

VI-4 半導体物性グループ

舛本泰章、金光義彦、鈴木隆司、三品具文

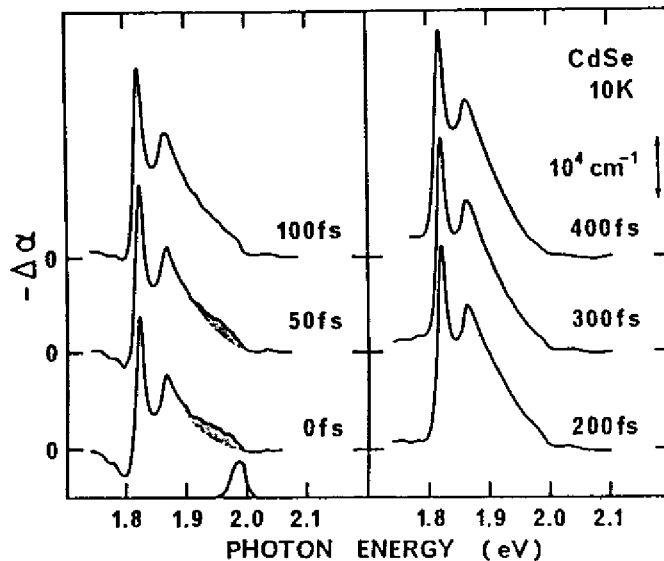
[1] 半導体の超高速レーザー分光

超高速レーザー分光、フェムト秒分光は極めて安定なフェムト秒光出力光パルスが高繰り返しで生成できる再生増幅器を含むTiサファイアレーザーシステムの開発により、新たに第4世代を迎えた。現代の高度に洗練された超高速レーザー分光のターゲットは、新しい現象の発見や解明である。

(1) 高密度励起下での半導体の過渡現象 (舛本泰章・三品具文)

<CdSeにおける熱い電子系の超高速バンド内緩和>

半導体中の熱い電子系の研究は応用上では、電子デバイス的高速特性にかかわるため、重要な問題であり、基礎的にも電子系の統計分布やその緩和過程を直接観測できることから非常に興味深い。従来、熱い電子系の研究は伝導実験や、熱い電子・正孔系の発光の解析などにより盛んに研究されてきた。一方、吸収スペクトル測定による実験的研究はバンド端近傍しか見ていないものが多い。従って、少なくとも、フェムト秒領域で時間分解吸収スペクトルによる十分な高エネルギー側の電子系の分布に関する研究はない。そこで、我々は、バンド端近傍から十分高エネルギー側を励起したときの熱い電子系の研究を行った。励起エネルギーは1.99eVで、パルスの幅は70fsである。励起エネルギーは、CdSeのBバンドとCバンドの間を励起するエネルギーに相当し、このエネルギー領域では伝導帯、価電子帯ともに、単一のエネルギー谷 (Γ -valley) しか存在しない。また、励起エネルギーはバンド端よりおよそ150meV高エネルギーであり、励起された熱い電子系はLOフォノンを放出しながらクーリングして行くと考えられる。図は白色光を用いたポンプ・プローブ法による時間分解吸収スペクトルの吸収係数の変化分を表す。

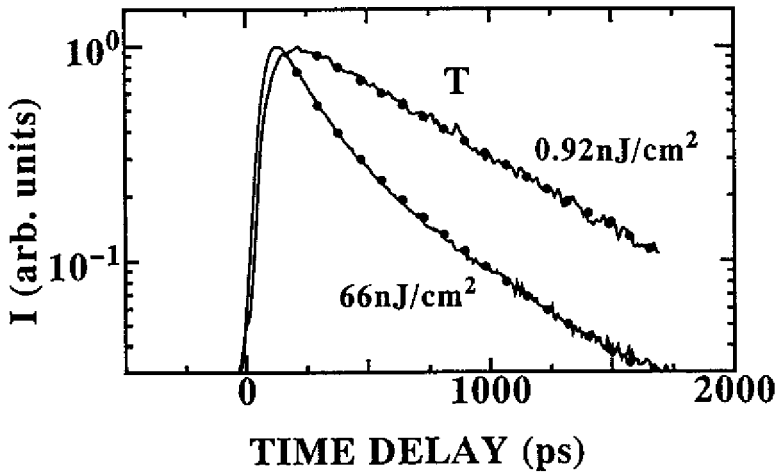


CdSeにおけるフェムト秒時間分解ポンプ・プローブスペクトル。

光励起中では1.9~2.0eVの領域に熱い電子系の非平衡分布 (図中のシャドウのかかった部分) が観測された。その後、約40fsの緩和時間で非平衡分布は熱平衡分布に変わって行き、平衡状態を保ったまま、クーリングして行く。同時にA励起子、B励起子間の衝突によるブロードニングやB励起子からA励起子への高速緩和およびバンドギャップ繰り込み効果の初期過程が観測された。(報文1, 5, 7, 15, 19)

< BiI₃ 中積層欠陥励起子における励起子対消滅 >

高密度に励起子の生成された半導体中においては位相空間占有効果や励起子分子形成など、励起子間の相互作用に伴う様々な非線形効果が引き起こされることが知られている。半導体結晶 BiI₃ における積層欠陥励起子の高密度効果を調べる目的で、励起子をピコ秒レーザーパルスにより励起し、その発光の時間変化を測定したところ励起子の対消滅によって説明される非線形効果が発見された。



BiI₃における励起子発光の時間変化の励起強度依存性。

図に示した実線は2つの励起強度における、T 励起子発光の時間減衰の様子を示したものである。弱い励起強度に対しては、ほぼ指数関数的減衰を示しているが、強い励起強度に対しては励起直後の減衰速度が増加し、非指数関数的減衰を示すようになる。この実験結果は励起子の対消滅効果を取り入れたレート方程式によりうまく説明することができる。図中の点は、この方程式を用いたフィッティング結果である。励起子対消滅効果は、励起子間相互作用の多彩な側面の一つであり、そのミクロなメカニズムなどに関して今後の研究の発展が期待される。(報文41)

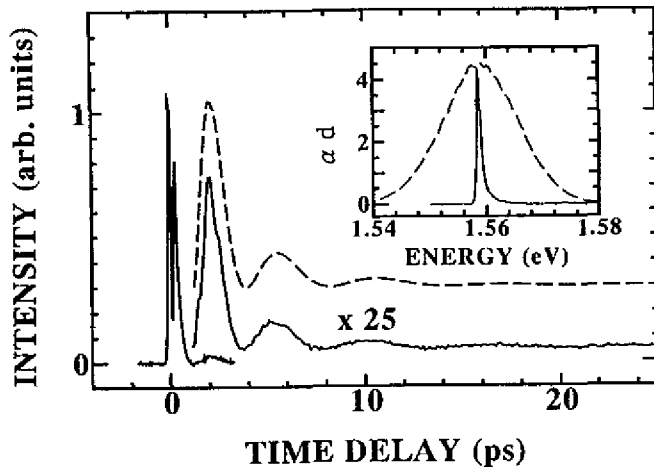
(2)フェムト秒コヒーレント現象 (三品具文・舛本泰章)

< ZnP₂におけるフェムト秒レーザーパルスのコヒーレントな伝搬効果 >

フェムト秒領域における超短光パルス生成技術の発展により光と物質のコヒーレントな相互作用を実験的に観測することが可能になってきた。

物質による光の吸収や発光という過程は物質系の位相緩和時間が非常に短いために、単に吸収係数(或いは断面積)としてのみ捉えられている。しかしながら、位相緩和より十分高速な時間分解分光を行うことにより、光と物質系が分極を通じてそれぞれの位相を干渉させながら光の吸収・放出を行っている様(コヒーレントな相互作用)を実験的に観測することができる。

図は、黒色 ZnP₂ 半導体結晶中の n=1 励起子に共鳴した時間幅 130 フェムト秒のレーザーパルスが結晶中を透過した後での時間波形である。小枠中の実線と破線はそれぞれ励起子の吸収スペクトルとレーザーパルスのスペクトルである。鋭敏な単一の励起子ピークからは緩和を反映した単調な信号の減衰が期待されるが、実験結果は複雑な様相を示している。時間原点付近では深い切れ込みが観測されるが、これは光と物質系の分極を通じたコヒーレントな相互作用を考えることによって初めて説明される効果である。また、図には裾野部分が 25 倍に拡大して示してあるが、奇妙な振動構造が観測される。これは空間的伝搬効果のために起こった干渉現象であり、励起子と光のハイブリッド状態として知られるポラリトンに起因するものである。図中の点線は、ポラリトン効果



励起子ポラリトンに起因する振動構造。実線と点線は、実験結果と計算結果である。また、小枠中の実線と破線はそれぞれ励起子の吸収スペクトル及び、レーザ光のスペクトルを示す。

