

解説

電子波へのフーリエ展開応用の可能性

古屋 一 仁

東京工業大学工学部電気電子工学科 〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1

(1992年2月7日受理)

Application Possibility of Fourier Expansion to Electron Wave

Kazuhito FURUYA

Department of Electrical and Electronics Engineering, Tokyo Institute of Technology,
2-12-1, Ohokayama, Meguro-ku, Tokyo 152

1. はじめに

光の領域で活用されているさまざまな現象に対応する電子現象を用いる新しい電子デバイスを探索することは大変興味深い。この類推は、電子の振舞いを記述する量子力学の方程式が電磁波の方程式と時間微分項を除いて同一であることに基づいており、本来、電子は波動性を有している。しかし、従来の電子デバイスのような“大きな”空間構造内では、さまざまな散乱現象のために電子の波動性は顕著には現れてこなかった。

ところが、最近、結晶成長法の発達により原子層オーダーの超薄層構造を作ることができるようになり、さらにこの超薄層表面に電子ビーム等によりパターンを描画して、電子の波長程度の超微細構造を結晶中に作り込むことが可能になりつつある。このようにして形成した電子波長、10~50 nm 程度の“小さな”構造内では、電子はその波動的位相情報を保持したまま伝搬するようになり、上記の波動方程式で予測される現象が実際に現れてくる。すなわち、電子波の干渉、回折、さらには空間伝搬によるフーリエ変換機能などが現れる可能性が生じてくる。

本文では、光と電子波との類推関係、両者の本質的な違い、電子波ブラッグ反射現象、回折現象、そしてデバイスへの応用の可能性と課題について述べる。

2. 光波と電子波—その類似性

原子が周期的に配置された結晶中には周期ポテンシャルが形成されており、その中で電子の振舞いを記述するシュレーディンガー方程式の解 $\phi(z)$ は次のようなブ

ッホ関数で表される。

$$\phi(z) = u(z) \exp(ik \cdot z)$$

ここに、 z は電子の進行方向の座標、 $u(z)$ は結晶の原子間隔を周期とする周期関数、 k は定数である (周期構造中の電波伝搬に慣れた読者にはフロークの定理を思い出していただきたい)。図1に $\phi(z)$ の様子を概念的に示す。 $u(z)$ は原子間隔程度の範囲内で速く変動する因子であり、 $\exp(ik \cdot z)$ はより緩やかに変動する因子 (包絡線関数) である。結晶内を動き回る様子は主にこの包絡線関数が描写する。今、結晶中に超微細構造を作り込んだとする。尺度は原子間隔よりは十分大きい。この超微細構造は包絡線関数を $\exp(ik \cdot z)$ から $\phi(z)$ に変化させる。そして包絡線関数 $\phi(z)$ はシュレーディンガー方程式から誘導される次の有効質量方程式の解として与えられる。

$$\nabla^2 \phi + (2m^*/\hbar^2)(E - V(z))\phi = 0$$

ここに、 \hbar はプランクの定数を 2π で割った値、 m^* は電子の有効質量、 E は電子エネルギー、そして、 $V(z)$ は超微細構造に対応するポテンシャル分布である。お気付きのように、有効質量方程式 (空間関数部分) は次の電磁波の波動方程式 (空間関数部分) と同形である。

$$\nabla^2 E + \omega^2 \varepsilon(z) \mu E = 0$$

ここに E は電界、 ω は角周波数、 $\varepsilon(z)$ は誘電率分布、 μ は透磁率である。そこで包絡線関数を電子波と呼ぶことにしよう。電子波は均質結晶中を自由空間の電磁波のように伝搬し、不純物や人工の構造により電磁波と同様に散乱されることになる。

なお時間を含むシュレーディンガー方程式には時間の1階微分項が含まれる。このことに基づく電子波の分散関係は角周波数 ω が伝搬定数 k の二乗に比例する放物線特

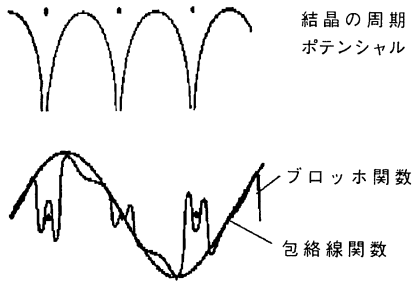


図1 結晶内の電子の波動関数の概念図

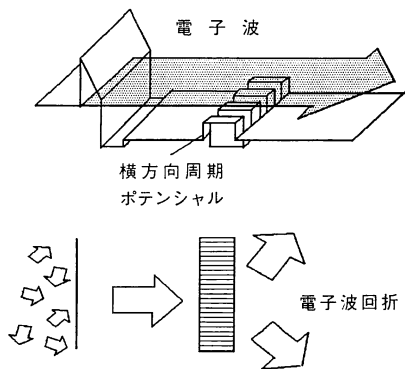


図2 電子波回折の概念図

性をもつ。一方、よく知られるように、物質による分散を除けば、光の分散関係 ($\omega-k$ 関係) は直線特性で、位相速度も群速度も角周波数には依存せず、伝搬光の時間波形は保たれる。ところが、電子波の時間波形は伝搬すると変形していき、光の場合とは大いに異なる。

