

## (2) ZnS 系量子井戸構造における誘導放出機構に関する研究

理工学研究科 物質工学専攻 D1 吉村 和正

### 研究目的

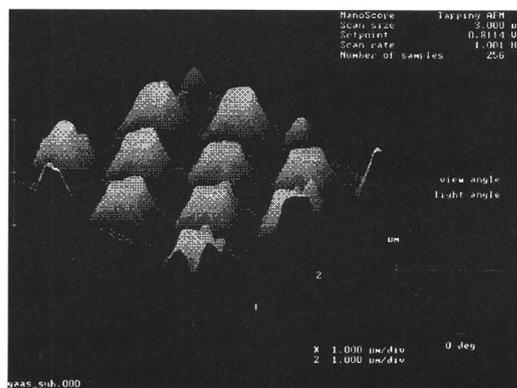
近年の結晶成長技術および微細加工技術の進歩は、半導体をナノメートルスケールで制御および加工することを可能にしつつある。その結果、量子井戸 (QW: quantum well)・量子細線 (QW: quantum wire)・量子ドット (QD: quantum dot) といった低次元量子構造が作製され、三次元の自由度を有するバルクとは異なる低次元での物性に関する研究が精力的に行われている。半導体低次元構造はその物性物理的関心のみならず、高性能デバイスや低しきい値レーザへの応用など光デバイスへの応用が期待されている。その中でも、QDを活性層に用いた半導体レーザは特性温度の改善、変調帯域の増加、しきい値電流の低減を可能にすると考えられ注目を集めている。

QDの作製方法としては大別すると、ヘテロ界面における格子不整合を利用し、立体構造を形成させる Stranski-Krastanow (S-K) 成長のような自己形成タイプと加工基板上に結晶を成長させ、成長速度の不均一を利用する方法や平坦基板上に結晶を成長させ、リソグラフィーやエッチングにより量子ドットを作製する加工タイプの二通りに分類することが出来る。しかしながら、前者の方法ではQDの大きさ・密度のばらつきが大きく、また、系の選択 (格子不整合の大きい系を選択する必要がある) に制限がある。一方、後者の方法では形状の不均一は抑制されるが微小化に制限があり、また、加工時に界面への光学的・構造的欠陥が導入される。以上のように、各作製方法とも一長一短を有している。

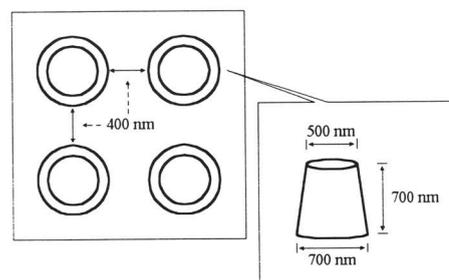
本研究では、形状の均一性が得やすく、系の選択に自由度のある後者の方法による量子ドットの作製を試み、作製した量子ドットを光学的・構造的に評価する。

### 研究方法

図1 (a)表面AFM像、(b)模式図) のような構造を電子線リソグラフィーおよびドライエッチングにより形成したGaAs加工基板上に、減圧MOCVD法によりZnS緩衝層を成長させた後に、基板上的凸



