

## Ⅵ-2 半導体物性グループ

教授 舛本泰章  
講師 金光義彦  
助手 鈴木隆司  
助手 三品具文  
助手 山田陽一  
大学院生 (8人)

### 【1】半導体の超高速レーザー分光 (三品具文・舛本泰章)

超高速レーザー分光、フェムト秒分光は100フェムト秒前後の極めて安定なフェムト秒高出力光パルスが生成できるチタンサファイアレーザーシステムの開発、普及により、高度に洗練された固体分光が可能になっている。現代の超高速レーザー分光の最も魅力的なターゲットは、新しい現象の発見や解明である。

#### (1) 自由誘導緩和法による励起子の超高速非線形応答の研究

自由誘導緩和法は、試料に照射した超短光パルスの透過光や反射光の時間特性を測定する方法で、その単純さ故に、励起子系の超高速な非線形応答を調べるには、より直接的で有力な測定手段であると考えられる。(報文1)

一般に、固体の超高速な光パルスに対する応答を考える場合には、極めて薄い試料においても伝搬効果が非常に重要であり、また表面における反射などの境界条件を同時に考慮した取扱いが必要である。線形な領域における自由誘導緩和信号については、ポラリトン描像による光の周波数領域での取扱いにより、境界条件を含めた反射と透過の数値計算が可能である。一方、非線形な領域においては、マックスウェル方程式と光学的ブロッホ方程式を連立させて解く必要がある。このために従来は、slowly varying envelope 近似法が用いられてきた。そこで、これを改良して、より正確にポラリトン効果や境界条件を取り込むことのできるforward and backward self consistent 法を工夫し、より一般的な非線形自由誘導透過信号の取扱いができるようにした。

図1は、 $\text{ZnP}_2$  の  $n=1$  励起子における自由誘導緩和信号の励起強度依存性である。励起子に共鳴した波長 800nm パルス幅 300fs のチタンサファイア再生増幅器の光出力を用い、光混合により自由誘導緩和信号を検出している。励起強度の増加とともに励起子遷移の飽和がおり裾野部分の振動構造が減少していくのがわかる。

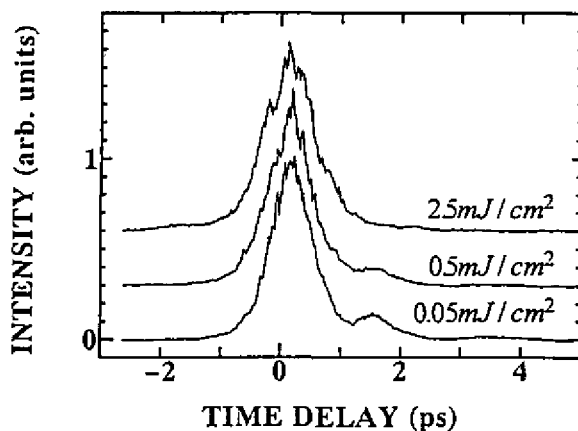


図1  $\text{ZnP}_2$  の  $n=1$  励起子における自由誘導緩和信号の励起強度依存性。励起強度の増加とともに裾野部分の振動構造が減少していく。

図2は、マックスウェルブロッホ方程式を用いて計算した自由誘導緩和信号である。実験との比較のために、レーザーパルス幅で畳み込みを行っている。パルス面積として与えられた励起強度の増加にともなって実験結果と同様な裾野部分の変化が再現されている。

その他、半導体超格子におけるコヒーレントフォノンの観測についての論文を発表した。(報文2、3)

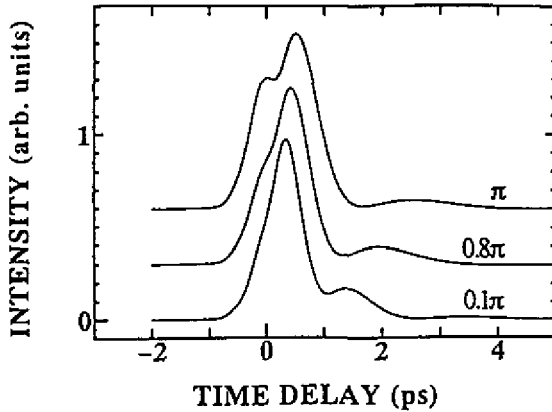


図2  
マックスウェルブロッホ方程式を用いて計算した自由誘導緩和信号。励起強度の増加にともなって実験結果と同様な形状の変化が再現されている。

## 【2】半導体量子井戸・超格子の光物性

### (1) II-VI族半導体量子井戸構造のレーザー光物性(山田陽一・三品具文・舛本泰章)

ワイドギャップII-VI族化合物半導体は、励起子のボーア半径が小さいために、高密度励起による励起子のスクリーニングが生じにくく、励起子分子及び励起子-励起子間の非弾性散乱等、励起子の多体効果に基づく発光が顕著に観測される。II-VI族半導体量子井戸構造におけるレーザー発振機構に励起子が関与している可能性が指摘されており、励起子の持つ大きな振動子強度を考慮に入れば、発振しきい値電流密度の低減下につながり、デバイスの室温安定動作という点からはプラスの因子として働く可能性がある。高密度励起子系のダイナミクスに関する研究は、レーザー発振機構の解明のみならず、励起子の非線形性を利用した素子の応用上重要である。

そこで、時間分解非線形発光分光法を用いて、量子井戸内に形成される高密度励起子系が示す光学的非線形性に関する研究を行った。試料は、MOMBE法により作製されたZnSe-ZnMgSSe単一量子井戸構造であり、量子井戸層の膜厚は10.5ML(3nm)である。励起光源には、CW-Ar<sup>+</sup>レーザー励起のモード同期チタンサファイアレーザー及びその再生増幅器から生成されるフェムト秒パルス(繰り返し周波数 250kHz, パルス幅 200fs)の第2高調波を用いた。非線形発光の測定法は、まず、励起光を2つに分けて、それぞれを異なる周波数( $\omega_1$ と $\omega_2$ )でチョッピングして試料の同一スポット上を励起する。そして、その和周波成分( $\omega_1 + \omega_2$ )の発光を検出するものである。従って、試料からの発光の非線形成分のみを検出することが可能な測定法である。また、2つに分けた励起パルス間に時間遅延を設けることにより、レーザー光のパルス幅程度の時間分解能で発光の立ち上がりや減衰に関する時間情報を得ることも可能である。

まず、非線形発光スペクトルにおいて、励起子発光は励起光強度の増加に伴い、sublinearな依存性(負の信号)を示し、一方、励起子分子発光は、superlinearな依存性(正の信号)を示した。励起子発光のsublinearな信号の起源は、主に励起子状態の位相空間占有効果によるものであるとして理解される。我々の興味は、励起子分子発光のsuperlinearな信号の起源である。ここで、非線形発光スペクトルにおける superlinearな信号(正の信号)は発光効率の増大を表していること

を考慮すると、この信号の起源は、励起子分子密度に対するより高次の非線形効果に起因したものであると考えられる。そこで、励起子及び励起子分子の非線形発光の時間相関トレースを測定した。その結果、非線形励起子発光が示す負の信号は、約133psの時定数で回復することがわかった。この値は、ストリークカメラを用いて測定した励起子発光の発光寿命(140ps)とほぼ一致しており、この負の信号が励起子状態の位相空間占有効果に起因したものであるとした解釈を支持している。一方、非線形励起子分子発光が示す正の信号は、約30psという早い時定数で減衰することがわかった。ここで我々は、この非線形励起子分子発光が示す正の信号、即ち励起子分子発光の発光効率の増大は、励起子分子発光の誘導放出によるものであると考える。即ち、第1励起パルスにより生成された励起子分子が輻射再結合消滅する前に第2励起パルスにより励起子分子が生成された場合、励起子分子発光の誘導放出が生じる。この場合、その30psという時定数は励起子分子の発光寿命を表すことになる。

これまで、ワイドギャップII-VI族半導体量子井戸構造における励起子が関与したレーザー発振機構は、主に、局在励起子状態の部分的な位相空間占有効果によって説明されてきた。このことは、量子井戸層が3元混晶であり、励起子が組成の揺らぎにより必然的に不均一広がりを有する系に適用され、理解されてきた。しかしながら、上述した結果は、量子井戸層が2元化合物であり、励起子の局在化が抑制された系では、そのレーザー発振機構に励起子分子が寄与することを示している。(報文4-9)

