

五神 真

東京大学大学院工学系研究科・教授

## 時空間モルフォロジーの制御による能動メゾ光学

## §1. 研究実施の概要

本研究では、東京大学グループが進めてきた微小球やナノキラル構造研究などのモルフォロジー依存光学の研究、電子系や励起子系の巨視的量子状態の研究と農工大グループが積み上げてきた極超短パルス分光技術研究を融合させ、物質系の新たな知見を得ると共に、新しい光制御技術-能動メゾ光学-を確立する。この為以下の2つの研究課題を東京大学と農工大学で分担し、互いに連携させながら研究を進める。連携を実質化するために、共同で進める課題を設け実験を東京大学において一緒に行う。

第5年度である本年度において、研究は当初の計画に従って順調に進んでいる。

これまでに得たキラルモルフォロジーに依存した光制御についての知見に基づき、今年度は特異モルフォロジーによって生じる真空場分布による新たな発光制御技術として、半導体キラルナノ格子中の円偏光異方性から生じる円偏光発光現象の解析を完了させた。また、ns から $\mu$ s までの広い時間スケールのダイナミクスを THz 領域で周波数分解して検出することが可能な新たな分光法を開発した。

光波操作による励起子系の低温高密度状態生成は、光音響分散フィルタを用いて近赤外フェムト秒パルス光の光位相制御を行うことで、2光子共鳴励起した極低温のオルソ励起子を生成する励起法の最適化を行い、サブケルビン領域での励起子ボース・アインシュタイン相で期待される密度領域においても励起子相が安定に存在できることを明らかにした。また、中赤外誘導吸収測定と時間分解発光測定を組み合わせることで、誘導吸収スペクトルから電子正孔液滴の成分を分離することに成功した。その結果、ダイヤモンドにおいては比較的低密度の光励起条件でありながら、非常に高密度な液滴が自然に形成され、中赤外領域の強い光学応答をもたらしていることを実証した。また、磁気応答と特異モルフォロジーの結合効果が顕著に現れる物質として、THz 領域に強い反強磁性共鳴が観測される酸化ニッケル(NiO)に注目し、超短パルス光を用いた非線形光学応答による磁化制御、およびそこから THz 磁気放射特性の解明を進めた。結晶の離散回転対称性によって、本来禁制であるような非線形光学効果が許容になる場合があることを理論的に示し、具体的にマルチドメイン NiO のように結晶が三回回転対称性を有する場合には、直線偏光パルスの入射によって電気磁気複合の誘導ラマン過程を介してコヒーレントに磁気共鳴励起を誘起することができ、それが磁気双極子放射によってコヒーレントな直線偏光のテラヘルツ波が発生することを見いだした。さらに偏光選択則を考慮し、ねじれ偏光のダブルパルスを励起光として用いることによって、左右の振動モードが縮退した磁気励起を選択的に励起し、それを円偏光放射として検出することに成功した。これは、反強磁性体の磁化制御の新しい手法として注目すべき成果である。

時空間波形制御技術の更なる高度化という点において、本年度は、位相変調のみでねじれ偏光パルスを生成する方法を新たに開発することに成功した。また、分子構造の指標となる分子振動スペクトルを測定するための新たな手法として、時空間波形制御技術を用いた「位相制御コヒーレントラマン顕微分光法」を開発した。これによって、単一のフェムト秒パルスの帯域がカバーできる  $1000\text{cm}^{-1}$  以下の範囲の振動モード由来の信号を、 $10\text{cm}^{-1}$  程度の高い周波数分解能で観測することに成功した。さらに、この手法を生体内での分子種同定に活用し、生きたイカの神経細胞内に注入した麻酔ガスの分子を検出することに成功した。また、分子振動を選択的に制御し、分子の光学活性を時間分解することで光学活性増強に必要な振動モードを同定する目的で、時間分解エリプソメリー測定系の開発を行い、測定系の高感度低ノイズ化を達成した。

また、昨年引き続き東大グループ、農工大グループともにモード同期ファイバーレーザーを中心とする光源開発が進んでいる。

以上のようにモルフォロジー敏感な光学応答の理解とその応用、及び光の波形制御技術については、当初の目的どおりに順調に研究が進んでおり、当初想定していなかった新たな研究展開も広がりつつある。空間モルフォロジー制御、時空間波形制御技術のそれぞれが新たな光制御技術や新しい分光法を生み出しているのは上述のとおりであるが、最終年度に向けて、今後これらの要素技術を直接的に融合し、新たなモルフォロジー依存光効果の実現のための準備も着実に進んでいる。