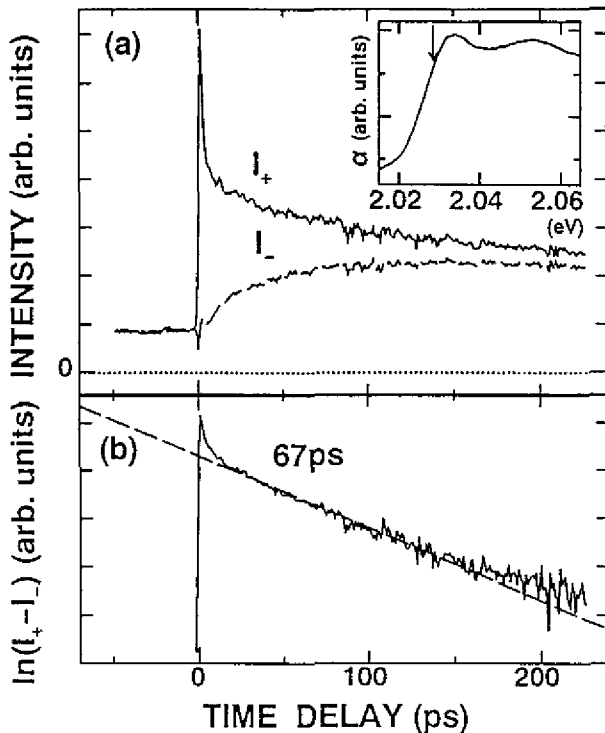
を考慮して行った計算結果であるが、実験結果によく一致している。

この様に、フェムト秒時間分解分光実験によって単純な思考からは予想されない光と物質のコヒーレントな相互作用に基づく複雑な干渉現象を明らかにすることができた。(報文42)

(3) 電子や正孔のスピンの緩和 (外本泰章・三品具文)

< AlGaAs/AlAsタイプII半導体量子井戸中のスピンの緩和 >

ここ数年、量子井戸中の電子のスピンの状態に関する研究が盛んに行われている。基礎的な側面からは、スピンの緩和などの角運動量の異なる電子状態間の散乱過程の研究が報告されており、応用的な側面からは、スピンの向きと磁場により閉じ込め状態を変化させる事のできるスピントラップ量子井戸などが提案され研究結果が報告されている。光を用いた電子のスピンの状態の研究では、



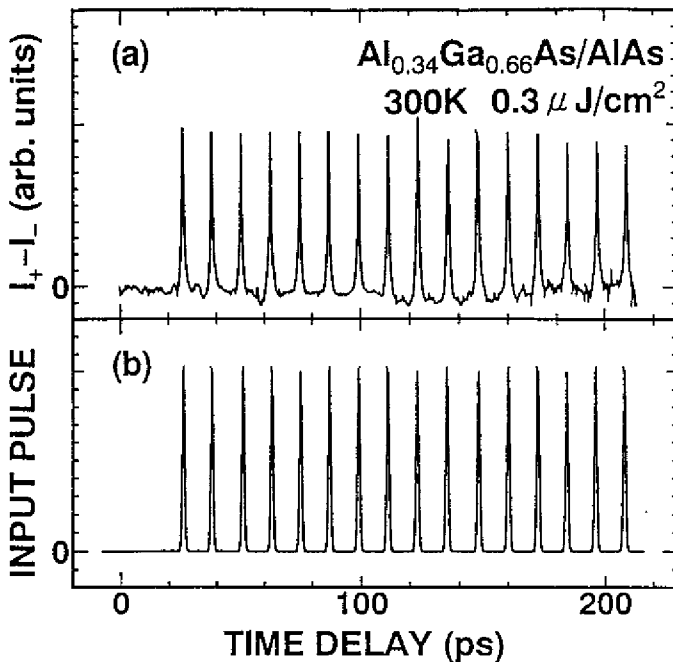
サンプルの吸収スペクトルとポンプ光の波長を表す矢印を(a)図の挿入図に示す。(a)図の I_+ と I_- は右円偏光と左円偏光に対する吸収の時間変化を表わす。(b)図は、 $I_+ - I_-$ の時間変化を対数プロットしたもので、この傾きより、67psの緩和時間が求められる。

偏光を用いる事により任意のエネルギー帯に選択的に従うスピン量子数を持つ電子、正孔を生成する事ができる。しかしながら、測定される結果は、電子、正孔の両方のスピン状態を反映してしまうため電子のみ、あるいは正孔のみのスピン状態を測定する事は、行われていなかった。そこで、我々は、本研究により、タイプII半導体量子井戸を用いたピコ秒ポンプ-プローブ法により初めて正孔のみのスピン緩和を測定し、正孔の密度と正孔のスピン緩和時間との関係から、正孔-正孔散乱の散乱断面積を測定した。

本研究には、AlGaAs/AlAsタイプII半導体量子井戸を試料として用いた。この試料の井戸層の伝導帯の底と価電子帯頂上はブリルアンゾーンのΓ点にある。この伝導帯は全角運動量1/2であり、この単位に励起される電子はスピン1/2または-1/2をもつ。また、価電子帯は全角運動量3/2であるが、量子井戸の次元性のため、この4重縮退は重い正孔と軽い正孔のバンドに分離し価電子帯頂上は重い正孔のバンドとなるため、ここに励起される正孔は、スピン3/2または、-3/2をもつ。さらに研究に用いたタイプII量子井戸では、光励起された電子は約1ピコ秒で障壁層へ緩和するため井戸層には正孔のみが残った状態となる。つまり、正孔のみが井戸層に残るため正孔のみの緩和を選び出して測定する事ができるのである。実験では、偏光ポンプ-プローブ法により、井戸層内に生成したスピン-3/2の正孔がスピン3/2の状態へどの様に緩和するのかを測定した。試料温度2Kに於いて得られた測定結果を図に示す。I₊は右円偏光のI、I₋は左円偏光の吸収の時間変化を表わし、この差I₊-I₋の時間変化からスピン緩和時間がわかる。スピン緩和時間は正孔密度依存性を持ち20ps~100psの特定数を持つ事が分かった。この密度依存性は、正孔のスピン緩和が正孔-正孔散乱によって起きている事を示す。また、詳しい解析によって、正孔-正孔散乱の散乱断面積を0.084x10⁻¹⁰ps⁻¹cm²と求める事ができた。(報文24)

<AlGaAs/AlAsタイプII半導体量子井戸を用いた超高速スピン光学スイッチの研究>

近年、光コンピュータなどをめざした超高速光学素子の研究開発が盛んに行われている。これらの素子に求められる性能としては、スイッチング時間 1ps以下、スイッチングパワー 1μJ/cm²以下であり、かつ繰り返し動作が可能である事が要求される。この条件を満たすため、我々はAlGaAs/AlAsタイプII半導体量子井戸を用いた超高速光学素子の研究を行ってきた。タイプII半導体



(a)は被制御光(プローブ光)の信号の時間変化。また、(b)は制御光(ポンプ光)の時間変化を示す。

量子井戸のスピンの緩和の研究により、タイプII半導体量子井戸中に於けるスピン緩和時間は室温に於いて極めて速く1ps程度である事が偏光ポンプ-プローブ法により判った。また、室温に於いては、光励起担体の寿命が短い事もあり、光励起担体の蓄積が小さい事も実験的に確認できた。そこで、このスピン緩和の性質を光学スイッチに应用するための研究を行った。実験手法は、ポンプ光を制御光、プローブ光を被制御光に見立てた偏光ポンプ-プローブ法を用い、繰り返し動作確認のため、ポンプ光は約10ps間隔のパルス列を用いた。図に実験結果を示す。(a)は被制御光の時間変化、(b)は制御光の時間変化を表し、被制御光が制御光に対応した変化をしていることからこのサンプルが光スイッチとして機能していることがわかる。この実験で、我々は、スイッチング時間 1ps、繰り返し周波数100GHz、スイッチングパワー 3 nJ/cm^2 、の結果を得た。この結果は、前述の条件を満たし、AlGaAs/AiAsタイプII半導体量子井戸が超高速光素子の材料として有望である事を示している。(報文3, 14, 44)

(4)コヒーレントフォノンの測定 (三品具文・舛本泰章)

フェムト秒程度の非常に短いパルス幅のレーザー光を試料に照射すると、時間的に位相の揃った格子振動(コヒーレントフォノン)が誘起される。そのため、試料内の屈折率とその振動周期で微小に振動させられる。そこで、試料の透過率もしくは反射率の時間変化を測定するとその振動が観測される。

<BiI₃のコヒーレントフォノン振動の観測>

層状物質BiI₃においてフェムト秒のポンプ・プローブ分光を行ったところ、コヒーレントフォノンが、ポンプパルスとプローブパルスの時間間隔に対するプローブ光の透過スペクトルの周期的な波長シフトとして観測された。これは、格子振動により屈折率が周期的に変化し、プローブ光に対して大きな位相変調が引き起こされた結果として説明される。時間軸上で、コヒーレントフォノン

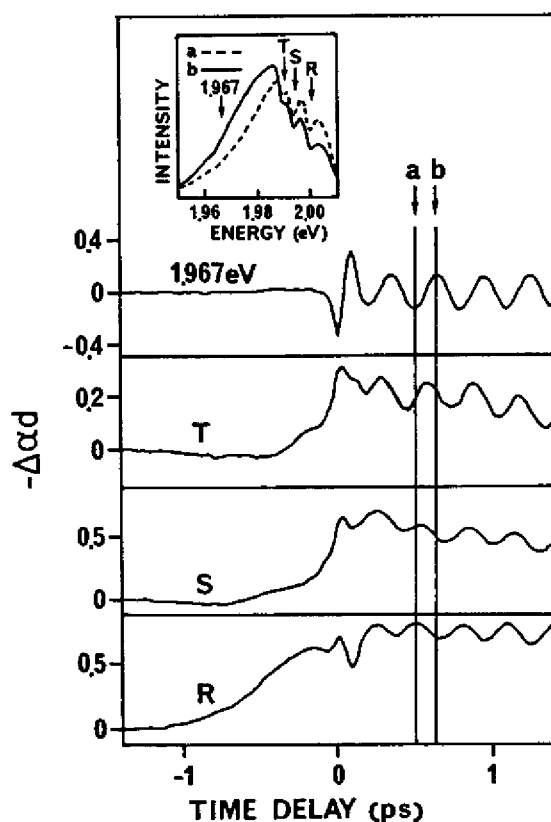


図6

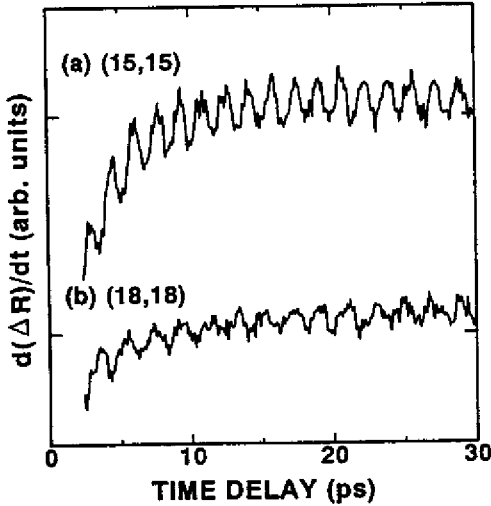
BiI₃におけるコヒーレントフォノン振動の観測。

透明域(1.967eV)及び、T, S, R励起子の位置での微分吸収の時間変化。2つの時間遅延、aとbにおけるプローブ光の透過スペクトルを小枠に示す。コヒーレントフォノンによる顕著なスペクトルのシフトが見取れる。