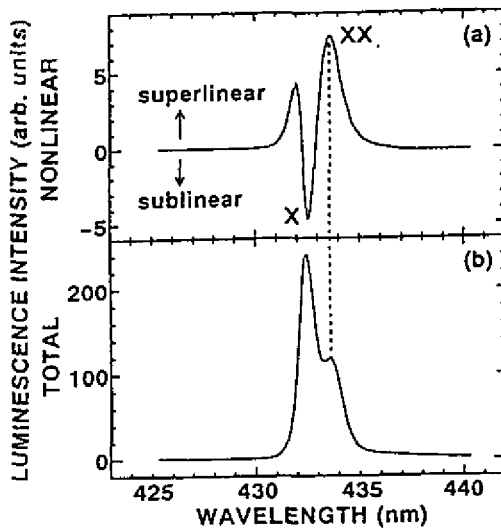


図 3

ZnSe-ZnMgSSe単一量子井戸構造における非線形発光スペクトル (a) と全発光スペクトル (b)。測定温度は2 K、励起エネルギー密度は $0.39 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ である。図中、Xは励起子を、XXは励起子分子を表している。非線形発光スペクトルにおいて、縦軸上向きは発光効率増加を、下向きは減少を表している。

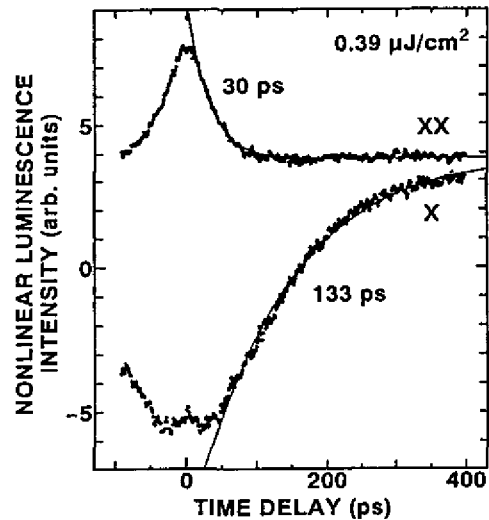


図 4

ZnSe-ZnMgSSe単一量子井戸構造における励起子(X)及び励起子分子(XX)の非線形発光の時間トレース。測定温度は2 K、励起エネルギー密度は $0.39 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ である。縦軸上向きは発光効率増加を、下向きは減少を表している。

### 【3】半導体量子ドットの光物性

物理、化学、電子工学の広い分野でナノメートルサイズの半導体微結晶（ナノクリスタル）が盛んに研究されている。ナノメートルサイズになると電子・正孔や励起子が狭い空間に閉じ込められ、運動エネルギーが量子化され、電子・正孔間に働くクーロンエネルギーも大きく増大する。この量子現象および、全原子数の数%～数十%に達する原子が構成する表面に起因する現象が半導体微結晶（ナノクリスタル、量子ドット）の本質である。

#### （1）CuCl, CuBr, CuI, CdS, CdSe量子ドット（舩本泰章）

ナノメートルCuCl微結晶のスペクトル領域、および時間領域のレーザー分光により新たに微結晶の励起子分子の束縛エネルギーや励起子、励起子分子間の分布のダイナミクスが明らかになった。また昨年度発見された永続的ホールバーニング現象の機構を解明する研究が進展した。

#### <量子ドット中の励起子分子の束縛エネルギー>

半導体ナノクリスタル中に閉じ込められた励起子分子はバルク結晶中とはかなり異なった環境下に置かれている。ナノクリスタル中の励起子分子の束縛エネルギーは既に数グループにより理論的に計算されているが、それぞれの近似の適用範囲に限りがあり、実験で求められるデータとの整合性を議論するには定量性が十分ではない。実験ではCuClナノクリスタル中の励起子分子の束縛エネルギーがサイト選択励起下で観測される発光スペクトルの小さな構造から求められている。しかし、発光スペクトルは時間的に異なる励起子や励起子分子の分布を反映している。こうした不確かさを排除するため、サイト選択励起下で励起子吸収帯中に掘れるホールと励起子から励起子分子に遷移する事で起きる誘導吸収構造を同時に観測し、励起子分子の束縛エネルギーを測定した。ポンプ光のエネルギーを変えて励起子のホールと励起子分子生成に伴う誘導吸収構造を同時にプロットすることで励起子分子の束縛エネルギーが求まる。励起子分子の束縛エネルギーはサイズの減少と共に単調に増大していることが明らかにされた。（報文10）

#### <CuCl量子ドット中の励起子・励起子分子のダイナミクス>

CuClナノクリスタル中の励起子及び励起子分子についてサブピコ秒レーザーパルスを用いた発光の時間分解測定や、白色光を用いたポンプ・プローブ測定が行われ、光学利得及び励起子吸収帯の吸収飽和の時間変化について報告されている。しかし、これらの実験結果の間にはいくつかの矛盾点があり励起子・励起子分子系の振る舞いを完全に理解しているとはいえない。そこでチタンサファイア再生増幅器を用いたフェムト秒レーザーシステムを用いて同一励起条件下でポンプ・プローブ測定と発光の時間分解測定を行い、それらの実験結果を統一的に説明することを試みた。

図5に励起強度が $810 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ の時の発光スペクトルとストリークカメラによって測定した励起子と励起子分子の発光の減衰を示してある。励起子の発光には緩やかな立ち上がりが見られる一方、励起子分子の発光は測定の時間分解能以内に立ち上がっている。これまで、励起子の数密度を考えて、レート方程式によって実験結果を説明することが行われていた。しかし、実験の励起条件では一つのナノクリスタル中の励起子の数は平均して2個以下であること、また励起子分子の生成には2個の励起子が相互作用することが必要であることを考えるとこの取り扱い是不適切であると考えられる。実際に、この実験結果をレート方程式で説明しようとした試みは、励起子分子がレーザーパルスから励起子を介さずに直接生成されるということを仮定しなければうまくいかない。そこで、ナノクリスタル中の励起子の数の離散性を考慮するためにモンテカルロシミュレーションを行った。図中に実線で示したのが平均励起子数を1.5としたときの結果であるが、実験結果とよく一致している。

図6に同じ励起条件でのポンプ・プローブ測定の結果を示す。上は実線がポンプ光がないときの吸収スペクトル、点線がポンプ光が当たってから10ps後の吸収スペクトルである。励起子吸収と励起子分子発光の位置にそれぞれ吸収変化と光学利得が見られる。下にいくつかの遅延時間に対する吸収スペクトルの差を示してある。このような光学非線形現象はナノクリスタル中に存在する励起子、励起子分子に起因すると考えられるが、シミュレーションの結果として得られた励起子、励起子分子数をもとにして吸収変化と光学利得の時間変化にあわせてみると良い一致を示した。励起強度に対する依存性も平均励起子数を変化させることによって説明できた。

このようにナノクリスタル中の励起子・励起子分子のダイナミクスには励起子の数の離散性が重要になることが分かった。(報文11, 12, 13)