両グループの定期的ミーティングでの研究報告会も継続しており、大学院学生間の交流等を通じて効果的な人材育成の場が形成されている。

## §2. 研究実施体制

### (1) 東大グループ

① 研究分担グループ長: 五神 真 (東京大学大学院理学系研究科、教授)

② 研究項目

研究課題: 「巨大光応答物質相探索とモルフォロジー制御光機能開拓」

研究項目① モルフォロジー制御による光機能発現

①-1: 形態に依存する光学応答の原理解明

①-2: モルフォロジー制御による非相反光学応答の発現

研究項目②: 巨大光応答物質相の制御と探索

②-1: 極低温状態励起子系の光生成手法の高度化

②-2: 光と物質の相互作用を巨大化する物質相の探索

### (2) 東京農工大グループ

① 研究分担グループ長: 三沢 和彦 (東京農工大学共生科学技術研究院、教授)

② 研究項目

研究課題: 「時空間光波束操作による3次元構造の動的制御」

研究項目①: 時空間波形制御技術の開拓

研究項目②: 能動的3次元時空間構造形成法の開発

### §3. 研究実施内容

#### 東大チーム: 巨大光応答物質相探索とモルフォロジー制御光機能開拓

##### ①-1: 形態に依存する光学応答の原理解明

(目的)

サブ波長スケールのパターンを周期的に並べた金属薄膜格子において見いだされた巨大旋光性の起源を系統的实验により明らかにする。表面プラズモンモードなどの電磁結合モードとメゾ構造の関わりについて、物理的モデルを構築し、効果の設計予測に活用する。

これら金属や誘電体薄膜において形成される局在電磁波モードと非局所的な光学応答の関連に関してはすでにこれまでの研究で明らかになった。昨年度より、これまでに得られた知見を生かして、キラルモルフォロジーの効果によって人工構造体内部に生じる真空場モード分布に円偏光非対称性を誘起し、アキラル媒質中に埋め込まれた発光体からの円偏光放射の実現に取り組む。

一方、THz領域においては、THz電磁波に対する等方的偏光アクティブ制御素子としての可能性を有する、人工金属キラル構造に対する光励起による旋光性制御手法について、特性評価をさらに進める。

(実施内容)

昨年度我々は、発光層として量子ドット層を有する導波路上キラルフォトニック結晶構造を、インジウム砒素系半導体を用いて作製し、構造のキラリティーに依存する円偏光発光成分の非等方性が観測されることを見出した。本年度は、このような半導体キラルフォトニック結晶構造からの発光特性について、実験、数値計算の両面からさらに解析を進めた。数値計算においては、計算領域の拡大を行うことによって構造内部の真空場電磁場分布をより詳しく調べることに成功した。その結果、導波路層内部への強い電場局在が生じていること、およびその効果によって真空場分布の円偏光異方性の増大が生じていることを明瞭に示すことに成功した。また、真空場の面内電磁場分布に対してフーリエ変換を行うことにより、そのモード構造を明らかにすることに成功し、真空場変調の増大には確かに特定の導波路モードの効果が支配的であることを明らかにした。さらに、複数の線幅の異なるキラルフォトニック結晶について同様の解析を行い、実験値と計算値が良く一致することを示した。以上の内容を論文にまとめ、*Physical Review Letters* に受理された<sup>8)</sup>。この成果は、*Physical Review Focus* および *NPG Asia Materials*(doi:10.1038/asiamat.2011.44)にハイライトされた。また、2011年2月2日付の日刊工業新聞および2011年2月18日付の科学新聞で報道され、技術月刊誌 *OplusE* 4月号で取り上げられた。

また、昨年度は、光励起キャリア擬2次元人工キラル格子の形成とテラヘルツ偏光制御に向けた取り組みとして、高抵抗 Si 基板上の単層キラル格子に対する光照射により、光励起キャリアの効果によって三次元キラリティーを誘起し旋光性を発現させることに成功した。本年度は、この効果の時間ダイナミクスを詳細に調べるために、低繰り返し率の光励起と高繰り返し率の THz 検出を組み合わせた計測法の開発を進めた。この方法により、通常の単一の繰り返し周波数の光パルスを用いた光学遅延では困難な ns から  $\mu$ s までの広い時間スケールのダイナミクスを THz 領域で周波数分解して検出することが可能になった。その結果、キラル格子に対する光励起で生じるキラリティーの起源が Si 基板内のキラル形状のキャリア分布であり、緩和メカニズムがキャリア寿命だけでなくキャリア拡散による分布の均一化にもよる、ということを確認に示すことに成功した。