を観測することにより格子振動がどのように緩和していくかなど、結晶格子の動的な特性に関して様々な情報を得ることができる。

<GaAs-AlAs超格子のコヒーレントフォノン振動の観測>

我々は、GaAs-AlAs超格子の反射率時間変化を超高速時間分解分光法により測定すると、明瞭な振動構造を初めて観測した。この振動は先に述べたラマン散乱における音響フォノンの折り返しモード〔2〕(1)参照)に対応している事が明らかとなった。超高速時間分解分光法により、格子振動



GaAs-AlAs超格子の反射率時間微分の時間変化。
GaAs, AlAsの一周期あたりの層数を(m, n)で表わした。
それぞれの周期に対応したコヒーレントフォノンの
振動が見られる。

が時間的なスケールで観測でき、その位相や減衰を調べる事により、詳細なコヒーレントフォノンの生成メカニズムを知る事が期待できる。

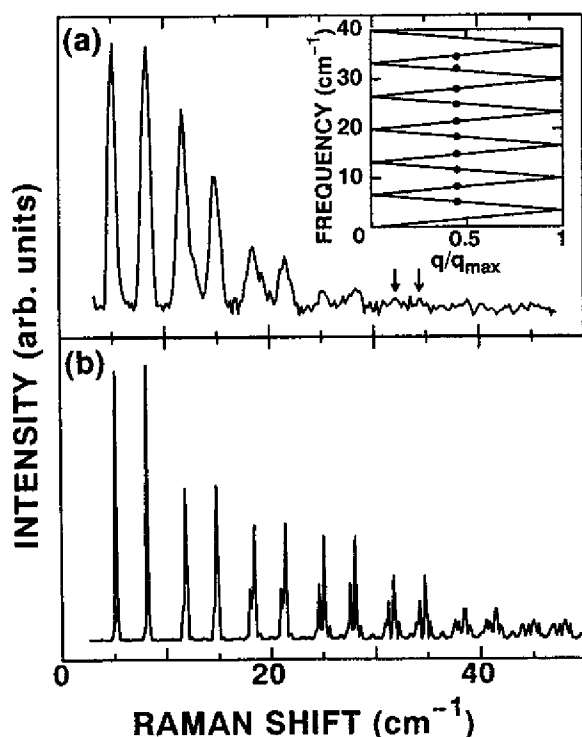
〔2〕半導体量子井戸・超格子の光物性

(1)半導体ナノ構造のラマン散乱 (外本泰章・金光義彦)

近年、ナノメートルサイズの構造を持つ半導体ナノ構造の研究が、非常に活発に行われている。格子振動の立場からも、ナノ構造に特有の興味ある現象が報告されている。例えば、超格子における音響フォノンの折り返し効果や光学フォノンの閉じ込め効果、微結晶における3次元的な光学フォノンの閉じ込め効果や新しい音響フォノンモード等が現在も活発に研究されている。我々は、ラマン散乱分光法を用いて半導体ナノ構造(特にヘテロ構造及び微結晶)のフォノンに関する新しい知見を得ることを目的として研究を行っている。

<音響フォノンの高次の折り返しモード>

超格子を構成する2種の半導体の格子定数の違いから歪を内包する系では、その歪のために高品質な試料を作成することが困難であり、音響フォノンの折り返しモードは観測されにくいのが現状であった。我々は、GaAs基板と格子定数が等しくなるように設計されたZnSe-ZnS歪超格子を用いたところ、非常に高次の(5次まで)音響フォノンの折り返しモードを観測する事に成功した。ラマンスペクトルを電子顕微鏡写真と光弾性モデルを用いて計算したところ、非常に良く実験結果を再現する事ができた。このことから、ラマンスペクトルは主に超格子の周期性と界面の粗さを反映している事が判明した。(報文23)



(a) ZnSe-ZnS歪超格子の音響フォノン折り返しモード。挿入図はフォノンの分散曲線と観測された折り返しモードのピークエネルギーをプロットした。

(b) 光弾性モデルを用いて計算した折り返しモードのラマンスペクトル。

<二軸性応力による光学フォノンモードのスプリットング>

歪超格子等のヘテロ構造には、それを構成する物質の格子定数の違いにより、界面に平行な面内に応力が生じる。この異方性を持った二軸性応力のため、光学フォノンは振動する方向によって異なる応力の影響を受ける。つまり、界面に対し垂直に振動するモード (singlet) と平行に振動するモード (doublet) とは、応力の受け方が異なり、スプリットする事が予想される。さらに、これはL0及びT0フォノンそれぞれについて成り立つはずである。この予測を実際に確認するために、入射レーザー光を界面に対し垂直に入射する従来法に加え、平行に入射する配置でも測定を行った。その結果、L0、T0それぞれについて2種類 (singlet及びdoublet) のタイプにスプリットすることを初めて示した。(報文8)

<Si微結晶の光学フォノン閉じ込め効果>

微結晶中の光学フォノンは、閉じ込め効果により粒径が小さくなるに従い、運動量保存則 ($q \sim 0$) が緩和され、ラマンスペクトルのピーク位置は低波数シフトし、低波数側に裾を引く形でブロードになることが一般に知られている。しかし、これまでの研究はおもにガラス母体中に埋め込まれた微結晶が多く、母体媒質との相互作用 (例えば歪の効果) が無視できない場合があった。そこで我々は、シランガス・ブレイク・ダウン法を用いてガラス基板の上に微結晶を降り積もらせて作成し、母体の影響の無い微結晶を使用した。さらに、L0及びT0フォノンの両者の分散曲線を考慮した spatial correlation (SC)モデルを用いて、さらに、これまで無視されていた粒径分布を電子顕微鏡写真から求め、ラマンスペクトルを計算し、よく再現する事を示した。

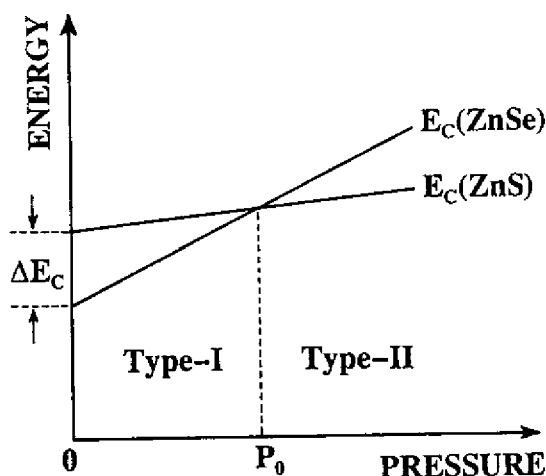
(2)ワイドギャップII-VI族半導体歪超格子のレーザ光物性 (外本泰章)

硫化亜鉛(ZnS)、セレン化亜鉛(ZnSe)に代表されるワイドギャップII-VI族化合物半導体は、紫外～青色波長領域にその吸収端を有し、直接遷移型のバンド構造を有する。従って、この材料系はIII-V族化合物半導体では果たせない短波長領域における光・電子デバイス材料として最も期待され、

基礎物性及びデバイス応用の両観点から研究が進められている。

<バンド構造及び電子状態の解析>

ワイドギャップⅡ-VI族半導体を用いた超格子・量子井戸構造は、Ⅲ-V族のそれと同様に、量子効果に基づいた新しい光・電子物性が期待されるが、この材料系に特徴的なことは、格子不整合に伴う弾性歪を結晶内に内蔵した、いわゆる歪超格子を形成することである。この弾性歪は、結品の体積変化、対称性の低下を誘起し、その結果として歪超格子のバンド構造、電子状態は大きく変化する。我々は、光学的手法を用いて、この歪超格子のバンド構造及び電子状態を定量的に評価することを試みている。例えば、4.5%もの大きな格子不整合を有するZnSe-ZnS歪超格子に関しては、外部から静水圧を印加すると、ZnSe井戸層とZnS障壁層の伝導帯変形ポテンシャル定数と体積弾性率の相違から両者の Γ 点における伝導帯端がある静水圧下において交差することが予想される。即ち、この Γ - Γ 交差が生じる前後でこの歪超格子のバンド構造はタイプ変化（タイプIからタイプII）する。我々は、励起子発光スペクトルの静水圧依存性の測定から、約31kbarにおいて Γ - Γ 交

