HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	電子波伝搬問題への回路理論の概念の応用
Author(s)	任, 捷; 真田, 博文; 永井, 信夫
Citation	電子科学研究, 2, 125-128
Issue Date	1995-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/24328
Type	departmental bulletin paper
File Information	2_P125-128.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

電子波伝搬問題への回路理論の概念の応用

信号処理研究分野　任　　捷，真田博文，永井信夫

近年の半導体作製技術の発展は，電子をポテンシャル中に閉じ込めて任意の方向に伝搬させ，その波の性質を利用することを可能としつつある。このような電子の波の性質を有効に利用するためには，ポテンシャル中での電子波の振舞いを的確に把握し，体系的に扱える手法が必要である。その一つの方法として，ここでは回路理論の概念を利用した方法について述べる。すなわち，電子波の伝搬を記述するSchröedinger方程式と電磁波の伝搬を記述する方程式の類似性に着目し，既存の回路関数，回路行列の概念を用いて電子波の伝搬問題を扱う。ここでは特に，非対称2重バリヤ構造における共鳴準位合成の問題，共振器型の電子波導波路構造の伝搬特性の解析について述べる。

1．はじめに

回路理論は古くから研究されてきた基礎工学の一つであり，それ単独ではいまさらやるべきことはほとんど無いと言ってよいかもしれない。しかし，その豊富な手法と考え方は，もっと多方面に利用できるように思われる。

量子現象と回路理論との類似性がKron等により示されて以来，トンネル現象などの量子効果現象の解明に回路理論を応用使用とする試みが幾つかなされた。半導体超格子の提案とともに，量子効果を利用したデバイスの開発が注目される中で近年，再びいくつかの試みがなされている。

ここでは，虚数抵抗を用いた複素等価回路を用いて，非対称2重バリヤ構造での共鳴準位の合成問題，電子波導波路における電子波の伝搬の解析について報告する。

2．非対称2重バリヤ構造における共鳴準位の合成

これまで多重バリヤ構造の透過，反射特性の議論ではフラットなポテンシャルで対称な場合を仮定するのがほとんどであった。しかし，実際には共鳴トンネルダイオードなどの電子輸送デバイスを動作させる時は，バイアス電圧の印加によるポテンシャルの傾きや空間電荷によるポテンシャルの曲がり等が存在する。

ここでは，バイアス電圧を印加して，ポテンシャルが斜めに傾いた場合を想定する。フラットなポテンシャルを用いて合成された共鳴準位は，ポテンシャルが斜めに傾くとその対称性が失われることによって共鳴準位の透過率が低下してしまう。そこで，予め電圧を印加する事を考慮して，電圧を印加した時に完全共鳴準位が生じるような構造を合成することを考える。

通常，バイアス電圧を印加した状態での透過確率を正確に計算するためには，次に示す方法がよく用いられる。

1．Airy関数を利用する方法
2．ポテンシャルを均一な微小区間多段（n段）の階段で分割近似する方法

方法1は特殊関数を用いるが，方法2は基本的に2行2列の行列の計算のみを必要とし，扱いが容易な手法である。しかし，上記の方法を用いて透過特性などの解析は可能だが，その逆に所望な透過特性を組み立てることは簡単ではない。

そこで所望な完全共鳴準位を生じる構造の合成法として回路理論における共役整合の考え方を利用することを考える。図1からわかるようにバイアス電圧が印加されたときポテンシャルは斜めに傾き，そのポテン

