

単一障壁における共鳴トンネル効果

大向 雅人* 平田 陽亮**

Resonant Tunneling in a Single Barrier Structure

Masato OHMUKAI, Yousuke HIRATA

ABSTRACT

Resonant tunneling has been studied widely in double barrier structures. The main feature of a resonant tunneling device is the resonance phenomenon of electron transmission through potential barriers. The resonance is also occurring in a single barrier structure. However, the characteristics have not been well investigated so far. The advantage of the single barrier structure is that only two hetero-interfaces are needed where four are needed for double barrier structures. We found how the resonant characteristics depend on the form of a single potential barrier

KEY WORDS: resonant tunneling, single barrier, negative resistnace, hetero-interface, semiconductor

1. はじめに

共鳴トンネル効果の概念は 1951 年の Bohm の著した量子力学の教科書の中で既に触れられている¹⁾。1960 年代の若干の研究²⁻⁴⁾を経て 1970 年代から本格的な研究が始まった^{5,6)}。

1970 年代から分子線エピタキシーによって原子レベルでの薄膜成長が可能になってきたため、10nm 程度の厚さを必要とする共鳴トンネルデバイスが実現可能になってきたのである。Chang らによって 77K で負性抵抗を観測し⁶⁾、Sollner らによって 2.5THz の動作が確認された⁷⁾。土屋らによって室温で負性抵抗が観測されるようになる⁸⁾など驚異的な速さで研究成果がだされてきた。

共鳴トンネル効果の応用としては電界効果トランジスタ⁸⁾及びホットエレクトロントランジスタ⁹⁾に導入され、後者の場合、排他的 NOR 回路が一つのトランジスタで実現できることが示された。

最近では障壁の形が台形や三角形である場合の共鳴トンネル効果の解析も行われており、着実に進歩を遂げつつけている。また、フォノンが関与する場合の共

鳴トンネル効果や境界面が平坦でない場合の共鳴トンネル効果など、細かい効果についても検討がなされるようになってきた。

量子力学の教科書には単一障壁におけるトンネル効果について記述されていることが多い。良く見ると障壁の高さより高いエネルギーにおいて共鳴の現象が起こっていることに気が付く。しかしながら単一障壁におけるトンネル効果の共鳴現象について本格的に調べられたことはない。その理由として考えられるのは共鳴のエネルギーが比較的大きいことが挙げられよう。

本論文では単一障壁における共鳴トンネル効果についてその特徴を数値計算によって明らかにすることを目的としている。単一障壁の構造においてはヘテロ接合が 2 ヶ所あり、2 重障壁の場合の 4 ヶ所と比べ数が少なく作りやすい利点を持っている。そのため単一障壁の共鳴トンネル効果を詳細に調べることは意義があるといえる。

2. 数値計算の方法

単一障壁構造のポテンシャル障壁を図 1 に示す。障壁幅 a で高さ V の障壁を左右からはさんだ構造となっ

*電気情報工学科、**明石高専卒業生

ている。横軸が位置を示しており、縦軸が電子に対するエネルギーを示している。図 1 で運動エネルギー E を持っている電子が障壁を越えて右側へ通りぬける現象がトンネル効果である。

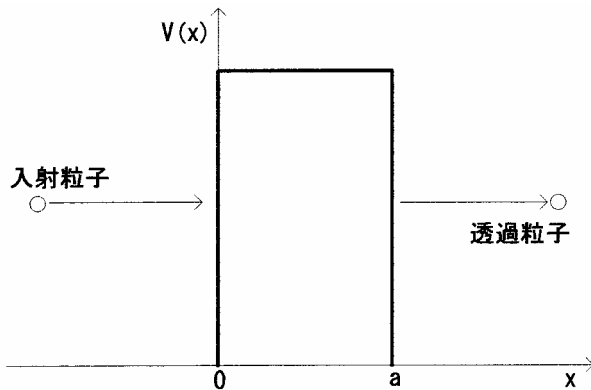


図1 単一障壁構造

具体的な計算方法としては時間に依存しないシュレーディンガー方程式を考えて、2ヶ所のヘテロ接合の部分において波動関数と波動関数の位置に関する1次導関数が連続になる境界条件を考える。これを行列で表現すると簡単な形となりこれを Transfer matrix 法と呼んでいる⁵⁾。

