

電子波の干渉効果を用いたスイッチングデバイスの 提案

相島亜洲雄

A Proposal of Switching Devices Utilizing Interference effects of Electron Waves

Asuo AISIMA*

ABSTRACT

A new switching device utilizing the quantum interference effects is proposed. AlGaAs-GaAs superlattice exhibits strong quantum interference effects due to quantum mechanical reflection at respective conduction band potential step. In AlGaAs-GaAs layered structures, the pass band, the stop band, and the pass band appears with increasing electron energy. Electron energy can be modulated by the gate voltage. Therefore, the transmission coefficient of electrons wave is changed by the gate voltage. Thus, electronwaves transmit for some range of the gate voltage and reflected for the other gate voltage. This nature can be applied for realizing a new switching device.

キーワード: 超格子、ガリウム砒素、スイッチ、量子効果、干渉

Key words: Superlattice, GaAs, Switch, Quantum effect, Interference

1. まえがき

1970年に当時IBMワトソン研究所にいた、江崎等により[1]超格子なる新しい概念が提案された。これは、人為的に半導体のエネルギーバンド構造を変えて、自然界に存在しない半導体の新しい物性を発現させようとするものであった。超格子は数十オングストロームのGaAs層とAlGaAs層を周期的に堆積させたものであるが、当時の結晶成長技術では理論的に予想された負性抵抗を、実験的に示せなかった。分子線エピタキシャル法などの

結晶成長技術の進歩より最近では、負性抵抗を確認できるようになった。従来の、超格子では、電子はGaAs層から注入され、バリアとなるAlGaAsと井戸層となるGaAs層による共鳴トンネル効果を用いてきた。AlGaAs層から電子を注入すると電子に対するポテンシャルのバリアは存在しない。GaAlAs層とGaAs層の伝導体でのポテンシャル段差のため、電子波はわずかに反射する。超格子の繰り返し周期が増加すると電子波は大きく反射される。この超格子は負性抵抗を示すことを既に報告し

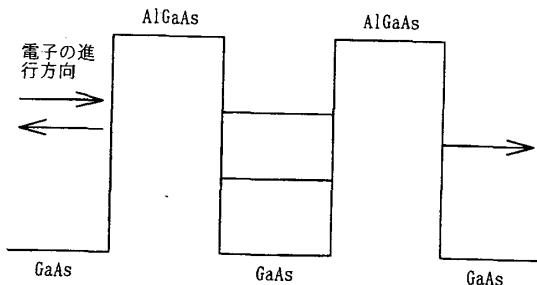
*電子・電気工学科

た[2]。またこの超格子の実空間での非対称性を利用した検波デバイスを提案した[3]。光の波長を人為的に変えるのは難しいが、電子波の波長は印加電圧で容易に変えることが出来る。AlGaAs層とGaAs層の長さで電子波の波長が同程度になると大きな量子干渉効果が生じ、電子波は反射される。ソースとドレイン間に電子波が透過する条件を満足する電圧を加えておく。この状態では電流が流れる。ゲート電圧により、電子波のエネルギーを変えて、電子波を反射させることが出来る。すなわち、電流を流さないように出来る。このように、量子干渉効果を利用して、新しいスイッチングデバイスを作成できる。

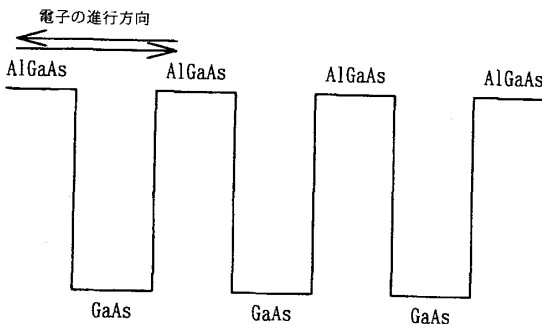
本論文では、時間に依存したシュレディンガーの波動方程式を解くことにより、電子波束の運動に対するゲート電圧の影響を示し、それにより、新しいスイッチングデバイスの作成が可能であることを示す。