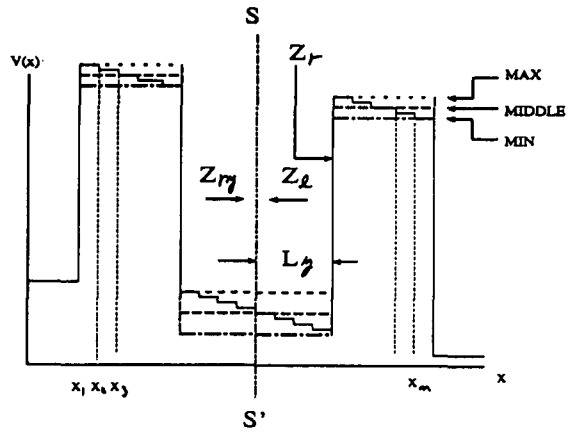

図1　微小区間近似と簡易モデル

シャルの大きさは位置xの関数でありその等価回路は不均一回路となる。また，透過確率は電子エネルギーEの関数であるとともに，バイアス電圧 V_b の関数でもある。文献［1］，［2］でスミスチャートを用いる合成法を提案したが，それを利用するには等価回路が均一回路であることが必要である。そのため図1の破線に示す簡易モデルを考える。これは，斜めに傾いたポテンシャルをある位置の値で近似的に表す方法である。今回，簡易モデルのポテンシャルの近似値として斜めに傾いている各層のポテンシャルの最大，中央，最小値を用いた。

ポテンシャル構造の各々のポテンシャルの値が異なる場合，有効質量も異なることを考慮した上で，任意の電圧を印加した状態で所望の完全共鳴準位を生じる非対称2重バリヤ構造を設計した。各層の層幅などの決定には上に述べた簡易モデルを利用することにより，スミスチャートの利用を可能として，共役整合の考えを利用した。

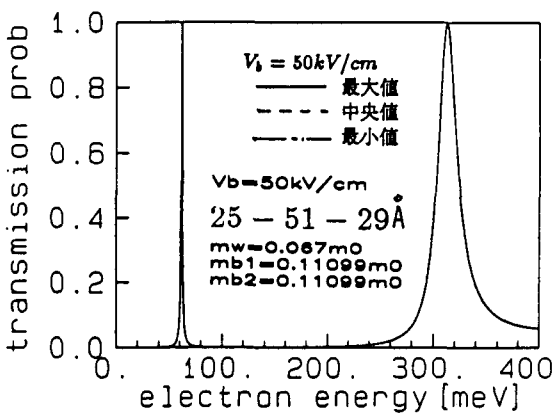

図2　得られた透過確率

図2に $V_b = 50\ kV/cm$ の時に $60\ meV$ に完全共鳴準位が生じるように設計した場合の透過特性を示す。所望のエネルギーで完全共鳴準位が生じていることがわかる。

3．二次元電子波伝搬の回路的解析

近年，半導体加工技術の進歩により高品質なポテンシャル構造が作製可能になってきている。これらのポテンシャル中では，電子波が散乱を受けずに伝搬することが可能になりつつあり，これをデバイスの動作原理として利用できる可能性があることから，これまでに多数の研究がなされている[3]。

電子波が波としての性質を維持するためには考えている系の大きさが系の非弾性散乱長より小さい必要がある。GaAs/AlGaAsヘテロ接合界面においては，非弾性散乱長は1K程度の温度で数ミクロン程度になり，それよりも小さいサイズで構成される電子波導波路では，電子は波の性質を維持出来ると考えられる[4]。このようなバリスティック領域では電子波の伝搬は波動伝搬の問題となり，その波動現象を把握し，電子波の位相や波長を制御するような電子波デバイスを考える場合，電子波とそれが存在するポテンシャル構造の形状との関連を明らかにすることが重要である。さらに目標とする特性を実現するためのポテンシャル構造を組み立てる体系的な方法が必要であると考えられる。

二次元的な電子波の伝搬に対して電磁波伝搬問題との類似性を考慮した研究がなされている[5]。これらの研究の目的は，電磁波の伝搬問題と電子波の伝搬問題の類似点，相違点などを明らかにし，これまでに蓄積されている知識や手法を，新しいデバイスの動作原理となり得る電子の波動性を制御するためのポテンシャル構造の解析，合成に利用することにあると考えられる。

