

氏名(本籍) 富 沢 一 隆 (千葉県)
KAZUTAKA TOMIZAWA

学位の種類 工学博士

学位記番号 工第32号

学位授与の日付 昭和48年3月25日

学位授与の要件 学位規則第5条第1項(課程博士)

学位論文題目 **n型砒化ガリウム電子遷移効果素子に関する研究とその論理素子への応用について**

外国語訳 ON TRANSFERED ELECTRON EFFECT AND ITS APPLICATION TO LOGIC DEVICES

論文審査機関 工学研究科委員会

論文審査委員 (主査) 後 藤 以 紀
(副査) 藪 本 忠 一 井 元 鑑 二

n型砒化ガリウム電子遷移効果素子に関する研究とその論理素子への応用について

本論文は、n型砒化ガリウム電子遷移効果素子内に発生、走行そして消滅する高電界層の振舞の高速に着目し、その振舞を論理素子へ応用する試みをもって、素子内での高電界層の振舞について調べたものである。

第1章の総論においては、これまでの電子遷移効果に関する研究のうち関連のあるものを述べ、本論文の位置づけおよび意義を明らかにするよう努めた。また、本論文の目的および内容についても簡単にふれた。

第2章では素子が様々な型の不均一性を持つ場合の高電界層の振舞を、実験的あるいは理論的に調べた。先ず第2章第2節で、素子がドナー密度の不均一性を持つ場合を取り扱った。素子内のドナー密度分布の変化がそれほど大きくない場合には、高電界層が素子内を走行する際、ドナー密度の変化にほぼ比例する電流が流れる。この電流変化の評価は図式解法によって行ない、計算機解析と非常に良く一致した。ドナー密度の変化が大きい場合には、高電界層はもはや素子全体を走行しなくなる。すなわち、素子のある部分で消滅するかまたは静止する。消滅する場合は新たな高電界層が再び発生し素子は電流振動を発生する。高電界層が素子の一部を走行するか全体を走行するかは、素子の全てに定常的に走行する高電界層が存在するか否かという理論的検討を行なうことによって容易に確かめられた。高電界層が消滅する場合と静止する場合の違いは、静止する場合についての位相解析的手法によって明らかになった。それによれば、静止する現象がドナー密度の $1 \times 10^{21} [\text{m}^{-3}]$ 以下の素子には現われないことが示された。また、この静止する高電界層(以後、静止高電界層と

呼ぶ)が発生する素子は直流的な負性抵抗を示すことが判明し、電子遷移効果素子のような微分負性移動度を有する半導体では直流的な負性抵抗は現れないという Shockley と Kroemer の正抵抗理論の結果をくつがえした。理論的な考察によって、筆者の結論が拡散電流を考慮しているためであることが明らかとなった。すなわち、拡散電流を考慮に入れた理論的考察の結果は電子遷移効果素子によって直流的負性抵抗が得られることを示したのである。

第2章第2節では、素子が形状の不均一性を持つ場合について取扱った。高電界層が素子全体を走行したり一部分を走行する場合、または定常状態を形成する場合等、多種の様態が実験的に得られた。高電界層が走行する場合は図式解法によって、定常状態を形成する場合は計算機解析によって、それぞれ理論的考察を行なった。高電界層の発生、消滅の位置、電流の値等良い一致を見た外、形状効果によっても、静止高電界層が現れ得ることが示された。

第2章第3節では、素子の表面に誘電体を装荷した場合を取り扱った。素子の厚さと誘電体の誘電率の変化および素子のどの部分にどの程度の長さの誘電体を装荷するかという条件の変化等によって、素子は従来全く知られていなかった様々の様態を示す。非線型でかつ二次元の場であるので、二次元の数値解析を行なってそれらの様態を調べた。素子内部の電位の変化が引き起す誘電体との充放電過程と高電界層の空間電荷が誘電体の存在によって影響を受ける過程とが重畳し合った非常に複雑な現象であることが解析の結果明らかとなった。しかし誘電体の下を走行中の高電界層が消滅する条件や、誘電体を装荷した部分の砒化ガリウムの厚さが薄い場合に高電界層の走行速度に見られる変化等を明らかにした。その他、誘電体を素子の全長に装荷した場合に見られる定常状態が、誘電体の陽極側の端にあたる半導体中にできる電子欠乏層によるものであることも判明した。

以上の第2章における諸結果より、第2章で考えた種類の不均一性またはそれと同じ効果をもたらす他の物理現象の利用による不均一性等によって高電界層の振舞の制御が可能であることが示された。

第3章では高電界層の横方向成長を、素子の表面の電位分布を測定することによって観測し、横方向成長の様子ならびに成長速度についての新しい知識を得た。特徴的なことの一つは、完全に成長した高電界層が横方向に成長するのではなく、ある程度まで成長した高電界層が横方向成長を完了したのち始めて完全な高電界層に成長することである。成長速度はバイアス電界が閾値電界の90%程度で 1×10^8 [cm/sec]、98%程度で 1×10^9 [cm/sec] の値を示し、高電界層の走行速度より1桁から2桁速いことが示された。簡単な理論的考察の結果も同様の結果を与えた。