2. 共鳴トンネル効果と量子干渉効果

江崎等により提案された超格子は図1に示されている共鳴トンネル効果を利用したものであった。GaAsとAlGaAsの格子定数はほぼおなじで、良好なヘテロ界面が得られる。電子波はGaAs側から注入され、AlGaAs層は電子波に対するポテンシャル障壁となる。



共鳴トンネル効果



量子力学的反射

Fig.1 Structure of superlattices

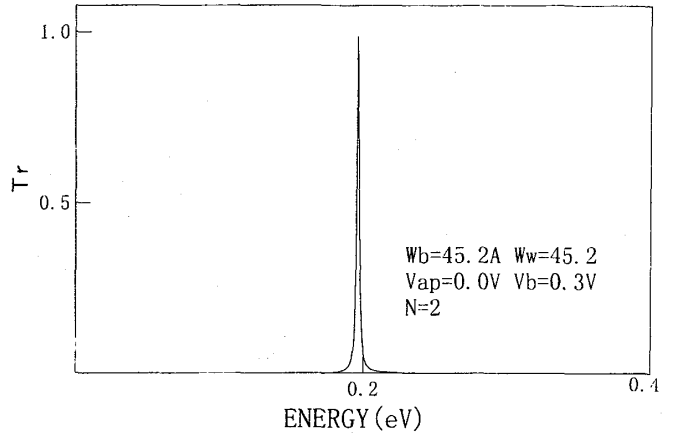


Fig.2 Transmission coefficient for tunneling diode.

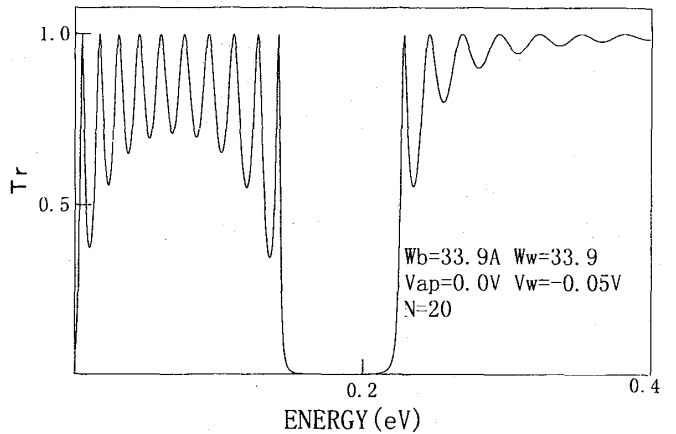


Fig.3 Transmission coefficient for quantum interference effect.

二つのポテンシャル障壁が存在すると、電子波はあるエネルギーを持つと共鳴トンネル効果で減衰することなくこの障壁層を通過する。このような構造のデバイスを共鳴トンネルダイオードと呼ぶ。このダイオードは負性抵抗を示すことが江崎等により、理論的に示され、結晶成長技術の進歩により、予言とよく一致する実験結果が得られている。このダイオードは高周波の発振器や検波デバイス、さらには高速で動作するメモリーへの応用が検討されている。

図1には本論文で取り上げる量子干渉効果(量子力学的反射効果による)が示されている。電子波はAlGaAs側から注入され、電子に対する障壁はない。電子はGaAs層でポテンシャルの井戸を見ながら走行する。このAlGaAsとGaAsの界面で、伝導体のポテンシャル段差のため電子波はわずかに反射する。段差の数、すなわち

超格子の周期数が増加すると、入射波と反射波の干渉効果のため、大きな量子干渉効果が生ずる。共鳴トンネル効果ではバリアの存在のため、わずかの電流しか流れない。これに対し、量子力学的反射効果を用いる場合は、電子に対するバリア層が存在しないため、大きな電流を流すことが出来る。電子デバイスの応答時間は電極間の容量を充放電する時間に律束される。したがって、共鳴トンネル効果より高速なデバイスになりうる。