ポテンシャル構造中の電子波の伝搬（反射，透過）を理解するためには，適当な境界条件のもとに有効質量近似Schröedinger方程式を解く必要がある。電子波をポテンシャルの谷にそって伝搬させる電子波導波路を考える場合には，二次元のSchröedinger方程式を解かなければならない。

ここでは，スタブ型構造を持つポテンシャル中の電

子波の伝搬を mode-matching 法に基づいて等価回路上の電圧波の伝搬として定式化する。これにより，電子波導波路内の反射，透過の問題は多端子回路上の有効電力の反射，透過の問題として扱う事ができ，回路関数，回路行列を利用した解析が行えることを述べる。ただし，簡単のためここでは不純物やバンドの曲がりなどの効果は無視している。

電子波導波路を複数のモードが伝搬する導波系と，それらをつなぐ接合回路ととらえ，接合回路の Y 行列を導出する。これにより，電子波の反射，透過の問題は回路上での波の反射，透過の問題として取り扱える。図3(a)に示したような二次元的広がりを持つ電子波導波路を考える。ただし，ポテンシャルの大きさは導波路内の各領域では一定であり，外部のポテンシャルは無限大であるとする。また，この構造で電子波の各モードは構造上の不連続以外では結合しないものとする。この場合，構造の均一な部分は複数の伝送モードを有する導波系であり，独立した等価伝送線路で表せると考えられる。また図3(a)の D の部分は平面的な接合回路としてとらえることができる。

各領域の解を境界において，波動関数が連続，及び波動関数の微分を有効質量で割ったものが連続という境界条件により接続すると，領域 D を表す Y 行列が得られる。ポテンシャル構造の等価回路表現は図3(b)のようになる。Y 行列が得られれば，通常の多端子回路を解析する様々な手法を利用して二次元ポテンシャ