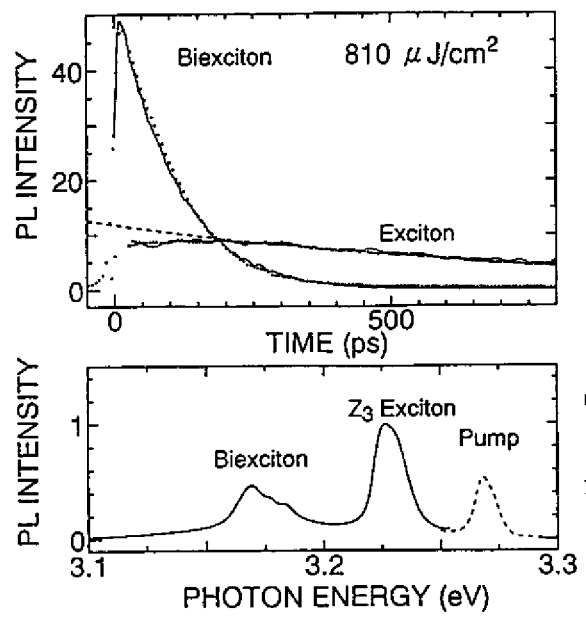


図5  
CuCl1ナノクリスタルの発光スペクトルと、ストリークカメラによって測定した励起子と励起子分子の発光の時間変化。

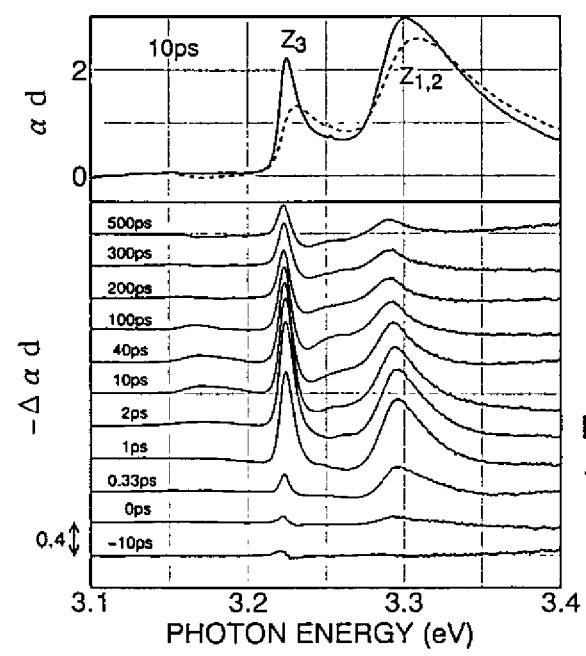


図6  
図5と同じ励起条件でのポンプ・プローブ測定による吸収スペクトルの時間変化。

### <半導体量子ドットの永続的ホールバーニングの機構>

半導体ナノクリスタルはゼロ次元「量子ドット」として振る舞う。量子閉じ込め効果は光学的性質を大きく変化させ、最も低いエネルギーの励起状態は、サイズに依存した高エネルギーシフトを示す。こうした量子サイズ効果は、量子井戸、量子細線、量子ドットに共通に普遍的に観測されるのであるが、量子ドットが量子井戸や量子細線と決定的に異なる点は、量子ドットは $10^3 \sim 10^6$ 個の比較的少数の原子から出来ていて、かなりの割合の原子が量子ドットの表面を形成したり、量子ドットと周囲の媒質との間の界面を形成している事である。この事から、量子ドットの電子状態は、量子ドット単独で議論されるべきではなく、表面や界面、さらには周囲の媒質まで一体として扱って議論すべきであると考えるのは極めて自然である。

もし、量子ドットよりもずっと小さな分子やイオンなどのゲストがガラス、結晶やポリマーなどのホスト中に存在している場合には、ゲストの電子状態は周囲のホストの影響を大きく受け、そのエネルギースペクトルは不均一に広がるという考えを、私たちは極めて自然に受け入れている。永続的ホールバーニング現象は多くのこの様な系で観測されるが、この現象の発現のためには、ゲストとホストからなる全系の基底状態のエネルギーが複数あること、および、基底状態間の緩和が励起状態の緩和に比べて、十分遅い必要がある。

実際に作成される半導体ナノクリスタルのサイズは分布を持ち、サイズの違いは量子エネルギーの違いにはねかえるので、量子ドットの集合の吸収スペクトルは不均一広がりを示す。不均一に広がった吸収スペクトルの一部に狭い線幅のレーザーを照射すると吸収スペクトル中に穴があいた様に見える現象（ホールバーニング）が観測されるが、今まで作られたホールは光励起状態が占有されている時間のみ観測されると考えられてきた。しかしながら、昨年、私たちの研究グループでは、このホールバーニングが永続的に起こる事を発見した。

半導体ナノクリスタルは半導体材料をイオンとしてドーブした結晶やガラスを適当な熱処理によりイオンを凝集させて作成することができる。とりあげた試料は、 $\text{GeO}_2:\text{Na}_2\text{O}$ ガラス中のCdSe微結晶（平均半径  $R=2.4\text{nm}$ ）、アルミノボロシリケートガラス中のCuBr微結晶（ $R=3.6\text{nm}$ ）、CuCl微結晶（ $R=2.5\text{nm}$ ）およびNaCl結晶中のCuCl微結晶（ $R=3.5\text{nm}$ ）である。これらの試料中の微結晶のサイズはX線小角散乱の実験により決定した。ホールバーニングの実験は、ポンプ光としては狭い線幅のナノ秒色素レーザー（ $0.014\text{meV}$ 程度）を用い、プローブ光としては、ハロゲンランプの光を用いる極めて単純なもので、クライオスタットにとりつけられた試料のレーザー励起前と励起後の吸収スペクトルを分光器と光多重分析器を用いて測定する事により行なった。

図7(a)は、 $\text{GeO}_2$ ガラス中のCdSeナノクリスタルの吸収スペクトルをあらわす。吸収スペクトルは $2.19\text{eV}$ にピークがあり、これはバルクCdSeのバンドギャップエネルギーよりも $0.35\text{eV}$ だけ高エネルギー側にあり、電子と正孔に対する量子閉じ込め効果により理解できる。図7(a)中の3つの構造は、A-励起子、B-励起子、C-励起子に対応する。図7(c)はCuBrナノクリスタルの吸収スペクトルを示す。吸収スペクトルは $3.073\text{eV}$ にピークを持ち、これはバルクCuBrの $Z_1$ 励起子のエネルギーより $109\text{meV}$ 高エネルギーシフトをしており、これは、「ドナー様励起子モデル」により電子の量子閉じ込め効果として説明できる。

図8(a)と8(c)はそれぞれガラスおよびNaCl結晶中のCuClナノクリスタルの吸収スペクトルで、 $Z_2$ と示された幅広いピークはバルクCuCl中の $Z_2$ 励起子のエネルギーより高エネルギーシフトをし、このシフトは励起子の量子閉じ込め効果として理解できる。

これらの試料の吸収スペクトルを狭い線幅のレーザーで照射すると、吸収スペクトルは図7(b)、7(d)、8(b)、8(d)に示す様に変化する。吸収スペクトルの変化 $-\Delta\alpha d$ はレーザーを照射後の吸収スペクトルからレーザーを未照射の吸収スペクトルを差し引いた量で定義する。低温でこのスペクトル変化は長時間保たれる。図中の吸収スペクトルの変化はレーザー照射2分後と50分後のものであるが、2Kでは吸収スペクトル中に作られたホールは8時間以上保たれる事が確認できた。吸

吸収スペクトルの変化成分は、スペクトルホール、サテライトホール、アンチホールの構造が、フォトダークニングの構造や、幅広い吸収スペクトルの微分構造を反映した波状構造の上に重畳されて観測される。これらの吸収スペクトルの変化は、時間の対数に比例して減衰することから、減衰時定数が幅の広い分布を持っている事がわかる。CuBrナノクリスタルの場合にポンプするレーザー光の積算強度の関数としてホールの深さをプロットすると、積算強度の対数に比例してホールの深さが成長する。この事は、ホールの成長速度が広い分布を持つ事を意味し、幅と高さの分布のあるポテンシャル障壁をトンネルするモデルで理解される。ホールの成長と同様に、吸収スペクトルの微分構造を反映した幅広い波状構造もポンプレーザー光の積算強度の対数に比例して成長するのが観測される。

一度開けられたスペクトルホールは、温度の上昇と共に消す事ができる。アニール温度が上がると共に、スペクトルホールの構造と吸収スペクトルの微分構造を反映した幅広い波状構造は同時に消えていく。ホールフィリングのアニーリング温度依存性はポテンシャル障壁を熱活性的に越えるというモデルで説明することができる。熱アニーリングだけでなく、幅広いスペクトルを持つ光照射によってもホールフィリングをおこすことができる。ホールフィリングはCuBrナノクリスタルの吸収域だけでなく、透明域を励起してもおこすことができる。透明域を励起した場合には、スペクトルホールと吸収スペクトルの微分構造の両方とも消えていくが、吸収域を励起した場合には、スペクトルホールはより効率的に消えていくが、吸収スペクトルの微分構造は反対に成長していく。吸収スペクトルの微分構造は吸収帯の低エネルギー側へのエネルギーシフト（レッドシフト）を反映している。CuClナノクリスタルの場合もホールフィリングの様子は、ほぼ同様である（図10）。

図7、8から、永続的スペクトル変化はゲストだけでなくホストにも依存していることがわかる。半導体ナノクリスタルの永続的ホールバーニング現象は、ゲストとホスト両者に依存しており、この意味で多様であり、ホールバーニング、ホールフィリングの機構も唯一ではないかもしれない。しかし、CuBrナノクリスタルについては、図9に示す様な機構が最も可能性の高いものと考えている。光励起されたCuBrナノクリスタル中に生成された励起子はナノクリスタル表面に局在化し、電子が表面にトラップされる。正孔はガラス中のトラップ準位へ、ナノクリスタルとガラスが構成するポテンシャル障壁をトンネル過程により透過して捕獲される。これはすなわち、ナノクリスタルの光イオン化過程である。