図2に共鳴トンネルダイオードの通過係数とエネルギーの関係を示す。バリア数2、バリア電圧0.3V、GaAsおよびAlGaAs層の幅は45.2Åを想定している。0.2eVで鋭い共鳴のピークが見られる。このように、共鳴トンネル効果の場合はエネルギーの増加に伴いストップバンド、パスバンド、ストップバンドが現れる。

図3は量子干渉効果(量子力学的反射効果)での透過係数とエネルギーの関係を求めたものである。超格子の繰り返し周期は20、井戸電圧は0.05V、GaAs層、AlGaAs層の幅は33.9Åを想定している。図に見られるように、ストップバンド、ストップバンド、ストップバンドが電子エネルギーの増加に伴い現れる。このように電子に対してバリアが存在しない領域でも電子の透過できないエネルギー領域が存在する。

3. デバイス構造

図3において、電子エネルギーが0.22eV程度とする。このエネルギーでは電子は透過する。電子エネルギーを人為的に少し下げれば、電子波は反射する。また、電子エネルギーが0.15eVでは電子波は透過する。電子エネルギーを少し高くすると電子波は反射する。電子波が透過するようなエネルギーになるよう、ドレイン電圧を印加しておき、ゲート電圧で電子波が反射するようになればこれはスイッチングデバイスになる。

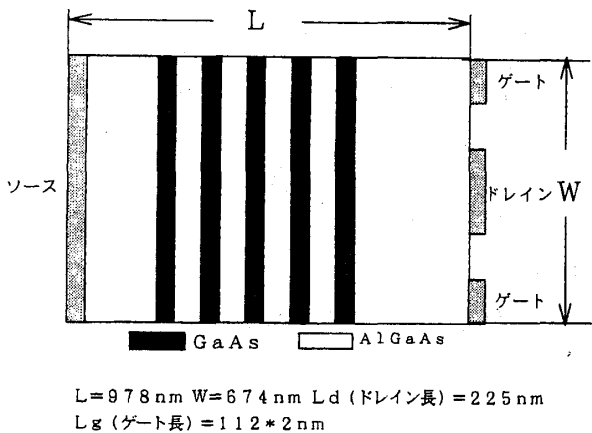


Fig. 4 Device structure.

図4は本論分で提案するデバイス構造である。電子はソースから注入され、AlGaAs-GaAsから構成された超格子層を通過して、ドレイン電極に到達する。ドレイン電極の周囲にゲート電極を置いておく。デバイス構造は簡単であり、現在の結晶成長技術およびプロセス技術で容易に作成可能な構造である。

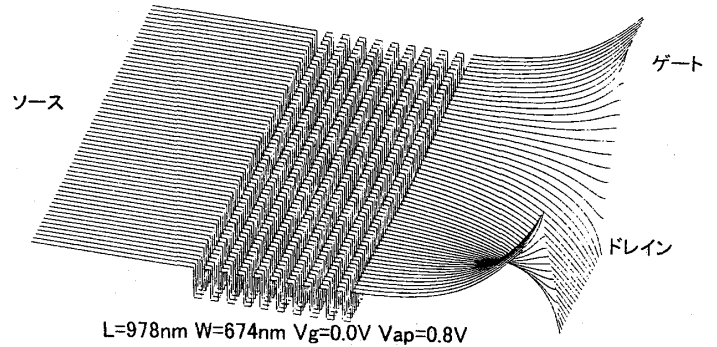


Fig. 5 Potential distribution in the device for a gate voltage of 0V

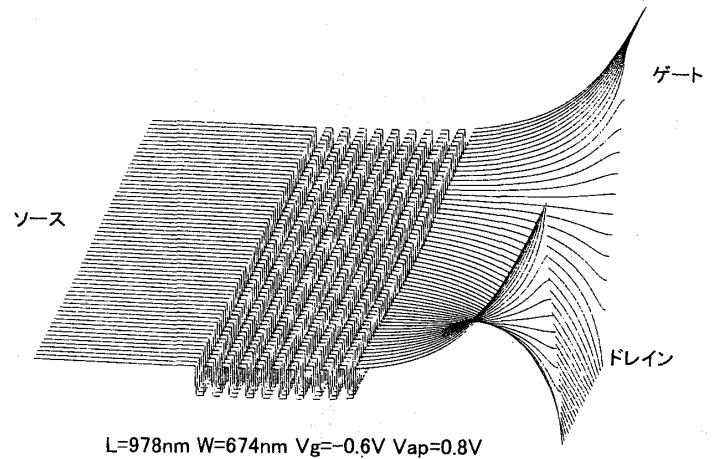


Fig. 6 Potential distribution in the device for a gate voltage of -0.6V.

