

■S2 群 (ナノ・量子・バイオ) - 2 編 (ナノエレクトロニクス)**2 章 化合物半導体ナノエレクトロニクス**

(執筆者: 水谷 孝) [2010 年 2 月 受領]

■概要■

化合物半導体では、エピタキシャル結晶成長技術の進展により、異なる半導体材料の多層構造で構成されヘテロ接合が容易に形成できるようになったこと、このヘテロ接合では電子に対するポテンシャル障壁が形成され電子閉じ込めが可能であること、更にはヘテロ接合界面には電子が蓄積され、高い移動度をもった電子の実現が可能であることなどの特徴を有する。これらの特徴からナノ領域においては、電子の量子力学的性質が顕著に現れ、この性質を積極的に利用したナノデバイスが盛んに研究されるようになってきており、ナノエレクトロニクスへの展開が期待されている。

電子の量子力学的性質の代表的なものとしては、電子が波として振る舞うことであろう。電子の波としての性質は、量子準位の形成、電子波干渉、トンネルといった形で現れてくる。このような電子の波動性に起因する現象をデバイスとして活用するためには、電子波の位相を保持することが重要であり、このためにはデバイスの寸法は電子の平均自由行程よりも小さい必要がある。ナノエレクトロニクスと言われる所以であり、化合物半導体の電子移動度が高いのは有利となる。また、化合物半導体の分子線エピタキシャル成長法や有機金属気相成長法では、ナノメートルレベルの薄膜成長が可能であり、この点も化合物半導体ナノエレクトロニクスが盛んに研究されている理由である。

2-1 節の量子ドットデバイスでは、四方をポテンシャル障壁で囲まれたナノメートルレベルの量子井戸 (ドット) における、1 個 1 個の電子のトンネルに着目した単電子デバイスについて述べている。電子の電荷に着目するのみでなく、最近では量子計算の要素素子としての期待から、量子ドットにおける電子スピンの挙動も注目を集めている。

2-2 節の量子細線デバイスでは、エピタキシャル結晶成長の精密制御による量子細線の作製技術について述べるとともに、量子細線トランジスタの高移動度の可能性、量子細線レーザにおける低しきい電流の可能性について述べている。

2-3 節の電子波デバイスでは、マッハツェンダー干渉計と類似の干渉デバイス、電子波に対するスリット (ポイントコンタクト) とエレクトロンフォーカシング、電子波回折トランジスタなどについて述べている。

2-4 節の超格子デバイスでは、多層ヘテロ接合に垂直方向に流れる電子に着目したブロッホ振動とテラヘルツ発振、共鳴トンネルデバイスとその超高速回路応用について述べている。

【本章の構成】

本章は、化合物半導体ヘテロ接合とナノ構造から作製される量子ドットデバイス (2-1 節)、量子細線デバイス (2-2 節)、電子波デバイス (2-3 節)、超格子デバイス (2-5 節) より構成されている。

■S2 群-2 編-2 章

2-1 量子ドットデバイス

(執筆者：石橋幸治) [2009年1月 受領]

量子ドットとは、電子ナノスケールの狭い空間に閉じ込める構造である。化合物半導体を用いた量子ドット構造は比較的容易に形成できるために、それを舞台にした量子ドットの物理が盛んに研究されている。量子ドットを作製するのに最もよく利用されるのは表面ゲート法と呼ばれる方法で、ショットキーゲートを GaAs/AlGaAs 2次元電子ガス基板上に蒸着し(図 2・1(b), (c)), 負の電圧を印加することによりゲート直下の電子を空乏化させ、量子ドットを形成する¹⁾。量子ドットに電流を流して物性を測定するデバイスは単電子トランジスタと呼ばれる(図 2・1(a))。量子ドットは単電子トランジスタ回路の中では、電気的に浮いているので、ゲート電圧で量子ドットのポテンシャルを変えることができる。

