能が必要であると共に適切な光励起エネルギーを選択することが必要である。光励起エネルギー、キャリアが生成するのに十分な大きさであり、かつ光励起後のキャリア温度がランダウ準位間のエネルギー差よりも十分に小さくなる条件を満たす必要がある。そこで、私たちは近接場光学顕微鏡を用いて、単一ヘテロ接合試料の電圧端子間に発生する光起電圧の光励起エネルギー依存性を強磁場中で調べた。その結果、磁場 2.02 T、試料温度は 200 mK において、図 13 に示すように磁場中半導体二次元電子量子ホール試料端に形成される圧縮性液体と非圧縮性液体の縞状分布を観測することに世界に先駆けて初めて成功した。吸収ピークの低エネルギー側の裾を光励起して剰余エネルギーが小さい場合は端近傍の狭い範囲に光起電圧が発生し、より高いエネルギーで光励起して剰余エネルギーが大きい場合はバルク状態を含むホールバーの内側へ光起電圧の発生する範囲が広がることがわかった。以上のように、私たちの開発した手法により、二次元電子系の任意の位置に任意の剰余エネルギーの電子を注入することが可能であることが示された。

本研究は低温物性グループの大塚教授、産業技術総合研究所柏谷聡氏、NTT 物性科学基礎研究所赤崎グループとの共同研究である。

（2）半導体二次元電子系の分数量子ホール領域における発光分光　（野村晋太郎）

分数量子ホール効果領域における二次元電子系発光は、全電荷が分数となる励起子である分数荷電励起子の存在が予言され、新たな興味が持たれている。ν<1 において電子は最低ランダウ状態を占有し、Laughlin 状態では完全偏極しているとされる。従来の描像では、この状態に十分微弱な光で励起すると電子-正孔対が生成され、発光は比較的自由な正孔と電子との間の再結合として理解された。私たちは、分数量子ホール効果領域における二次元電子系発光現象を理解するためには励起状態を含んだ相関を理解することが重要であることを示した。光励起により余剰エネルギーが生じるため、熱平衡に達する前に発光し、非平衡状態を考察する必要に迫られる。分数量子ホール効果領域での発光は、電子間、電子-正孔間相互作用が本質的な役割を果たす現象であるので電子と正孔で記述するより、相互作用を繰り込んだ「粒子」、即ち複合フェルミオンや分数荷電励起子により記述した方が現象を理解しやすい。図 14 に σ−、σ+ 円偏光の発光強度の電子密度依存性を示す。σ− 偏光は主に上向きスピンの多数キャリアの再結合、σ+ 偏光は下向きスピンの少数キャリアの再結合に対応する。分数量子ホール効果状態を示す特定の分数 ν において構造が見られる。σ+ 偏光の低エネルギー側発光は ν=1/2 に対して対称に、σ− 偏光は反対称に変化する。これは、有効磁場 $B^*$ が ν=1/2 において 0 となり、その両側において、$B^*$ に依存したスピンギャップエネルギーが増大するためである。さらに、この発光はエネルギー緩和過程のダイナミクスに左右される、つまり最低励起状態のみを知れば十分なのではなく、途中の緩和過程によって観測される円偏光度等の結果が異なることが示された。以上の結果は、励起状態間の相関、動的相関を考慮する必要があることを示す。私たちは、一重項・三重項分数荷電励起子の生成レート、結合エネルギー、光励起により生成される電子、正孔の偏極度等を考慮し、分数荷電励起子と平衡関係にある複合フェルミオンとを