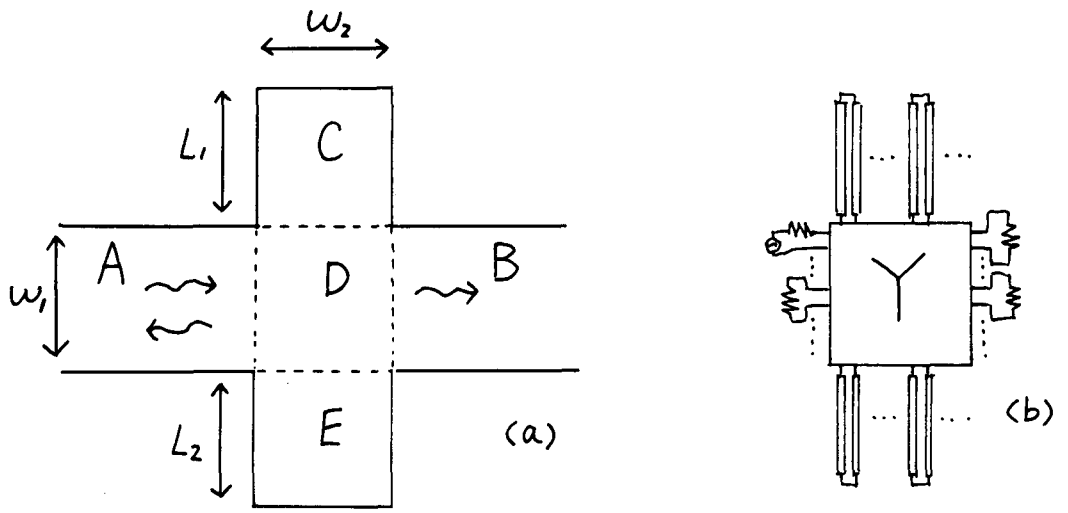

図3　電子波導波路と等価回路

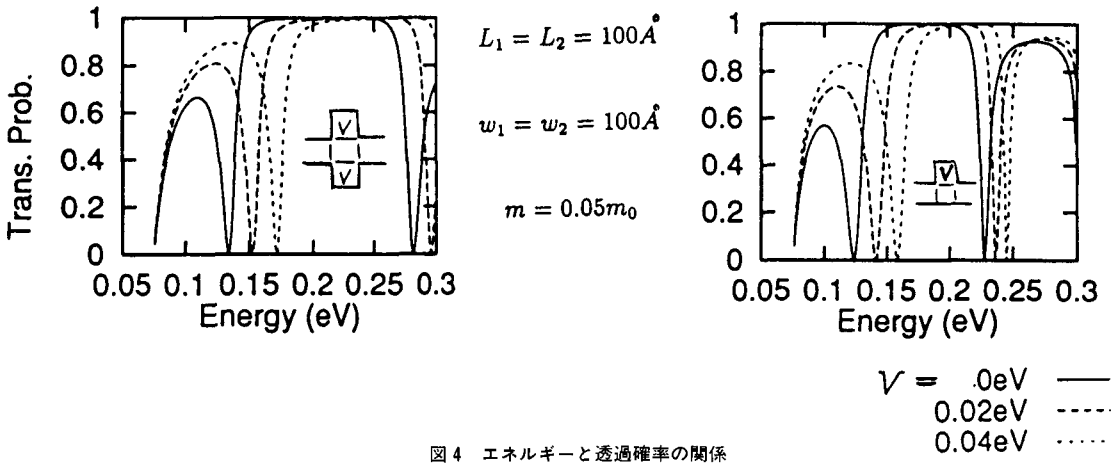

図4　エネルギーと透過確率の関係

ル中の電子波の伝搬を取り扱うことができる。計算例として，図4にエネルギーと透過確率の関係を示す。ただし，電子波は領域 A から基本モードで入射するものとする。電子波が完全に透過するエネルギーと，遮断されるエネルギーが存在することがわかる。

4. まとめ

本稿では，主に2つのことについて述べた。一次元の2重バリヤ構造において，簡易モデルを利用して不均一な形状を均一形状で近似することにより回路的な手順によって，完全共鳴準位を生じるポテンシャル構造を合成できることを示した。数値実験によって任意の電圧印加状態で所望な完全共鳴準位を合成できることを確認した。また電子波導波路を多モードが伝搬する導波路と接合回路とみなし，回路行列，回路関数を用いた解析について述べた。半導体作製技術のよりいっそうの進歩により，電子波の伝搬をさらに精密に制御可能となれば，複雑なポテンシャル構造を構成して，光，マイクロ波で実現されている部品からのアナロジーによる様々なデバイスが実現される可能性がある。その場合には解析的な方法だけでなく，計算機の支援による設計が有力な手法となると考えられる。そのためには，現在，光，マイクロ波の分野で研究されている数値解析法の適用について検討する必要がある。今後，より実態に近い状態での，解析法，合成法が確立されることが望まれる。

本稿で述べた内容について様々な方面の方から御意見や御批判を頂ければ幸いです。

【参考文献】

[1] 大谷直毅，永井信夫，鈴木正清，三木信弘：〝対称3重バリヤの共鳴条件に関する回路理論的一考察〟，信学論（C-I），J 73-C-I，11，pp.683-689（1990-11）．

[2] 任捷，永井信夫，大谷直毅，三木信弘：〝非対称3重バリヤ構造による唯一つの完全共鳴準位の実現〟，信学論（C-II），J 77-C-II，4，pp.181-189（1994-04）．

[3] 難波進編，〝メゾスコピック現象の基礎〟，オーム社，(1994)．

[4] 〝メソスコピック系の物理〟，数理科学（1992-10）．

[5] Weisshar, A. el al., J. Appl. Phys, 70, 1, pp.355-366 (1991).

[6] 真田博文，任捷，永井信夫，信学会技術報告，CAS 94-16（1994-06）．