通常の結晶内で熱平衡状態の電子はさまざまな向きおよび大きさの波数ベクトルで伝搬する電子波が混合している。そこで、例えば図2に示すように、薄いポテンシャル障壁をトンネル通過させることで向きおよび大きさが揃った電子波、すなわち、コヒーレントな平面波、を取り出して結晶内に伝搬させることができる。

結晶を伝搬する電子波は波長変化を起こす非弾性散乱や入射波を同一波長の散乱波に一部変換する弾性散乱を受ける。電子電子散乱やフォノン放出が前者の、イオン化不純物散乱が後者の代表的散乱要因である。これらの散乱が生じるまでの寿命時間以内で電子波はコヒーレントに伝搬することができる。このコヒーレント伝搬の距離は0.2~数 μm 程度であり、この距離内に人工的に構造を作り込むことは、現在、十分可能になってきている。

3. ボース粒子とフェルミ粒子—コヒーレンスに現れる本質の違い

電子波のコヒーレンスは電磁波と大きく異なった事情にある。フェルミ粒子である電子はパウリの排他律により、同一波長、同一方向の伝搬は電子二つ(上向きスピンと下向きスピン)しか許されない。このことは、一方向に伝搬する電子により運ばれる電流量はコヒーレンスの良さと引き換えになることを意味する。たとえば、電子の単一モード導波路を作製したとすると、波長幅すなわちエネルギー幅に比例した電流を流すことができ、それは1eV当り78 μA ($=2e^2/h$)である。一方、ボース粒子である光子では、単一モード光ファイバで波長幅を任意に狭くしてはば任意の電力を送ることができる。

4. 電子波のブラッグ反射現象

EsakiとTsuは1970年に超格子構造の概念を提案した¹⁾。これは異種結晶層あるいはドナー層とアクセプタ層の交互積層より成り、ポテンシャルエネルギーが次元方向に周期的に変化する構造である。この方向に伝搬する電子波の分散特性は、上に述べたような通常の放物線特性から、ブラッグ反射に基づく阻止帯をもつ特性へと変化する。

超格子構造中の電子を電界で加速してエネルギーを上昇させていくと、電子の状態は分散曲線に沿って移動して行き曲線の変曲点まで、あるいはさらに阻止帯端まで、さらにブラッグ反射を受けるまで連続的に変化する可能性がある。この結果、負性抵抗や、直流電界印加の下での振動電流が流れる、いわゆるブロッホ振動現象が現れる可能性があり大変興味深い。この提案は、現在多くの研究者が関与している新たな研究分野を開いた。そして、ここ10年で結晶成長技術の発展により超格子構造が実現され上記の特徴をもつ分散特性が実証されている。さらにブロッホ振動観測に近いことを示唆する実験結果も報告されている。

5. 電子波の回折現象

筆者はポテンシャルが周期的に変化する方向と直角な方向に電子波を伝搬させて生じる回折現象の利用を提案した²⁾。図2は電子波回折の概念図を示す。図中の横方向周期ポテンシャルは半導体結晶中にバンドギャップが周囲の結晶とは異なる結晶からなる量子細線を周期的に埋め込むことで実現できる。トンネル現象を利用してエネルギー、したがって波長、を揃えた電子波を発生させ

ることができる。エネルギーの揃った電子波を超格子に入射させると超格子周期と電子波長とで決まる角度だけ電子は偏向する。超格子電位を外部から制御して高速で電子の進行方向を制御できる可能性があり、超高速トランジスタ²⁾を実現する観点から興味深い。

さらに不純物原子を一列に配置した“不純物原子ワイヤ”³⁾を結晶内に配列することによっても図2の横方向周期ポテンシャルの部分形成することができる。ところで、“不純物原子ワイヤ”は導電性があり外部から電位を制御できる。そこでそれぞれのワイヤのポテンシャルを外部信号にしたがって変化させることを考える。すると図2の横方向周期ポテンシャルは、今度は入力パターンに対応したポテンシャル分布になる。ここに電子波を通過させ、十分な距離伝搬させると、入力パターンのフーリエ変換に相当する電子波パターンを得ることが原理上可能である。これは光学系を用いてフーリエ変換を行うのと同様の原理による。もし、このようなパターン変換機能が実現できれば電気・光変換を用いずに、また電子波長程度の極めて小さな空間内でパターン情報処理を行うことが可能になり応用の可能性が出てくるかも知れない。

上に述べたような電子波回折現象を実証するためには、結晶内に 20~50 nm 周期の格子を埋め込んだ構造を形成する必要がある。また、電子波の波面が空間的にどれだけ広がっているのかについても調べる必要がある。これらはブラッグ反射現象実現に比べると、さらに一段高度な作製・測定技術を要求するものであり今後の挑戦課題である。

6. おわりに

電子波と光波との間にある興味深い対応や違いについて簡単に述べた。電子波のデバイス応用の探索はまだ始まったばかりである。光学分野の方々のお知恵をいただくことができれば幸いである。

文 献

- 1) L. Esaki, *et al.*: “Superlattice and negative differential conductivity in semiconductors,” IBM J. Res. Dev., **14** (1970) 61.
- 2) K. Furuya: “Novel high-speed transistor using electron-wave diffraction,” J. Appl. Phys., **62** (1987) 1492.
- 3) K. Furuya: “Coherent electron devices,” Jpn. J. Appl. Phys., **30** (1991) L82.