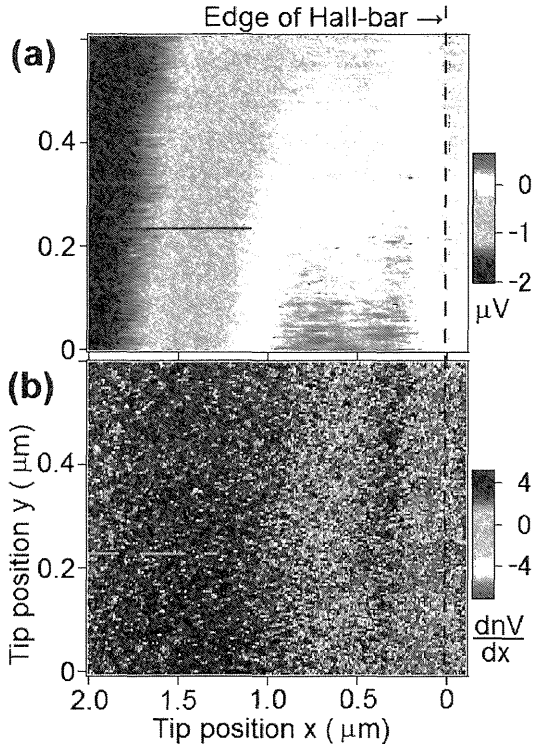


図 13：磁場 2.02 T、試料温度は 200 mK において近接場顕微鏡を用いて得た (a) 光起電圧の空間マップ像と (b) その空間微分マップ像。端付近に縦方向縞状の構造が見られる。

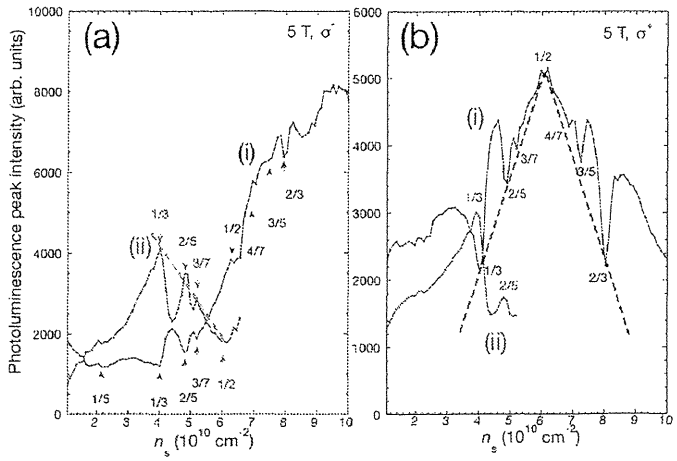


図 14：分数量子ホール効果領域の (a) は σ− 偏光、(b) は σ+ 偏光での (i) 低エネルギー側、(ii) 高エネルギー側にみられる 2 つのピークの発光強度の電子密度依存性。測定温度 $T$=100 mK、磁場 $B$=5 T。

レート方程式を用いてモデル化した。その結果、複合フェルミオン、即ち電子系のスピン偏極度、分数量子ホール効果ギャップエネルギーΔ 、等の値を発光スペクトルにより決定することがはじめて可能となった。

本研究はNTT物性科学基礎研究所赤崎達志氏のグループ、東北大学教授平山祥郎氏との共同研究である。

（3）半導体中スピン観測のためのナノSQUIDの開発（柴田佑輔、宍戸将之、野村晋太郎）［論文26］

ナノメートルサイズの超伝導量子干渉素子（ナノ SQUID）は、ジョセフソン接合を二つ有する量子干渉素子であり、超高感度の磁場検出素子として知られる。ナノSQUIDは単一スピンの検出のための有力な候補である。私たちは半導体ナノ構造中電子スピンの直接的な観測のために、ナノSQUIDの開発を行っている。ナノスケールでの局所磁気観察用プローブとして、SQUIDと測定対象との直接的な磁気カップリングについて検討し、マッピング可能な走査型SQUIDプローブの開発に着手した。まずベクトル磁気観察を想定した2ch-SQUID測定系の開発を行った。また基板端へのフォトリソグラフィーを可能にするプロセスを開発し、作製した4端子パターンにおけるNb/Au薄膜の超伝導転移を確認した。極低温中で動作するピエゾアクチュエータを用いた走査機構の開発を行った。。