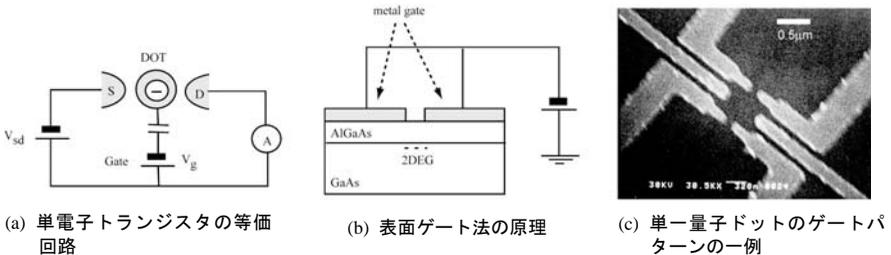


図 2・1 量子ドットデバイス

量子ドットに重要なエネルギースケールは、1 個の電子を量子ドットに充電するために必要な 1 電子帯電エネルギー ($E_c = e^2/C_D$) と、閉じ込めにより形成される離散化準位の間隔 (ΔE) である。電子ビーム露光法で作製した表面ゲートでは、量子ドットサイズはサブミクロン程度が普通なので、前者は 1 meV 程度、後者は 0.1 meV 程度であるのが普通である。したがって、これらのエネルギーが重要になるのは、通常 1 K 以下の極低温である。量子ドットが十分小さい場合、電子のトンネルは 1 個単位で生じる。それを制御する単電子トランジスタの動作は、ソース・ドレイン電圧 (V_{sd}) とゲート電圧 (V_g) によって決まる²⁾。図 2・2(a) は、表面ゲート法で作製した GaAs/AlGaAs 単一量子ドットの微分コンダクタンスを V_{sd} と V_g の関数でグレースケールプロットした、いわゆるクーロンダイヤモンドと呼ばれる図である。色が白いほどコンダクタンスが小さく、すなわち電流が流れにくくなっていることを表す(クーロンブロックイド)。ゲート電圧に沿って、クーロンブロックイドの菱形領域が周期的に並んでいるのが特徴で、各菱形の中では電子数は固定されており、隣り合う菱形では電子数は正確に 1 個だけ異なる。 V_{sd} がゼロに近い線形応答領域で、 V_{sd} をスイープして電流を測定すると、図 2・2(b) に示すように菱形が接したところだけにスパイク状に電流が流れる。これをクーロン振動という。単電子トランジスタではドット内の電子数を正確に 1 個だけ変えることができることを利用して、トンネル障壁に印加する交流電圧 1 周期で電子を 1 個だけドットを通過させるターンスタイルというデバイスが実証されており、電流標準として用いることができる³⁾。この場合、電流は周波数 f によって $I = ef$ のように与えられる。

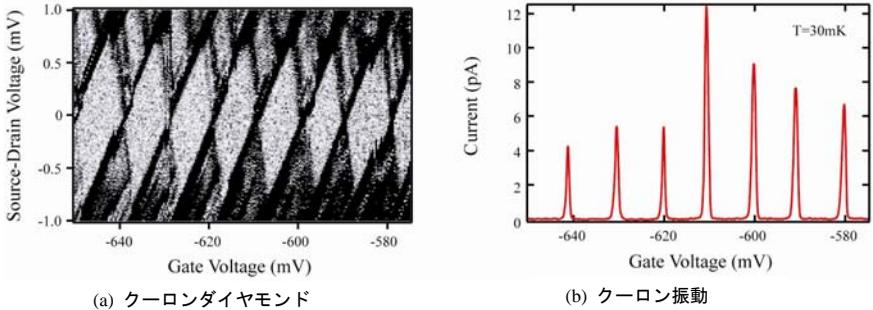


図 2.2 単一量子ドットのクーロンダイヤモンドとクーロン振動

単一量子ドットでは、ゲート電圧を負にかけていくと、量子ドット内の電子数は 1 個ずつ減っていく。そして最後には、電子 1 個の状態を作ること也有可能である。このように電子数が少ない領域（少数電子系）では、人工原子としての性質が現れる⁴⁾。すなわち、量子ドットの閉じ込めポテンシャル（半導体人工原子の場合 2 次元調和振動子型）によって決まる量子状態の縮退構造（電子殻構造）が、1 電子帯電エネルギーに現れる。例えば、縮退したエネルギー準位では電子の入り方に総スピン数を大きくしようとする Hund 則が見られる。

量子ドット中の電子数が 1 個の状態は、まさにスピン量子ビット（スピン 2 準位系）である。これを外部からの電磁波で操作し、スピンの向きを検出する実験も行われている。化合物半導体の場合、スピン軌道相互作用が強く、また、ホスト原子が核スピンを有することから、電子スピンは安定ではなく量子ビットの候補として有効ではないことが分かってきている。しかし、スピン軌道相互作用を逆に利用して電圧でスピンの向きを操作し、ラビ振動を観測した例が報告されている⁵⁾。このとき、スピンの向きの検出には、スピンプロックイドという現象を利用する⁶⁾。