ナノクリスタルの表面に電子がトラップすると、新たに創る励起子のエネルギーは高エネルギーシフトすることになり、線幅の狭い光で選択励起されたナノクリスタルの吸収が減少してホールとなり、高エネルギー側に誘導吸収帯が現れる。このスペクトル変化が図7(d)で観測される変化である。メインホールの両側に観測されるサテライトホールは光学型フォノンの放出に伴った構造で、ガラス中のトラップに捕獲された正孔とナノクリスタル表面に捕獲された電子が局所電場を作り、これが光励起されていないナノクリスタルに量子閉じ込めシュタルク効果を及ぼし、吸収スペクトルの全体としてのレッドシフトにつながる。この光イオン化モデルは光誘起ホールフィリングの現象もうまく説明することができる。

永続的ホールバーニングは従来、ガラスや結晶をホストとし、イオン、分子、カラーセンターをゲストとする、すなわち分子サイズのゲストに対してのみ観測されており、半導体ナノクリスタルをゲストとしたシステムで永続的ホールバーニングが観測されたのは最初の例である。半導体ナノクリスタルは $10^3 \sim 10^6$ 個の原子で構成され、全体のうちのかなりの割合を占める数の原子が構成する界面を通してホストの中でのゲストであるメソスコピック結晶が光イオン化をおこすことで、永続的ホールバーニングという劇的な現象の発現につながっている。

永続的ホールバーニング現象の応用はよく知られている様に、波長多重光メモリである。現実にはデバイスとして応用するには、もちろん、室温で使えて波長多重度が高く、かつ弱い光量でホールが書き込める必要がある。半導体ナノクリスタルが、現実には波長多重光メモリデバイスになる可能

性は、現時点ではわからないが、波長多重に書き込める可能性を示しておく事ができる（図11）。

永続的ホールバーニング現象を使う事で、あるサイズの半導体ナノクリスタルをレーザーにより印をつけて（レーザーマーキング）、高精度の分光測定を行う事ができる。例えば、ナノクリスタル中に閉じ込められた音響型フォノン、ナノクリスタル中に閉じ込められた光学型フォノン、ナノクリスタルの吸収スペクトル中に開けたホールの励起状態などがナノクリスタルのサイズの関数として精密に研究することができる。外場（温度、電場、磁場、圧力など）下での半導体ナノクリスタルの電子状態の振舞いをスペクトルホールの狭い線幅を利用して精密に測定する事が可能で、この方向への応用も有望である。（報文14-22）

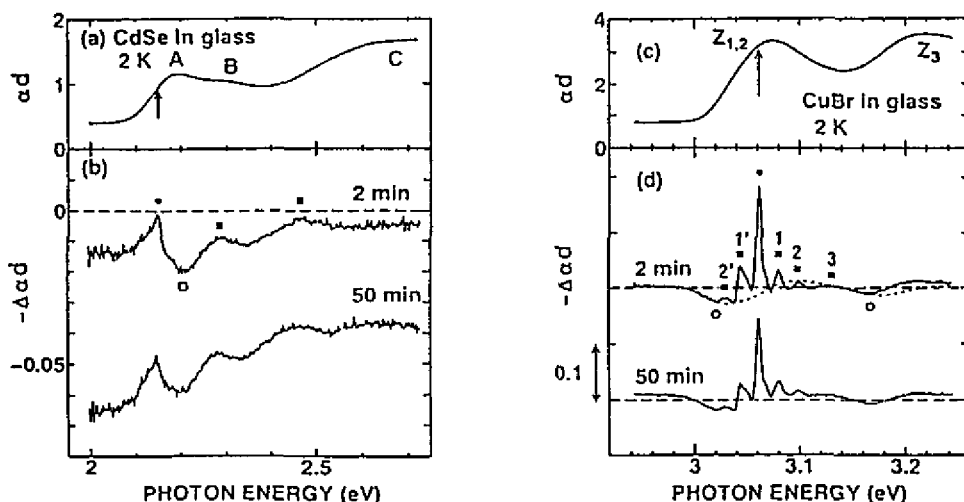


図7

ガラス中に埋め込まれたCdSe, CuBrナノクリスタルの永続的ホールバーニングの観測(2K)。

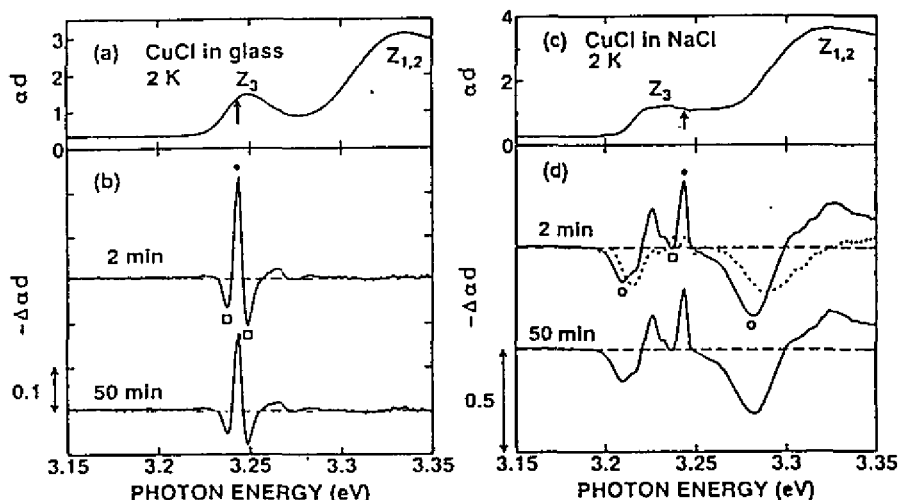


図8

ガラスおよびNaCl結晶中に埋め込まれたCuClナノクリスタルの永続的ホールバーニングの観測。



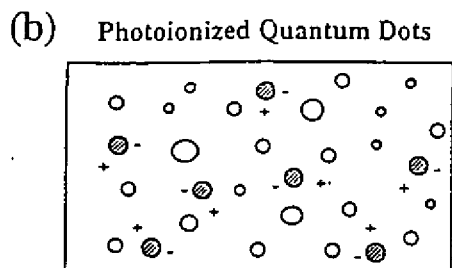
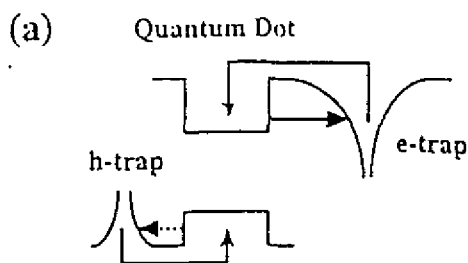


図 9

(a) ガラスや結晶中に埋め込まれた量子ドットの光イオン化モデル。光励起された電子や正孔は、ポテンシャル障壁をトンネル効果で抜け、ホスト中のトラップに捕獲される。トンネル過程は実線と破線で表わし、熱アニール、光誘起ホールフィリングの過程はシャドウ線で表わす。

(b) 光イオン化したCuBr量子ドットとホスト中のトラップに捕獲されたキャリアの模式図。光イオン化した量子ドットとホスト中の電荷の空間分布の種々の配置が永続的ホールバーニングの必要条件である基底状態の不均一広がりを作る。

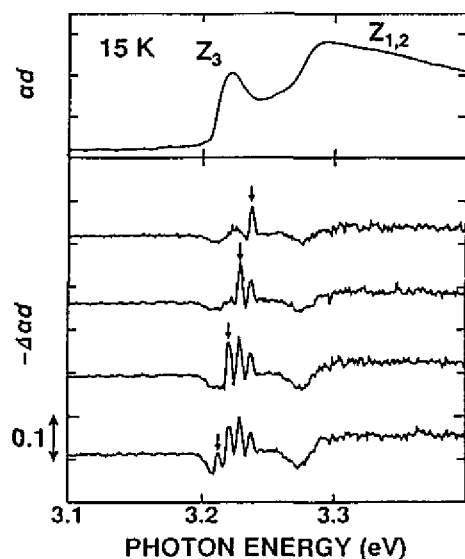
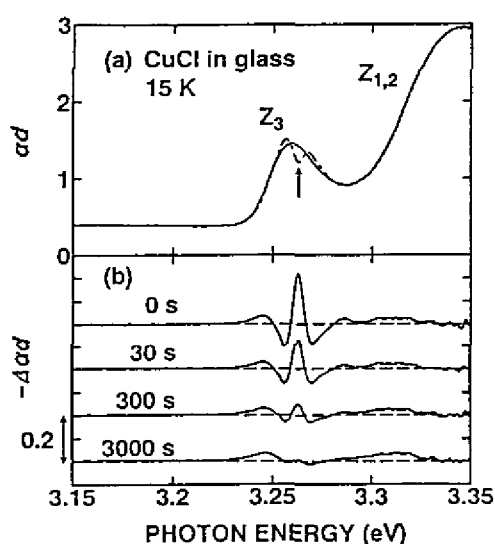


