

用語解説(31)

『半導体超格子』

永沼 充

NTT 光エレクトロニクス研究所
〒243-01 厚木市森の里宮宮 3-1

量子サイズ効果 (Quantum Size Effect)

ド・ブロー波長程度 (GaAs 結晶中で約 500 Å) 以下の空間 (量子井戸) に閉じ込められた電子のエネルギーは量子サイズ効果により量子化されて離散的な値しかとりえなくなる。最も簡単な量子井戸構造は 2 種類の半導体をサンドイッチ型に積層させたヘテロ接合により実現できる。これは半導体超格子の基本構造でもある。この時のエネルギー固有値は電子系の波動方程式を解くことにより簡単に求めることができる。閉じ込めエネルギー (ポテンシャル深さ) が無限大の場合には、井戸幅の 2 乗と有効質量の 1 乗に反比例する。量子数 n に対する依存性は 2 乗であるが、これはポテンシャル井戸の形状が矩形の場合であって、放物線型の場合には n の 1 乗に比例する依存性を示す。閉じ込めの方向以外には自由電子として振舞うので、積層構造で閉じ込められた電子の波数・エネルギー分散は放物型のコーンを重ねた構造となる。

量子閉じこめシュタルク効果 (Quantum Confined Stark Effect)

一般にバルク結晶の励起子は電界を印加すると分離してしまう。超格子の場合でも層に平行な方向に印加すると 10^4 V/cm 程度の電界で分離してしまうが、層に垂直な電界の場合は高電界においても励起子は分離せず、励起子吸収ピークは電界効果によって低エネルギー側へシフトする。この電界効果は量子閉じこめシュタルク効果 (QCSE) と呼ばれている。電界印加により矩形であったポテンシャル井戸の形が非対称になるために生ずる効果で、井戸幅が大きいほど顕著である。QCSE によれば、外部から印加した電界により超格子層の吸収係数と屈折率が制御できるので、実用上きわめて重要であり、光変調器、波長選択形光検出器、全反射型光導波路スイッチなどに応用されている。

共鳴トンネル効果 (Resonant Tunneling Effect)

隣接する量子井戸のエネルギー準位が一致すると 2 つの準位が共鳴し、障壁層を介して流れるトンネル電流が著しく増大する。エネルギー準位の相対関係は超格子層に垂直な電界に依存するので、共鳴状態と非共鳴状態を印加電界により制御した微分負性抵抗素子に應用されている。トンネル効果はきわめて早い現象であるので THz 帯での非線形デバイスとして期待され、種々のデ

バイスに取り込まれている。

表面超格子 (Surface Lateral Lattice)

真空中の清浄な結晶表面に現れる 2 次元超格子 (表面再配列超格子) は Esaki らによって半導体人工超格子が提案される以前から見いだされていたものである。もっぱら表面物性の研究対象であり、実用的見地からの研究は少ない。

半導体超格子の製作に威力を発揮する分子線エピタキシー法で III-V 属化合物半導体結晶を成長する際、供給する III 族元素と V 族元素の割合や基板温度に依存して成長層表面の 2 次元超格子像が変化することから、結晶成長中の in situ モニターとして用いられている。

タイプ I 超格子 (Type I Superlattice)

GaAs-AlGaAs 系に代表される最もポピュラーな超格子である。InGaAs-GaAs, InGaAsP-InP, ZnSe-ZnS 系などもこのタイプに分類される。電子と正孔はともに禁制帯幅の狭い半導体に閉じこめられる。電子と正孔が空間的に同一領域に閉じこめられるので、発光および光吸収遷移を起こし易く、量子井戸レーザ等の光素子に用いられる。電子と正孔を閉じ込めるポテンシャルの形は矩形が一般的であるが、放物線型、鋸歯型なども報告されている。バンド構造に基づく分類を図 1 に示す。

タイプ II 超格子 (Type II Superlattice)

STAGGERED 型: InGaAs-GaAsSb 系にみられるように電子に対するポテンシャル井戸と正孔に対するポテンシャル井戸が異なる半導体に生ずるので、キャリアは空間的に離れて閉じ込められる。ZnTe-ZnSe, ZnTe-ZnS 系超格子もこのタイプに分類される。応用例はまだ少なく、電子と正孔を空間的に分離してなだれ増倍を起こさせる APD (アバランシフォトダイオード) が提案されている程度である。

MISALIGNED 型: InAs の伝導帯の底は GaSb の価電子帯の底よりエネルギー的に低いため、InAs-GaSb 超格子では層厚 150 Å 前後を境にして半金属的性質から半導体的性質に遷移する。すなわち、厚さが 150 Å 以上の場合には、InAs 層に閉じこめられた電子の基底準位は GaSb 層に閉じこめられた正孔の基底準位より低くなるため、電子と正孔が併存した状態、すなわち半金属状態を示す。両者の層厚がこれより薄くなると、量子サイズ効果によるエネルギー固有値の増大にともなって、電子の基底準位は正孔の基底準位より高エネルギーに位置し、エネルギーギャップを生じる結果、半導体的性質を示すようになる。

タイプ III 超格子 (Type III Superlattice)

HgTe は Γ_6 と Γ_8 のバンドが逆転しているため実効禁制帯幅 0 eV の半導体と考えられている。これと CdTe を組み合わせた HgTe-CdTe 超格子では、CdTe と HgTe の層厚に依存して禁制帯幅が 0~1.6 eV の間で調整できるので赤外域の光素子への応用が期待されるが、報告例は少ない。