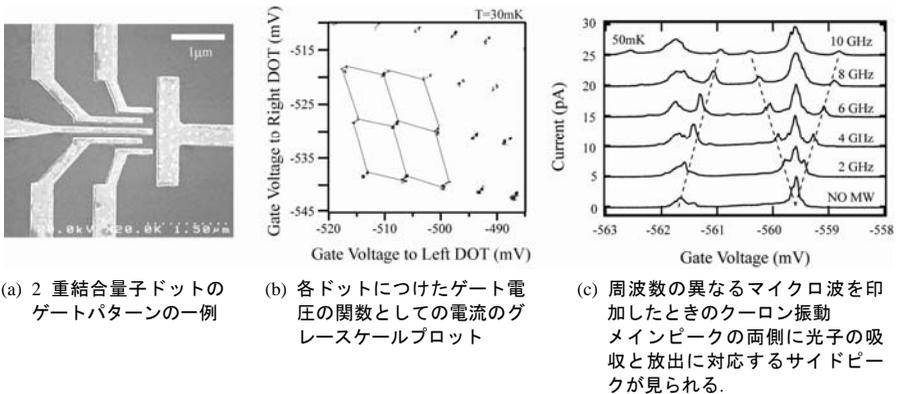


図 2.3 2 重結合量子ドット

単一量子ドットが人工原子であるならば、2 重結合量子ドットは人工分子と考えられる。

図 2.3(a)には 2 重結合量子ドットのゲートパターン、図 2.3(b)には二つのゲート電圧の関数

としての電流をグレースケールプロットした。図から分かるように、 V_{sd} が小さい場合、電流が流れる領域は蜂の巣状のパターンを形成することが知られている。各量子ドットに形成された量子準位間で光（マイクロ波）アシストトンネルも実現されており（図 2・3(c)）、この手法を二つの準位間隔を調べるスペクトロスコープとして用い、結合軌道と反結合軌道からなる人工分子が形成されることも示されている⁷⁾。2重結合量子ドットに電子を1個入れた状態は、電子がどちらのドットにいるかという意味で電荷型量子ビットと考えることもでき、実際、ラビ振動の観測も行われている⁸⁾。

■参考文献

- 1) T. J. Thornton, M. Pepper, H. Ahmed, D. Andrews, D. J. Davis, "One-dimensional conduction in the 2D electron gas of GaAs-AlGaAs heterojunction," Phys. Rev. Lett. vol.56, no.11, pp.1198-1201, 1986.
- 2) D. V. Averin and K. K. Likharev, "Mesoscopic Phenomena in Solids," eds. B. Altshuler, P. A. Lee and R. A. Webb (Elsevier Science Publishers, 1991) Chap.6.
- 3) L. P. Kouwenhoven, A. T. Johnson, N. C. van der Vaart, C. J. P. M. Harmans, C. T. Foxson, "Quantized current in a quantum dot turnstile using oscillating tunnel barriers," Phys. Rev. Lett. vol.67, no.12, pp.1626-1629, 1991.
- 4) S. Tarucha, DG. Austing, T. Honda, RJ. vanderHage, LP. Kouwenhoven, "Shell filling and spin effects in a few electron quantum dot," Phys. Rev. Lett. vol.77, no.17, pp.3613-3616, 1996.
- 5) K. M. Nowack, F. H. L. Koppen, Yu. V. Nazarov, L.M.K. Vandersypen, "Coherent control of a single electron spin with electric fields," Science, no.318, pp.1430-1433, 2007.
- 6) K. Ono, DG. Austing, Y. S. Tokura, "Current rectification by Pauli exclusion in a weakly coupled double quantum dot system," Science, no.297, pp.1313-1317, 2002.
- 7) T. H. Oosterkamp, T. Fujisawa, W. G. van der Wiel, K. Ishibashi, R. V. Hijman, S. Tarucha and L. P. Kouwenhoven, "Microwave spectroscopy of a quantum-dot molecule," Nature, no.395, pp.873-876, 1998.
- 8) T. Hayashi, T. Fujisawa, HD. Cheong, YH. Jeong, Y. Hirayama, "Coherent manipulation of electronic states in a double quantum dot," Phys. Rev. Lett., vol.91, no.22, 226804, 2003.

■S2 群-2 編-2 章

2-2 量子細線デバイス

(執筆者：福井孝志) [2009年12月 受領]

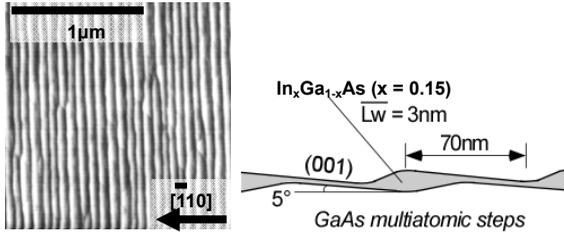
超微細加工技術の発展により、半導体をナノメートルスケールで加工することが可能になっている。化合物半導体では、材料の異なる異種接合構造を用いることで、電子に対してポテンシャルの障壁を設けることができ、数 10 nm の極微小領域に電子を閉じ込めたり、また電子の通り道に薄い障壁を設けた場合、電子の量子力学的な性質が顕著になる。この性質を利用することにより、トンネル効果素子、2 次元電子トランジスタ、電子波干渉素子、あるいは電子 1 個 1 個を操作する単電子素子などの新しい機能をもつデバイスへの道が開かれる。量子細線構造を活性層に利用した半導体レーザーにおいては、従来の半導体レーザーに比べて、低閾値動作、温度安定性などの特性の向上が、理論的に予測されている¹⁾。また、量子細線トランジスタでは、電子の散乱を抑制することで、高移動度が得られる可能性が指摘されている。これらの量子細線を利用した量子効果デバイスを実現するためには、活性領域となる線状の半導体を他の半導体材料で覆い尽くす必要がある。また、電子の低次元性の特長を生かすためには、サイズの均一性も非常に重要になる。