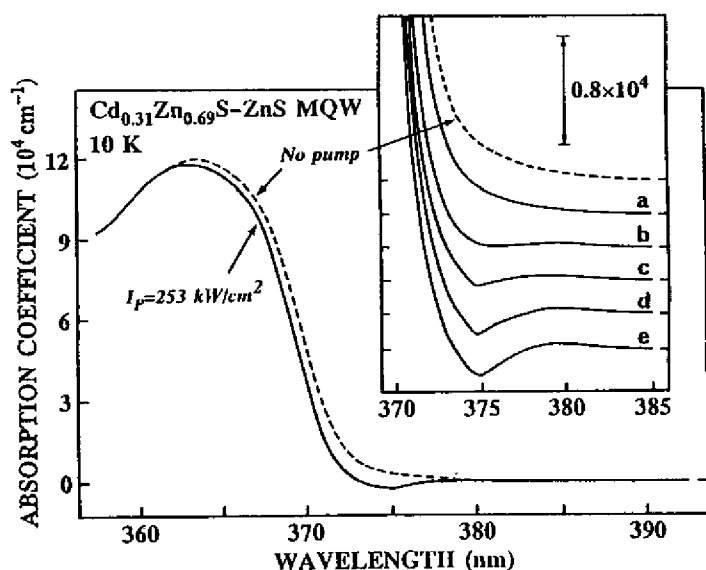


ZnSe-ZnS歪超格子におけるZnSe井戸層とZnS障壁層の伝導帯 Γ - Γ 交差。

差が生じることを観測し、この歪超格子の伝導帯に形成されるバンドオフセットの値（バンド不連続値）を実験的に初めて解析した。（報文4,6）

<励起子が関与したレーザ発振機構>

ワイドギャップⅡ-VI族半導体歪超格子・量子井戸構造にもう一つ特徴的なことは、励起子の示す光物性を通して顕著に現れる。Ⅱ-VI族半導体中に形成される励起子は、Ⅲ-V族半導体中のそれと比較すると、非常に大きな束縛エネルギーと振動子強度を有する。ZnSに至っては、その励起子束縛エネルギーの値はGaAsのものに比べて約1桁大きい。従って、その量子井戸内に形成される擬2次元励起子は、量子サイズ効果により、さらなる束縛エネルギーの増大が期待され、これまでに見られない新しい物性を呈する可能性がある。その1つがレーザ発振機構に現れている。現在実用化されているⅢ-V族半導体レーザにおいては、そのレーザ発振機構、即ち、光学利得の生成機構は、縮退した電子-正孔プラズマによる反転分布によって説明され、理解されている。しかしながら、ワイドギャップⅡ-VI族半導体量子井戸構造においては、その機構は異なる。我々は、半導体レーザ材料の中では最短波長領域（紫外波長領域）をカバーすることが可能な $Cd_xZn_{1-x}S$ -ZnS歪量子井戸構造を設計・作製し、光励起下ではあるが、室温において紫外レーザ発振を初めて観測した。また、ナノ秒パルスを用いたポンプ-プローブ分光法による光学利得スペクトルの測定を行った。その結果、光学利得の生成に励起子が寄与していることを明らかにした。この励起子が関与し



CdZnS-ZnS歪量子井戸構造における光学利得スペクトル。

た光学利得の生成機構に関しては、不均一広がりの中における励起子の局在化と位相空間占有効果の概念を考慮した現象論的な解析によって良く説明されることが明らかにされた。即ち、混晶量子井戸層の膜厚や組成のゆらぎにより、励起子吸収は不均一な広がりをもつ、生成された励起子は、より低エネルギー側の状態に局在化する。そして、その励起子吸収の低エネルギー側は状態密度が小さいために位相空間占有効果により容易にブリーチング（吸収飽和）し、その状態で光学利得が生成されるとして説明された。（報文21, 45, 47, 48）

[3] 半導体量子ドットの光物性

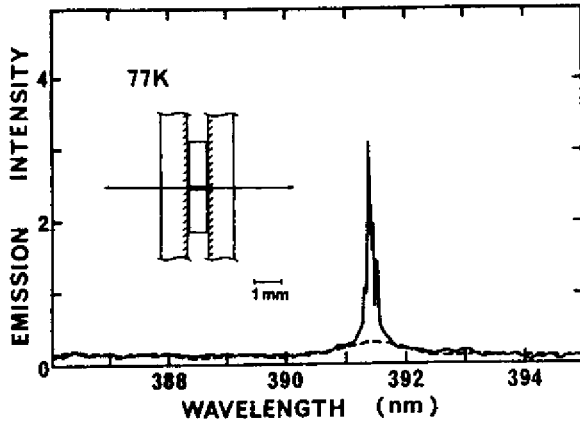
物理、化学、電子工学の広い分野でナノメートルサイズの半導体微結晶が盛んに研究されている。ナノメートルサイズになると電子・正孔や励起子が狭い空間に閉じ込められ、運動エネルギーが量子化され、クーロンエネルギーも大きく増大する。この量子現象が半導体微結晶（量子ドット）の本質である。本研究グループでは、CuCl, CuBr, CdS, CdSe, AgBr, Si, Geのナノメートル微結晶について新しい現象の発見と解明をめざして研究を進めている。

(1) CuCl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励起子分子のレーザー発振、微結晶の振動モード（微結晶に閉じ込められた音響フォノン）が発見され、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ックスが明らかになった。

< 量子ドットのレーザー発振 >

数ナノメートルの寸法をもつCuCl微結晶を多数NaCl結晶中に埋め込んだ材料は大変ユニークな系である。数ナノメートルの寸法をもつCuCl微結晶中に閉じ込められた励起子や励起子分子は量子サイズ効果を示す事が知られている。X線小角散乱法で5.0nmと決定された粒径のCuCl微結晶では励起子エネルギーはバルク結晶中のエネルギーに比べて6meV程の高エネルギーシフトを示す。77Kでこの試料を窒素レーザーやエキシマーレーザーを用いて、強励起すると、励起子分子発光が観測できるようになる。励起子分子発光は励起子発光の励起子強度依存性の丁度2乗に比例して強度が増大し、2~3MW/cm²で励起子分子発光が励起子発光より強くなる。励起子の数密度より励起子分子の数密度が大きくなると、励起子分子と励起子との準位間に反転分布ができたと考えられる。実際、90%の

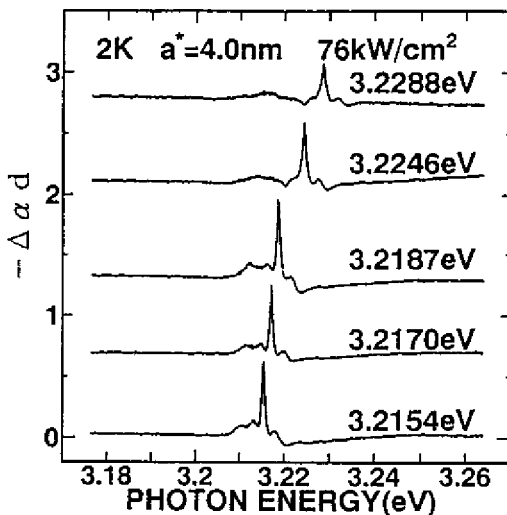


しきい値前後での発光スペクトル。しきい値は 2.1 MW/cm^2 。実線はしきい値の1.08倍の励起強度でのスペクトル、破線はしきい値の0.86倍の励起強度でのスペクトルである。

反射率をもつ2枚の誘電体ミラーで共振器を構成すると391nmの励起子分子発光のエネルギー位置にレーザー発振がおこる。図はレーザー発振前後の発光スペクトルを示す。レーザー発振時のスペクトル中の構造は共振器中に立つ縦モードに対応する。この様にCuCl量子ドットの励起子分子を用いてレーザー発振がおこっている事は明らかである。これは半導体量子ドットにおける初めてのレーザー発振である。更に、ポンプ・プローブ法を用いた光学利得スペクトルにも励起子分子発光帯の低エネルギー部分に明確なピークがあり、励起子分子を始状態とし、縦波励起子を終状態としている事を示している。(報文10,20)

<微結晶の振動モード>

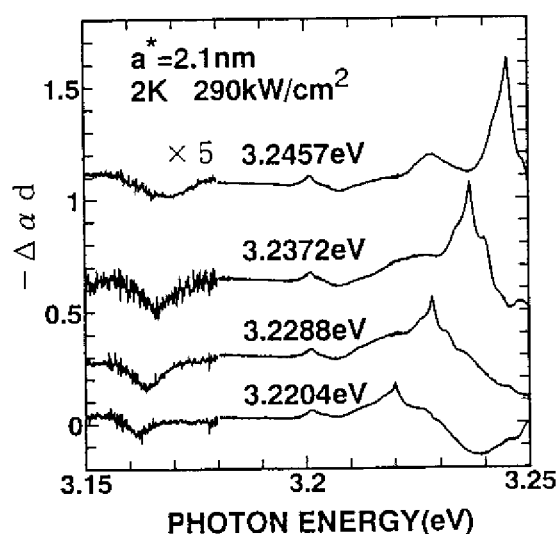
NaCl結晶中に成長させたナノメートルCuCl微結晶はサイズに分布があるため励起子吸収帯が不均一に広がっている。この不均一広がりを持った励起子吸収帯を狭い線幅の波長可変レーザーで共鳴励起(サイト選択励起)すると、あるサイズのCuCl微結晶のみを選択的に励起でき励起子吸収帯の中に均一幅を持ったスペクトルホールを掘る事ができる(ホールバーニング)。(報文2) 実際、線幅の狭い(0.014meV) ナノ秒パルス光でホールバーニングの実験を行うと、スペクトルホールが観測され、しかもスペクトルホールのストークス、アンチストークス両側に、サイドバンドとして微結晶の振動モード(微結晶に閉じ込められた音響フォノン)を観測した。このサイドバンドとスペクトルホールのエネルギー差は、微結晶のサイズの逆数にほぼ比例して増加し、音速から求めた絶対値からも微結晶に閉じ込められた音響フォノンによる振動モード(Spherical Mode)と同定できる。



