

顕微分光装置の製作とそれを用いた 半導体量子構造の研究



鐘本 勝一（かねもとかついち）

所属：理学研究科数物系専攻光物性物理学研究室

専門分野：物性物理学（光物性、磁気共鳴）

趣味：格闘技テレビ観戦、娘と遊ぶこと。

連絡先：内線 2550, email:kkane@sci.osaka-cu.ac.jp

1. はじめに

筆者はこれまで光物性物理分野で主に研究してきた。その場合、装置の製作から簡単な部品作りに至るまで何かと工作技術センター（機械工作部門）にお世話になることが多い。その意味では、行っている研究のほとんどが工作技術センターと関係が深いことになる。今回その中で、最近研究室で取り組んでいる顕微分光に関して、装置製作とそれを用いた研究の内容を簡単に述べさせていただきたいと思う。尚この研究は、今春、熊本大学衝撃・極限環境研究センターに栄転された赤井一郎教授が着手された研究を、唐沢力教授（現、工作技術センター長）及び大学院生の薄井将吾君とともに継続して行っているものである。

2. 顕微分光装置

装置について触れる前にまず顕微分光について少し述べる。尚、初心者にもわかりやすい説明書として本学理学研究科の杉崎満准教授が書かれた記事を推薦する[1]。顕微分光法とは、正に顕微鏡を分光技術と組み合わせることで、微小領域における分光情報を得ようとするものである。光には回折性があるため、用いる光の波長程度には領域を絞ることは出来ないが(回折限界)、数 μm サイズの空間分解能を持たせる事が可能なため、微細試料の評価から微視領域の物性解明さらには単一分子分光に至るまで幅広く応用されている。中でも発光検出による顕微分光の研究例はこれまでも多くの成果を上げている。

発光検出顕微分光では励起光の集光とそこから発せられる信号光の検出を同じ光学系で行う共焦点顕微分光法が一般に用いられる。実際に用いている共焦点顕微計測システムの様子を図 1 に示す。レーザー1 から照射された励起光をビームスプリッターで試料側へ導き、対物レンズで集光して励起する。生じる発光は同じ対物レンズを通り、ビームスプリッターを透過し、ピンホールにより領域を絞った後に、光ファイバーを通して分光器へと導かれる。実際の装置を写真 1 に示す。細部まで写真で表現できない点は残念であるが、用いられてい