図 10

ガラス中に成長させたCuClナノクリスタルの、光誘起ホールフィリング。図(a)は、励起エネルギー密度  $10 \mu\text{J}/\text{cm}^2$  のレーザーパルスで照射する前(実線)、10分間照射した後(一点破線)の吸収スペクトルである。このようにしてできたホールは、幅広いスペクトルを持つ光(ランプの光から干渉フィルターにより切り出した光など)を照射することにより消すことができる。このことを示したのが図(b)の吸収変化スペクトルである。これはエネルギー3.26 eV、スペクトル幅 0.1 eVの光による、ホールの減衰する過程を示している。各スペクトルに付記してあるのは、光の照射時間である。また $Z_3$ 吸収端より低いエネルギーの光を照射してもホールフィリングが起こること、さらにガラス中のCuClナノクリスタルでは、NaCl中に比べて光照射によるフィリング効率が大きいことがわかった。

図 11

NaCl中のCuClナノクリスタルを用いた光メモリー機能の一例。サイズ分布により不均一に広がった $Z_3$ 励起子吸収帯中に、スペクトラル・ホールをあけることができる。このホールは低温下では数時間たっても消えないために、ポンプ光のエネルギーを変化させて次々とホールを掘っていても、それ以前にあげられたホールはほぼそのままの形で保持される。またこのようなホールは、サンプル温度を上昇させたり、スペクトル幅の広い光を照射することによって、消去(ホールフィリング)することができる。

<発光スペクトルにおける永続的ホールバーニング効果>

半導体微結晶の吸収スペクトルにみられる永続的ホールバーニング現象は、発光スペクトルにも痕跡を与える。ホストにNaCl結晶を用いたCuClナノクリスタルの試料の発光スペクトルに永続的ホールバーニング効果が見いだされた。図12(a)は試料の吸収スペクトルであり、微結晶の平均粒径は5nmである。図12(b)は図12(a)中の矢印部分を色素レーザーにより励起したときに得られる差分吸収スペクトルである。この吸収スペクトル中のホールは、実験の行われた温度領域(2K)では永続的である。図12(c)は、この試料を355nmの波長で励起したときの発光スペクトルであり、励起子発光である。また、実線はスペクトルホールを作る前の発光スペクトルであり、破線で示した発光スペクトルは、図12(b)に示したスペクトルホールを作った直後のものである。ここに示すように、発光スペクトルにもスペクトルホールが作られたように見える。「発光スペクトルのホールバーニング」と「吸収スペクトルのホールバーニング」の関係は、半導体ナノクリスタルの永続的ホールバーニングの機構を明らかにする有力な手段と思われ、現在研究を進めている。

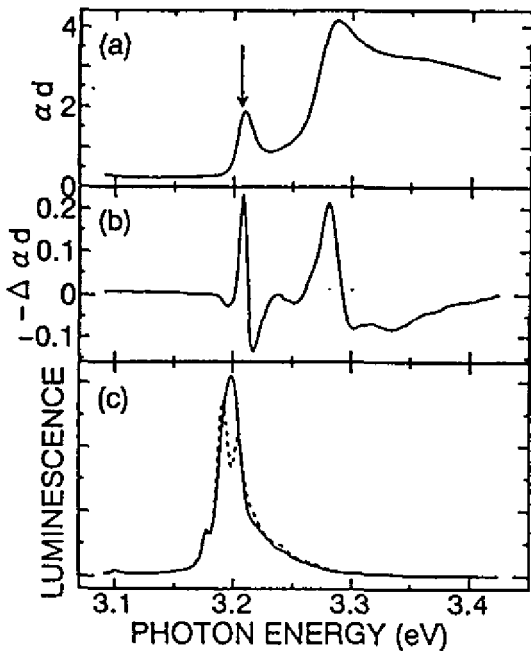


図12  
CuClナノクリスタルの発光スペクトルに見られる永続的ホールバーニング効果。

<半導体量子ドットの永続的ホールバーニング現象の普遍性の探求>

半導体量子ドットの永続的ホールバーニング現象の普遍性を確かめるために、ガラス中のCuIナノクリスタル、NaI中のCuIナノクリスタル、NaBr中のCuBrナノクリスタル、ポリマー中のCdSナノクリスタル、GeO<sub>2</sub>ガラス中のCdSeナノクリスタルについて研究を行い全ての場合に永続的ホールバーニング現象を確認した。図13にCuIナノクリスタルの永続的ホールバーニングの実験結果を示す。上図は、吸収スペクトル、下図は、矢印の位置を線幅の十分狭い励起光で励起したときの差分吸収スペクトルである。この時得られるスペクトルホールは、低温では、数時間以上保たれる。

また、CuIナノクリスタルの量子サイズ効果について研究をした。励起子のボーア半径が0.7nmのCuIナノクリスタルは、励起子量子閉じ込めの典型的物質である。一方励起子ボーア半径が1.3nmのCuBrは、「ドナー様励起子モデル」が成立し、電子だけが量子閉じ込めを受けるモデルで、大概は理解できる。ボーア半径がより大きいCuIナノクリスタルの場合はどうであろうか？ まず、ガラス中のCuIナノクリスタルを作成し、光吸収スペクトル、発光スペクトルを測定した。また、高エネルギー

ギー物理学研究所の放射光施設を利用したX線小角散乱の実験により粒径を測定した。その結果、サイズ効果による吸収スペクトルピークの高エネルギーシフトがみられ、X線小角散乱の結果と併せて、この高エネルギーへのシフトは電子・正孔個別閉じ込め効果で説明できることが分かった。図14にその結果を示す。図中の実線は、個別閉じ込め効果による計算結果であり、平均粒径30～50nmの領域で一致していることが分かる。

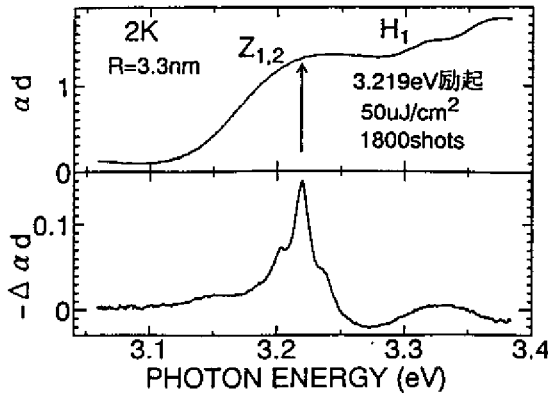


図13  
CuIナノクリスタルに見られる永続的ホールバーニング効果。

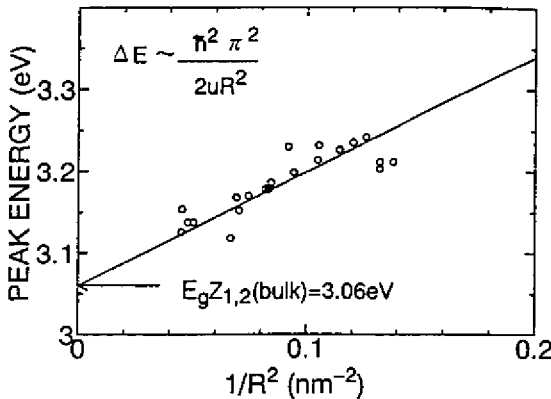


図14  
CuIナノクリスタルの量子サイズ効果

(2) Si, GeおよびSiCナノメートル微結晶の電子構造 (金光義彦)