CuCl微結晶(平均サイズ4.0nm)のナノ秒ポンプ・プローブスペクトル。縦軸は微分吸収を表わす。

<励起子分子の束縛エネルギー>

ナノメートルサイズの半導体微結晶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。微結晶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微結晶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、我々のグループでは、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。図はNaCl結晶に成長させたCuCl微結晶（平均半径2.1nm）を2Kで5ns、線幅0.014meVの色



CuCl微結晶（平均サイズ2.1nm）のナノ秒ポンプ・プローブスペクトル。縦軸は微分吸収を表わす。高エネルギー側のピークはブリーチング、低エネルギー側のくぼみは励起子から励起子分子への誘導吸収を表わす。

素レーザーをポンプ光、色素の自然発光をプローブ光として観測したポンプ・プローブスペクトルである。励起子吸収帯中にポンプ光に対応したホールがあき、励起光強度が290kW/cm²程度するとき、3.16eVから3.17eVの場所に励起子から励起子分子への遷移に対応する誘導吸収が明確に観測される。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。

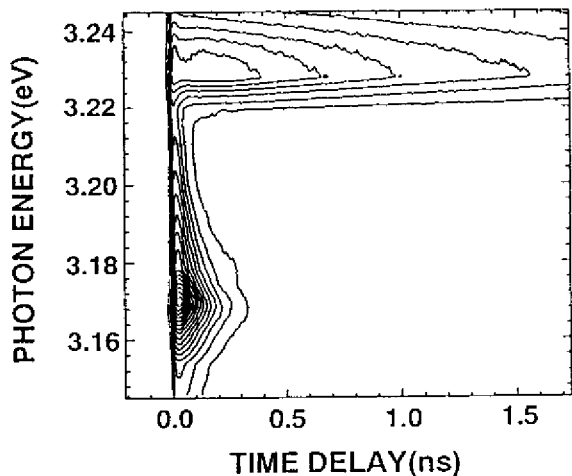
<励起子、励起子分子間の分布ダイナミクス>

励起子、励起子分子間の分布ダイナミクスを時間分解発光の方法により研究した。一例を等高線図に示す。

その結果いくつかの特徴が観測された。

1. 励起子分子の寿命は80ps、励起子の寿命は1.6nsである。
2. 励起子分子の減衰には80ps以外に第2成分があり、それは励起子の寿命の半分の0.8nsである。
3. 励起子の発光は、時間の初期、明確な立ち上がりを示し、これは励起子分子の発光に伴う励起子の分布の増加である。
4. 時間の初期、励起子分子の発光は極めて線幅が広く励起子のエネルギー位置まで広がっている。これは、励起子分子間の強い相互作用を示している。

このうち2、3、4の特徴はバルク結晶では見られない特徴で、ナノメートルCuCl微結晶中での励起子および励起子分子の相互間の盛んな相互作用を示している。空間的に閉じ込められた励起子お

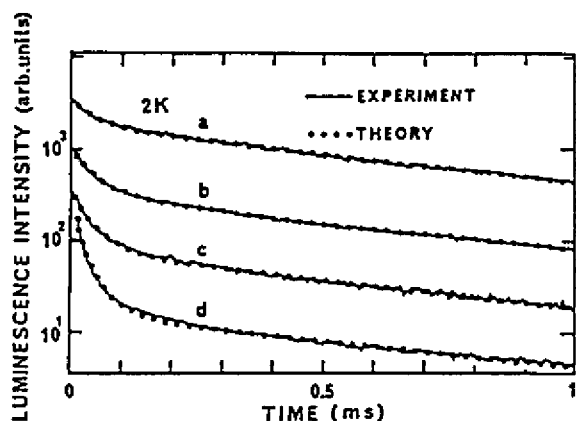


CuCl微結晶（平均サイズ2.4nm）のエネルギー時間分解発光（等高線図）。温度は77K、励起エネルギーは3.282eV、励起密度は5.4mJ/cm²。

よび励起子分子の特徴であり、これがバルクCuClと比べて高い光学利得の原因になっている。

(2)AgBr量子ドット（舛本泰章）

AgBrバルク結晶では、純度を上げて不純物としてIイオンの分離除去が困難で1ppm程度の濃度が限界であろう。しかし、 $10^3 \sim 10^6$ 個のAgBrイオン対からできているAgBr量子点ではIイオンがBrイオンの代わりに入る数は0, 1, 2, ...の整数値をとり、かなりの確率でゼロになると考えられる。量子点中にIイオンがp個ある確率が $(\lambda/p!) \exp(-\lambda)$ のポアソン分布に従い、自由励起子のIイオンへのトラップ速度はp個Iイオンがある場合には、1個Iイオンがある場合のp倍になると仮定すると、AgBr量子点の自由励起子発光の減衰曲線は $\exp[-t/\tau(0)] + \exp\{\lambda \exp[-t/\tau(1)]\} - 1$ に比例する事が示せる。ここで $\tau(0)$ は自由励起子の発光寿命、 $\tau(1)$ は1個あるIイオンへの励起子のトラップ時間である。図中のa~dは、それぞれ半径3.5, 4.5, 5.2, 6.6nmのAgBr量子点の2K

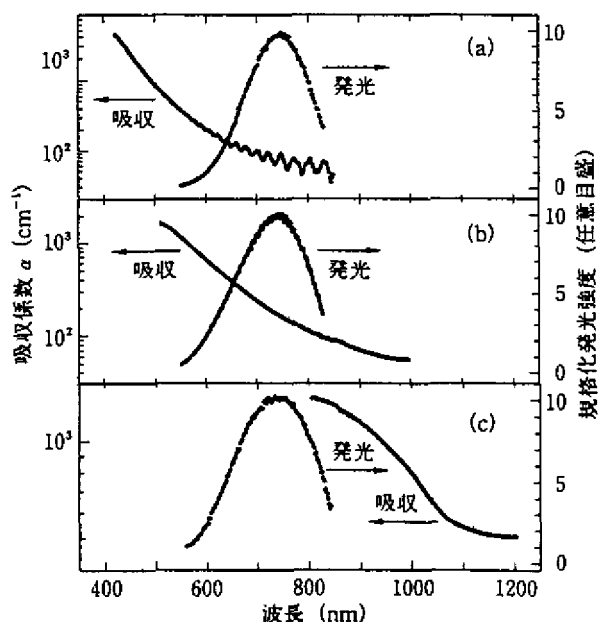


AgBr量子点中の自由励起子発光の時間変化。a~dはそれぞれ半径3.5, 4.5, 5.2, 6.6nmのAgBr量子点に対応する。

での自由励起子発光の減衰曲線をこの関数でフィッティングした例である。いずれの場合も良い一致を示している。しかも $\tau(0) \sim 700 \mu s$ 、 $\tau(1) \sim 50 \mu s$ とほぼ一定である。この事実は、バルク結晶ではIイオンへのトラップの為に測定が不可能であった自由励起子の寿命が、量子点では簡単に測定できる事を示している。自由励起子の発光効率も量子点のサイズの減少と共に増大し、上述のモデルを支持している。（報文17）

(3)Siナノメートル構造（金光義彦・舛本泰章）

固体物理的に興味のある種々の新物質の開発とその電子構造・光物性に関する実験的研究を行っ



微結晶サイズの異なるポーラスSi薄膜の吸収スペクトルと発光スペクトル（励起光325nm）。

ている。研究対象としては、量子サイズ効果の発現が期待されるメソスコピック系である。具体的な研究テーマは、(1)SiおよびGe間接半導体のナノメートル微結晶の電子構造の解明、(2)Siクラスターの光物性、(3)一次元量子井戸または量子細線とみなすことのできる σ 電子および π 電子共役系高分子の光物性、(4)光伝導性ポリマーのキャリア生成と輸送、などである。

<Siナノメートル微結晶の電子構造>

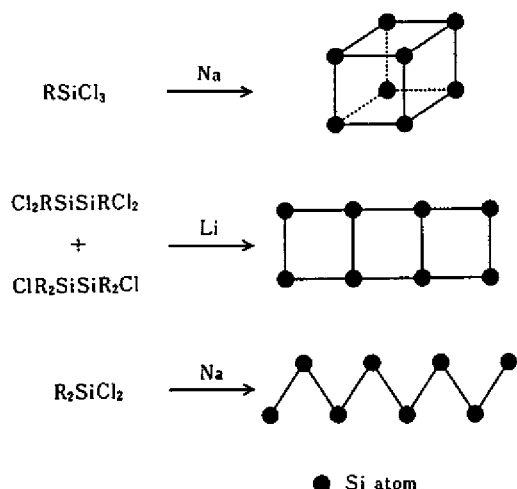
大きな半導体結晶を分割していくと、原子や分子になる前に、固体と分子の中間的な奇妙な特性を持つ新しい物質相が現れる。これらはクラスター、超微粒子あるいは微結晶などと呼ばれ活発に研究されている。物質の大きさを変化させるだけおもしろい現象や物性が発現するのであれば一つの物質からいろいろな特性を示すデバイスが作製でき、大きな技術革新をもたらすものと期待される。Siは、電子デバイス材料として広く利用されているが、バンドギャップの小さな間接半導体であるために発光材料にならなかった。しかしサイズを小さくすることにより、バンドギャップの大きさを変化させることが可能となり、新しい発光する材料としてSiナノメート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。これまでに得られた実験的結果は以下のようにまとめられる。