半導体量子井戸構造に関しては、多層薄膜形成技術を用いて、容易に作製されてきたが、数 10 nm の線状の結晶（量子細線）を他の結晶で完全に覆い尽くすには、工夫が必要である。一般的な方法は、多層薄膜の結晶成長から結晶加工、更に結晶成長（再成長）と繰り返す方法である。最初の結晶成長で、量子井戸構造を形成した後、リソグラフィとエッチングにより細線状に加工し、更に加工側壁を 2 度目の再成長により埋め込むことにより、量子細線を形成する方法である。細線幅とその均一性がリソグラフィ技術の精度に依存する、再成長界面の欠陥の低減など様々な課題はあるが、InGaAs/InP 系で良好な発光特性をもつ量子細線レーザーが報告されている²⁾。

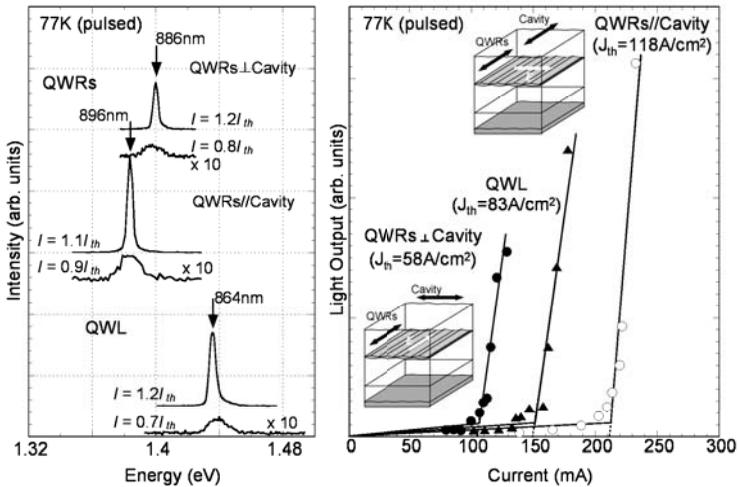
一方、活性領域に対して、加工技術を介すことなく、結晶成長のみで量子細線を形成することも可能であり、有機金属気相成長法（MOVPE 法）、あるいは分子線エピタキシャル成長法（MBE 法）で作製された量子細線デバイスが報告されている。例えば、化合物半導体の微傾斜面上のステップを起点に、横方向に成長するステップフローモードを利用して、細線構造を自然形成する方法である³⁾。この方法の利点は、量子細線を形成するにあたり、使用する基板結晶の方位を変える以外、特別な加工技術をいっさい必要としない点である。GaAs 量子細線の例では、結晶成長用基板として、(001)面から(111)面方向にわずかに傾斜したいわゆる微傾斜 GaAs(001)基板が用いられている⁴⁾。正確な膜厚制御技術を必要とするなどの、作製技術上の困難さに関わらず、量子細線レーザー⁵⁾への応用が報告されている。

更に、MOVPE 法を用いてこのような基板上に GaAs 層を厚く成長すると、結晶表面上に単原子層ステップが会合し、一定の周期をもった多原子層のステップ、いわゆる多段原子ステップ構造が形成される。この多段原子ステップを利用して InGaAs 量子細線レーザーが報告されている⁶⁾。図 2・4 は GaAs 多段原子ステップの原子間力顕微鏡像と量子細線構造の模式図、及び InGaAs 量子細線を活性層に有するレーザーの 77 K におけるパルス注入電流-光出力特性である。レーザー共振器を細線に平行及び垂直方向とした量子細線レーザー、及び、同時に作製した量子井戸レーザーの電流-光出力特性である。量子細線レーザーの発振スペクトル位置は、

量子井戸レーザに対して、50 meV 程度低エネルギー側にシフトしている。量子細線レーザの利得の異方性に関する計算によると、共振器方向が量子細線の方向に対して垂直のときに、レーザの利得が最大になる。