図5はラプラスの式より求めたデバイス内の電圧分布である。ドレイン電圧は0.8V、ゲート電圧は0.0V、デバイスの全長は978nm、全幅は674nmを想定している。電子は谷にすべり落ちるようにドレインに向かって走行する。図に見られるポテンシャルの段差で強い量子干渉効果を受ける。ゲート電圧は0.0Vを想定しているが、この電圧は電子の加速を妨げるように働く。ゲート電圧が存在しなければ、ドレインに向かってのポテンシ

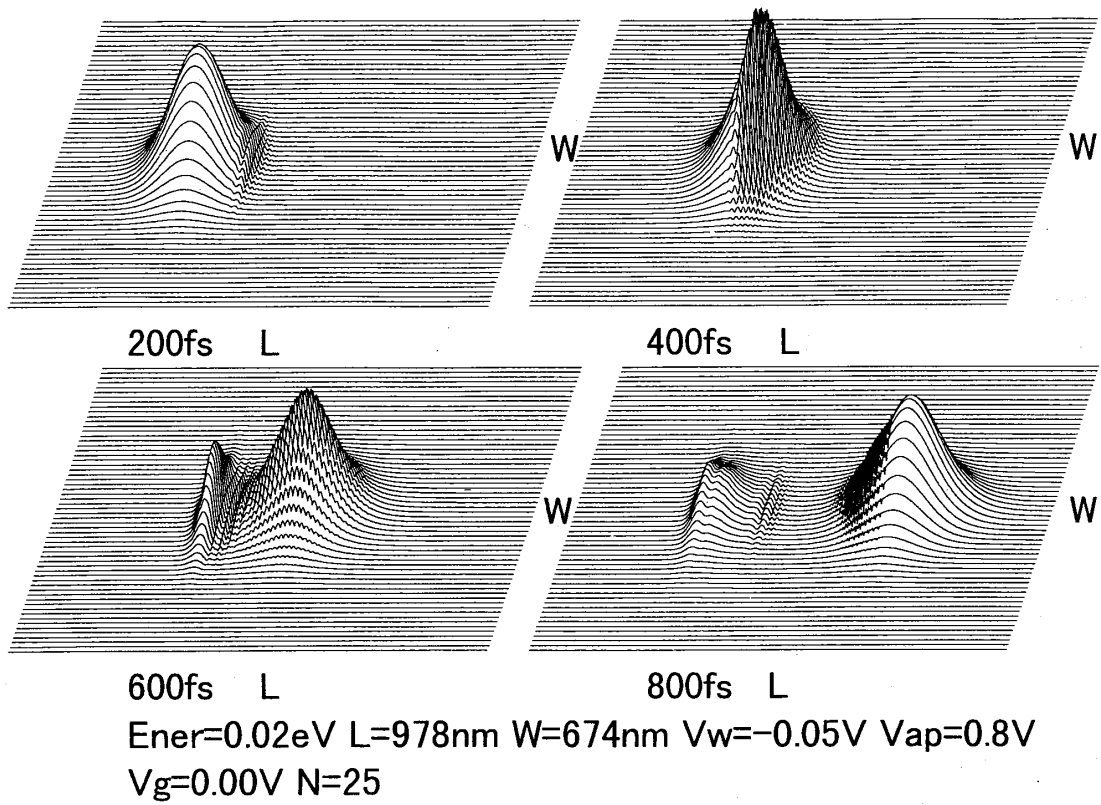


Fig.7 Time response of incidental electron wave.

