

# 低次元集合系フォトニクスラボ

## ( Low-dimensional Aggregates Photonics Lab. )

研究項目：低次元集合系と制御された輻射場の時間・空間相互作用の研究  
研究期間：平成11年度～15年度

### 1. はじめに

現在の、情報化社会においては、大容量の情報を処理し、伝達し、また記録することが必要とされている。光は、伝達および記録の分野において主役となっているが、情報処理の分野では、光を制御するデバイス技術が不十分であり、期待に対して充分に応えていない。エレクトロニクス技術における電子を制御する半導体デバイスと類似の役割を果たすべき、光技術における光を制御するための材料およびデバイスが不十分である。

一方、視覚情報に代表されるように、人間が大容量の情報を獲得し、発信するための、情報とのインターフェースとして、光は重要な役割を担っている。エレクトロニクスの主役であるSi半導体デバイスは、電気信号を光に変換する機能が不得意であり、情報の入出力には他の材料の持つ機能を利用しなければならない。

有機材料は、光との相互作用が大きく、光の状態を制御するための材料として期待されている。また、近年有機材料の持つ電気特性の研究が急速な進展を示している。電気信号を光に変換する発光ダイオード(LED)が実用化され、有機材料を用いた電気—光相互変換が可能となってきた。

本研究グループは、人間と情報のインターフェースとして利用できるデバイス技術のための機能材料を、有機材料が持つ優れた光—光制御機能および電気—光変換機能を利用して実現することを目標としている。

### 2. 光の時間・空間特性を利用した光機能材料

光は、 $10^{14} \sim 10^{15}$  Hz という高い周波数領域を持っており、 $10^{-15}$  秒程度という超高速で応答できる可能性をもつ。われわれは、この超高速時間応答性を情報の伝送や処理などに利用するための材料の開発研究を、産技プロジェクト「非線形光電子材料の研究・開発」(研

究期間：平成元年～平成10年)で行ってきた。そこで、非常に大きな集団励起状態(励起子)を示す1次元分子集合体を開発し、この材料を用いて、光に対する低エネルギー超高速非線形応答を実証することが出来た。本材料の特徴は、励起子が百分子から千分子に渡ってコヒーレントに広がっていることである。このため、光との相互作用の目安となる遷移双極子モーメント $\mu$ が、コヒーレント状態の広がり分だけ増大を示している。このため、光との相互作用が非常に大きくなり、低い動作エネルギーの光でも高い非線形応答を示す。

しかし、実用的には、さらに低いエネルギーの光に対して非線形応答を示すような材料を開発する必要がある。特に、今後の大容量情報処理に用いることが期待されている、光の持つ2次元空間特性を利用した画像情報などの並列信号処理機能を実現するためには、さらに低い光強度のインコヒーレントな光に含まれる情報を処理出来るようにしていかなければならない。

光を有効に利用するためには、光の持つ空間特性を制御する必要がある。光の空間モードを、光ファイバーや導波路、共振器などにより制御することで、様々な応用が展開されてきた。光ファイバーによる長距離信号伝送や、干渉型構造の導波路を用いる光スイッチなどはその例である。この光の空間特性を制御し、物質系の電子状態の制御と共に、これと相互作用をする光の状態を最適化することにより、自然光などの低いエネルギーのインコヒーレントな光に含まれる情報を処理出来る材料を開発することが可能となる。

### 3. 光の空間制御

光の持つ時間・空間特性を利用した情報処理を可能とする材料を開発するには、光と相互作用する物質の電子状態を制御すると共に、光の輻射場をも制御し、低い強度の光でも大きな相互作用が可能となる状態

を創出する事が本提案の内容である。

反射鏡を2枚対向させた共振器は、光の時間・空間状態を制御するものであり、レーザー共振器はその例である。この共振器の間隔を光の波長程度にまで狭くすると、共振器内にはある特定の輻射場のモードしか存在出来なくなる(微小共振器)。これを利用して、共振器内にある物質からの自然放出を制御する事が行われ、レーザーの発信閾値を下げることや、有機発光ダイオードの発光方向制御に利用されている。

共振器内の輻射場と物質の励起電子状態の相互作用は、物質の持つ遷移双極子モーメント $\mu$ に対して、共振器内での励起状態の散逸する速度 $\gamma_{ex}$ および共振器の輻射場モードの散逸する速度 $\gamma_{cav}$ の相対的大きさに依存する。従来試みられてきた微小共振器による物質からの自然放出の制御は、 $\mu$ が小さく $\gamma_{ex}$ 、 $\gamma_{cav}$ が大きい系についてであり、この場合は、相互作用は弱く、物質の励起状態は大きな変化を受けない(弱結合)。一方、 $\gamma_{ex}$ 、 $\gamma_{cav}$ を小さくし、微小共振器内に $\mu$ の大きな物質を閉じ込めた場合には、共振器の損失が小さいため、物質から共振器内へ放出された光は、長時間共振器内に留まり、共振器内で光の放出・吸収が繰り返される。このため、物質の励起状態と共振器の輻射場モードが一体化し(強結合)、共振器ポラリトンと呼ばれる状態となる事が期待される。

このような状態が実現できると、インコヒーレントな光が入射しても、共振器から出てくる光はコヒーレントな状態となり、2次元画像処理に必要なインコヒーレント→コヒーレント変換が可能となる。さらに、共振器内で、物質と光が大きな相互作用を起こしていることから、特異な光非線形光学効果が生じることが期待される。