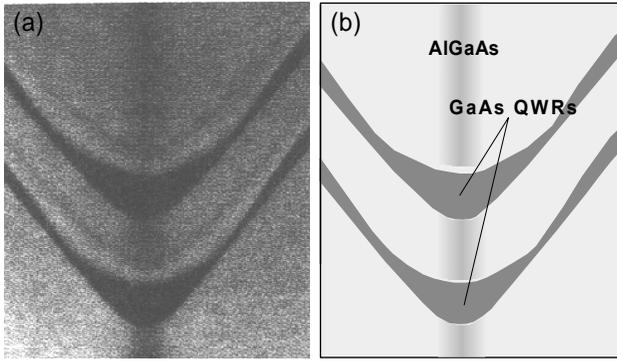
(a) GaAs 多段原子ステップの原子間力顕微鏡像と量子細線構造の模式図



(b) InGaAs 量子細線を活性層に有するレーザの 77 K におけるパルス注入電流-光出力特性

図 2・4

エピタキシャル成長用の基板にサブミクロンから数ミクロンの周期で加工を施し、その上に多層構造を結晶成長すると、成長層は必ずしも基板表面の凹凸を正確に踏襲するのではなく、成長速度の不均一が生じる。これは、表面上の原子の拡散及び、加工の際に現れる側面のファセット面の性質によるものである。これらの現象を利用して、特定の場所に厚く成長することにより量子細線が形成される。この技術を用いて、V 溝をもつ GaAs (001) 基板上に、MOVPE 法により GaAs/AlGaAs 量子細線レーザが作製されている⁷⁾。量子細線形成の原理は、AlGaAs の成長時に正確な {111} A ファセット面が現れ、溝の底が V 字形を保つのにに対し、GaAs の成長時には、V 溝の底に GaAs がやや厚く成長する性質による。図 2・5 に多重量子細線の断面 TEM 写真とその模式図を示す。



(a) 加工 V 溝基板上の多重量子
細線の断面 TEM 像

(b) その模式図

図 2・5

■参考文献

- 1) Y. Arakawa and H. Sakaki, Appl. Phys. Lett., vol.40, 939, 1982.
- 2) M. Notomi, M. Okamoto, H. Iwamura, and T. Tamamura, Appl. Phys. Lett., vol.62, 1094, 1993.
- 3) P. M. Petroff, A. C. Gossard, and W. Wiegmann, Appl. Phys. Lett., vol.45, 620, 1984.
- 4) T. Fukui and H. Saito, Appl. Phys. Lett., vol.50, 824, 1987.
- 5) A. Chavez-Pirson, H. Ando, H. Saito, and H. Kanbe, Appl. Phys. Lett. vol.64, 1759, 1994.
- 6) S. Hara, J. Motohisa, and T. Fukui, Electron. Lett. vol.34, 894, 1998.
- 7) E. Kapon, D. M. Hwang, and R. Bhat: Phys. Rev. Lett., vol.63, 430, 1989.

■S2 群-2 編-2 章

2-3 電子波デバイス

(執筆者：宮本恭幸) [2009年1月 受領]

電子の走行する距離が短くなり、走行中に散乱がない場合は、位相などの波としての情報を保持し続ける。この波による干渉などを機能に反映させた電子デバイスが電子波デバイスである。結晶成長による極薄膜内などに電子を閉じ込めることで量子準位を形成することも波の性質を用いているが、ここでは、それ以外の効果を使った電子デバイスについて述べてよう。

電子の走行中に散乱しない状態にするためには、電子の平均自由行程よりも小さな構造を作る必要がある。一般的な半導体の平均自由行程は 10 nm のオーダーである。したがって、現在の電子ビーム露光などを用いた微細構造の最小寸法とほぼ等しく、波としての制御をするための波長程度の周期を形成することは難しい。そこで、注目されたのが、GaAs/AlGaAs 変調ドーパヘテロ構造¹⁾である。特に低温にした場合は、その移動度²⁾は高くなり、現在では極低温での移動度が $1000 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{sec}$ を超え³⁾ 平均自由行程も数百 μm に達している。したがって、電子ビーム露光を使えば、位相を保てる平均自由行程内で、位相などの情報を制御し干渉させるための構造を作れるようになり、得られた現象はメゾスコピック現象と呼ばれている。

まず、アハラノフ=ボーム効果を観測するための微小金属リング⁴⁾から着想を得た二つの異なる経路をたどった電子を干渉^{5,6)}させて、オンオフを行うことが提案された。これは、光におけるマッハツェンダー干渉計と同じ原理である。最初の試みは、アハラノフ=ボーム効果を確認するための同様に磁場をかけて位相を変化^{5,7)}させるものであり、電子デバイスとしてよりは、物性的理解のために行われた。しかしながら、半導体内の電子の波数は、電子のもっているエネルギーの平方根に比例するので、**図 2・6**のように伝導帯底のポテンシャルを変化させることで、波数も変えることが可能である。したがって、電子の走行する二つの経路に異なる電圧を印加することで、位相差を作りオンオフ⁶⁾をすることができる。

