

氏 名	原 田 八 十 雄		
授 与 学 位	工 学 博 士		
学位授与年月日	平成元年3月15日		
学位授与の根拠法規	学位規則第5条第2項		
最 終 学 歴	昭 和 4 2 年 3 月 名古屋大学理学部物理学科卒業		
学 位 論 文 題 目	ビームリード GaAs ショットキバリヤダイオードの高 性能化と高信頼化に関する研究		
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 水野 皓司	東北大学教授 小野 昭一	
	東北大学教授 御子柴宣夫	東北大学教授 高木 相	

論 文 内 容 要 旨

本論文は、マイクロ波帯の実用的なミキサの開発に関する研究として、GaAs及びポリイミド膜のプレファレンシャル（Preferential）エッチング技術の確立、並びにこれらの技術の応用により開発したビームリード GaAs ショットキバリヤダイオード（SBD）ミキサの高性能化、変換損失の理論と実験との比較及び高信頼化についての研究成果をまとめたものである。

本研究まで、GaAs 動作層の表面清浄化と正確な膜厚制御が同時にでき、かつマスクパターンに忠実なエッチ孔が形成できる化学エッチング技術は開発されておらず、また配線容量を大幅に低減できる絶縁膜形成技術などが開発されていなかったために、GaAs のビームリード SBD は、パッケージ入り SBD の性能を上回ることができなかつたし、その信頼度の詳細も明らかにされていなかった。本研究は、このエッチング及び絶縁膜形成・加工技術を開発し、これらの技術の応用により SHF 帯域用の高性能でかつ高信頼性を有するビームリード GaAs SBD を開発することを目的として行われたものである。本論文は7章から成る。

第1章は、“序論”で、本研究の上記背景と目的、並びに意義を述べ、その意義は、①開発されたビームリード GaAs SBD が、高度情報化社会の実現に必要とされていたマイクロ波通信システムなどの高性能化、高信頼化、小型・軽量・低廉化の促進及び普及に寄与し、更に②プレファレンシャルエッチングとポリイミド膜の形成・加工技術が、GaAs デバイスの高性能化と今日までの発展に寄与してきた点にあることを明らかにしている。

第2章の“GaAsのプレファレンシャルエッチング”では、 $\text{Br}_2\text{-CH}_3\text{OH}$ 溶液を用いて、GaAsでは初めての本エッチングの方法、特徴、機構並びにデバイスへの応用について述べている。

①まず (i) エッチ速度が、 $\{\bar{1}\bar{1}\bar{1}\}$ の As 面で非常に速く Ga 面では非常に遅くなることを示し、両面の不對電子の差に起因したエッチング機構を明らかにした。そして (ii) エッチングが反応律速で進みエッチ量の制御が正確にでき、(iii) エッチ速度の順序が $\{110\} \geq \{\bar{1}\bar{1}\bar{1}\} \text{As} \geq \{100\} > \{111\} \text{Ga}$ 面になるので、この Ga 面でエッチングが止まるプレファレンシャルエッチ孔が形成できることを予測した。②次に $\{\bar{1}\bar{1}\bar{1}\} \text{As}$ と $\{110\}$ ウェハ面に結晶方位が反映されるエッチ像を新たに形成し、この像にマスクパターンを整合させてエッチングした結果、 $\{\bar{1}\bar{1}\bar{1}\} \text{As}$ 面では一側面だけが平坦なエッチ孔が形成されるが、 $\{100\}$ 面では、幾何学的形状のV字形と逆V字形のエッチ孔に加え三角柱状の“橋”も形成され、更に各形状がマスク寸法で自動的に制御されることを示した。③これらのエッチ孔の形成機構を検討し、 $\{111\}$ Ga 面でエッチングが止まることにより形成されていることを明らかにした。更に、エッチング溶液の特性、特にエッチ速度の結晶方位依存性、マスク形状とその方向、並びに被エッチング結晶面の三条件を制御すれば、上記②以外の種々のエッチ孔を形成し得ることを明らかにした。更に、④本エッチングの特徴である、上記 (ii) 及び②を利用すれば、GaAsのMES (Metal-Semiconductor) FET とビームリードSBDの高性能化が可能になることを明らかにした。MESFETでは、逆V字形エッチ孔にゲート電極を形成すると、本素子の高性能化に必要な条件を満たし作製工程も簡単になる自己整合型構造が実現できることを示した。このような構造は、今日のMESFETやHEMT(高電子移動度トランジスタ)には全て採用されている。SBDでは、へき開面と 45° ずれた方向にマスクパターンを形成してエッチングすると、本素子の高性能化と高信頼化を実現するための必要条件である、台形状のGaAsチップが再現よく正確に形成されることを示した。