## ①-2:モルフォロジー制御による非相反光学応答の発現

(目的)

磁性金属や半導体等を対象とし、空間モルフォロジーの最適化された人工物質系を用いて磁気光学と旋光性の複合による非相反的光学応答の発現を狙う。超低ノイズ光パルスを探プローブとした分光により、精密高感度検出を行う。ニッケルやパーマロイなどの強磁性金属や磁性半導体等を用いて、人工キラル構造によって旋光性を発現させることにより、磁気光学と旋光性の複合による非相反的光学応答の発現を狙う。

(実施内容)

## 研究項目②:巨大光応答物質相の制御と探索

### ②-1:極低温状態励起子系の光生成手法の高度化

(目的)

励起パルスの時空間での精緻な制御により、励起子や電子正孔系を極低温高密度状態とする手法を開拓する。時空間でこれらのマクロな位相情報を可視化し量子物性を探る。4重極励起子などの内部スピン自由度にも着目し、多体効果によるスピン緩和の基礎原理探求や特異光応答の発現についても検討を行う。

本年度は光音響分散フィルタ(AOPDF)を用いた亜酸化銅における極低温高密度励起子生成において密度を最適化し、励起子モット転移領域における赤外応答を観測する。束縛エネルギーが大きく安定な励起子であるため、このような密度領域においてより明瞭に転移のダイナミクスが観測できる可能性がある。一方、量子カスケードレーザーを用いたスピン禁制パラ励起子の高敏感検出法を完成させた上で、歪トラップされたパラ励起子の精密分光を進める。その際、量子カスケードレーザーでは波長領域がカバーできないことも考えられるため、2波長モード同期レーザーの同期による中赤外光発生法の検討も行う。

さらに、新現象の高精度低雑音分光法確立のため、モード同期ファイバーレーザーの利用も農工大グループと密接に連携を取りつつ進める。

(実施内容)

光音響分散フィルタ(AOPDF)を用いて波長 1.2 マイクロメートル付近の近赤外フェムト秒パルス光の光位相制御を行うことで、バルク亜酸化銅結晶において3光子バンド間吸収に伴う高温のオルソ励起子生成を抑え、2光子共鳴励起した極低温のオルソ励起子を生成する励起法の最適化を行った。従来用いていた空間光変調器(SLM)による変調方法と比較して1桁高密度のオルソ励起子を生成することに成功し、加えて励起子 Lyman 遷移のスペクトルに変化が認められないことから、サブケルビン領域での励起子ボース・アインシュタイン相で期待される密度領域においても励起子が安定に存在できることが分かった。

また、最近導入した希釈冷凍機の立ち上げを行い、これを用いた高密度励起および発光の精密測定を行うための準備を進めた。

一方、自作したモード同期ファイバーレーザーの分光利用への応用として、ファイバーアンプを用いて増幅したエルビウム同期モード同期ファイバーレーザーの出力を受動共振器へ導入し、パルス蓄積により非線形光学効果を増強することで通常では変換効率が低いテラヘルツ波発生の高効率化をはかった。

### ②-2:光と物質の相互作用を巨大化する物質相の探索

(目的)

本研究で開拓する原理をより広い物質系に適用するために、特異な光機能発現が期待できる物質系の探索を進める。

昨年度はダイヤモンドにおける電子正孔液滴の中赤外における応答を観測することに成功した。

本年度は、ダイヤモンドにおける高密度な電子正孔液滴の性質を生かし、制御された励起フェムト秒パルスを用いて電子正孔液滴の立体構造を生成することでダイヤモンド試料内に光制御可能な中赤外領域の共振器を形成する。また、ダイヤモンドにおける励起子のライマン遷移をとらえ、励起子状態の精密分光を試みる。励起子のみを生成できる波長での2光子励起を行うことで、電子正孔プラズマ生成時と液滴形成のダイナミクスに違いが生じるかどうかを精密に調べる。特異光機能が期待できる新物質系の探索も引き続き行う。