- (1)Si微結晶のバンドギャップは量子サイズ効果により大きくブルーシフトする。
- (2)表面は強い発光をするが、Si微結晶コアも弱く発光する。
- (3)表面酸化物SiO₂の結合状態を制御することにより発光スペクトルを変化させることが可能となった。（報文22, 26, 28, 29, 30, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 43）

<Siクラスターの光物性>

Si原子数が10個程度のSiクラスターの電子構造は理論的に活発に行われてきたが、実験的には全く研究が行われていないのが現状である。我々は、化学的に合成したクラスターを用いて、クラスターのサイズと形状に注目して、光学的特性を明らかにしてきた。

- (1)一次元的なSi鎖では、20-50個の大ききで分子から固体への状態の変化が連続的に起こる。
- (2)二次元や立方体クラスターでは励起子は局在する。
- (3)立方体クラスターは三重項励起子からの弱い発光のみが視測される。

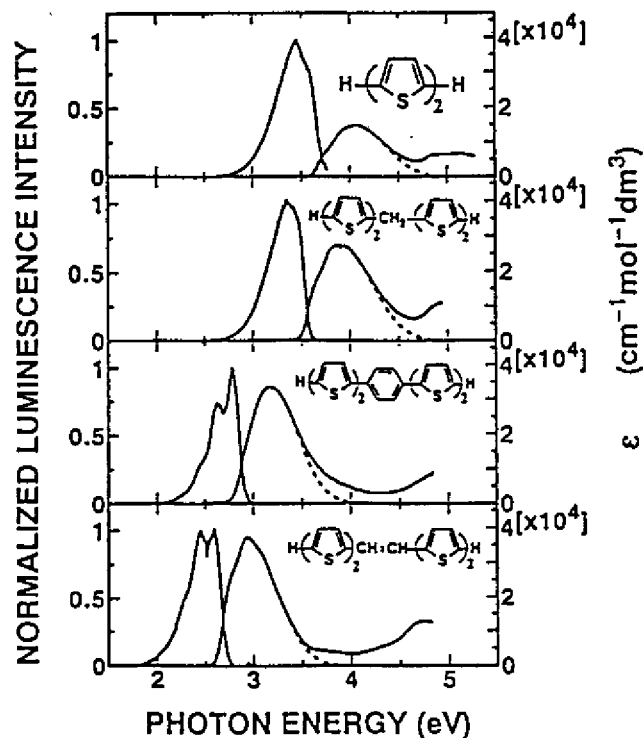


Siクラスターの合成法。立方体、ラダー、鎖構造と形状を変化させることができる。ダングリングボンドは有機化合物で終端されている。

以上Si原子数よりもクラスターの形状によって大きく光学特性が変化する。(報文18,31)

<共役系高分子の量子サイズ効果>

非局在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、アトムミクスケールからの物理現象の解明を試みることができる。 σ 共役系ポリシランと π 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量子サイズ効果の研究を行った。励起子の振動



バリアー分子を挟んだヘテロ構造チオフェンの吸収と発光スペクトル。

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が、これらの基礎的な研究成果から波長可変の有機発光デバイスの設計指針を得ることができた。すなわち、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り、量子サイズデバイスの試作も検討している。

<光伝導性ポリマーのキャリア輸送>

分子分散ポリマー (MDP's) におけるキャリアのホッピング伝導の微視的メカニズムを実験および理論の両面から研究した。MDP'sのキャリア輸送のダイナミクスをtime-of-flight (TOF) 過渡光電流法を用いて研究した。電界ゼロにおける正孔のドリフト移動度の大きさはドーピングした分子の電子的特性と密接に関連している事を、分子軌道計算から明らかにした。アモルファス材料であるMDP'sのキャリア輸送特性を支配するdiagonalおよびoff-diagonal disorderはドーピングした分子内の電荷の空間分布によって決まる。すなわち、分子の中性およびカチオン状態での電荷の非局在性はホッピングサイトのdisorderを小さくする。高移動度MDP'sにおいては、分子の構造緩和にともなうポーラロン効果も電荷の非局在性とともに関与する重要な因子であることがわかった。(報文13)

[4] 層状化合物磁性体の磁気構造 (鈴木隆司)

我々は、層状化合物に遷移金属をインターカレートした磁性体の磁気構造を中性子回折で調べた。 $\text{Fe}_{1/3}\text{NbX}_2$ ($X=\text{S}, \text{Se}$) について、ほぼ同じ結晶構造でありながら前著者と異なる磁気構造を見出した。この原因は、僅かなFe原子の濃度の違いによる第3近接磁性原子同志の交換相互作用エネルギーによって説明される。このことは、これ等の物質の磁性が報告者によって異なることの大きな原因と考えられる。又、磁気散乱ピークの温度変化からこの物質のスピン系はイジングスピンの性質を持つと考えられる。

1. 原著論文

- (1) F. Sasaki, T. Mishina, Y. Masumoto, B. Fluegel, K. Meissner and N. Peyghambarian: "Nonequilibrium Distribution of Hot Carriers in a CdSe Thin Film", *Semiconductor Science and Technology*, Vol. 7, pp. B160-B163 (1992).
- (2) Y. Masumoto, T. Wamura and T. Kawamura: "Size Selective Nonlinear Optical Spectroscopy of Excitons in CuCl Quantum Dots", *Surface Science*, Vol. 267, pp. 315-318 (1992).
- (3) T. Mishina, F. Sasaki and Y. Masumoto: "Ultrafast Optical Nonlinearities in Type-II AlGaAs/AlAs Multiple-Quantum-Well Structures and Their Device Applicability", *Surface Science* Vol. 267, pp. 634-637 (1992).
- (4) Y. Yamada, Y. Masumoto and T. Taguchi: "Hydrostatic Pressure Dependence of Two-Dimensional Exciton Luminescence in ZnSe/ZnS Strained-Layer Superlattices", *Surface Science*, Vol. 267, pp. 129-132 (1992).
- (5) Y. Masumoto, B. Fluegel, K. Meissner, S. W. Koch, R. Binder, A. Paul and N. Peyghambarian: "Band Gap Renormalization and Optical Gain Formation in Highly Excited CdSe", *Journal of Crystal Growth*, Vol. 117, pp. 732-737 (1992).
- (6) Y. Yamada, Y. Masumoto and T. Taguchi: "Hydrostatic-Pressure-Induced Type I→Type II Conversion in ZnSe-ZnS Strained-Layer Superlattices", *Journal of Crystal Growth*, Vol. 117, pp. 484-487 (1992).
- (7) F. Sasaki, T. Mishina, Y. Masumoto, B. Fluegel, K. Meissner and N. Peyghambarian: "Femtosecond Optical Nonlinearities under Resonant Excitation of Excitons in CdSe", *Journal of Crystal Growth*, Vol. 117, pp. 768-772 (1992).
- (8) A. Yamamoto, Y. Yamada and Y. Masumoto: "New Characterization Method of Biaxial Stress

- by Raman Scattering: Demonstration in ZnSe-ZnS Strained-Layer Super-Lattices", *Journal of Crystal Growth*, Vol. 117, pp. 488-491 (1992).
- (9) Y. Kanemitsu, A. Yamamoto, Y. Masumoto, H. Nabeta, S. Yamada, A. Yoshikawa, K. Yamanaka, Y. Nagata, T. Koda: "Residual Strains and Disorder in ZnS_{1-x}Se_x Epitaxial Films on GaAs", *Journal of Crystal Growth*, Vol. 117, pp. 316-319 (1992).
- (10) Y. Masumoto and T. Kawamura: "Observation of Lasing CuCl Quantum Dots", in "Nonlinear Optics, Fundamentals, Materials and Devices", ed. S. Miyata (Elsevier, Amsterdam, 1992) p. 393-398.
- (11) Y. Nakayoshi, Y. Kanemitsu, Y. Masumoto and Y. Maeda: "Dynamics of Rapid Phase Transformations in Amorphous GeTe Induced by Nanosecond Laser Pulses", *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 31, No. 2B, pp. 471-475 (1992).
- (12) T. Mishina, Y. Masumoto, B. Fluegel, K. Meissner and N. Peyghambarian: "Observation of Coherent Optical Phonons in BiI₃", *Physical Review B*, Vol. 46, No. 7, pp. 4229-4232 (1992).
- (13) Y. Kanemitsu, H. Funada and Y. Masumoto: "Electric Field Dependence of the Hole Drift Mobility in Molecularly Doped Polymers: Importance of Disorder of Hopping Sites", *Journal of Applied Physics*, Vol. 71, No. 1, pp. 300-303 (1992).
- (14) T. Mishina and Y. Masumoto: "Picosecond Repetitive Optical Switching Using Type II Multiple Quantum Well Structures", *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 31, No. 3B, pp. L343-L345 (1992).
- (15) F. Sasaki, T. Mishina and Y. Masumoto: "Ultrafast Pump-and-Probe Spectroscopy in CdSe: Hot-Carrier and Exciton Dynamics", *Physical Review B*, Vol. 46, No. 11, pp. 6750-6759 (1992).
- (16) Y. Kanemitsu, A. Yamamoto, H. Matsue, Y. Masumoto, S. Yamaga and A. Yoshikawa: "Raman Study of Disorder and Strain in Epitaxial ZnS_xSe_{1-x} Films on a GaAs Substrate", *Applied Physics Letters*, Vol. 60, No. 11, pp. 1330-1332 (1992).
- (17) Y. Masumoto, T. Kawamura, T. Ohzeki and S. Urabe: "Lifetime of Indirect Excitons in AgBr Quantum Dots", *Physical Review B*, Vol. 46, No. 3, pp. 1827-1830 (1992).
- (18) Y. Kanemitsu, K. Suzuki, Y. Nakayoshi and Y. Masumoto: "Quantum Size Effects and Enhancement of the Oscillator Strength of Excitons in Chains of Silicon Atoms", *Physical Review B*, Vol. 46, No. 7, pp. 3916-3919 (1992).
- (19) B. D. Fluegel, A. Paul, K. Meissner, R. Binder, S. W. Koch, N. Peyghambarian, F. Sasaki, T. Mishina and Y. Masumoto: "Experimental and Theoretical Investigation of Femtosecond Carrier Relaxation in CdSe", *Solid State Communications*, Vol. 83, No. 1, pp. 17-19 (1992).
- (20) Y. Masumoto, T. Kawamura and K. Era: "Biexciton Lasing in CuCl Quantum Dots", *Applied Physics Letters*, Vol. 62, No. 3, pp. 225-227 (1993).
- (21) Y. Yamada, Y. Masumoto, J. T. Mullins and T. Taguchi: "Ultraviolet Stimulated Emission and Optical Gain Spectra in Cd_xZn_{1-x}S-ZnS Strained-Layer Superlattices", *Applied Physics Letters*, Vol. 61, No. 18, pp. 2190-2192 (1992).
- (22) Y. Kanemitsu, H. Uto, Y. Masumoto and Y. Maeda: "On the Origin of Visible Photoluminescence in Nanometer-Size Ge Crystallites", *Applied Physics Letters*, Vol. 61, No. 18, pp. 2187-2189 (1992).
- (23) A. Yamamoto, Y. Kanemitsu, Y. Masumoto, S. Yamaga and A. Yoshikawa: "High Order Zone-