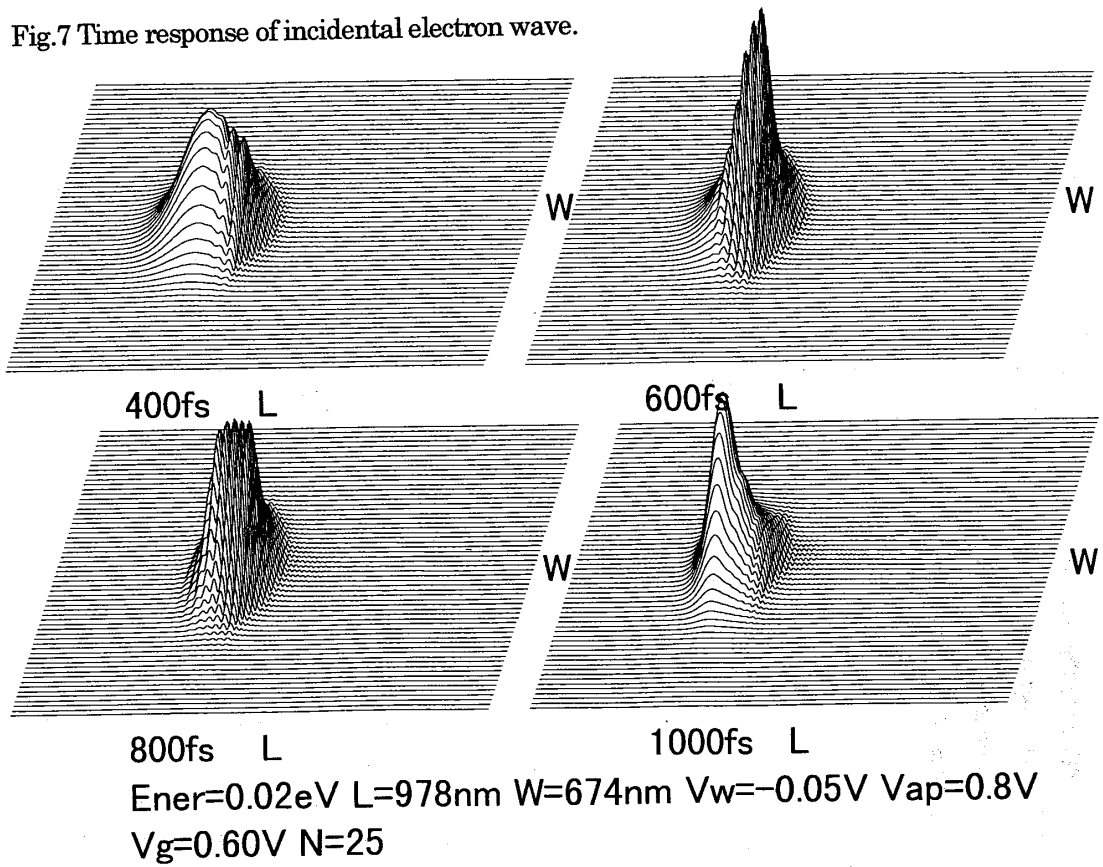


Fig.8 Time response of incidental electron wave.