(a) 表面AFM像



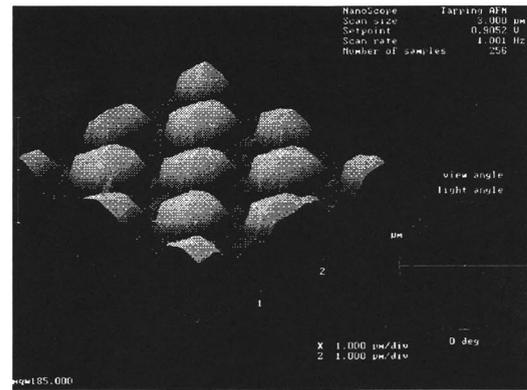
(b) 模式図

図1. 加工基板構造図

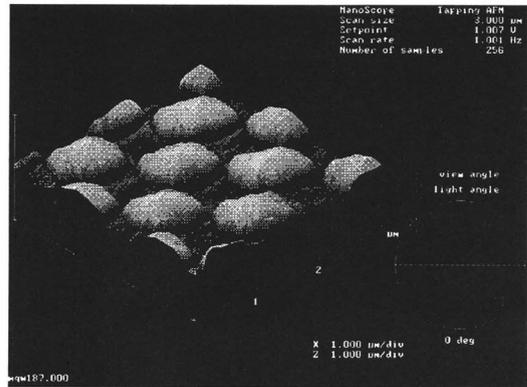
部分に  $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{S}$ -ZnS 多重量子井戸構造を成長させることで、成長方向に垂直な面での閉じ込めを生じさせ、QDの作製を試みた。多重量子井戸構造の成長は、過去の我々の研究において得られた平坦なGaAs基板上での最適成長条件である成長温度  $350^\circ\text{C}$  およびVI/II比14.2を用いて行った。また、多重量子井戸構造は、厚さがそれぞれ  $15\text{\AA}$ 、 $114\text{\AA}$  の量子井戸層と障壁層の30周期からなっている。量子井戸層のCdの組成比は0.21である。

### 研究成果

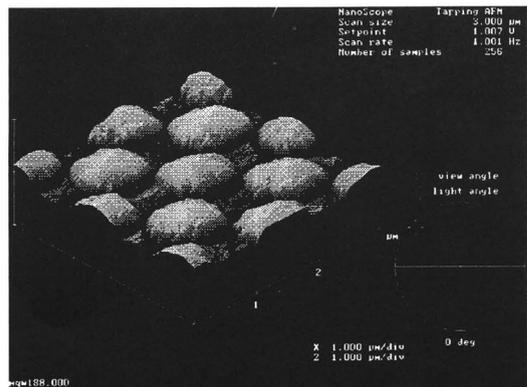
異なる厚さを有するZnS緩衝層上に成長させた  $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{S}$ -ZnS 量子構造の表面AFM像を図2に示す。ZnS緩衝層の厚さはそれぞれ(a)50nm、(b)200nm および(c)400nmである。図に見られるように、いずれの試料においても基板の凸部分上に四角錐状に結晶が成長しているのがわかる。形成された四角錐の先端部は、ZnS緩衝層の厚さが厚くなるにつれ鋭くなり、緩衝層の厚さが200nm以上になると鋭さは飽和する傾向が見られた。また、200nm以上の緩衝層上に成長した量子構造の表面は、四角錐の裾部分の凹凸が大きくなり、かつ、基板の凸部分以外への結晶成長が顕著に観測された(c)。図3にZnS緩衝層の厚さの異なる試料において観測された弱励起下におけるフォトルミネッセンススペクトルの発光半値幅の膜厚依存性を示す。図に見られるように、成長した表面の凹凸が荒くなり始める200nmより厚い緩衝層を有する試料において半値幅が急激に増大しているのがわかる。そこで、表面の凹凸が少なく、かつ、基板の凹部分への成長が抑制され基板の凸部分にもっともシャープな突端を有する四角錐状の構造が形成された200nmの緩衝層を有する試料において度依存性等の光学的評価を行った。



(a) 50nm-緩衝層上



(b) 200nm-緩衝層上



(c) 400nm-緩衝層上

図2. 表面AFM像の緩衝層膜厚依存性

図4は、4.2KでのHe-Cdレーザ励起下における  $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{S}$ -ZnS 量子構造のPLスペクトルを示している。図中実線が加工基板上に成長した結晶からの発光であり、破線が平坦基板上に同条件で成長した結晶からの発光である。図に見られるように、加工基板上に作製した結晶からの発光は、平坦基板上のものと比較して発光半値幅が広く、発光強度が弱