- Folded Modes in ZnSe-ZnS Strained Layer Superlattices", Applied Physics Letters, Vol.61, No.14, pp.1700-1702 (1992).
- (24)T. Kawazoe, Y. Masumoto and T. Mishina: "Spin Relaxation Process of Holes in Type II $Al_{0.34}Ga_{0.66}As/AlAs$ Multiple Quantum Wells", Physical Review B Vol.47, No.16, pp.10452-10455.
- (25)Y. Kanemitsu, H. Nabeta, H. Matsue, A. Yamamoto, Y. Nagota, K. Yamanaka, T. Koda and Y. Masumoto: "Photoacoustic Characterization of Semiconductor Hetero-structures", Japanese Journal of Applied Physics, Vol.31, Suppl.31-1, pp.29-31 (1992).
- (26)Y. Kanemitsu, K. Suzuki, H. Uto, Y. Masumoto, T. Matsumoto: "Visible Photo-luminescence of Silicon-Based Nanostructures: Porous Silicon and Silicon-Based Clusters", Applied Physics Letters, Vol.61, No.20, pp.2446-2448 (1992).
- (27)Y. Kanemitsu and Y. Sugimoto: "Microscopic Nature of Charge transport in Molecularly Doped Polymers: Effect of the Charge Distribution in Dopant Molecules on the Drift Mobility", Physical Review B, Vol.46, No.21, pp.14182-14185 (1992)
- (28)Y. Kanemitsu, T. Matsumoto, T. Futagi and H. Mimura: "Hydrogen Termination and Optical Properties of Porous Silicon", Japanese Journal of Applied Physics, Vol.32, No.1B, pp.411-414 (1993).
- (29)T. Matsumoto, T. Futagi, H. Mimura and Y. Kanemitsu: "Picosecond Decay Dynamics in Porous Silicon", Mater. Res. Soc. Sym. Proc., Vol.283, pp.149-154 (1993).
- (30)Y. Kanemitsu, H. Uto, Y. Masumoto, T. Matsumoto, T. Futagi, and H. Mimura: "Photochemical Etching Effects on Optical Properties of Porous Silicon", Mater. Res. Soc. Sym. Proc., Vol.283, pp.221-226 (1993).
- (31)Y. Kanemitsu, K. Suzuki, Y. Masumoto, T. Sato, K. Komatsu, S. Kyushin and H. Matsumoto: "Optical Properties of Small Si-Skeleton Sheets: Ladder Polysilanes", Solid State Communications, Vol.86, No.9, pp.545-548 (1993).
- (32)T. Matsumoto, T. Futagi, H. Mimura and Y. Kanemitsu: "Ultrafast Decay Dynamics of Luminescence in Porous Silicon", Physical Review B, Vol.47, No.20, pp.13876-13879 (1993).
- (33)Y. Kanemitsu, H. Uto, Y. Masumoto, T. Matsumoto, T. Futagi and H. Mimura: "Microstructure and Optical Properties of Free-Standing Porous Silicon Films: Size Dependence of Absorption Spectra in Si Nanometer-Sized Crystallites", Physical Review B, Vol.48, No.4, pp.2827-2830 (1993).
- (34)Y. Kanemitsu, T. Ogawa, K. Shiraishi and K. Takeda: "Visible Photoluminescence from Oxidized Si Nanometer-sized Spheres: Exciton Confinement on a Spherical Shell", Physical Review B, Vol.48, No.7, pp.4883-4886 (1993).
- (35)Y. Kanemitsu: "Slow Decay Dynamics of Visible Luminescence in Porous Silicon", Physical Review B, Vol.48, No.16, pp.12357-12360 (1993).
- (36)T. Matsumoto, T. Futagi, H. Mimura and Y. Kanemitsu: "Initial Stage Carrier Dynamics in Porous Silicon", Mater. Res. Soc. Symp. Proc., Vol.298, pp.199-204 (1993).
- (37)Y. Kanemitsu, T. Matsumoto, T. Futagi and H. Mimura: "Visible Photoluminescence of Oxidized Porous Silicon", Mater. Res. Soc. Symp. Proc., Vol.298, pp.205-210 (1993).
- (38)Y. Kanemitsu, H. Uto, Y. Masumoto, T. Matsumoto, T. Futagi and H. Mimura: "Optical Properties of Free-Standing Porous Silicon Films", Mater. Res. Soc. Symp. Proc., Vol.298, pp.265-270 (1993).

- (39) T. Matsumoto, T. Futagi, H. Mimura and Y. Kanemitsu: "Visible Luminescence from Porous Silicon Carbide", Mater. Res. Soc. Symp. Proc., Vol. 298, pp. 255-259 (1993).
- (40) H. Mimura, T. Matsumoto, T. Futagi and Y. Kanemitsu: "Electroluminescence from SiC/Porous Silicon PN Junctions", Mater. Res. Soc. Symp. Proc., Vol. 298, pp. 285-290 (1993).
- (41) T. Mishina, H. Chida, and Y. Masumoto: "Nonlinear Luminescence of Stacking-Fault Excitons in BiI_3 Induced by the Exciton-Exciton Auger Process", Physical Review B, Vol. 48, No. 3, pp. 1460-1463 (1993).
- (42) T. Mishina and Y. Masumoto: "Coherent Propagation of Femtosecond Optical Pulses in a Monoclinic ZnP_2 Single Crystal", Physical Review Letters, Vol. 71, No. 17, pp. 2785-2788 (1993).
- (43) Y. Kanemitsu, K. Suzuki, H. Uto, Y. Masumoto and Matsumoto: "Optical Properties of Porous Silicon and Small Silicon Clusters: Search for the Origin of Visible Photoluminescence of Porous Silicon", Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 32, No. 1B, pp. 408-410 (1993).
- (44) T. Kawazoe, T. Mishina, and Y. Masumoto: "Highly Repetitive Picosecond Polarization Switching in Type-II AlGaAs/AlAs Multiple Quantum Well Structures", Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 32, No. 12A, pp. L1756-L1759 (1993).
- (45) Y. Yamada, Y. Masumoto and T. Taguchi: "Formation of Optical Gain due to Exciton Localization in $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{S-ZnS}$ Strained-Layer Quantum Wells" Physica B, Vol. 191, pp. 83-89 (1993).
- (46) T. Taguchi, Y. Kawakami and Y. Yamada: "Interface Properties and the Effect of Strain of ZnSe-ZnS Strained-Layer Superlattices", Physica B, Vol. 191, pp. 23-44 (1993).
- (47) T. Taguchi, Y. Yamada, T. Ohno, J. T. Mullins and Y. Masumoto: "Ultraviolet Laser and Photodetector of CdZnS-ZnS Multiple Quantum Wells", Physica B, Vol. 191, pp. 136-139 (1993).
- (48) T. Taguchi, Ch. Onodera, Y. Yamada and Y. Masumoto: "Band Offsets in CdZnS-ZnS Strained-Layer Quantum Well and Its Application to UV Laser Diode", Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 32, No. 9B, pp. L1308-L1311 (1993).

2. 口答発表

A. 国際会議

- (1) Y. Masumoto: "Optical Properties and New Functionality of Nanocrystalline CuCl and Ge", 1992 MRS Fall Meeting, Boston (Nov. 30, 1992). (Invited)
- (2) Y. Masumoto: "Biexciton Lasing in CuCl Quantum Dots", 2nd Taiwan-Japan Workshop on Solid State Optical Spectroscopy (July 14, 1992).
- (3) Y. Kanemitsu and Y. Masumoto: "Optical Properties of Si and Ge Low-Dimensional Nanostructures: Clusters, Quantum Dots, and Quantum Wires", 2nd Taiwan-Japan Workshop on Solid State Optical Spectroscopy (July 14, 1992).
- (4) T. Matsumoto, T. Futagi, H. Mimura, and Y. Kanemitsu: "Picosecond Decay Dynamics in Porous Silicon", 1992 MRS Fall Meeting, Boston (Nov. 30, 1992).
- (5) Y. Kanemitsu, H. Uto, Y. Masumoto, T. Matsumoto, T. Futagi, and H. Mimura: "Photochemical Etching Effects on Optical Properties of Porous Silicon", 1992 MRS Fall Meeting,

Boston (Dec. 1, 1992).