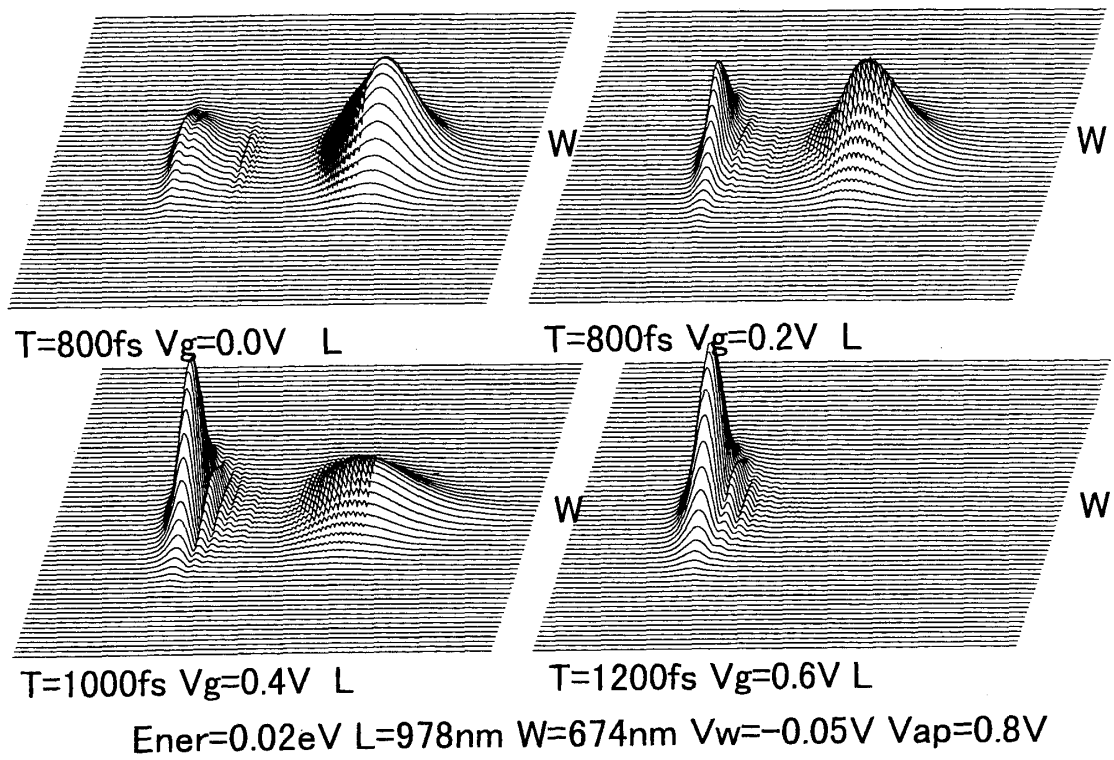


Fig.9 Time response of incident electron wave.