#### 4. 分子集合体と微小共振器を用いる空間制御

このような系を実現するためには、物質の電子状態として、 $\mu$ が大きく $\gamma_{ex}$ が小さい系を開発する必要がある。このような系として、主に半導体量子井戸の励起子について調べられてきた。しかし半導体量子井戸の励起子の振動子強度( $f \cdot \mu^2$ )が $5 \times 10^{-2} / \text{nm}^2$ 程度であるのに対し、色素分子ではそれ自身の振動子強度が大きくほとんど1に近く、さらに、集合体を形成することにより $\mu$ の増大効果が生じる。このため、単位面積当た

りの $\mu$ は、半導体量子井戸に比較し4桁以上大きくすることが出来る。われわれは、非線形光学効果の大きな材料の開発において、分子集合体により $\mu$ の非常に大きな系を見出している。

励起状態の散逸速度 $\gamma_{ex}$ を小さくするためには、励起状態の位相緩和時間を長くする必要がある。このため半導体量子井戸を用いる研究は主に液体ヘリウム温度付近で行われているが、分子集合体は、液体窒素温度でほぼ同程度の位相緩和時間を示す事をわれわれは見出している。さらに吸収と発光のピーク位置がほとんど同じであり、共振器内での放出・吸収が効率よく行われるため、 $\gamma_{ex}$ が小さいことが予想される。

小さな $\gamma_{cav}$ を持つ微小共振器は、対向する2枚の誘電体多層膜鏡構造がおもに用いられている。われわれは、物質の電子状態と輻射場の結合を強くするため、分布帰還形(DBF)微小共振器構造を用い、分子集合体をこの中に埋め込んだ。これは、1次元フォトニッククリスタルと呼ばれるものである。DBF微小共振器構造は、石英基板上に電子ビーム露光と反応性イオンエッチング法を用いて作製した。回折格子の周期( $\Lambda$ )は、360nmから430nm、山と谷の幅の比は1:1、深さおよそ400nmである。その上に、分子集合体薄膜をスピンコートにより作成し、さらに、ポリスチレン薄膜をオーバーコートして、薄膜導波路とした。図1に、各周期のDBF共振器に垂直入射した時の透過スペクトルを示す。図中、下向きの矢印は、共振器ポラリトンの下枝モード、上向きの矢印は、同上枝モードに対応すると考えられ、物質の電子状態と輻射場の強結合の結果と考えられる。

#### 5. 今後の展開

ここで述べたDBF微小共振器は、輻射場の1次元的な閉じ込めであるが、さらに効率良く輻射場を閉じ込めるため、2次元や3次元的な閉じ込め構造を研究する必要がある。この系は、優れた非線形光学応答を示すことが期待され、これを用いて2次元情報処理機能素子を作成することが出来よう。

また、分子集合体の代わりに、光学特性のみではなく電気伝導特性にも優れた1次元共役系高分子を用いて微小共振器構造を作り、この系で電流注入により発光させることが出来れば、発光の方向性に優れたコ

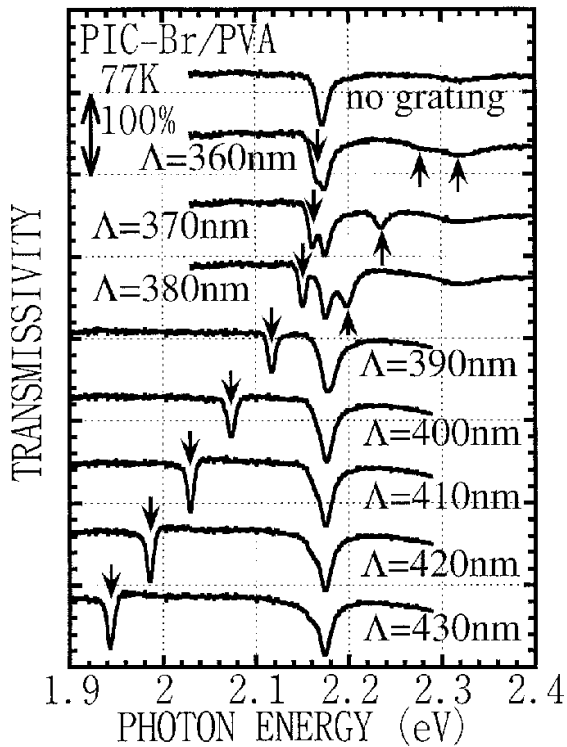


図1 DFB 微小共振器中に埋め込まれた分子集合体 (PIC-Br) の光透過スペクトル。回折格子が無い場合の励起子吸収が、回折格子と結合し共振器ポラリトンを形成し、回折格子の周期( $\Lambda$ )の違いにより、共振器ポラリトンの分裂の大きさが異なってくる。

ヒーレントな光源を作成することも可能となってくる。これは 2 次元情報処理のための理想的な光源となる事が期待できる。

当該研究担当者等

ラボ構成員( 総数5名 )

職員( 4名 ) 小林俊介\* ,佐々木史雄 ,榊原陽一( 材料科学部 ) ,原市 聡( 電子デバイス部 )

職員以外( 1名 ) 加藤 毅 ( 分子研 )

\* ラボリーダー