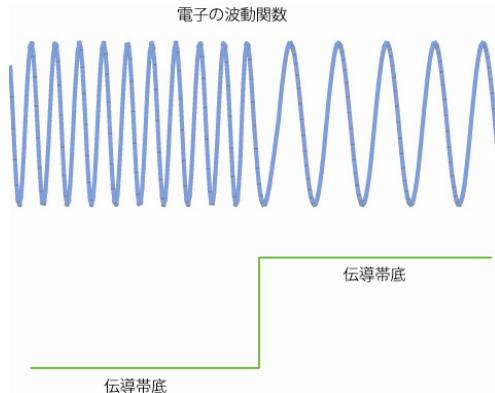


図 2・6 伝導帯底の変化による電子の波数の変化

二次元電子ガスではショットキー電極を表面に形成して、そこに電圧を印加することで、電極の下を流れる電子の感じるポテンシャルを変化させることができる。更に、大きな電圧を加えれば、二つの電極間のポテンシャルを操作して幅の狭いスリットを作り、導波路として働かせることも可能になる。導波路においては許されるモードの数によって電流が流れるようになる。これは、スリット幅を変えたときの伝導度の変化が明瞭な階段状になることから確認⁸⁾され、ポイントコンタクトと呼ばれる。また、電子スリットから出てきた電子は、二次元電子ガス平面上で絞り込まれた電子ビームとして働くことができる。これはスリットから出てきた電子ビームを磁場で曲げて、再びスリットに入れるエレクトロンフォーカシングと呼ばれる現象⁹⁾で確認された。

以上を組み合わせると、二次元電子ガスの平面内で、電子ビームを出射し、その波数を場所によって変化させ、位相変化を行うことが可能になる。電子ビームの一部を、電子の一部が電圧が印加された電極下を通り過ぎて位相変化を作り、電極下を通らない電子と干渉させることで、電圧変化による周期的な変化が観測された¹⁰⁾。同じくスリットから出射した電子をレンズ¹¹⁾やくさび形¹²⁾の電極構造の下に入射させ、その下を通過した電子を曲げることで、電子の流れの方向を変える実験も行われた。

ここまでの実験は GaAs 系材料で極低温で行われているものである。一方、室温においては、InGaAs/InP 系材料の方が GaAs 系よりも高い移動度をもっている。そこで、InGaAs 系材料を用いることで、電子スリットを室温でも動作させることが可能となる。そこで、この電子スリットにより出射した電子ビームを傾いた反射面にぶつけることで、整流性を得ることが可能になった。この素子は数十 GHz 帯での動作が確認¹³⁾されている。

これ以外にも二次元電子ガス構造のうねに格子状の電極構造を作ってブラッグ反射と同様の現象を起こす試み¹⁴⁾や、二次元電子ガスを使ってマイクロ波におけるスタブの概念を用いたトランジスタ¹⁵⁾の提案なども行われている。

一方、電子の速度は波数に比例する。そこで、電子を速い速度で走らせたい場合には、構造を小さくする必要がある。InGaAs 中では電子に 100 meV 程度のエネルギーを与えるだけで、 7×10^7 cm/s 程度の速度を与えることができる。そのときの散乱要因は LO フォノン散乱またはプラズモン散乱となるが、プラズモン散乱は、キャリア濃度が低い真性領域を走行させるときには避けることができる。そこで、フォノン散乱時間を 0.1 ps 程度と考えると、数十 nm 程度は無散乱で走行できる¹⁶⁾。したがって、その中にすべての構造を入れ、ホットエレクトロンと呼ばれる高いエネルギーをもった電子を入射すれば、高速な電子波デバイスの実現が可能となる。そのような構造として電子波回折トランジスタ¹⁷⁾が提案された。予備実験として、スリット間隔 25 nm の InGaAs/InP ヘテロ構造による微細ダブルスリットにホットエレクトロンを入射させての干渉が確認¹⁸⁾され、ポイントコンタクトとは違い、平面的な構造から電子を取り出しているものの、出てきた電子のコヒーレンスが空間的に保たれていることが示された。

■参考文献

- 1) R. Dingle, et al., Appl. Phys. Lett., vol.33, 665, 1978.
- 2) K. Hirakawa et al., Phys. Rev. B, vol.33, 8291, 1986.
- 3) R. L. Willett, et al., Phys. Rev. Lett., vol.54, 2696, 1985.
- 4) R. A. Webb, et al., Phys. Rev. Lett., vol.54, 2696, 1985.