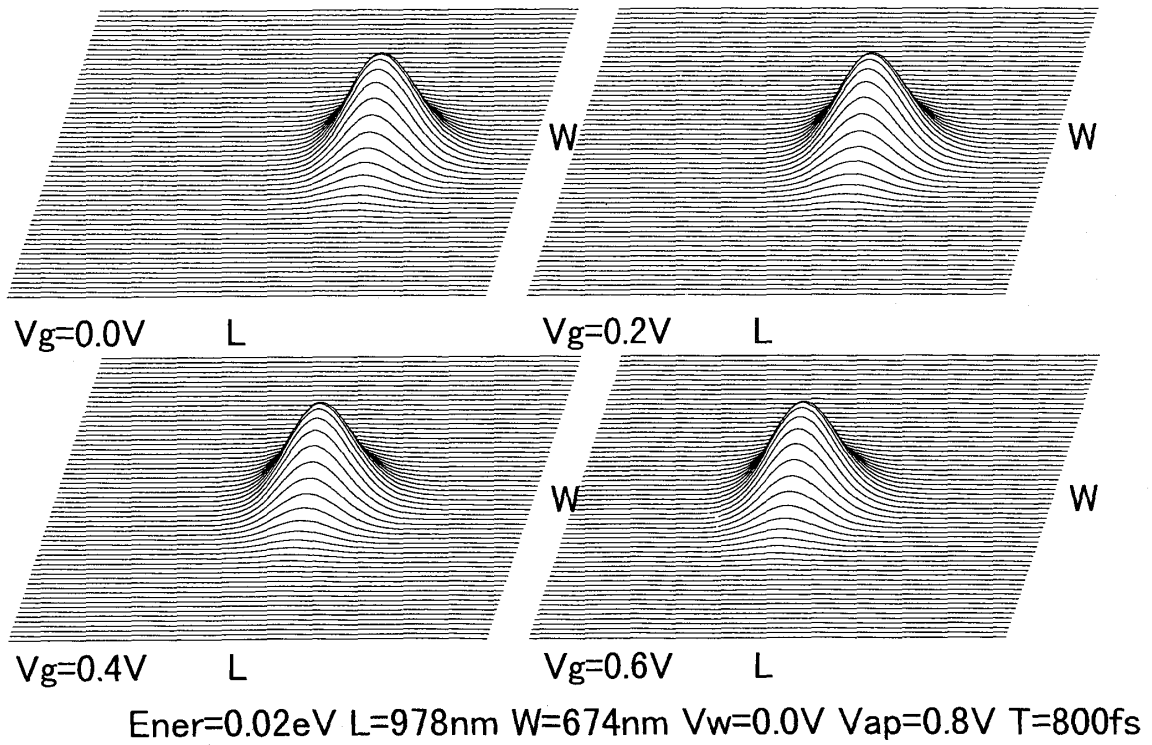


Fig.10 Time response of incident electron wave.

ャルの傾き〔電界〕はこの図より、大きくなる。

図6はゲート電圧を -0.6 V とした場合のデバイス内の電圧分布である。このゲート電圧は、電子の加速を妨げる作用をする。ソースからドレインに向かった電圧の傾きは小さい。このように、ゲート電圧で電子エネルギーを制御できる。超格子の層数が多いほど、大きな量子干渉効果が生ずる。

4. 電子波の透過と反射

デバイス内での電子波の運動は、よく知られているようにシュレディンガーの波動方程式を解くことにより、明らかになる。時間に依存したシュレディンガーの方程式において、ポテンシャル項として図5や図6などの結果を用いる。デバイス内を縦方向を600、横方向を61のメッシュに分割し、差分法により解析を行った。

図7はゲート電圧は0V、井戸電圧は 0.05 V 、入射電子のエネルギーは 0.02 eV 、超格子周期25層の場合の電子波の時間発展を求めた結果である。200fs（ヘムト秒）では、電子波の先端が超格子層に進入し、600fsでは超格子層から波の先端が離れ、600fsで透過波と反射波は完全に分離している。波の大半は透過する。

図8はゲート電圧が -0.6 V の場合の結果で200fsで超格子層に入射した波は600fsでも超格子内に存在し、1000fsで、反射波のみが超格子層を離れている。このようにゲート電圧で電子波を透過および反射させることが出来る。

図9は本論文の結論となる結果で、ゲート電圧を変化させて、電子波の透過と反射の様子を示したものである。ゲート電圧の増加につれ、透過電子は少なくなり、反射電子がふえている。超格子の存在しない場合の結果が図10に示されている。当然のことながら、超格子が存在しないとなにも起こらない。ゲート電圧により、電子波の速度が変わるだけである。このように、超格子という‘仕掛け’

により、電子波の透過および反射を制御できるのである。

5. まとめ

量子干渉効果（量子力学的反射効果）を利用した、GaAlAs-GaAsからなる、半導体超格子を利用したスイッチングデバイスを提案した。電子をGaAlAs側から注入すると、電子はバリアを見ることなくデバイス内を走行する。GaAlAs-GaAs界面での、伝導体の電位段差のため、電子波はわずかに反射する。超格子の層数が増加すると反射波入射波の多重干渉効果のため、大きな量子干渉効果が生ずる。電子波に対して、電子エネルギーを増加させると、パスバンド、ストップバンド、パスバンドが形成され、パスバンドにある電子波を、ゲート電極により、ストップバンドに置けることが判明した。すなわち、電子波をゲート電圧により、通過させたり、反射させる、スイッチングデバイスを作成可能なことを示した。ここでの解析は、電子波の透過、反射をゲート電極で制御できることを示した、初歩的な内容である。電流がゲート電圧でどのように制御出来るか、スイッチング速度は何で決まるかなどの検討が必要である。

参考文献

- [1] L. Esaki and T. Tsu: Superlattice and negative differential conductivity in semiconductors, IBM J. Res. Develop., 14, p. 61, (1970).
- [2] 相島亜洲雄, 吉田直樹: 量子干渉効果を利用した負性抵抗デバイスの一提案, 福山大学工学部紀要, 17, 25-29, (1993).
- [3] 相島亜洲雄, 吉田直樹: 量子干渉効果を利用した検波デバイスの提案, 日本産業科学研究所 研究報告, 7, 4-9, (1994).