本研究は産業技術総合研究所柏谷聡氏のグループ、東京理科大学教授高柳英明氏のグループとの共同研究である。

（4）Siナノレイヤー•ナノワイヤーの発光分光（櫻井蓉子、野村晋太郎）［論文22］

最近、ナノメートルサイズの極微デバイスの特性評価やLSIにおける光配線等、デバイスへの応用の観点から低次元Siの光学特性の研究が重要になってきている。Siは励起子(FE)の寿命が長く、異方的かつ縮退したバンド構造を持つため、励起子の電子正孔液滴(EHD)への凝縮を観測するのに適した系である。二次元系では、励起子の結合エネルギーが三次元系の4倍となりEHDが生成されやすい。擬一次元系であるSiナノワイヤーは、次世代デバイスの有力候補である。生成されたEHDの安定性は、例えば、非発光中心やEHD生成の際の核等、$Si/SiO_2$界面の特性に影響を受ける。このため、SOIの発光測定は、$Si/SiO_2$界面の特性を知る上でも有力なツールである。物理としても一次元系、二次元系の多励起子状態の解明は興味深い対象である。そこで、本研究では、低温において異なる膜厚のSiナノワイヤーおよびSiナノワイヤーの顕微発光測定を行った。図15に得られた発光スペクトルの膜厚依存性を示す。

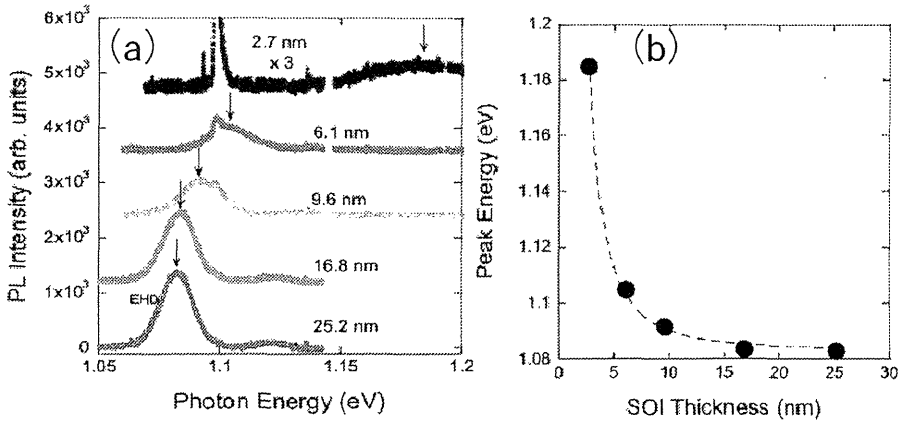


図15：(a) 4.4 K における膜厚2.7～25.2 nmのSOIの発光スペクトル。(b) EHDからの発光ピークエネルギーの膜厚依存性。破線はフィット曲線 $f(d)=c/d^2+1.08$ を示す。

矢印で示すEHDからの発光が膜厚に依存して高エネルギーシフトすることが示された。また、Siナノワイヤーからの発光強度の水素アニーリング温度依存性を調べ、水素アニーリング温度に依存したSiナノ