- 5) S. Datta, et al., Phys. Rev. Lett., vol.55, 2344, 1985.
- 6) S. Datta, et al., Appl.Phys.Lett., vol.86, 487, 1986.
- 7) G. Timp, et al., Phys. Rev. Lett., vol.58, 2814, 1987.
- 8) B. J. van Wees, et al., Phys. Rev. Lett., vol.60, 848, 1988
- 9) H. van Houten, et al., Phys. Rev. B, vol.39, 8556, 1989
- 10) A. Yacoby, et al., Phys. Rev. Lett., vol.66,1938, 1991.
- 11) J. Spector, et al., Appl. Phys. Lett., vol.56, 1290, 1990
- 12) J. Spector, et al., Appl. Phys. Lett., vol.56, 2433, 1990
- 13) A. M. Song,et al., Jpn. J. Appl. Phys., vol.40, L909, 2001
- 14) Y. Tokura, et al., Appl. Phys. Lett., vol.51, 1807, 1987.
- 15) F. Sols, et al., Appl. Phys. Lett., vol.54, 350, 1989.
- 16) M. Igarashi, et al., Physica Status Solidi(C), vol.5, 70, 2008.
- 17) K. Furuya, J. Appl Phys., vol.62, 492, 1987.
- 18) K. Furuya, et al., Phys. Rev. Lett., vol.91,216803, 2003.

■S2 群-2 編-2 章

2-4 超格子デバイス

(執筆著：浅田雅洋) [2009年1月 受領]

半導体中の電子波の波長と同程度 (数~数十 nm) の周期で極薄膜多層構造を形成すると、**図 2・7** に示すように、電子のエネルギーにミニバンドが形成される¹⁾。伝導帯の電子に対してポテンシャルの高い層と低い層それぞれが、価電子帯のホールに対してもそのようになっているものはタイプ I 超格子、ホールに対しては逆になっているものはタイプ II 超格子と呼ばれる。材料系としては GaAs/GaAlAs や GaInAs/InP などのヘテロ接合や p 型と n 型の反復によるドーピング超格子など種々の組合せがある^{2)~4)}。金属/絶縁体超格子も報告されている⁵⁾。ポテンシャルの高さは数百 meV~1 eV 程度、ミニバンドやミニギャップの幅は数~数百 meV である。

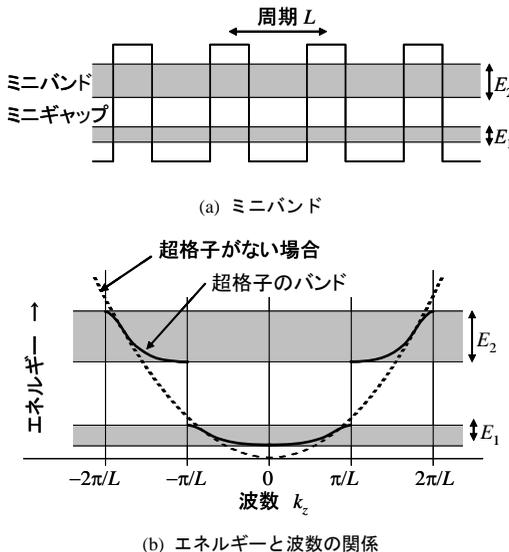


図 2・7 超格子のミニバンド形成

このような超格子に電界を印加して電子を加速すると、散乱の影響が少ないうちに電子はブリルアンゾーンの端に達してブラッグ反射され、実空間と波数空間で往復運動 (ブロッホ振動) を起こす。この振動による負性抵抗特性と増幅・発振が予測されている¹⁾。ブロッホ振動の周波数は、103~104 V/cm 程度の比較的弱い電界でも数百 GHz~数 THz に及ぶため、これを用いるテラヘルツ発振デバイスが期待されている。テラヘルツ帯での増幅利得は時間分解テラヘルツ分光法により観測されている⁶⁾。

数層の極薄膜だけで構成されているデバイスとしては共鳴トンネルダイオード (RTD) がある。RTD は 1973 年に理論的に予測され⁷⁾、液体窒素温度⁸⁾及び室温⁹⁾での動作達成を経て、現在、代表的な量子効果デバイスのひとつとなっている。

図 2・8 は二重障壁共鳴トンネルダイオードの動作を示す。バイアス電圧印加により、エミッタの伝導帯端が共鳴準位にほぼ一致したときに電流はピークになり、それ以上のバイアス電圧では、電圧上昇とともに電流が減少する負性抵抗領域が見れる。材料系としては、ピーク電流やピーク対バレー電流比を大きくできる組合せとして、第 2 共鳴準位が十分高くできるような高く薄い障壁、底の深い量子井戸などが適している。