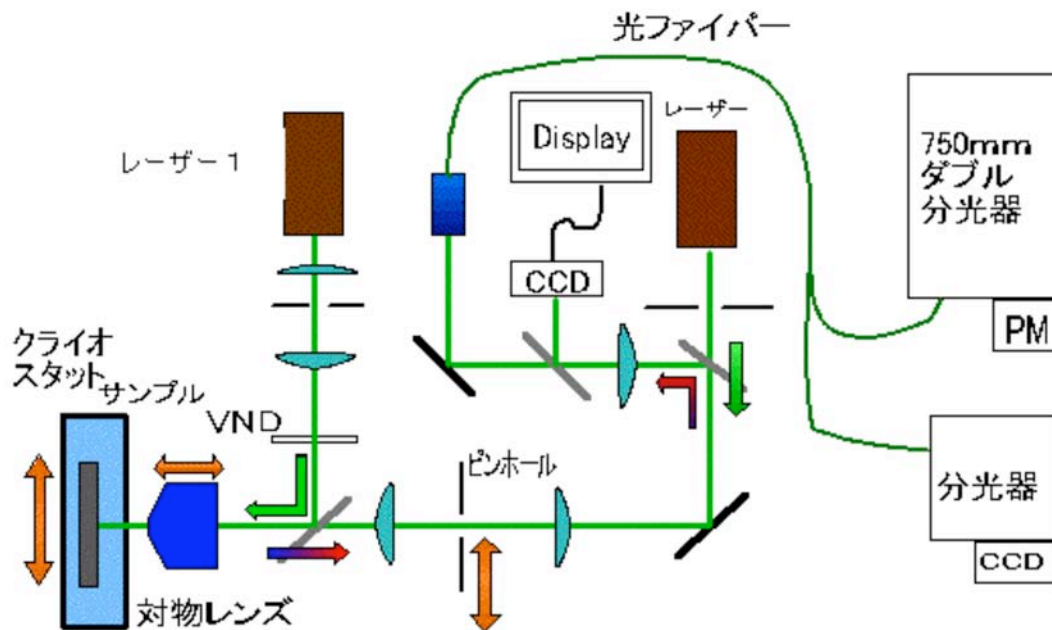


図1 共焦点顕微分光装置の概略図

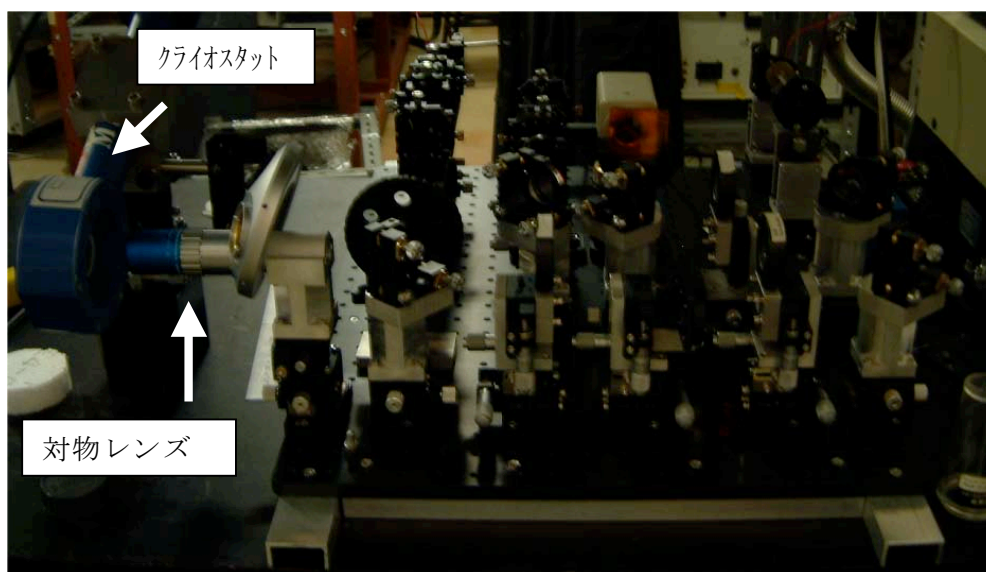


写真1：実際の共焦点顕微分光装置

る光学部品と光学ステージの結合などにはほとんど手作りのものを用いている。特に顕微分光装置では、レンズ・ミラーを光軸上に正確に配置する必要があるため、それらをマウントする部品は、基盤に対して垂直に固定できなければならない。これらは、工作技術センターに依頼し作製していただいた。左に配置されたクライオスタットは装置の都合上、鉛直に対して角度をつけて固定する必要

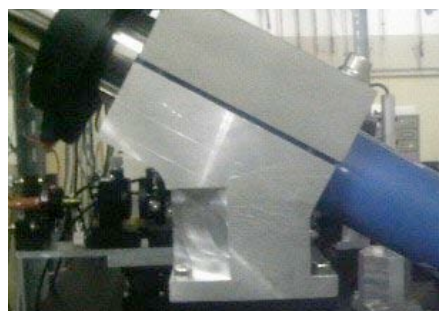


写真2：クライオスタット固定用部品

があった。写真2に、工作技術センターで作製して頂いた低温測定用クライオスタットを固定するための部品を示す。この部品は光実験で要求される精密な角度を正確に固定できるように作製されており、大いに役立った。