ワイヤーの界面準位密度の変化を光学的に検知することに成功した。

本研究は白石賢二教授、山田啓作教授、大毛利健治准教授、東京工業大学教授岩井洋氏、准教授角嶋邦之氏との共同研究である。

<論文>

1. P. Jing, X. Yuan, W. Ji, M. Ikezawa, Y. A. Wang, X. Liu, L. Zhang, J. Zhao, Y. Masumoto: "Shell-Dependent Energy Transfer from 1,3,5-Tris (*N*-phenylbenzimidazol-2,yl) Benzene to CdSe Core/Shell Quantum Dots", J. Phys. Chem. C 114, 19256-19262 (2010).
2. E. L. Ivchenko, V. K. Kalevich, A. Yu. Shiryaev, M. M. Afanasiev, Y. Masumoto: "Optical orientation and spin-dependent recombination in GaAsN alloys under continuous-wave pumping", J. Phys. C. 22, 465804-1-12 (2010).
3. Y. Masumoto, K. Goto, B. Pal, P. Mohan, J. Motohisa, T. Fukui: "Spectral diffusion of type-II excitons in InP/InAs/InP core-multishell nanowires", Physica E 42, 2579-2582 (2010).
4. Y. Masumoto, K. Kawana, S. Tomimoto: "Coherent spin precession of electrons and excitons in charge tunable InP quantum dots", Physica E 42, 2493-2496 (2010).
5. 舛本泰章:「量子ドット中の永続的ホールバーニング」 光学 39(9), 453-460 (2010).
6. J. Zheng, W. Ji, X. Wang, M. Ikezawa, P. Jing, X. Liu, H. Li, J. Zhao, Y. Masumoto: "Improved Photoluminescence of MnS/ZnS Core/Shell Nanocrystals by Controlling Diffusion of Mn Ions into the ZnS Shell", J. Phys. Chem. C 114, 15331-15336 (2010).
7. Y. Masumoto, K. Goto, S. Yoshida, Y. Sakuma, P. Mohan, J. Motohisa, T. Fukui: "One- and two-dimensional spectral diffusion of type-II excitons in InP/InAs/InP core-multishell nanowires", Phys. Rev. B 82, 075313-1-5 (2010).
8. Y. Ido, Y. Masumoto, F. Sasaki, M. Mori, S. Haraichi, S. Hotta: "Reduced lasing threshold in thiophene/phenylene co-oligomer crystalline microdisks", Appl. Phys. Express 3, 012702-1-3 (2010).
9. S. Tomimoto, S. Nozawa, Y. Terai, S. Kuroda, K. Takita, Y. Masumoto: "Anisotropic spin dynamics of confined electrons in CdTe/ZnTe quantum structures", Phys. Rev. B 81, 125313-1-10 (2010).
10. F. Sasaki, M. Mori, S. Haraichi, Y. Ido, Y. Masumoto, S. Hotta: "Microdisk lasers and field effect transistors of thiophene/phenylene co-oligomers by using high temperature deposition method", Organic Electronics 11, 1192-1198 (2010).
11. S. Tomimoto, S. Nozawa, H. Kato, M. Sano, T. Matsumoto, Y. Masumoto: "Optical electron spin orientation in Ga-doped and undoped ZnO films", 30th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS2010) プロシーディング(in press).
12. M. Ikezawa, M. Watanabe, Y. Sakuma, Y. Masumoto: "Reexamination of the atomic configurations of NN centers and observation of new infrared luminescence centers in GaP:N", 30th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS2010) プロシーディング(in press).
13. Y. Masumoto, S. Yoshida, M. Ikezawa, Y. Sakuma: "Exciton Dephasing and Biexcitons in InAs Quantum Rhombic Disks", 30th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS2010) プロシーディング(in press).
14. Y. Masumoto, K. Kawana, S. Tomimoto: "Initialization of Electron Spins in One-Electron-Doped InP Quantum Dots", 30th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS2010) プロシーディング(in press).
15. Y. Masumoto, S. Yoshida, M. Ikezawa, S. Tomimoto, Y. Sakuma: "The enhanced binding energy for biexcitons in InAs quantum dots", Appl. Phys. Lett. 98, 061905-1-3 (2011).
16. S. Tomimoto, S. Nozawa, Y. Terai, S. Kuroda, K. Takita, Y. Masumoto: "Exciton spin dynamics in CdTe/ZnTe quantum structures", Phys. Stat. Sol. B 248(2), 389-392 (2011).
17. Y. Masumoto, Y. Hirata, P. Mohan, J. Motohisa, T. Fukui: "Polarized photoluminescence from single wurtzite InP/InAs/InP core-multishell nanowires", Appl. Phys. Lett. 98, 211902-1-3 (2011).