#### (実施内容)

液滴由来の光学応答が観測される中赤外領域では、励起子のイオン化による誘導吸収がスペクトル上で重なる。中赤外誘導吸収測定と時間分解発光測定を組み合わせることで、誘導吸収スペクトルから液滴成分を分離することに成功した。二成分系の有効媒質モデルを仮定した解析により、液滴の密度、ダンピング、体積占有率や励起子の密度の時間発展を詳細に調べた。これにより、光励起による電子正孔対密度が  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  程度の電子正孔プラズマの生成後に、 $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  程度の励起子ガスと  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$  程度の電子正孔液体に空間相分離するダイナミクスを明らかにした。すなわち、ダイヤモンドにおいては比較的低密度の光励起条件でありながら、 $10^{20} \text{ cm}^{-3}$  という非常に高密度な液滴が自然に形成され、中赤外領域の強い光学応答をもたらすことを実証した。現在、論文の投稿準備を進めている。

### ②-3: 光と物質の非局所相互作用の原理と応用

#### (目的)

電気四重極・磁気双極子相互作用は通常微弱であるが、非局所相互作用であるため空間モルフォロジー制御により劇的に増強されることが期待できる。双極子遷移が禁止されこれらの高次項が支配的になる系で非局所相互作用の本質を探る。

本年度は、昨年度に引き続き亜酸化銅における電気四重極遷移許容励起子状態や原子ガスの  $s$ - $d$  遷移など物質の非局所的共鳴と、ナノキラル格子を組み合わせ、物質-光の相互作用の増強や巨大旋光性の発現等の実証を進める。また、農工大グループが開発した時空間制御パルスとの融合による非局所相互作用の増強についても検討を進める。

#### (実施内容)

人工構造を用いた非局所的相互作用制御のため、半導体キラルナノ構造中における真空場モード分布の数値計算方法を開拓し、実際に人工構造を用いて真空場の円偏光異方性が誘起できることを確認することに成功した。

また、磁気応答と特異モルフォロジーの結合効果が顕著に現れる物質として、THz 領域に強い反強磁性共鳴が観測される酸化ニッケル(NiO)に注目し、超短パルス光を用いた非線形光学応答による磁化制御、およびそこから THz 磁気放射特性の解明を進めている。まず、角運動量保存則の観点から光誘起磁化の選択則について整理した。固体中の光磁気相互作用においては光、および誘起された磁化、そして結晶の三者間で角運動量は保存されなければならない。ここで結晶はその離散対称性に応じて離散的な値の角運動量のやり取りにしか関与しない。この事を明示的に扱うことによって、本来禁制であるような非線形光学効果が許容になることを我々は理論的に示した。具体的には例えばマルチドメイン NiO のように結晶が三重回転対称性を有する場合には、直線偏光パルスの入射によって電気磁気複合の誘導ラマン過程を介してコヒーレントに磁気共鳴励起を誘起することができる。我々は誘起された磁化からのコヒーレントな THz 放射を測定する実験によって、光誘起磁化の従う偏光選択則が上記から予想されるものと非常に良く一致することを明らかにした。以上の内容を論文にまとめ、**Physical Review Letters** に受理された<sup>7)</sup>。さらに既知となった偏光選択則に基き、偏光の自由度も考慮して設計したねじれ偏光ダブルパルスを励起光として用いることによって左右の振動モードが縮退した磁気励起を選択的に励起し、それを円偏光放射として検出することに成功した。これは、反強磁性体の磁化制御の新しい手法として注目すべき成果である。(論文投稿準備中)。

## 農工大チーム:時空間光波束操作による3次元構造の動的制御

### 研究項目①:時空間波形制御技術の開拓

(目的)

本研究の目的は、パルス列間の電場波形を完全に揃えた位相制御光源を開発することである。特に、時間領域に対応した光波の進行方向( $z$  軸)に沿ってパルス波形整形を施す従来の方法に加えて、時間とともに  $xy$  平面内の偏光方向が任意に変化する3次元時空間制御されたパルス光源を開発し、3次元時空間構造形成に応用する。また、光波の2次元横モードの波面整形も施す。

(実施内容)

光パルスのパルス内での偏光状態の制御は、配向分子、キラル分子、結晶、磁性体等の光学応答に偏光依存性を持つ多くの対象にコヒーレント制御を適応させるために必要不可欠である。本プロジェクトでは、誘電体または反強磁性体等の媒質を介した偏光整形パルスによる任意偏光状態の THz パルスの生成や、ねじれた偏光をもつパルスによる誘電体媒質への過渡的な光学活性の誘起を目指している。特にキラリティーの動的制御には、偏光方向がパルス内で任意の周波数で回転するねじれ偏光パルスが有用であることを示してきた。