大きな半導体結晶を分割していくと、原子や分子になる前に、固体と分子の中間的な奇妙な特性を持つ新しい物質相が現れる。これらはクラスター、超微粒子あるいは微結晶などと呼ばれ活発に研究されている。物質の大きさを変化させるだけおもしろい現象や物性が発現するのであれば一つの物質からいろいろな特性を示すデバイスが作製でき、大きな技術革新をもたらすものと期待される。Siは、電子デバイス材料として広く利用されているが、バンドギャップの小さな間接半導体であるために発光材料にならなかった。しかしサイズを小さくすることにより、バンドギャップの大きさを変化させることが可能となり、新しい発光する材料としてSiナノメートル微結晶が注目を集めるようになった。我々は、サイズの異なる微結晶を作製し、さらにその表面構造を制御することにより、Siナノメートル微結晶の電子構造と可視発光メカニズムを研究している。特に、Si表面における酸素の効果について、実験的および理論的に研究を行った。さらに、SiCナノメートル微粒子を新たに作成し、青色のフォトルミネッセンスおよびエレクトロルミネッセンスを得た。

(報文23, 24, 25)。

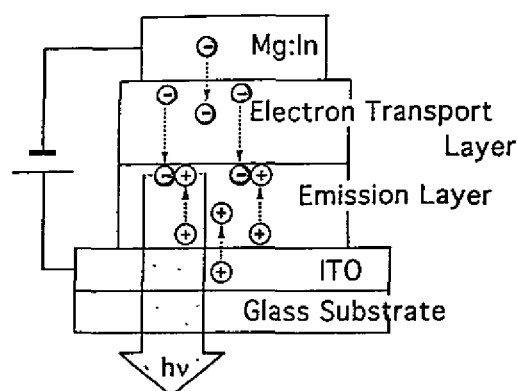
#### 【4】共役系高分子の光物性と量子サイズ効果（金光義彦）

##### (1) Siクラスターおよびポリマーの光物性

化学的に合成した8個のシリコンを骨格に持つクラスターを用いて、クラスターの形状に注目して、光学的特性を明らかにしてきた。また局所構造を制御したポリマーを用いて、その発光特性を研究した。特に、立方体Siクラスターは、他の形状のクラスターと電子構造が大きく異なり、三重項励起子からの弱い発光を観測した。（報文28）

##### (2) 共役系高分子の量子サイズ効果と発光ダイオード

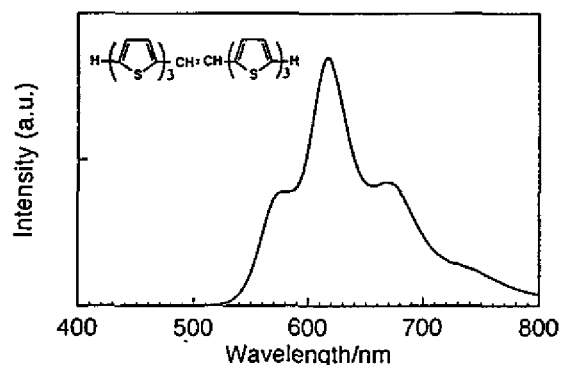
非局所的な共役電子をもつ有機半導体や高分子は、天然の量子細線や量子箱とみなすことができる。さらに、局所的な構造を制御できるため、無機半導体にはない細かな研究が可能であり、アトミックなスケールからの物理現象の解明を試みることができる。 $\pi$ 共役系ポリチオフェンの擬一次元共役系高分子の光学特性のサイズ効果の研究を行った。励起子の振動子強度のサイズ依存性をレーザー分光により明らかにした。さらに、copolymerの作製により共役長を制御し、任意の発光波長を得ることが可能になった。しかし、電界発光やダイオード特性に問題点があり今後、応用上解決しなくてはならない問題点も明らかになった。（報文26）。



Structure of the organic-EL device

図15

ポリマー発光ダイオード素子と電界スペクトル



Electro luminescence spectrum of the organic-EL device

【5】アモルファス半導体の電子輸送の微視的メカニズム（金光義彦）

これまでもアモルファス半導体の電子輸送の研究は数多く行われているが、無機および有機半導体の輸送特性を統一的に説明するモデルの提唱までには至っていない。アモルファス半導体を特徴づけるガラス転移温度を、唯一のパラメーターとする新しいモデルを提唱し、これまでの実験結果が非常にうまく説明できることを示した。（報文27）

【6】層状磁性体及び酸化物超伝導体の研究（鈴木隆司）

層状化合物  $NbX_2$  ( $X=S, Se$ ) に遷移金属をインターカレントした層状化合物について、その中性子回折のデータを解析し磁気構造と交換相互作用との関係をしらべた。Eu 元素を含む酸化物超伝導体のメスバウアー効果の研究を行った。特に衝撃合成法で作製された  $EuBa_2Cu_3O_7$  の試料の Eu 原子の配位について調べた。（報文29）

<報文>

- 1) T. Mishina and Y. Masumoto:  
"Quantum Beats in Monoclinic  $ZnP_2$  crystals",  
Journal of Luminescence, Vol. 58, pp. 82-84 (1994).
- 2) A. Yamamoto, T. Mishina, Y. Masumoto and M. Nakayama:  
"Coherent Oscillation of Zone-Folded Phonon Modes in GaAs-AlAs Superlattices"  
Physical Review Letters, Vol. 73, pp. 740-743 (1994).
- 3) A. Yamamoto, T. Mishina, Y. Masumoto, and M. Nakayama:  
"Coherent Oscillation of Zone-Folded Phonons in GaAs-AlAs Superlattices"  
Journal of Luminescence, Vol. 58, pp. 265-267 (1994).
- 4) A. Yamamoto, Y. Kanemitsu and Y. Masumoto:  
"Structural Characteristics and Higher-Order Zone-Folded Phonon Modes in ZnSe-ZnS Strained-Layer Superlattices"  
Journal of Crystal Growth, Vol. 138, pp. 643-646 (1994).
- 5) Y. Yamada, Y. Masumoto and T. Taguchi:  
"Ultraviolet Lasing and Excitonic Gain in  $Cd_xZn_{1-x}S$ -ZnS Strained-Layer Quantum Wells"  
Journal of Crystal Growth, Vol. 138, pp. 570-574 (1994).
- 6) Y. Yamada, T. Mishina, Y. Masumoto, Y. Kawakami, S. Yamaguchi, K. Ichino, Sz. Fujita, Sg. Fujita, and T. Taguchi:  
"Time-Resolved Spectroscopy of Biexciton Luminescence in Wide-Bandgap II-VI Quantum Wells"  
Superlattices and Microstructures, Vol. 15, pp. 33-36 (1994).
- 7) Y. Kawakami, M. Funato, Sz. Fujita, Sg. Fujita, Y. Yamada, and Y. Masumoto:  
"Localized Excitons in Cubic  $Zn_{1-x}Cd_xS$  Lattice Matched to GaAs"  
Physical Review B, Vol. 50, pp. 14655-14658 (1994).
- 8) Y. Yamada, T. Mishina, Y. Masumoto, Y. Kawakami, S. Yamaguchi, K. Ichino, Sz. Fujita, Sg. Fujita, and T. Taguchi:  
"Time-Resolved Spectroscopy of Biexciton Luminescence in  $Zn_xCd_{1-x}Se$ -ZnS,  $Se_{1-y}$