18. Y. Sakurai, Y. Takada, J-I. Iwata, K. Shiraishi, S. Nomura, M. Muraguchi, T. Endoh, Y. Shigeta, M. Ikeda, K. Makihara, S. Miyazaki: "Electron Tunneling between Si Quantum dots and Two Dimensional Electron Gas under Optical Excitation at Low Temperatures", ECS Transactions 28 (1), 369-374 (2010).
19. Y. Takada, M. Muraguchi, T. Endoh, S. Nomura, K. Shiraishi: "Investigation of the New Physical Model of Ohmic Contact for Future Nano-scale Contacts", ECS Transactions 28 (1), 369-374 (2010).
20. M. Muraguchi, Y. Takada, S. Nomura, T. Endoh, K. Shiraishi: "Importance of the Electronic State on the Electrode in Electron Tunneling Processes between the Electrode and the Quantum Dot", IEICE Transactions on Electronics, E93-C No.5, 563-568 (2010).
21. H. Ito, Y. Shibata, K. Furuya, Y. Ootuka S. Nomura, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, H. Tamura, T. Akazaki: "Mapping of quantum-Hall edge channels by a dilution-refrigerator based near-field scanning optical microscope", Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials 19 (4), 563-569 (2010).
22. Y. Sakurai, S. Nomura, K. Shiraishi, K. Ohmori, K. Yamada: "Photoluminescence Characteristics of Ultra-Thin Silicon-on-Insulator at Low Temperatures", Key Engineering Materials 470, 39-42 (2011).
23. M. Muraguchi, Y. Sakurai, Y. Takada, Y. Shigeta, M. Ikeda, K. Makihara, S. Miyazaki, S. Nomura, K. Shiraishi, T. Endoh: "Collective Electron Tunneling Model in Si-Nano Dot Floating Gate MOS Structure", Key Engineering Materials 470, 48-53 (2011).
24. Y. Takada, M. Muraguchi, T. Endoh, S. Nomura K. Shiraishi: "Investigation about I-V Characteristics in a New Electronic Structure Model of the Ohmic Contact for Future Nano-scale Ohmic Contact", Key Engineering Materials 470, 43-47 (2011).
25. M. Muraguchi, Y. Sakurai, Y. Takada, Y. Shigeta, M. Ikeda, K. Makihara, S. Miyazaki, S. Nomura, K. Shiraishi, T. Endoh: "Collective Tunneling Model in Charge Trap Type NVM Cell", Jpn. J. Appl. Phys. (in press).
26. T. Matsumoto, H. Kashiwaya, H. Shibata, H. Takayanagi, S. Nomura, S. Kashiwaya: "Fabrication of weak-link Nb-based nano SQUIDs by FIB process", FDP-39 (in press).

＜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（2011 年 3 月）

1. 濱野毅信：「GaP:N および GaAs:N 中の単一等電子トラップの磁気光学」
2. 平田裕基：「ウルツ鉱型 InP/InAs/InP コアマルチシェルナノワイヤーの偏光フォトルミネッセンス」
3. 森田孝裕：「微小共振器に組み込んだ(チオフェン/フェニレン)コオリゴマーの光学特性」
4. 宍戸将之：「2 次元電子系スピン検出のための GaAs 上における Nb-SQUID の研究」
5. 古谷景佑：「近接場光学顕微鏡を用いた 2 次元電子系端状態における光励起効果の研究」
6. 森川祐：「High-k ゲート絶縁膜付き GaAs/AlGaAs 量子井戸発光」
7. 重田浩司：「ハフニウム系絶縁膜中欠陥の光局所励起による研究」

＜国際会議＞

1. S. Tomimoto, S. Nozawa, Y. Terai, S. Kuroda, K. Takita, Y. Masumoto: "Exciton spin dynamics in CdTe/ZnTe quantum structures", The 9th International Conference on Excitonic and Photonic Processes in Condensed and Nano Materials (EXCON'10) (Brisbane, 2010.7).
2. Y. Masumoto, K. Kawana, S. Tomimoto: "Initialization of Electron Spins in One-Electron-Doped InP Quantum Dots", 30th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS2010) (Seoul, 2010.7).
3. Y. Masumoto, S. Yoshida, M. Ikezawa, Y. Sakuma: "Exciton Dephasing and Biexcitons in InAs Quantum Rhombic Disks", 30th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS2010) (Seoul, 2010.7).
4. M. Ikezawa, M. Watanabe, Y. Sakuma, Y. Masumoto: "Reexamination of the atomic configurations of NN centers and observation of new infrared luminescence centers in GaP:N", 30th International Conference on the

Physics of Semiconductors (ICPS2010) (Seoul, 2010.7).