透過した波動関数の振幅の入射した波動関数の振幅に対する比を透過率と呼び0から1の間の値を取る。また反射した波動関数の振幅に対しては同様に反射率を考えることができ、透過率と反射率を加え合わせると常に1となる。

3. 計算結果

ポテンシャル障壁の高さが 0.23eV とした場合の結果を図2から図5に示す。障壁幅は図2から順番に3、

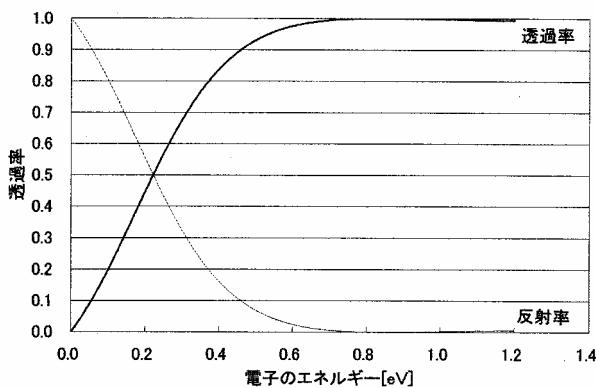


図2 透過率の入射エネルギー依存性 (障壁幅 3 nm)

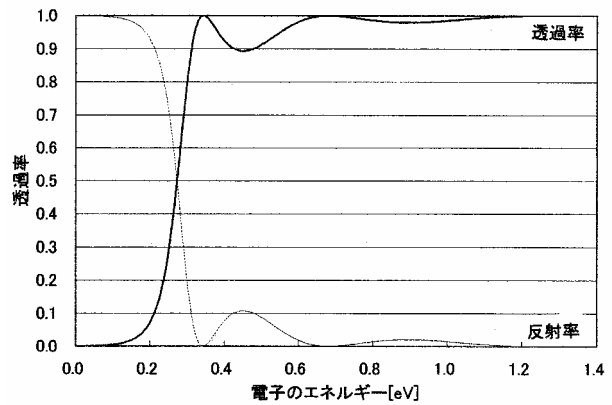


図3 透過率の入射エネルギー依存性 (障壁幅 7 nm)

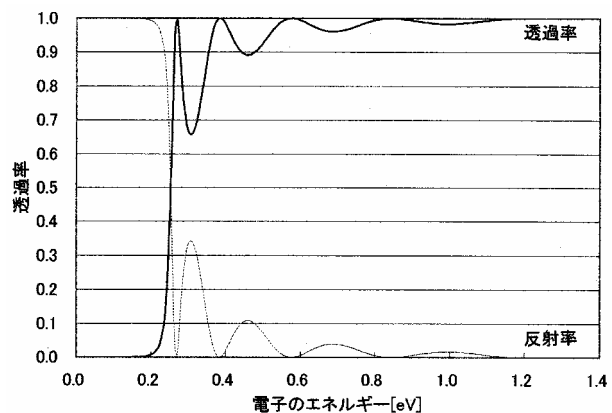


図4 透過率の入射エネルギー依存性 (障壁幅 12 nm)

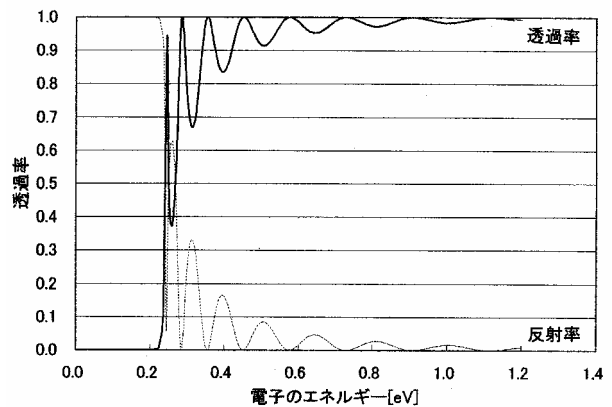


図5 透過率の入射エネルギー依存性 (障壁幅 20 nm)

7、12、20nm である。障壁幅が 3nm の場合 (図2) では障壁の高さに対し 5 倍以上の入射エネルギーである 1.2eV まで共鳴の現象がはっきりと現われていないことがわかる。障壁幅が 7nm の場合 (図3) では 0.35eV 付近で透過率が極大値 1 となっていることがわかる。これが1つ目の共鳴エネルギーである。その後透過率