従来は、振幅変調と位相変調の両方を用いるねじれ偏光パルスを生成してきた。しかしながら、この方法では、ねじれのピッチを変えると、パルスエネルギーも変化してしまう。そこで、本年度は、位相変調のみでねじれ偏光パルスを生成する方法を新たに開発した。ねじれ偏光パルスの詳細な解析から、光パルスのキラリティーには異なる周波数成分を持つ光パルスを合波することが本質的であり、不可欠であることが示された。そこで、単一の光パルスを互いに直交する独立偏光成分に分け、一方のスペクトルの長波長側と短波長側とで  $\pm \pi/2$  の位相差を与え、もう片方にはそれと逆向きの位相差を与えた後に、合波する方法を考案した。偏光分割相互相関測定法により、擬似的なねじれ偏光パルスの生成を確認した。この成果により、動的モルフォロジー制御の実現に向けて大きく前進した。

昨年度より、位相制御パルスを電場波形整形された実効的多色コヒーレント光源として活用している。本年度は、分子構造の指標となる分子振動スペクトルを測定するための新たな手法として、時空間波形制御技術を用いた「位相制御コヒーレントラマン顕微分光法」を開発した。コヒーレントアンチストークスラマン散乱(CARS)分光は、異なる 3 種類のコヒーレント光を用い、特定の分子振動のコヒーレントに励起し観測する手法である。従来のコヒーレントラマン分光法では、これらの複数のレーザービームを別々に用意していたが、微細構造に伴うモルフォロジー制御などへの応用例を考えると、顕微鏡下でそれら複数のビームを時間的空間的に正確に合わせる必要が生じるなど、技術的な困難を伴う。

それに対して、本年度に開発した「位相制御コヒーレントラマン顕微分光法」では、1台のレーザー装置から出る単一のレーザービームを顕微鏡に導入するだけで済むため、実用性が飛躍的に増大した点において革新的といえる。

本年度は、種々のハロゲン化炭化水素をモデル物質として観測したところ、単一のフェムト秒パルスの帯域がカバーできる  $1000\text{cm}^{-1}$  以下の範囲の振動モード由来の信号を、 $10\text{cm}^{-1}$  程度の高い周波数分解能で観測できた。

チタンサファイアレーザーに替わる次世代の分光光源としての Yb ファイバーレーザーについては、増幅後のパルス波形を測定する自己相関光学系を立ち上げ、パルス幅の定量的評価を行った。高次分散の影響が大きいことがわかったため、回折格子対を用いた分散補償光学系に液晶空間光変調器を組み込み、最適制御にもとづくパルス圧縮装置を構築した。

## 研究項目②:能動的3次元時空構造形成法の開発

### (目的)

本研究の目的は、時空間パルス波形整形技術を用いて、3次元誘電率分布を動的に書き込む手法を開拓することである。偏光整形により、等方媒質中にも光学活性を能動的に誘起するなどして、位相制御パルスによるモルフォロジー制御を実証する。モルフォロジー制御の対象として、農工大チームの得意とする有機分子の選択的異性化を用い、新しいパターン形成法を開拓する。

3次元時空構造形成の材料探索として、様々な感光性有機分子の非線形光学特性を波形整形パルスによって誘起する実験を系統的に行う。

### (実施内容)

ねじれた分子構造を持つキラル分子が持つ光学活性などは、分子や媒質のモルフォロジーに依存して発現する。モルフォロジーを動的に制御することができれば、光学活性の能動的な発生や増強が可能となる。本年度は、位相や偏光を整形したパルスにより分子振動を選択的に制御し、分子の光学活性を時間分解することで光学活性増強に必要な振動モードを同定する目的で、時間分解エリプソメリー測定系の開発を行った。開発した測定系の動作検証として、キラル分子ではないが、ラマン能率の大きなクロロホルム分子に対して、超短光パルスでISRS(Impulsive Stimulated Raman Scattering)により励振された分子振動モードの観測と、パルス列を用いた振動モードの選択制御実験を行った。本研究プロジェクトにおける農工大チームの役割のひとつに、動的モルフォロジーの高感度低ノイズ計測手法を開発することがある。今回、分子振動によって変調を受けたプローブ光スペクトルの周波数シフトを差動アンプで増幅し、既に本プロジェクトで開発済みの高速掃引型波束分光計と組み合わせることにより、高感度低ノイズ化を達成した。