5. S. Tomimoto, S. Nozawa, H. Kato, M. Sano, T. Matsumoto, Y. Masumoto: "Optical electron spin orientation in Ga-doped and undoped ZnO films", 30th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS2010) (Seoul, 2010.7).
6. M. Ikezawa, M. Watanabe, Y. Sakuma, Y. Masumoto: "Atomic configurations of NN centers and new infrared luminescence centers in GaP:N", The International Conference on NANOPHOTONICS 2010 (Tsukuba, 2010.6).
7. S. Tomimoto, K. Kawana, Y. Masumoto: "Coexistence of the fast and slow spin orientation processes of the doped electron in InP quantum dots", The 6th International Conference on the Physics and Applications of Spin Related Phenomena in Semiconductors (PASPS-VI) (Tokyo, 2010.8).
8. Y. Sakurai, Y. Takada, J-I. Iwata, K. Shiraishi, S. Nomura, M. Muraguchi, T. Endoh, Y. Shigeta, M. Ikeda, K. Makihara, S. Miyazaki: "Electron Tunneling between Si Quantum dots and Two Dimensional Electron Gas under Optical Excitation at Low Temperatures", ECS meeting (Vancouver, 2010.4).
9. Y. Takada, M. Muraguchi, T. Endoh, S. Nomura, K. Shiraishi: "Investigation of the New Physical Model of Ohmic Contact for Future Nano-scale Contacts", ECS meeting (Vancouver, 2010.4).
10. Y. Takada, M. Muraguchi, T. Endoh, S. Nomura, K. Shiraishi: "Proposal of a new electronic structure model of Ohmic contacts for the future metallic source and drain", 2010 International Workshop on Joint Technology (Shanghai, 2010.5).
11. H. Ito, Y. Shibata, K. Furuya, Y. Ootuka, S. Nomura, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, H. Tamura, T. Akazaki: "Mapping of quantum-Hall edge channels by a dilution-refrigerator based near-field scanning optical microscope", O-50, Nanophotonics 2010 (Tsukuba, 2010.6).
12. M. Yamaguchi, S. Nomura, H. Tamura, T. Akazaki: "Reduction of electric-field-dependent broadening of photoluminescence linewidth with electron density", P-B19, Nanophotonics 2010 (Tsukuba, 2010.6).
13. Y. Sakurai, K. Shiraishi, K. Ohmori, K. Yamada, S. Nomura: "Photoluminescence characteristics of ultra-thin silicon-on-insulator at low temperatures", P-25, International Symposium on Technology Evolution for Silicon Nano-Electronics (Tokyo, 2010.6).
14. M. Muraguchi, Y. Sakurai, Y. Takada, Y. Shigeta, M. Ikeda, K. Makihara, S. Miyazaki, S. Nomura, K. Shiraishi, T. Endoh: "Collective electron tunneling model in Si-nano dot floating gate MOS structure", P-37, International Symposium on Technology Evolution for Silicon Nano-Electronics (Tokyo, 2010.6).
15. Y. Takada, M. Muraguchi, T. Endoh, S. Nomura, K. Shiraishi: "Investigation of I-V characteristics in a new electronic structure model of the Ohmic contact for future nano-scale Ohmic contact", P-20, International Symposium on Technology Evolution for Silicon Nano-Electronics (Tokyo, 2010.6).
16. H. Ito, Y. Shibata, K. Furuya, Y. Ootuka, S. Nomura, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, H. Tamura, T. Akazaki: "Real-space mapping of quantum-Hall edge channels by a dilution-refrigerator based near-field scanning optical microscope", Th-5-12, 29$^{th}$ Electronic Materials Symposium (Syuzennji, 2010.7).
17. S. Nomura, M. Yamaguchi, H. Tamura, T. Akazaki, Y. Hirayama: "Dynamical correlation of fractionally charged excitons with a two-dimensional electron system", P1-196, 30$^{th}$ International Conference on Physics of Semiconductors (Seoul, 2010.7).
18. M. Yamaguchi, H. Sanada, S. Nomura, T. Sogawa, H. Tamura, T. Akazaki : "Spin lifetime of localized electrons in a gated undoped GaAs quantum well at low electron density", P1-196, 30$^{th}$ International Conference on Physics of Semiconductors (Seoul, 2010.7).
19. H. Ito, Y. Shibata, K. Furuya, Y. Ootuka, S. Nomura, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, H. Tamura, T. Akazaki: "Real-space mapping of compressible and incompressible strips by a near-field scanning optical microscope", P2-188, 30$^{th}$ International Conference on Physics of Semiconductors (Seoul, 2010.7).