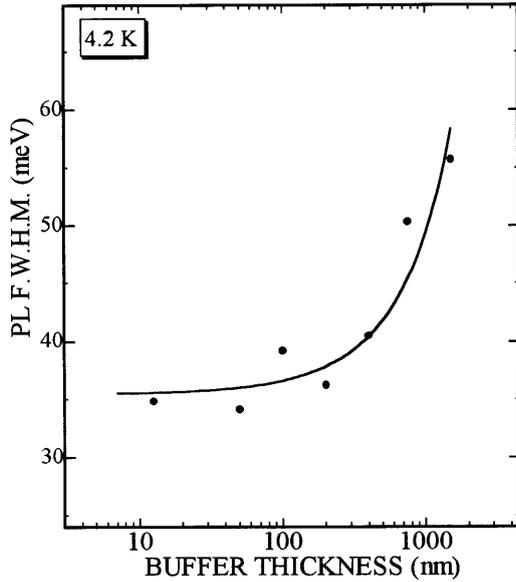


図3. PL半値幅の緩衝層膜厚依存性

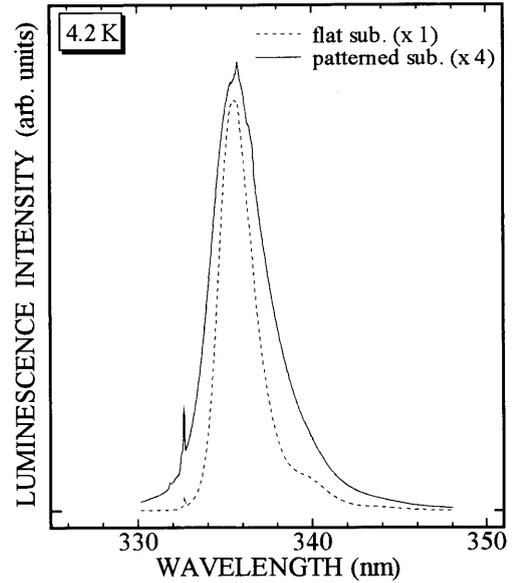


図4. 弱励起下のPLスペクトル。  
(実線：加工基板上、破線：平坦基板上)

くなった。これは、前者が構造に揺らぎがあることに起因し、また、後者は結晶が成長している部分が少ないことに起因していると考えられる。しかしながら、加工基板上の結晶からの発光において、335.73nmの位置に新しい鋭い発光ピークが観測された。これは温度依存測定において室温付近まで観測され、また温度上昇に伴う発光ピークエネルギーのレッドシフトと同様の傾向を示すことから、加工基板上の凸部分に形成された空間的に狭い部分からの発光であると考えられる。また、二つの試料における温度上昇に伴う発光強度の減少を比較すると(図5)、加工基板上からの発光は平坦基板上からの発光に比べて、約3倍程度減少が抑制されており、このことからこのピークは凸部分上の四角錐上からの発光であると考えられる。

次に、二つの試料を劈開し誘導放出スペクトルの測定を行った。平坦基板上の結晶からは強い紫外誘導放出光が観測されたものの、加工基板上の結晶からは誘導放出光が観測されなかった。現時点では断

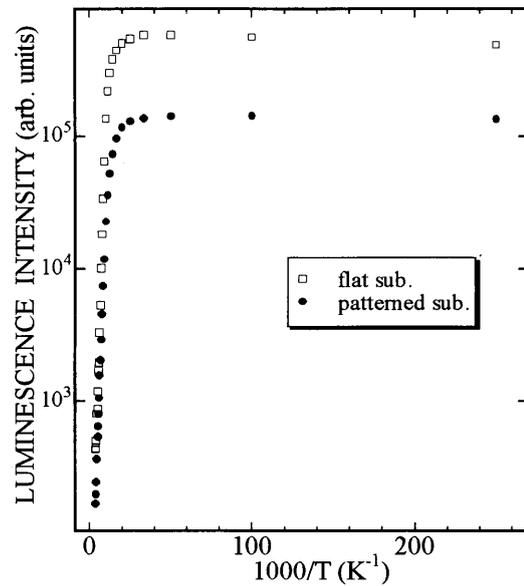


図5. 発光強度の温度依存性。  
(●：加工基板上、□：平坦基板上)

定できないが、これは加工基板上の結晶に存在する多くの界面により生成された非輻射再結合中心や、凹凸を有する結晶により生じた励起の不均一により十分な利得が得られなかったことなどが原因として予想される。

### 結論と今後の課題

加工基板上へ量子井戸構造の作製を行うことで凸部分への量子ドットの作製を試みた。また、AFM測定・PL測定により作製した結晶の構造的・光学的評価を行った。その結果、加工基板上凸部分に四角錐状に結晶が成長し、キャリアの空間的な閉じ込めが行われていることが予想されるものの、量子ドットのような三次元の閉じ込めは観測されなかった。これは量子効果が現れる程度まで成長方向に垂

直な方向の閉じ込めが達成されていなかったためと考えられる。

今後、加工基板の凹凸のさらなる微サイズ化、および成長条件の最適化を行うことで、成長方向に垂直な面内での閉じ込めを増大させ、量子ドットを作製することが出来るのではないかとと思われる。また、加工基板上への自己形成量子ドットの選択成長などにより、サイズの均一性の高い量子ドットの作製が達成される可能性もある。