

Title	微傾斜基板を利用したガリウム砒素量子細線からの発光
Author(s)	井上, 恒一; 中島, 尚男
Citation	大阪大学低温センターだより. 1995, 92, p. 11-14
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/3761
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

微傾斜基板を利用した ガリウム砒素量子細線からの発光

産業科学研究所 井上恒一、中島尚男（内線8411）

E-mail : inoue-k@sanken.osaka-u.ac.jp

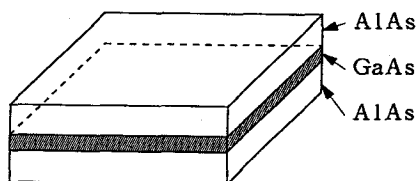
1 量子細線とは

半導体中の電子をポテンシャルによって閉じこめ、ある向きにはわずかしか（例えば数nm程度しか）動けないようにする。そうすると電子の運動はその方向について量子化され、とびとびのエネルギー状態しか取り得なくなる。このような電子の閉じこめによって、電子を2次元的にしか動けなくしたものを量子井戸、1次元的にしか動けなくしたものを量子細線と呼ぶ。閉じこめによって電子の状態密度が集中し、電子デバイスとしての特性が向上し、また量子効果による新しい機能も期待される。そこで現在どうしたら良好な量子細線ができるか、そしてその性質はどのようなものか 盛んに研究が行われている。

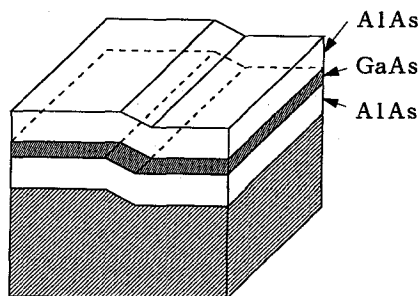
2 量子細線の作り方

GaAsとAlAsはほとんど同じ格子定数を持ち、任意の割合で混晶となる。そして分子線成長装置（MBE）を用いて分子層オーダーで厚さを制御しながら結晶を成長することができる。そこで、例えば図1(a)に示すようにAlAs/GaAs/AlAsというAlAsに挟まれたサンドイッチ状のGaAsの薄い結晶をつくる。そうするとGaAsのバンドギャップはAlAsのバンドギャップより小さいので、電子（正孔）はAlAs中にあるよりGaAs中にある方がエネルギーが低くなり、そのためGaAsの薄い膜中に閉じこめられる。膜厚が10nm程度より薄くなると量子効果が顕著になる。こうして2次元的な量子井戸が実現される。量子井戸は現在半導体レーザーなどに応用されている。

次に1次元的な量子細線にするためには、量子井戸の面内の運動をさらに制限してひとつの方向しか動けなくする必要がある。その方法としていくつかの提案が発表されているが、われわれは微傾斜基板の上にMBEにより成長する方法を開発した。この方法では微傾斜基板の上に見える階段状の表面構造を利用する。図1(b)に階段状の段差のある基板上に先ほどの量子井戸を成長するとどうなるかを模式的に示す。図中、段差のある斜め



(a) 量子井戸



(b) 量子細線

図1. 量子井戸と量子細線の模式図。
エネルギーギャップの小さいGaAs中に電子は閉じこめられる。

の部分は直線状にのびているので、この部分に電子を閉じこめることができれば量子細線となる。そのためには斜めの部分における電子のエネルギーが平らな部分より低くなっていなければならない。それにはどのような条件であればよいかというと、(1)斜めの部分の膜厚が平らな部分より厚くなる。(2)斜めの部分の物質のバンドギャップが平らな部分より小さくなる。という2つのうちどちらか、あるいは両方が実現されていれればよい。(1)の理由は、量子井戸中では膜厚が薄くなるにつれ量子閉じこめのエネルギーが大きくなるため、膜厚の厚い所の方が薄い所より電子のエネルギーが低いからである。そして(1)と(2)の条件は、次に述べるようにMBE成長中に自然にかなえることができることがわかった。