さらに、波形整形器で時間間隔を調整したパルス列を用いて、観測できた複数の振動モードのうち任意のモードのみを選択励起できることを確認した。今後は、キラル分子等を対象に、偏光制御パルスを用いて、光学活性増強に必要な振動モードを同定していく。

研究項目①で述べた「位相制御コヒーレントラマン顕微分光法」は、能動的3次元時空構造を形成する目的で開発したものであるが、東京医科歯科大学の寺田純雄教授からの研究提案により、生体内での分子種同定に活用することを試みた。その結果、生きたイカの神経細胞内に注入した麻酔ガスの分子を検出することに成功した。巨大軸索とよばれるイカの神経突起内に注入した麻酔薬(セボフルラン)のラマンスペクトルを、細胞質から分離して測定し、細胞中での麻酔ガス分子の位置を特定した。この成果は、2010年12月27日付の日刊工業新聞および2011年1月1日付の科学新聞で報道され、日経BP社のバイオテックジャパン Web サイトで取り上げられた。

## §4. 成果発表等

### (4-1) 原著論文発表

#### ●論文詳細情報

1. T. Unuma, Y. Ino, M. Kuwata-Gonokami, E. M. Vartiainen, K.-E. Peiponen, and K. Hirakawa, "Determination of the time origin by the maximum entropy method in time-domain terahertz emission spectroscopy", *Optics Express*, vol. 18, No. 15, pp.15853-15858, 2010 (DOI: 10.1364/OE.18.015853)
2. K. Yoshioka, T. Ideguchi, André Mysyrowicz, and M. Kuwata-Gonokami, "Quantum inelastic collisions between paraexcitons in Cu<sub>2</sub>O" *Physical Review B*, vol. 82, pp.041201/1-4(R), 2010 (DOI: 10.1103/PhysRevB.82.04120)
3. N. Kuse, Y. Nomura, A. Ozawa, M. Kuwata-Gonokami, S. Watanabe, Y. Kobayashi, "Self-compensation of third-order dispersion for ultrashort pulse generation demonstrated in an Yb fiber oscillator", *Optics Letters*, vol. 35, Issue 23, pp.3868-3870 (2010) (DOI:10.1364/OL.35.003868)
4. Yu Nagashima, Takayuki Suzuki, Sumio Terada, Shoji Tsuji, and Kazuhiko Misawa "In-vivo molecular labeling of halogenated volatile anesthetics via intrinsic molecular vibrations using nonlinear Raman spectroscopy", *Journal of Chemical Physics*, vol. 134, pp.024525 (2011) (DOI: 10.1063/1.3526489)
5. Yu Nagashima, Takayuki Suzuki, Sumio Terada, Shoji Tsuji, and Kazuhiko Misawa "Improved signal extraction method for single-pulse heterodyne CARS spectroscopy", *Proc. SPIE 7376*, 73760S (2010); doi:10.1117/12.871162
6. Masaaki Sato, Takayuki Suzuki, and Kazuhiko Misawa "Full Control of Polarization Shaped Pulses Using a Phase-Locked Mach-Zehnder Interferometer", *Proceedings of International Conference on Ultrafast Phenomena XVII*, pp.844-846 (2011)
7. T. Higuchi, N. Kanda, H. Tamaru, and M. Kuwata-Gonokami, "Selection rules for light-induced magnetization in a crystal with threefold symmetry: the case of antiferromagnetic NiO", *Physical Review Letters*, vol. 106, Issue 4, 047401/1-4 (2011) (Selected as Editor's suggestion)
8. K. Konishi, M. Nomura, N. Kumagai, S. Iwamoto, Y. Arakawa, M. Kuwata-Gonokami, "Circularly Polarized Light Emission from Semiconductor Planar Chiral Nanostructures", *Physical Review Letters*, vol. 106, Issue 5, 057402/1-4 (2011) (Highlighted in *Physical Review Focus* and *NPG Asia Materials* (doi:10.1038/asiamat.2011.44))
9. K. Yoshioka, E. Chae, and M. Kuwata-Gonokami, "Transition to a Bose-Einstein condensate and relaxation explosion of excitons at sub-Kelvin temperatures", *Nature Communications*, accepted (2011).