20. M. Muraguchi, Y. Sakurai, Y. Takada, S. Nomura, K. Shiraishi , M. Ikeda, K. Makihara, S. Miyazaki , Y. Shigeta, T. Endoh: "Collective tunneling model between two-dimensional electron gas to Si-nano-dot", P2-105, 30th International Conference on Physics of Semiconductors (Seoul, 2010.7).
21. M. Muraguchi, Y. Sakurai, Y. Takada, Y. Shigeta, M. Ikeda, K. Makihara, S. Miyazaki, S. Nomura, K. Shiraishi, T. Endoh: "Collective Tunneling Model in Charge Trap Type NVM Cell", E-3-2, 2010 International Conference on Solid State Devices and Materials (Tokyo, 2010.9).
22. T. Matsumoto, H. Kashiwaya, H. Shibata, A. Yamaguchi, H. Takayanagi, S. Nomura, S. Kashiwaya: "Weak-link Nb nanoSQUIDs fabricated by FIB process", 23rd International Symposium on Superconductivity (Tsukuba , 2010.11).
23. (invited) S. Nomura, M. Yamaguchi, H. Tamura, T. Akazaki, Y. Hirayama, P. Hawrylak: "Circular polarized photoluminescence from fractionally charged excitons in composite fermion sea", 2010 Workshop on Innovative Devices and Systems (WINDS) (Kohala coast, 2010.12).
24. S. Nomura, M. Yamaguchi, H. Tamura, T. Akazaki, Y. Hirayama, P. Hawrylak: "Composite Fermion Picture for Photoluminescence in the Fractional Quantum Hall Effect Regime", International Symposium on Nanoscale Transport and Technology (Atsugi, 2011.1).
25. Y. Sakurai, K. Shiraishi, K. Ohmori, K. Yamada, S. Nomura: "Photoluminescence from Electron-Hole Droplet in Ultra-Thin Silicon-on Insulator at Low Temperatures", International Symposium on Nanoscale Transport and Technology (Atsugi, 2011.1).
26. K. Miyagi, M. Yamaguchi, H. Tamura, T. Akazaki, S. Nomura: "Gate Voltage Dependence of Lifetime of Photoluminescence From an Asymmetric GaAs-AlGaAs Double Quantum Wells", International Symposium on Nanoscale Transport and Technology (Atsugi, 2011.1).
27. H. Ito, K. Furuya, Y. Shibata, Y. Ootuka, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, H. Tamura, T. Akazaki, S. Nomura: "Investigation of the Spatial Profile of the Quantum-Hall Edge State by the Photovoltage Mapping Using Near-field Optical Microscopy", International Symposium on Nanoscale Transport and Technology (Atsugi, 2011.1).
28. M. Yamaguchi, S. Nomura, H. Tamura, T. Akazaki: "Motional Narrowing of Photoluminescence Linewidth of 2DEG-hole Emission", International Symposium on Nanoscale Transport and Technology (Atsugi, 2011.1).
29. K. Tsumura, M. Ohsugi, T. Hayashi, E. Watanabe, D. Tsuya, S. Nomura, K. Hirakawa, H. Takayanagi: "Development of graphene-based superconducting quantum interference device", MANA International Symposium 2011 (Tsukuba, 2011.3).
30. M. Shishido, S. Nomura, T. Matsumoto, S. Kashiwaya, R. Ishiguro, H. Takayanagi: "Evaluation of focused ion beam induced damage to GaAs heterojunction by micro-photoluminescence measurements", ISIMS-2011 (Tsukuba, 2011.3).
31. Y. Sakurai, K. Shiraishi, K. Ohmori, K. Yamada, S. Nomura: "Silicon-on-Insulator Thickness Dependence of Photoluminescence from Electron-Hole Droplet", ISIMS-2011 (Tsukuba, 2011.3).
32. H. Juda, R. Hasunuma, K. Yamabe, K. Yamada, K. Shiraishi, S. Nomura: "Leakage current mapping of hafnium silicate gate dielectrics by local optical excitation", ISIMS-2011 (Tsukuba, 2011.3).

＜講演＞

1. 池沢道男、佐久間芳樹、曽根良則、張遼、濱野毅信、舘林潤、舛本泰章：「GaAs 中の窒素等電子発光中心からの単一光子発生」　秋季第 71 回応用物理学会学術講演会（2010 年 9 月）
2. 舘林潤，佐久間芳樹，池沢道男，曽根良則，落合雅幸，池田直樹，舛本泰章，中尾正史，杉本喜正，迫田和彰：「窒素を導入したGaPナノワイヤの結晶成長及び光学特性」　春季第58回応用物理学関係連合講演会（2011年3月）