- Multiple Quantum Wells”  
Physical Review B, Vol. 51, pp. 2596-2599 (1995).
- 9) Y. Kawakami, M. Funato, S. Fujita, Y. Yamada, and Y. Masumoto:  
“Time-resolved Spectroscopy of Exitonic Luminescence in Cubic ZnCdS  
Lattice Matched to GaAs”  
Proc. 22nd Int. Conf. Physics of Semiconductors, vol. 1, pp. 305-308 (Vancouver, Canada  
August 15-19, 1994).
- 10) Y. Masumoto, S. Okamoto and S. Katayanagi:  
“Biexciton Binding Energy in CuCl Quantum Dots,”  
Physical Review B, Vol. 50, pp. 18658-18661 (1994).
- 11) Y. Masumoto:  
“Luminescence and Lasing of CuCl Nanocrystals”  
Journal of Luminescence, Vol. 60&61, pp. 256-261 (1994).
- 12) Y. Masumoto  
“Dynamical Processes of Lasing in CuCl Nanocrystals”  
in Nanostructures and Quantum Effects ed. H. Sakaki and H. Noge, pp. 152-156 (Springer-  
Verlag, 1994).
- 13) Y. Masumoto, S. Katayanagi and T. Mishina:  
“Time-resolved Luminescence Study of Biexcitons in CuCl Quantum Dots”  
Physical Review B, Vol. 49, No. 15, pp. 10782-10785 (1994).
- 14) Y. Masumoto, L. G. Zimin, K. Naoe, S. Okamoto and T. Arai:  
“Persistent Spectral Hole-Burning in Semiconductor Microcrystals”  
Material Sciences and Engineering B, Vol. 127, pp. L5-L9 (1994).
- 15) Y. Masumoto:  
“Persistent Spectral Hole-Burning in Semiconductor Microcrystals”  
Proc. 22nd Int. Conf. Physics of Semiconductors, vol. 3, pp. 2015-2018 (Vancouver, Canada  
August, 1994).
- 16) K. Naoe, Lev G. Zimin and Y. Masumoto:  
“Persistent Spectral Hole Burning in Semiconductor Nanocrystals,”  
Physical Review B, Vol. 50, No. 24, 18200-18210 (1994).
- 17) Y. Masumoto:  
“Persistent Spectral Hole-Burning Phenomenon of Semiconductor Nanocrystals”  
Proc. 4th Int. Work. on Nonlinear Optics and Excitation Kinetics in Semiconductors  
(Berlin, 1994). //INVITED PAPER// Phys. Status solidi Vol. 188, pp. 209-219 (1995).
- 18) Y. Masumoto, Lev G. Zimin, K. Naoe, S. Okamoto, T. Kawazoe and T. Yamamoto:  
“Observation of Persistent Spectral Hole-Burning in Semiconductor Nanocrystals”  
Proceedings of Spectral Hole-Burning and Related Spectroscopies: Science and  
Applications (Tokyo, August, 1994). To be published in Journal of Luminescence.
- 19) S. Okamoto and Y. Masumoto:  
“Observation of Confined Acoustic Phonons in Semiconductor Nanocrystals by Means of  
the Persistent Spectral Hole-Burning Spectroscopy”  
Proceedings of Spectral Hole-Burning and Related Spectroscopies: Science and  
Applications (Tokyo, August, 1994). To be published in Journal of Luminescence.
- 20) Y. Masumoto:

"Persistent Spectral Hole-Burning in Semiconductor Quantum Dots"

Proceedings of the 7th International Symposium on Small Particles and Inorganic Clusters (Kobe, September, 1994). //INVITED PAPER// To be published in Surface Review Letters.

21) Y. Masumoto:

"Persistent Spectral Hole Burning Phenomenon of Semiconductor Nanocrystals: Observation, Mechanism and Application"

Proceedings of the International Conference on Optical Properties of Nanostructures (Sendai, September, 1994); //INVITED PAPER// Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 34, Suppl. 34-1, pp. 8-11 (1995).

22) S. Okamoto and Y. Masumoto:

"Persistent Spectral Hole-Burning in CuCl Nanocrystals: Demonstration of Optical Data Storage"

Proceedings of the International Conference on Optical Properties of Nanostructures (Sendai, September, 1994); Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 34, Suppl. 34-1, pp. 128-130, 1995.

23) Y. Kanemitsu:

"Luminescence Properties of Nanometer-Size Si Crystallites: Core and Surface States" Physical Review B 49, pp. 16845-16848 (1994).

24) Y. Kanemitsu, T. Matsumoto, T. Futagi and H. Mimura:

"On the Origin of Blue and Red Photoluminescence from Oxidized Porous Silicon" Physical Review B 49, pp. 14732-14735 (1994).

25) H. Mimura, T. Matsumoto and Y. Kanemitsu:

"Blue Electroluminescence from Porous SiC" Applied Physics Letters 65, pp. 3350-3352 (1994).

26) Y. Kanemitsu, K. Suzuki, Y. Masumoto, M. Tomiuchi, Y. Shiraishi, and M. Kuroda:

"Optical Properties of Quasi-One-Dimensional Thiophene-Based Oligomers" Physical Review B 50, pp. 2301-2306 (1994).

27) H. Naito and Y. Kanemitsu:

"Relations between Transient Charge Transport and Glass Transition Temperature in Amorphous Chalcogenides"

Physical Review B 49, pp. 10131-10135 (1994).

28) Y. Kanemitsu, K. Suzuki and Y. Masumoto:

"Optical Properties of Disordered Silicon Polymers with Different Backbone Structures"

Proc. 22nd Int. Conf. Physics of Semiconductors, vol. 3, pp. 2149-2152 (Vancouver, Canada, August, 1994).

29) H. Hikosaka, T. Atou, K. Kusaba, T. Suzuki, K. Fukuoka, M. Kikuchi, and Y. Syouno

"Characterization of  $\text{EuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}$ , Synthesized in Shock Processes", Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 34, pp. 1506 (1995).

<著書・総説等>

- 1) 舛本泰章: "結晶とガラス中の半導体ナノクリスタルの光物性と新機能性", ニューガラス Vol. 9, pp. 6-10 (1994).
- 2) 舛本泰章: "半導体ナノクリスタルの永続的ホールバーニング", 固体物理, Vol. 29, pp. 691-697 (1994).
- 3) 舛本泰章: "半導体ナノクリスタル—レーザー発振と永続的ホールバーニング", 電子情報通信学会, Vol. 77, pp. 1125-1131 (1994).
- 4) 金光義彦: "SiおよびGeのナノメートル量子構造の物質科学: 物理と化学の接点", 化学と工業, Vol. 47, pp. 104-107 (1994).
- 5) 金光義彦: "小さな系の光物性: ナノメートル量子構造", 電子情報通信学会技術報告, Vol. 75, pp. 33-37 (1994).
- 6) 金光義彦: "モノづくりとスペクトロスコーピー: ポーラスシリコン", 分光研究, Vol. 43, pp. 385-394 (1994).
- 7) 金光義彦、小川哲生、舛本泰章: "光るシリコン", 日本物理学会誌 Vol. 49, pp. 979-986, (1994).
- 8) 白石賢二、小川哲生、大野隆央、武田京三郎、金光義彦: "シリコン低次元の電子構造と光学応答", 応用物理, Vol. 63, pp. 994-1002 (1994).
- 9) Y. Kanemitsu, M. Kondo and K. Takeda 編著: "Light Emission from Novel Silicon Materials" (Physical Society of Japan, Tokyo, 1994).
- 10) Y. Kanemitsu, T. Matsumoto, T. Futagi and H. Mimura: "Porous Silicon", edited by Z. C. Feng and R. Tsu, (World Scientific, Singapore, 1994), Chapter 18.
- 11) K. Suzuki, Y. Kanemitsu, S. Kyushin and H. Matsumoto: "Polymer Materilas for Microelectronic Applicatuons", edited by H. Ito, S. Tagawa and K. Horie, (American Chemical Society, Washington DC, 1994) Chapter 34.
- 12) 三品具文: "半導体の中のコヒーレントフォノン", O plus E, No. 176, pp. 93-97 (1994).
- 13) 田口常正, 山田陽一: "CdZnS歪超格子紫外線レーザーと発振機構", 固体物理, Vol. 29, pp. 875-881 (1994).

#### <学位論文>

##### 修士論文

- 1) 川畑 香苗: "ハロゲン化金属微粒子の光学的性質"
- 2) 武田 友胤: "サブミクロンCuCl微結晶と光との相互作用"

#### <国際会議>

- 1) Y. Kawakami, M. Funato, S. Fujita, Y. Yamada and Y. Masumoto:  
"Time-resolved Spectroscopy of Exitonic Luminescence in Cubic ZnCdS Lattice Matched to GaAs"  
22nd Int. Conf. Physics of Semiconductors, vol. 1, 305 (Vancouver, Canada, August, 1994)
- 2) Y. Masumoto:  
"Persistent Spectral Hole-Burning in Semiconductor Microcrystals"  
22nd Int. Conf. Physics of Semiconductors, vol. 3, pp. 2015-2018 (Vancouver, Canada, August, 1994).
- 3) Y. Yamada, T. Mishina, Y. Masumoto, Y. Kawakami, S. Yamaguchi, K. Ichino, Sz. Fujita,



Sg. Fujita and T. Taguchi:

"Time-Resolved Spectroscopy of Biexciton Luminescence in Wide-Bandgap II-VI Quantum Wells"

7th International Conference on Superlattices, Microstructures and Microdevices, Banff (August 23, 1994).

4) Y. Kawakami, M. Funato, Sz. Fujita, Sg. Fujita, Y. Yamada and Y. Masumoto:

"Time-Resolved Spectroscopy of Excitonic Luminescence in Cubic ZnCdS Lattice Matched to GaAs"

22nd International Conference on the Physics of Semiconductors, (Vancouver, August, 1994).

5) Y. Kanemitsu, K. Suzuki, Y. Masumoto, S. Kyusiu and H. Matsumoto:

"Optical Properties of Disorderd Silicon Polymers with Different Backbone Structures"

22nd International Conference on the Physics of Semiconductor (Vancouver, August 1994).