3. 研究対象

半導体微細量子構造の典型例である CdTe/ZnTe 量子ドットに顕微分光計測を適用した例について紹介する。一般に量子ドットとしては、III-V族半導体である InAs/GaAs 系のものがよく知られているが、II-VI族半導体の CdTe/ZnTe 量子ドットは、格子定数の大きなミスマッチにより、小さなサイズのドットが自己形成されること、および広いバンドギャップエネルギーを持っていることから、短波長域の発光デバイス材料への応用が期待されている。半導体量子ドットは、分子線エピタキシー(MBE)法によって作成されることが多いが、我々はホットウォール法で作成された CdTe/ZnTe 量子構造を試料に用いた。この試料に顕微分光法を適用したときの発光（顕微発光）スペクトルおよび通常の（非顕微）発光スペクトルの温度依存性より、光励起状態のダイナミクスを明らかにすることができる。

CdTe/ZnTe 量子構造試料は、基板にアンドープ(100)-GaAs を用い、ZnTe バッファ層、CdTeQW 層、ZnTe キャップ層の順にホ

ットウォール法を用いて成長させたものである。CdTe 層の厚さ及び、成長中断時間が異なる試料をいくつか準備した。その作成条件を表1に示す。表中の QW 層厚は成長時間から求めた公称厚さ（nominal thickness:モノレイヤー (ML) 単位）である。平均ドットサイズは、球状ドットの無限ポテンシャル閉じ込めを仮定して発光ピークエネルギーの測定値

試料番号	QW 厚	基板温度	成長中断
	(ML)	($^{\circ}$ C)	(秒)
35	82.3	300	1800
37	20.6	300	900
75	5.2	300	0
76	2.1	300	0

表1 試料作成条件

から見積もる。キャップ層をつけていない試料を原子間力顕微鏡 (AFM) で観察したところ、量子ドットの密度は $1\mu\text{m}$ 四方で約 500 個程度であり、一つのドットのサイズは 10nm ~ 数 10nm であった。

顕微分光測定の概要は以下の通りである。試料の励起には LD 励起の YAG レーザー (532nm) を用いた。顕微発光の測定範囲は直径 $4\mu\text{m}$ (拡大倍率: 25×4 倍、ピンホール径: $100\mu\text{m}$) で、用いた対物レンズの開口数 (N.A.) は 0.42 である。試料は、液体 He フロー式クライオスタット (Oxford Microstat He) により 3K まで冷却した。発光スペクトルの検出は 75cm ダブル分光器 (SPEX) + 冷却 PM または、 32cm シングル分光器 (JY-HR320) + 冷却 CCD を用いて行った。

4. 測定結果

図2に、3K において測定した通常発光と顕微発光の測定結果を示す。成長中断を行わな

かった試料 (#75,76) と中断を行った試料 (#35,37) の通常発光スペクトル幅に大きな違いがある。成長中断した試料のスペクトル幅が広い。これは不均一幅である。成長中断は試料の不均一を増大させていることがわかる。

図 2(a)は成長中断時間が最も長い試料(#35)のスペクトルである。顕微発光スペクトルは、通常発光スペクトルより幅が広く、高エネルギー側に大きくシフトしている。図 2(b)は成長中断時間が試料 (#35) の半分である試料 (#37)のスペクトルである。通常発光と顕微発光のスペクトルピークは一致するが、やはり顕微発光スペクトルの高エネルギー領域に通常発光スペクトルでは顕著でなかった成分が強く現われている。図 2(c)、2(d)は成長を中断しなかった試料(#76) 、(#75)のスペクトルである。試料(#76)では、顕微発光スペクトルの幅は通常発光スペクトルと同程度であるが、ピークがほぼ一致するものと、高エネルギー側にシフトしたものが測定位置に依存して現れている。試料(#75)の顕微発光スペクトルでは、ピーク・幅ともに通常スペクトルとほぼ一致している。