3. 野村晋太郎：「半導体二次元電子系の発光分光」、特定領域研究「光－分子強結合反応場の創成」領域 および新学術領域研究「半導体における動的相関電子系の光科学」 領域合同シンポジウム（日本科学未来館みらいCANホール）（2010年5月）
4. 山口真澄、野村晋太郎、田村浩之、赤崎達志：「高品質 GaAs 量子井戸発光の電子密度-電場強度二次元マップ、」特定領域研究「光－分子強結合反応場の創成」領域 および新学術領域研究「半導体における動的相関電子系の光科学」 領域合同シンポジウム（日本科学未来館みらいCANホール）（2010年5月）
5. 櫻井蓉子，白石賢二，大毛利健治，山田啓作，野村晋太郎：「低温における極薄 SOI の発光特性」応用物理学会学術講演会（2010年9月）
6. 柴田祐輔，宍戸将之，松本哲朗，柏谷 聡，野村晋太郎，高柳英明：「局所磁気観察用 2ch-SQUID 測定系の開発」 応用物理学会学術講演会（2010年9月）
7. 伊藤宙陛，古谷景佑，柴田祐輔，大塚洋一，野村晋太郎，柏谷聡，山口真澄，田村浩之，赤崎達志：「近接場局所光照射による量子ホール端状態の観測 その2」 日本物理学会秋季大会（2010年9月）
8. 野村晋太郎，山口真澄，田村浩之，赤崎達志，平山祥郎：「分数量子ホール領域の円偏光発光スペクトルの温度依存性II」 日本物理学会秋季大会（2010年9月）
9. 山口真澄，眞田治樹，寒川哲臣，田村浩之，赤崎達志，野村晋太郎：「ゲートつき非ドープGaAs量子井戸のスピン緩和測定」 日本物理学会秋季大会（2010年9月）
10. 宮城浩一，山口真澄，田村浩之，赤崎達志，野村晋太郎：「ゲート付 GaAs-AlGaAs 非対称二重量子井戸の蛍光寿命のゲート電圧依存性」 日本物理学会秋季大会（2010年9月）
11. （招待講演）野村晋太郎：「複合フェルミオン描像による分数量子ホール効果領域発光の理解」 東北大学電気通信研究所研究会“ナノスケールのゆらぎ･電子相関制御に基づく新規ナノデバイス”（宮城県）（2010年11月）
12. 野村晋太郎，山口真澄，田村浩之，赤崎達志，平山祥郎：「複合フェルミオンスピン偏極の光学検出」PASPS-15（つくば）（2010年12月）
13. 野村晋太郎，山口真澄，田村浩之，赤崎達志，平山祥郎：「分数量子ホール領域の発光の微細構造」日本物理学会年次大会（2011年3月）
14. 櫻井蓉子，大毛利健治，山田啓作，角嶋邦之，岩井洋，白石賢二，野村晋太郎：「低温における Si ナノワイヤーの発光特性」 日本物理学会年次大会（2011年3月）
15. 古谷景佑，伊藤宙陛，柴田 祐輔，大塚洋一，野村晋太郎，柏谷聡，山口真澄， 田村浩之 ，赤崎達志：「近接場局所光照射による量子ホール端状態の観測 その3」 日本物理学会年次大会（2011年3月）
16. 矢ヶ部恵弥,佐久間大輔，津村公平,石黒亮輔,渡辺 英一郎,津谷大樹,野村晋 太郎,高柳英明:「トンネル型マイクロ SQUID 磁束計による光励起少数電子スピン観測システムの開発」 日本物理学会年次大会（2011年3月）
17. 柏谷裕美,松本哲朗,野村晋太郎,高柳英明,柏谷 聡：「Nb系 nano - SQUID の開発」 日本物理学会年次大会（2011年3月）
18. 櫻井 蓉子，大毛利 健治，山田 啓作，角嶋 邦之，岩井 洋，白石 賢二，野村 晋太郎：「デバイス評価に向けた Si ナノワイヤーの発光測定」 第58回応用物理学関係連合講演会（2011年3月）
19. 森川祐、野村晋太郎、山口真澄、小野満恒二、原田裕一、赤崎達志：「発光スペクトルによる high-k ゲート絶縁膜付き GaAs/AlGaAs 量子井戸のゲート制御性評価」 第58回応用物理学関係連合講演会（2011年3月）