6) Y. Kanemitsu and T. Matsumoto:

"Nonlinear Optical Properties Silicon Quantum Crystallites: Core and Surface States"

22nd International Conference on the Physics of Semiconductor (Vancouver, August 1994).

7) Y. Kanemitsu and H. Uto:

"Slow Decay Dynamics of Visible Photoluminescence from Nanometer-Sized Si Crystallites"

7th International Conference on Superlattices, Microstructures, and Microdevices (Banff, August 1994).

8) Y. Kanemitsu and T. Matsumoto:

"Optical Bistability using Photoindu Absorption Change in Porous Silicon"

7th International Conference on Superlattices, Microstructures, and Microdevices (Banff, August 1994).

9) Y. Kanemitsu:

"Luminescence properties of Silicon clusters:Chain, Ladder, and Cubic Structures"

Materials Research Society 1995 Fall Meeting (Boston, Nov 1994).

10) Y. Masumoto:

"Persistent Spectral Hole-Burning Phenomenon of Semiconductor Nanocrystals"

Proc. 4th Int. Work. on Nonlinear Optics and Excitation Kinetics in Semiconductors (Berlin, 1994). //INVITED PAPER//

11) Y. Masumoto, Lev G. Zimin, K. Naoe, S. Okamoto, T. Kawazoe and T. Yamamoto:

"Observation of Persistent Spectral Hole-Burning in Semiconductor Nanocrystals"

Spectral Hole-Burning and Related Spectroscopies: Science and Applications (Tokyo, August, 1994).

12) S. Okamoto and Y. Masumoto:

"Observation of Confined Acoustic Phonons in Semiconductor Nanocrystals by Means of the Persistent Spectral Hole-Burning Spectroscopy"

Spectral Hole-Burning and Related Spectroscopies: Science and Applications (Tokyo, August, 1994).

13) Y. Masumoto:

"Persistent Spectral Hole-Burning in Semiconductor Quantum Dots"

7th International Symposium on Small Particles and Inorganic Clusters (Kobe, September, 1994). //INVITED PAPER//

- 14) Y. Masumoto:  
 "Persistent Spectral Hole Burning Phenomenon of Semiconductor Nanocrystals: Observation, Mechanism and Application"  
 International Conference on Optical Properties of Nanostructures  
 (Sendai, September, 1994); //INVITED PAPAER//
- 15) S. Okamoto and Y. Masumoto:  
 "Persistent Spectral Hole-Burning in CuCl Nanocrystals; Demonstration of Optical Data Storage"  
 International Conference on Optical Properties of Nanostructures  
 (Sendai, September, 1994).
- 16) Y. Kanemitsu, H. Mimura and T. Matsumoto:  
 "Blue and Green Electroluminescence from Porous Materials"  
 Materials Research Society 1995 Fall Meeting (Boston, Nov 1994).
- 17) Y. Kanemitsu and T. Matsumoto:  
 "Optical Nonlinear Absorption and Optical Bistability in Porous Silicon"  
 Materials Research Society 1995 Fall Meeting (Boston, Nov 1994).
- 18) Y. Kanemitsu, T. Matsumoto and H. Mimura:  
 "Nonlinear Luminescence Properties of Silicon Quantum Crystallites"  
 Materials Research Society 1995 Fall Meeting (Boston, Nov 1994).

<講演>

- 1) 三品具文、舛本泰章： "自由誘導緩和法による励起子コヒーレンスの研究", 日本物理学会 (1994年9月).
- 2) 山田陽一、三品具文、舛本泰章、須田 淳、山口栄雄、川上養一、藤田静雄、藤田茂夫、田口常正： "ワイドギャップII-VI族半導体量子井戸内の励起子分子", 応用物理学会 (1994年9月).
- 3) 川上養一、船戸 充、藤田静雄、藤田茂夫、山田陽一、舛本泰章：  
 "GaAs基板上に格子整合した立方晶ZnCdSエピ膜における励起子の局在化", 応用物理学会 (1994年9月).
- 4) 横川俊哉、P. Floyd, J. Merz, H. Luo, J. Furdyna, 山田陽一、岡本慎二、直江和彦、舛本泰章：  
 "(Cd, Zn)Se系歪量子井戸構造と面発光レーザへの応用", 応用物理学会 (1994年9月).
- 5) 川上養一、山口栄雄、須田 淳、藤田静雄、藤田茂夫、山田陽一、三品具文、舛本泰章：  
 "ZnSe系半導体量子井戸の励起子光物性", 電気学会 電子材料研究会 (1994年10月).
- 6) 山田陽一、田口常正： "ZnSe系青色発光材料の光物性評価 -バルク、量子井戸の励起子光物性-", 日本学術振興会 結晶加工と評価技術第145委員会 (1995年1月).
- 7) 山田陽一、三品具文、舛本泰章、須田 淳、川上養一、藤田静雄、藤田茂夫：  
 "ZnSe-ZnMgSSe単一量子井戸内の励起子分子の時間分解非線形発光", 応用物理学会 (1995年3月).
- 8) 川上養一、船戸 充、藤田静雄、藤田茂夫、山田陽一、三品具文、舛本泰章：  
 "GaAs基板上に格子整合したZnCdSエピ膜における局在励起子発光の高励起効果"  
 応用物理学会 (1995年3月).
- 9) 山口栄雄、大西俊一、川上養一、藤田静雄、藤田茂夫、山田陽一、三品具文、舛本泰章：

- “CdSe-ZnSe-ZnSSe単一量子井戸構造における励起子発光”, 応用物理学会 (1995年3月).
- 10) 岡本慎二, 舛本泰章: “CuClナノクリスタルの永続的ホールバーニング”, 日本物理学会 (1994年9月).
  - 11) 山本哲也, 川添忠, 舛本泰章: “CuBrナノクリスタルの永続的ホールバーニング、ホールフィリング”, 日本物理学会 (1994年9月).
  - 12) 舛本泰章, 川添忠, 岡本慎二, 山本哲也, “半導体ナノクリスタルの永続的ホールバーニング: メカニズム”, 日本物理学会 (1994年9月).
  - 13) 川添忠, 山本哲也, 舛本泰章: “半導体ナノクリスタルの永続的ホールバーニングの応用” 日本物理学会 (1994年9月).
  - 14) 舛本泰章, 池沢道男: “CuBr中の電子・正孔プラズマの観測”, 日本物理学会年会 (1995年3月).
  - 15) 三品具文, 舛本泰章: “自由誘導緩和法による励起子のコヒーレンスの研究II”, 日本物理学会年会 (1995年3月).
  - 16) 金光義彦: “Si立方体クラスターの光物性”, 日本物理学会年会 (1995年3月).
  - 17) 舛本泰章: “半導体ナノクリスタル表面の光イオン化と永続的ホールバーニング現象” 日本物理学会年会 (1995年3月).
  - 18) 岡本慎二, 舛本泰章: “CuClナノクリスタルの永続的ホールバーニングII”, 日本物理学会年会 (1995年3月).
  - 19) 川添忠, 川畑香苗, 舛本泰章: “半導体ナノクリスタルの発光スペクトルにおける永続的ホールバーニング効果”, 日本物理学会年会 (1995年3月).
  - 20) 山本哲也, 舛本泰章: “CuBrナノクリスタルの永続的ホールバーニング、ホールフィリング”, 日本物理学会年会 (1995年3月).
  - 21) 川畑香苗, 川添忠, 舛本泰章: “ガラス中のCuIナノクリスタルの光学スペクトルと永続的ホールバーニング”, 日本物理学会年会 (1995年3月).
  - 22) 威継発, 舛本泰章: “PVA中のCdS微粒子における長寿命ホールバーニングの観測” 日本物理学会年会 (1995年3月).
  - 23) 宮嶋宏, 山田陽一, 舛本泰章: “CuCl、CuBrナノクリスタルの永続的ホールバーニングにおける初期過程”, 日本物理学会年会 (1995年3月).
  - 24) 池沢道男, 三品具文, 舛本泰章: “CuClナノクリスタル中の励起子・励起子分子のダイナミクス”, 日本物理学会年会 (1995年3月).
  - 25) 彦野英昭, 阿籐敏行, 草葉啓治, 村上義弘, 福岡清人, 菊池昌枝, 庄野康彦  
鈴木隆司: “衝撃合成された  $\text{EuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  のキャラクターゼーション”, 応用物理学会東北支部 (1994年12月).