は 0.9 まで落ちて再び 0.7eV で透過率が 1 の極大値をとっており、このエネルギーが 2 つ目の共鳴エネルギーである。障壁幅が 12nm の場合 (図 4) では 4 つの共鳴エネルギーが現われている。1 つ目の共鳴エネルギーと 2 つ目の共鳴エネルギーの間にある谷は 0.65 まで下がっており図 3 に比べかなり低くなっていることがわかる。1 つ目の共鳴エネルギーと谷との間の範囲は微分負性抵抗領域となっており、障壁が厚くなるに従い狭くなっていることがわかる。更に図 5 に示すように、障壁幅が 20nm では以上のべた効果が更に顕著になっていることがわかる。1 つ目の共鳴エネルギーにおいて透過率が 1 に達していないのは数値計算の分割数が荒すぎたため生じた現象であると考えられる。したがってもっと細かく計算すれば 1 つ目の共鳴エネルギーにおいても透過率は 1 になるものと思われる。

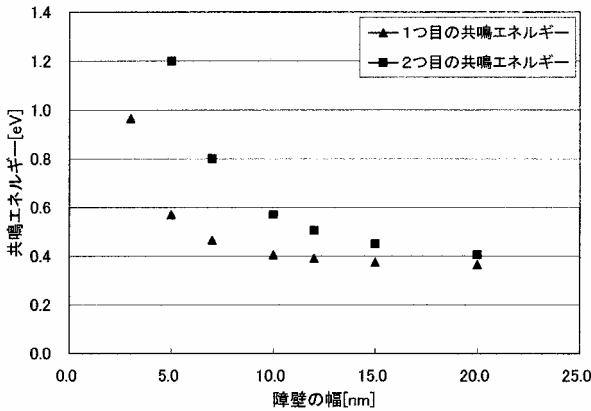


図 6 共鳴エネルギーの障壁幅依存性 (障壁 0.35 eV)

この共鳴エネルギーの推移の様子を障壁の高さを 0.35eV にした場合についてまとめたものを図 6 に示す。1 つ目の共鳴エネルギーは障壁の幅が大きくなるにしたがって下がっていくが、ある値に漸近する傾向を示している。その値は障壁の高さ程度であることがわかる。2 つ目の共鳴エネルギーも同様に障壁の幅と共に下がっていき、1 つ目の共鳴エネルギーと同じく障壁の高さ程度の値に漸近する傾向を見せている。この図から 2 つの共鳴エネルギーの差が障壁幅と共に縮まっていくことがわかる。

負性抵抗の領域を広く取るためには障壁の幅は薄いほうが好ましいといえる。しかし、障壁幅が薄くなるほど負性抵抗領域は高エネルギーに位置するため、多量の電圧を印加しなければならない。また、障壁の幅が薄くなると 1 つ目の共鳴エネルギーと谷との透過率の差が小さくなるため負性抵抗の効果がより得られに

くくなる欠点も出てきてしまう。これらのことから障壁幅は以上の欠点と利点の兼ね合いによって決めなければならない。

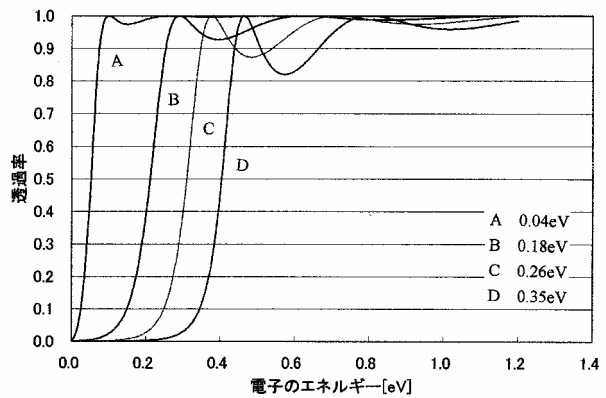


図 7 透過率の入射エネルギー依存性 (障壁幅 7 nm)