タイプ I, II, III の分類は Esaki の最近の分類¹⁾ によったが、必ずしも統一されているわけではなく、タイプ

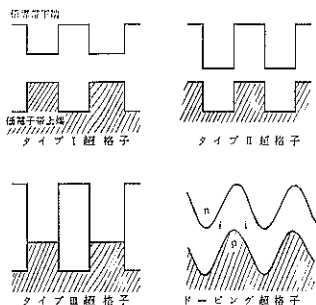


図1 半導体超格子のバンド構造。

II-STAGGERED をタイプ I' としたり, タイプ II-MISALIGNED がタイプ III と呼ばれたりする。

- 1) "Molecular Beam Epitaxy and Heterostructures", ed. by L. L. Chang and K. Ploog (Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht/Boston, 1985) p. 1.

ドーピング超格子 (Doping Superlattice)

半導体ヘテロ接合を用いなくても, n形とp形の不純物を交互にドーピングすることにより, ポテンシャルを変調することが出来る。タイプII超格子と同様, 電子はn形領域, 正孔はp形領域に分離される。実際にはn形とp形の間にノドープのi層を設けるためnipi超格子と呼ばれる。シートドーピング技術によりドーピング層の厚さを単原子層程度にすると, ポテンシャルの形が鋸歯状になるのでSawtooth超格子と呼ばれることもある。ドーピング超格子の実効禁制帯幅は熱平衡状態では母体材料の禁制帯幅よりかなり小さい。これに光を照射すると, 生成された過剰キャリアによりバンドプロファイルが変調されて実効禁制帯幅は増大し, 母体材料の禁制帯幅に近づく。i層にタイプI超格子を組み込んだ複合超格子も提案されている。この場合には生成された過剰キャリアは組み込んだ超格子にかかる電界強度を変調するので, 光照射によりQCSEを制御することができる。

多次元超格子 (Multidimensional Superlattice)

超格子は量子閉じ込めの次元数によって1, 2, 及び3次元超格子に分けることが出来る。単に超格子と言えば1次元超格子(量子薄膜)をさし, 閉じ込められた電子・正孔は2次元の自由度をもつ。閉じ込めの次元が増えるとともに2次元超格子(量子細線), 3次元超格子(量子箱)と呼ばれる。

多次元化に伴って現われるもっとも大きな特徴は状態密度が変調を受けることである。バルク結晶においては, 図2に破線で示したようにエネルギーEに対して状態密度関数ρは, $\rho \propto E^2$ であるが, 1次元超格子では各々のサブバンド内で $\rho \propto E^0$, すなわちエネルギーに依存せずステップ関数になる。2次元超格子ではエネルギー依存性は $\rho \propto E^{-1/2}$ となり, サブバンドの底で状態密度が最大になる。さらに3次元超格子では状態密度は線スペクトルとなり, 孤立した水素原子モデルに類似する。

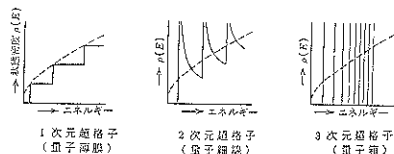


図2 多次元超格子の状態密度。

実験的には GaAs/AlGaAs 系について InGaAs/InP 系での報告が多い。1次元超格子(量子薄膜)を面内方向に微細加工する方法が一般的であるが, 後述する分数超格子を利用する方法もある。また, ガラス媒体中に半導体超格子を分散させた半導体ドーパガラス(色ガラスフィルター)も量子箱の一種と考えることができる。

歪超格子 (Strained Layer Superlattice)

半導体超格子は, 通常は多数のヘテロ接合の集合であるから, 格子整合系で構成するのが理想的である。GaAs-AlGaAs 系超格子が最も良く研究されているのは当然と言える。一方, 格子不整合系であっても超格子の様に各層がきわめて薄い場合には転位は発生せず, 格子不整が格子歪により緩和され得る。格子整合の制約を受けない材料の選択が可能であるという製作上の利点の他に, 内部応力の効果により現れる新しい物性が期待されている。例えば, 重い正孔と軽い正孔のバンドを反転して価電子帯の有効質量を制御したり, 間接遷移半導体を用いて直接遷移形超格子を製作することが可能となる。

歪超格子の材料としては, InAs-GaAs 系が最もポピュラーであり実用的な見地からの研究も多い。Si-Ge 超格子では直接遷移によると思われる発光が観測されたという報告もある。

分数層超格子 (Fractional Layer Superlattice)

(100) 面等の低指数面から数度傾いた表面は理想的には図3に示すような数十Åの幅をもつ周期的な一原子層ステップ構造をしている。ステップの端から2次元成長が起こるような成長モードによりこのような表面に結晶成長する場合を考える。A及びBの半導体層が1/2層ずつ成長するように交互に原料を供給するとAとBの層が基板に対して縦に積層した構造が得られる。この様に一層の中に異なる半導体層を有する超格子を分数層超格子または通常の超格子と区別する意味で縦超格子と呼ぶ。

アイデアは5年ほど前にだされたが実際に製作されたのは最近である。分数層超格子は基板面内に周期性をもつことから量子細線の製作に応用され, これを活性層に用いたレーザーが光励起発振したという報告がある。

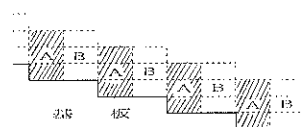


図3 分数層超格子の模式図