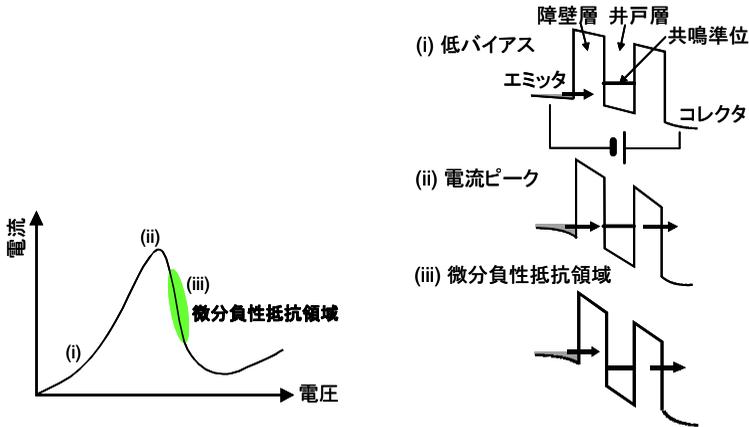


図 2・8 2重障壁共鳴トンネルダイオードの電流-電圧特性とポテンシャルの変化

デバイスとしては、高周波発振素子¹⁰⁾や高速論理回路素子¹¹⁾への応用が期待されている。負性抵抗領域を利用した高周波発振では、これまでに基本波で 712 GHz¹²⁾、高調波で 1.02 THz の発振¹³⁾が報告されており、最近、基本波で 831 GHz の発振も報告された¹⁴⁾。これらはいずれも、現時点において単体の室温電子デバイス中で最高の発振周波数である。極短パルス発生も報告されている¹⁵⁾。これらの特性から、光と電波の中間にあり種々の応用が期待されるテラヘルツ帯でのコンパクトな光源の一候補として期待されている。現在のところ出力は $10\mu\text{W}$ 程度と小さいが、インピーダンス整合やアレイ構成により高出力化が可能と考えられている¹⁰⁾。

高速論理回路への応用では、周波数デバィダ、カオス発生、MOBILE (MONostable-BIstable Logic Element) による高速 AD 変換器など、通常のトランジスタより簡単な回路で高速な論理動作が報告されている¹¹⁾。

共鳴トンネルダイオードにコレクタ層を追加した共鳴トンネルホットエレクトロントランジスタ (RHET) やそれによる単一素子での XNOR 論理回路も報告されている¹⁶⁾。

■参考文献

- 1) L. Esaki and R. Tsu, IBM J. Res. Dev., vol.14, 61, 1970.
- 2) C. Weisbuch and B. Vinter, "Quantum Semiconductor Structures," Academic, New York, 1991.
- 3) F. Cappaso, Ed., "Physics of Quantum Electron Devices," Springer, Berlin, 1990.
- 4) 佐々木昭夫, "量子効果半導体," 電子情報通信学会, コロナ社, 2000.
- 5) 渡辺正裕, 末益 崇, 浅田雅洋, 応用物理, vol.63, 124, 1994.

- 6) N. Sekine and K. Hirakawa, Phys. Rev. Lett., vol.94, 057408, 2005.
- 7) R. Tsu and L. Esaki, Appl. Phys. Lett., vol.22, 562, 1973.
- 8) L. L. Chang, L. Esaki, and R. Tsu, Appl. Phys. Lett., vol.24, 593, 1974.
- 9) M. Tsuchiya, H. Sakaki, and J. Yoshino, Jpn. J. Appl. Phys., vol.24, L466, 1985.
- 10) M. Asada, S. Suzuki, and N. Kshimoto, Jpn. J. Appl. Phys., vol.47, 4375, 2008.
- 11) 前澤宏一, 電子情報通信学会論文誌, J88-C, 295, 2005.
- 12) E. R. Brown, J. R. Sönderström, C. D. Parker, L. J. Mahoney, K. M. Molvar and T. C. McGill, Appl. Phys. Lett., vol.58, 2291, 1991.
- 13) N. Orihashi, S. Suzuki, and M. Asada, Appl. Phys. Lett., vol.87, 233501, 2005.
- 14) S. Suzuki, A. Teranishi, K. Hinata, M. Asada, H. Sugiyama, and H. Yokoyama, Int. Conf. Indium Phosphide and Related Materials, Newport Beach, CA, USA, 2008.
- 15) N. Kamegai, S. Kishimoto, K. Maezawa, T. Mizutani, H. Andoh, K. Akamatsu, and H. Nakata, Jpn. J. Appl. Phys., vol.47, 2833, 2008.
- 16) N. Yokoyama, K. Iwamura, S. Muto, S. Hiyamizu, and H. Nishi, Jpn. J. Appl. Phys., vol.24, L853, 1985.