次に障壁幅を 7 nm 一定にして障壁の高さを変化させた場合の透過率の様子を図 7 に示す。障壁の高さが高くなるにつれ 1 つ目の共鳴エネルギーが大きくなっていることがわかる。また、1 つ目の共鳴エネルギーはいずれも障壁の高さより大きくなっている。谷における透過率は障壁の高さが高いほど小さくなり、より共鳴の効果が顕著になることがわかる。微分負性抵抗領域である、1 つ目の共鳴エネルギーと谷の間の範囲は障壁の高さが高いほど広くなりより好ましいことがわかる。これらを総合して考えると障壁の高さは高いほうが、好ましい条件がより多く整うものの、微分負性抵抗の起こるエネルギーがより高く位置するため、やはりトレードオフを考えることを免れない。2 つ目の共鳴エネルギーについては図 7 では見にくいので、改めて図 8 において 1 つ目の共鳴エネルギーと 2 つ目の共鳴エネルギー両者について障壁の高さに対する依存性を示した。この図から共鳴エネルギーは障壁のエネルギーに対しほぼ直線関係に近い関係となっていることがわかる。また 1 つ目の共鳴エネルギーの切片が 0.1eV 程度となっており、このことは単一障壁では共鳴エネルギーに最小値が存在することを示している。

4. おわりに

本論文では単一障壁における共鳴トンネル効果について Transfer Matrix 法を用いた数値計算によりその効果を調べた。その結果障壁の幅を大きくするにつれ、2 つの共鳴エネルギーは単調に減少するが、障壁の高さ程度の値に漸近する性質があることがわかった。また、障壁の高さを高くするにつれ、2 つの共鳴エネル

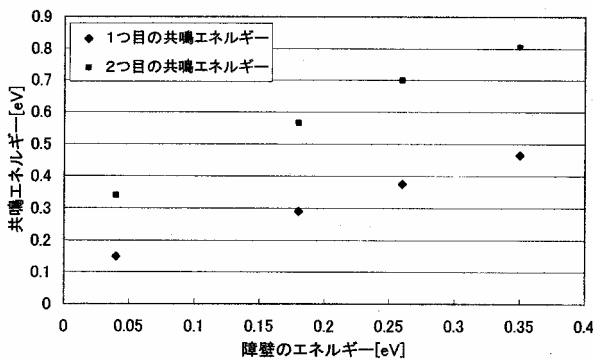


図8 共鳴エネルギーの障壁高さによる変化(障壁幅7 nm)

ギーは単調に増加する事がわかった。微分負性抵抗領域の広さ、ピークと谷との透過率の比、1つ目の共鳴エネルギーの大きさから共鳴現象の特性を考慮すると相反する条件が存在するため、これらの特性の兼合いで最適な条件を考える必要があることが分かった。

実際に単一障壁を用いて共鳴トンネルデバイスを実現するためには更に外部から電圧が印加される影響を考慮しなければならないため、電流電圧特性の解析が重要となり、今後の課題である。

参考文献

- 1) D. Bohm: "Quantum theory", (prentice-Hall, Inc., 1951), New Jersey.
- 2) R. H. Davis and H. H. Hosack: "Double barrier in thin-film triodes", *J. Appl. Phys.*, **34** pp. 864-866 (1963).
- 3) L. V. Iogansen: "The possibility of resonance transmission of electrons in crystals through a system of barriers", *Soviet Phys JETP* **18** pp. 146-151 (1964).
- 4) L. V. Iogansen: "Resonance tunneling of electrons in crystals", *Soviet Phys. JETP*, **20** pp. 180- (1965).
- 5) R. Tsu and L. Esaki: "Tunneling in a finite superlattice", *Appl. Phys. Lett.*, **22** pp. 562-564 (1974).
- 6) L. L. Chang, L. Esaki and R. Tsu: "Resonant tunneling in double barriers", *Appl. Phys. Lett.*, **24** pp. 593-595 (1974).
- 7) T. C. L. G. Sollner, W. D. Goodhue, P. E. Tannenwald, C. D. Parker and D. D. Peck: "Resonant tunneling through quantum wells at frequencies up to 2.5 THz", *Appl. Phys. Lett.*, **43** pp. 588-590 (1983).
- 8) S. Luryi and F. Capasso: "Resonant tunneling of two-dimensional electrons through a quantum wire: a negative transconductance device", *Appl. Phys. Lett.*, **47** pp. 1347-1349 (1985).
- 9) N. Yokoyama, K. Imamura, S. Muto, S. Hiyamizu and H. Nishi: "A new functional resonant-tunneling hot electron transistor (RHET)", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **24** pp. L853-L854 (1985).