3 階段上の量子細線

まず図1(b)のような階段状構造（量子効果が現れるには少なくとも数10nmオーダーの構造）を作るにはどうするかというと、それには特殊な向きのGaAs基板を用いる。GaAsはせん亜鉛型構造の結晶で、(100)面が半導体基板としてよく用いられる。量子細線を作るために、ここでは自然へき開面である(110)面から、[111] A方向へわずかに（例えば3度）傾けた面を用いる。そのような微傾斜面上にMBEによりGaAsやAlAsを成長したときにどのような構造ができるかという問題は、ひとつの興味ある研究テーマである¹⁾。しかしそれは別の機会にゆずり、ここでは比較的低温でGaAs/AlGaAs超格子を数周期成長するとそろった階段状構造が形成されるという結果を用いる。図2(a)にこうして作った階段状の表面を原子間力顕微鏡によって見た像を示す。1μあたり3段くらいの間隔の階段が見え、その幅（細線の長さ）は数10μ以上にわたっている。

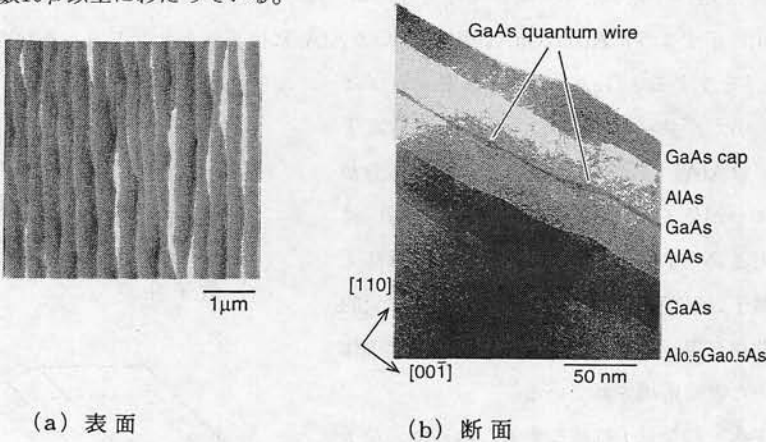


図2. 試料の構造の顕微鏡像。

- (a)原子間力顕微鏡による表面観察像。数10μの長さにおたる階段状構造が見られる。
- (b)透過型電子顕微鏡による断面観察像。階段状構造の段差の部分でGaAs層が厚くなり、そこが量子細線になる。

量子細線を作るためにはこの階段状構造の上にAlAs/GaAs/AlAs量子井戸を成長する。こうして作った試料の断面の透過型電子顕微鏡写真を図2(b)に示す。階段の斜めの部分のGaAs層の厚みが、平らな部分の1.5倍くらいまで厚くなっている様子がよく見える。この厚くなった部分に電子が閉じこめられる。

GaAsの量子井戸の代わりにAlAs/Al_xGa_{1-x}As/AlAsといったAlGaAs混晶の量子井戸を用いても良い²⁾。

その場合、都合のいいことにAlAs組成が階段の斜めの部分で少し減少し、その部分のバンドギャップが小さくなることによって量子細線ができる³⁾。

以上のようにして量子細線が実現されることがわかった。この方法では成長過程のみを用いているので、いろいろな欠陥の入る可能性が少ない。つまり発光を調べるのに適した試料が得られる。

4 量子細線のフォトルミネッセンス

図3に4 KにおけるGaAs量子細線のフォトルミネッセンススペクトルを示す。励起光源としてアルゴンイオンレーザーの514.5nmの光を直径20 μ 程度に集光した。(110)とラベルがついているものが(110)微傾斜(3度傾斜)基板上に階段状構造を育成し、その上にAl_{0.5}Ga_{0.5}As/GaAs(1nm)/Al_{0.5}Ga_{0.5}As量子井戸を成長して作製した量子細線からの発光である。この試料を作るときに同時に(100)面の基板も入れておいた。(100)面では階段状構造ができないので、GaAs(1nm)層は平らな量子井戸のままであり、その発光は図3に見られるように1.98eV付近にピークを持つ。それに対して(110)面の試料の発光はかなり低エネルギー側(1.8~1.9eV)に現れる。その位置はだいたい1.5nmの厚