第4章では、第2章での諸結果を利用して、第3章で述べた高電界層の横方向成長の制御を基本にした論理素子を設計、動作させた。その論理動作は Sheffer の縦棒の一変形をなし、他のあらゆる基本論理素子が、この素子の組み合わせで可能であることを示している。その動作を理論的に考察した結果、実験とのよい一致を見た。第4章ではこの横方向成長を利用した複雑な論理動作を行なう素子を提案している。

審査結果の要旨

(主査) 後藤 以紀

(副査) 藪本 忠一

(副査) 井元 鑑二

本論文はn型砒化ガリウム電子遷移効果素子に発生し得る高周波電気振動現象に関する著者の実験的並びに理論的解明とその応用として特殊演算素子および高速度桁上方式について報告したものである。

本論文は5章および謝辞、参考文献、付録より成っている。

第1章は総論であって、従来の電子遷移効果に関する研究のうち関連のあるものを紹介し、本論文の上記の目的について述べている。

第2章は4節に分れ、第1節は序言であって、第2章以降で用いる記号の他、内容の概説を行なっている。

第2章第2節においては、素子が種々な型の不均一性をもつ場合について、陰極側で発生した高電界層の波が陽極方向へ進行する様子や途中で止まる場合等を測定し、その発生条件および発生機構を明らかにするために、まず、計算機による数値解析を行なっている。すなわち、ドナー密度の小さい領域と大きい領域とが、陰極側より陽極側に向かって連なっている素子の場合、ドナー密度の分布の順序がその反対の場合、あるいは密度の差の少ない場合、差の大きい場合等のように多くの組み合わせについて、電子の拡散作用を考慮に入れた波動方程式を解いて、実験結果と比較して、それを解明している。方程式は電子の平均速度が電界の強さに依存するために、非線形偏微分方程式となるので、一般には種々なドナー密度に対する数値解しか求められないが、高電界層が定常的に走行するときの条件または途中で静止したり消滅したりする理由は図式解法あるいは位相解析的にこれを解明している。それにより、静止する現象がドナー密度の $1 \times 10^{21} [\text{m}^{-3}]$ 以下の素子には現われないことが示され、この静止する高電界層が発生する素子は直流的に負性抵抗を示すことが判明し、電子遷移効果素子のような微分負性移動度を有する半導体では負性抵抗は現われないという Shockley と Kroemer との正抵抗理論の結果をくつがえしている。これは先に述べたように著者が電子の拡散に基づく電流を考慮に入れた結果である。

次に第2章第3節においては、素子の形状が不均一性をもつ場合について取扱っている。

高電界層が素子全体を走行したり、一部走行する場合または定常状態を形成する場合等、多種の様態を実験的に観測し、走行する場合は図式解法により、定常状態は計算機解析によって、それぞれ理論的に解明し、高電界層の発生、消滅の位置、電流の値等良い一致を見せている。また形状効果によっても、静止高電界層が現われ得ることを明らかにしている。

第2章第4節においては、素子の表面に誘電体 BaTiO_3 を装荷した場合を取扱い、その誘電

率、形および取付場所を種々に変えて、その効果を観測し、それに対応して二次元の非線形波動方程式の数値解析を行ない、比較した結果、素子内部の電位の変化がひき起す誘電体との充放電過程と高電界層の空間電荷が誘電体の存在によって影響を受ける過程とが重なった複雑な現象であることを明らかにしている。

第3章においては、高電界層の横方向成長と、素子の表面の電位分布を測定することによって観測し、その特徴的なことの一つとして、完全に成長した高電界層が横方向に成長するのではなく、ある程度まで成長した高電界層が横方向成長を完了したのち始めて完全な高電界層に成長することを発見している。成長速度はバイアス電界が閾値電界の90%程度で 1×10^8 [cm/sec]、98%程度で 1×10^9 [cm/sec] の値を示し、高電界層の走行速度より1桁から2桁速いことを明らかにしている。これは理論に基づく計算値によっても示されている。

第4章においては、第2章での諸結果を利用して、第3章で論じている高電界層の横方向成長の制御を基本にした論理素子を製作した報告であって、陰極と陽極との他に BaTiO_3 のトリガー電極をつけた素子と BaTiO_3 のゲート電極をつけた素子とを狭いブリッジでつないだH形の素子を作ることにより、種々な論理演算が可能となるので、例えば信号Xと信号Yの否定 $\sim Y$ との論理積 $X \cdot \sim Y$ に相当する動作をさせることができる。これの応用として、これを連結して高速度桁上回路を簡単に作れることを明らかにしている。

第5章は結論で、上記の成果を総括している。付録1および2はそれぞれ、一次元的な数値解析法および二次元的なその補足説明であり、付録3は実験に使用した試料の作成法の説明である。

これを要するに著者はn型砒化ガリウム電子遷移効果素子における高電界層の波動に関する実験的並びに理論的研究により、よくその動作機構を詳細に解明し、特に横方向の波動の特徴を生かした新演算素子を作り、工学および技術の発展に貢献するところ多大であると考えられる。

よって著者は工学博士の学位を受けるに十分な資格があるものと認められる。

以 上

昭和47年9月26日