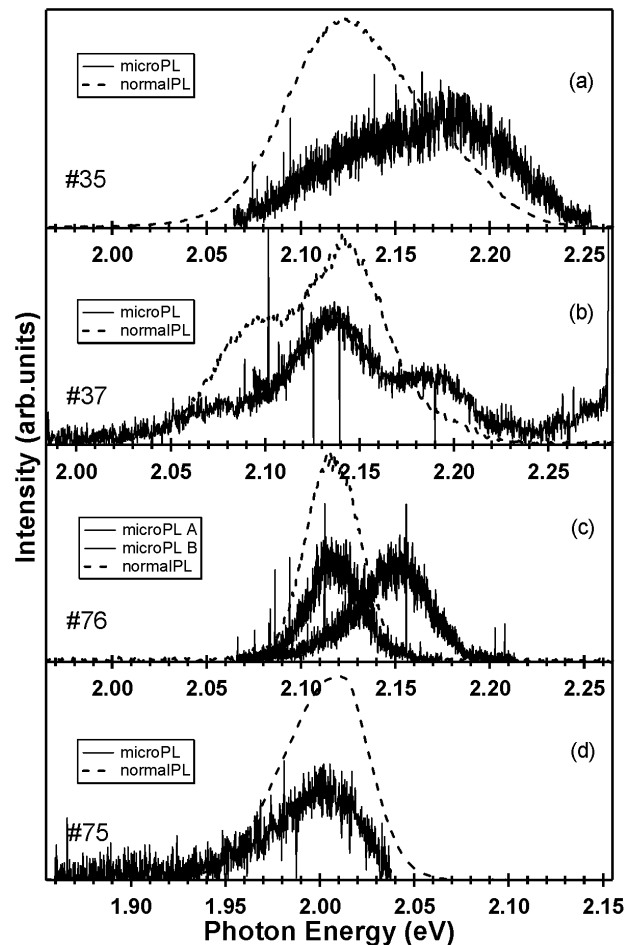


図 2. 各試料の顕微発光スペクトル

----- 通常発光、 —— 顕微発光

単一あるいは少数の孤立したドットの発光を顕微分光が捉えられているならば、顕微発光ピークは通常発光のピークより高・低どちらの側にも現われうるが、その幅は非常に狭くなるはずである。従って、成長中断を行った試料 (#35,37) の顕微発光スペクトルの幅がより広くなるという結果は、サイズ分布を持つ孤立ドット群からの発光を分離せずに観測している事を示す。しかし、この場合、発光スペクトルピークが常に高エネルギー側に現れることは説明できない。

成長中断していない試料(#76)では、顕微発光スペクトル幅は通常発光スペクトル幅とほとんど変わらず、高エネルギー側にピークシフトが生じている。このことは各ドットが十分孤立しておらず、相互に非常に接近しており、ドット間でエネルギー移動が生じている事を示唆している。この移動は緩和を伴うため、高いエネルギー固有値を持つ小さいサイズのドットから大きいドットへと移動が起こる。励起領域の外周部において、この様なドット間エネルギー移動が起こると、通常測定ではこのドット間エネルギー移動により領域外にある大

きいドットへと緩和した成分を含めて取り込むため、スペクトルにおいて低エネルギー成分はより顕在化するはずである。一方、顕微分光測定では励起領域内からの発光のみ取り込まれる。そのため大きいドットへの緩和成分が領域外に外れれば、スペクトルの低エネルギー成分が減少するため、ピークは高エネルギー側にしか現われない。この現象は成長中断した試料(#35,37)でも観測されている。詳細は省くが、これらの解釈は、それぞれの試料における通常発光のスペクトル幅の温度依存性とも対応しており、妥当性が裏付けられている。

5. 結語

以上の解釈は、顕微発光を通して、励起子が顕微観測領域 ($4\ \mu\text{m}$) から領域外へ移動していく様子が観測できたことを意味する。これらの移動の存在は通常スペクトルの観測からは明らかに出来ず、顕微測定法の有用性を示したものである。今後はさらに CdTe/ZnTe 系量子ドットに対する研究を進めていき、加えて高輝度発光性の有機物への展開も行う予定である。

謝辞：この研究を進めるにあたり、工作技術センターの皆さんに装置の製作はもちろんのこと、数々の貴重のご助言を頂きました。この場をお借りしまして、厚くお礼申し上げます。

文献

[1] 杉崎満、「光物性との基礎と応用」、オプトロニクス社、2006年出版、P.152