- (6) T. Suzuki, S. Ikeda, J. W. Richardson and Y. Yamaguchi: "Magnetic Structure of $\text{Fe}_{1/3}\text{NbS}_2$ ", Proc. of the Fifth Int. Symp. on Advanced Nuclear Energy Research (JAERI-CONF 2) 2 (Mar. 1993) pp. 343-346.

B. その他の研究集会

- (1) 松本貴裕、二木登史郎、三村秀典、金光義彦: "ポーラスSiのピコ秒緩和ダイナミクスと表面構造" 応用物理学会 (1992年9月18日).
- (2) 片柳智志、岡本慎二、川畑香苗、Lev Zimin、舛本泰章、江良皓: "CuCl微結晶の励起子・励起子分子反転分布と光学利得 I", 日本物理学会分科会 (1992年9月25日).
- (3) 岡本慎二、片柳智志、Lev Zimin、舛本泰章: "CuCl微結晶の励起子・励起子分子反転分布と光学利得 II", 日本物理学会分科会 (1992年9月25日).
- (4) 松本貴裕、二木登史郎、三村秀典、金光義彦: "ポーラスSiの発光メカニズム: ピコ秒ダイナミクス" 日本物理学会分科会 (1992年9月25日).
- (5) 白石賢二、武田京三郎、小川哲生、金光義彦: "シロキセン・ゲルモキセンの電子構造" 日本物理学会分科会 (1993年3月30日).
- (6) 小川哲生、白石賢二、武田京三郎、金光義彦: "シロキセン・ゲルモキセンの励起子構造" 日本物理学会分科会 (1993年3月30日).
- (7) 松本貴裕、玉木輝幸、二木登史郎、三村秀典、金光義彦: "ポーラスシリコン誘導吸収効果の測定" 応用物理学会 (1993年3月29日).
- (8) 松本貴裕、玉木輝幸、二木登史郎、三村秀典、金光義彦: "陽極化成したシリコンカーバイドからの可視領域発光" 応用物理学会 (1993年3月29日).
- (9) 松本貴裕、植田健司、二木登史郎、三村秀典、金光義彦: "急速熱酸化したポーラスシリコンからの青色発光" 応用物理学会 (1993年3月30日).
- (10) 二木登史郎、松本貴裕、三村秀典、金光義彦: "高速熱酸化多孔質Siからの発光" 応用物理学会 (1993年3月30日).
- (11) 直江和彦、山田陽一、三品具文、Lev Zimin、舛本泰章: "CdZnS-ZnS歪超格子の2光子吸収分光", 日本物理学会分科会 (1992年9月26日).
- (12) 川添忠、三品具文、舛本泰章: "AlGaAs/AlAsタイプII型超格子中の電子スピン緩和III", 日本物理学会分科会 (1992年9月28日).
- (13) 山田陽一、舛本泰章、田口常正: "CdZnS-ZnS歪超格子の光学利得II", 日本物理学会分科会 (1992年9月28日).
- (14) 山本愛士、金光義彦、舛本泰章: "Si及びGe微粒子のラマン散乱", 日本物理学会分科会 (1992年9月25日).
- (15) 金光義彦、宇都裕士、舛本泰章、松本貴裕、二木登史郎、三村秀典: "ポーラスSiの発光メカニズム: 表面構造", 日本物理学会分科会 (1992年9月25日).
- (16) 金光義彦、宇都裕士、舛本泰章: "ナノ結晶Geの可視波長フォトルミネセンスと発光機構", 日本物理学会分科会 (1992年9月25日).
- (17) 金光義彦、鈴木克紀、舛本泰章、小松徹、佐藤浩太、久新莊一郎、松本英之: "Siクラスターの光物性II: シート状クラスター", 日本物理学会分科会 (1992年9月25日).
- (18) 舛本泰章: "GeとAgBrの微結晶サイズ効果", 応用物理学会 (1992年10月16日).
- (19) 山田陽一、舛本泰章、田口常正: "CdZnS-ZnS量子井戸と光励起紫外レーザー", 応用物理学会 (1992年10月18日).

- (20)山本愛士、金光義彦、舛本泰章、山賀重來、吉川明彦：“ラマン散乱によるZnSe-ZnS歪超格子の高次の折り返しモード”，応用物理学会(1992年10月16日)。
- (21)鈴木克紀、金光義彦、舛本泰章、白石洋太郎、黒田晶美：“共役系高分子を用いた擬一次元量子構造の光物性”，応用物理学会(1992年10月17日)。
- (22)宇都裕士、金光義彦、舛本泰章¹、松本貴裕、仁木登史郎、三村秀典：“ポーラスSiの可視波長フォトルミネセンスと表面構造”，応用物理学会(1992年10月18日)。
- (23)山田陽一、舛本泰章、田口常正：“CdZnS-ZnS歪量子井戸の光学利得と紫外レーザー”，電子材料研究会(1992年12月11日)。
- (24)金光義彦、鈴木克紀、舛本泰章、佐藤浩太、小松徹、松本英之、久新莊一郎：“Siクラスターの光物性(Ⅱ)：シート状クラスター”，応用物理学会(1992年10月19日)。
- (25)川添忠、三品具文、舛本泰章：“AlGaAs/AlAsタイプⅡ型超格子のスピン選択光学非線形性”，日本物理学会年会(1993年3月29日)。
- (26)直江和彦、山田陽一、三品具文、Lev Zimin、舛本泰章：“CdZnS-ZnS歪超格子の2光子吸収分光Ⅱ”，日本物理学会年会(1993年4月1日)。
- (27)片柳智志、Lev Zimin、舛本泰章：“CuCl微結晶の励起子・励起子分子反転分布と光学利得の精密測定”，日本物理学会年会(1993年3月30日)。
- (28)仲吉良彰、川畑香苗、Lev Zimin、舛本泰章：“CuCl微結晶における励起子分子発光の時間分解”，日本物理学会年会(1993年3月30日)。
- (29)矢代哲子、Lev Zimin、舛本泰章：“単結晶CuClのレーザー発振とその機構”，日本物理学会年会(1993年3月30日)。
- (30)岡本慎二、Lev Zimin、舛本泰章：“CuCl微結晶の励起子・励起子分子反転分布と光学利得スペクトル”，日本物理学会年会(1993年3月30日)。
- (31)山田陽一、舛本泰章、田口常正：“CdZnS-ZnS歪超格子の光学利得Ⅲ”，日本物理学会年会(1993年4月1日)。
- (32)金光義彦、舛本泰章、武田京三郎、白石賢二、小川哲生：“Si微結晶の可視発光と表面効果”，日本物理学会年会(1993年3月30日)。
- (33)鈴木克紀、金光義彦、舛本泰章、久新莊一郎、松本英之：“擬一次元ポリシランの光物性：主鎖分岐とラダー構造”，日本物理学会年会(1993年3月29日)。
- (34)山本愛士、金光義彦、舛本泰章：“Si微結晶のラマン散乱”，日本物理学会年会(1993年3月30日)。
- (35)宇都裕士、金光義彦、舛本泰章、松本貴裕、三村秀典、仁木登史郎：“ポーラスシリコンの微結晶サイズと光学特性”，日本物理学会年会(1993年3月30日)。
- (36)三品具文、舛本泰章：“ZnP₂におけるフェムト秒時間分解分光”，日本物理学会年会(1993年3月30日)。
- (37)山田陽一、舛本泰章、田口常正：“CdZnS-ZnS歪量子井戸構造における光学利得の生成機構”，応用物理学会(1993年3月)。
- (38)川添忠、三品具文、舛本泰章：“AlGaAs/AlAsタイプⅡ型量子井戸を用いた円偏光光スイッチ”，応用物理学会(1993年3月)。
- (39)鈴木克紀、金光義彦、舛本泰章、白石洋太郎、富内芳昌、黒田晶美：“共役系高分子を用いた擬一次元量子構造の光物性(Ⅱ)”，応用物理学会(1993年3月)。

3. 著書・総説等

- (1)舛本泰章：“半導体微結晶の光物性と新機能性”，固体物理，Vol.27，No.4，pp.314-319。
- (2)金光義彦：“光伝導性ポリマーのキャリア輸送”，電子写真，Vol.32，No.2，pp.60-71(1993)。

- (3) 金光義彦、舛本泰章：“ナノメートルGe微結晶の光物性”，表面科学，vol.14，No.2，pp.119-123（1993）。
- (4) 金光義彦：“青く光るシリコン”，パリティ，Vol.8，No.8，pp.42-44（1993）。
- (5) 金光義彦、松本貴裕、二木登史郎、三村秀典：“ポーラスシリコン：赤色から青色発光へ”，固体物理，Vol.28，No.9，pp.42-48（1993）。
- (6) 金光義彦：“共役系高分子の量子サイズ効果”，Molecular Electronics and Bioelectronics，Vol.4，No.3，pp.226-231（1993）。
- (7) 金光義彦：“クラスターから固体へ：光学的特性を中心としたSiとGeのサイズ効果”，応用物理，Vol.62，No.10，pp.994-997（1993）。