さの量子井戸の発光に対応する。つまり階段状構造の上に量子井戸を成長した場合、階段の斜めの部分の厚さが平らな部分より約1.5倍ぐらになり、その分厚さ方向の量子閉じこめエネルギーが低くなって発光の低エネルギーシフトが起こると考えられる。階段の斜めの部分の幅は20nm程度なので電子は断面が約1.5x20nm²の細線に閉じこめられている。電子が細線に閉じこめられるとその発光は細線方向に偏光することが理論的に予想されている。そこで図3では発光を細線方向とそれに垂直方向の偏光成分にわけて測定した。その結果発光は細線方向に強く偏光していることがわかり、細線への閉じこめが起こっていることが確かめられる。

量子細線の発光は大きく2つの山に分かれ、さらに細かいさざ波のような構造が見られる。このさざ波構造はノイズではなく、不均一なたくさんの量子細線からの発光が重なっているためと考えられる。そのことはカソードルミネッセンス法や試料上にマスクをおいて数本の量子細線のみを見るようにした測定とも一致する。大きく2つの山に分かれる理由としては、量子細線中のより高い励起状態からの寄与が考えられる。そこで現在、温度依存性、励起強度依存性などいろいろな角度から検討を加えている。

5 終わりに

量子細線ができたので、現在その物性と応用について研究を進めている。その際共同研究、共同利用など、いろいろな形でたくさんの研究室のお世話になっている。ここに述べた研究は、中島研究室のス

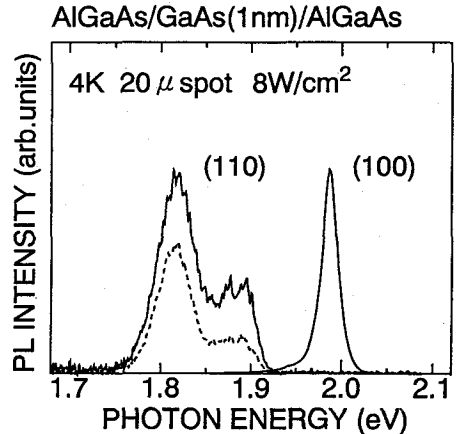


図3. 量子細線のフォトルミネッセンススペクトル。
 実線：細線に平行な方向の偏光
 破線：細線に垂直な方向の偏光
 比較のため平らな(100)量子井戸からの発光も示してある。
 (1.98eV付近のピーク)

トップや大学院学生ばかりでなく、産業科学研究所の権田研究室（分子線成長装置）、岩崎研究室（原子間力顕微鏡）、電子顕微鏡室（透過型電子顕微鏡）、理学部の邑瀬研究室（リソグラフィ、フォトルミネッセンス測定）、ドイツのベルリン工科大（カソードルミネッセンス測定）など、その他、名前を挙げないが多くの方々の協力によりすすめられた。ここに深く感謝します。

- 1) S. Hasegawa, M. Sato, K. Maehashi, H. Asahi and H. Nakashima, *J. Crystal. Growth* **111** (1991) 371.
- 2) K. Inoue, K. Kimura, K. Maehashi, S. Hasegawa, H. Nakashima, M. Iwane, O. Matsuda, and K. Murase, *J. Crystal Growth* **127** (1993) 1041.
- 3) M. Takeuchi, K. Shiba, H. K. Huang, K. Sato, K. Inoue, K. Maehashi and H. Nakashima, *J. Crystal Growth* **150** (1995) 441.