第3章の“ポリイミド膜の形成と化学エッチング”では、ポリイミド膜のホットエッチングにより、約 $30^\circ \sim 40^\circ$ のテーパ角 θ を持つ幾何学的形状のエッチ孔を再現よく形成できる膜形成とそのエッチング方法、エッチ孔の特徴と形成過程、並びに応用について述べた。

①厚膜(約 $6 \mu\text{m}$)形成に、プレポリマー溶液をスピナ塗布してはプリベーク(低温)とポストベーク(高温)する工程を3回繰り返す、3-ステップコーティング法を新たに導入し、プリ及びポストベークの最適条件が、 150°C 、15分及び 185°C 、30分(第3工程目)であることを実験的に明らかにした。②この膜のエッチングには、ヒドラジンヒドラート(H. H.)とエチレンジアミン(E. D.)の混合溶液が有効になり(液温 40°C 以下)、広範囲のE. D.組成(0.5~0.9:体積比)で θ が 30° 以上、特に約0.8の組成では約 35° のエッチ孔が形成されることを示した。③これらのエッチ孔は、サイドエッチ速度が非常に遅くかつ θ が膜形成条件で決まるので、V字形の断面形状を有し、その形状はマスク寸法で自動的に制御され、更にマスク形状にかかわらずウェハ面内のあらゆる方位に形成されることを示した。また1-ステップコーティング法を用いると、 θ が約 40° のサブミクロンエッチ孔も形成されることを示した。また、④本膜形成・加工技術は、低温($185^\circ\text{C} \sim 350^\circ\text{C}$)プロセスで、上記②及び③のような相互配線に最適なエッチ孔を薄膜($< 1 \mu\text{m}$)から

厚膜 ($>10\mu\text{m}$) 中に形成できるので、リフトオフ工程や層間絶縁膜の形成に有効になり、ビームリード GaAsSBD の絶縁膜形成に用いると、寄生容量を大幅に低減できかつ断線の起きないビームリード電極を形成し得ることを示した。

第4章の“ビームリード GaAs ショットキバリアダイオードの高性能化”では、本素子の高性能化と高周波化について述べ、2000GHz 以上のカットオフ周波数 f_c を有する素子が初めて開発されたことを明らかにした。

①第2章と3章の技術に加え、連続液相成長法で開発した N/N^{++} エピタキシャルウェハを用いて開発したビームリード GaAsSBD は、このウェハと $5\mu\text{m}$ 厚のポリイミド膜の採用、並びに素子構造の最適化により、直列抵抗 R_s と寄生容量 C_p が非常に小さくなるように設計されていることを示した。そして、 N^{++} 層の抵抗率が非常に小さく表面が平坦かつ鏡面なウェハ (N ($\sim 0.3\mu\text{m}$) / N^{++} ($\sim 15\mu\text{m}$) が、反応管内のキャリアガス流と垂直方向の温度分布を制御することで、同一メルトを30回以上用いても再現よく成長でき、更にビームリード電極の配線に最適なポリイミド膜のコンタクトホールと台形状の GaAs チップが正確に形成されていることを示した。②上記技術が素子特性にも反映され、本素子は、 R_s が約 0.5Ω で C_p が約 0.03pF と非常に小さく、 C_p を含む f_c が 2000GHz 以上、12GHz 帯から 1GHz 帯への (500MHz 帯域幅) 変換損失が 2.5dB 以下という、従来 GaAsSBD では実現されなかった高性能を有していることを明らかにした。

③接合容量 $C_j(V)$ のより小さい多品種の素子を高性能化・高信頼度かつ同一ウェハプロセスで開発するために、動作層のキャリア濃度を減少して $C_j(V)$ を小さくする手法を導入し、(i) 従来手法よりショットキ接触面積 (直径: $2r$) を拡大すると共に、(ii) 本手法の課題である R_s 低減のために、動作層の抵抗を逆耐電圧と $C_j(V)$ の電圧依存範囲の両規格値を同時に果たす条件下で低減し、これ以外の R_s 成分を前記①の R_s 低減化技術を用いて非常に小さくすると素子設計法を開発し、素子設計に必要な特性を計算より明らかにした。④この設計法と前記①の寄生成分低減化技術を用いて開発した、 $0.02\text{pF}\sim 0.09\text{pF}$ の $C_j(0)$ を有し種々の用途に対応できる4品種の SBD ($2r=8\mu\text{m}^*$) は、設計通りの特性を示し、20GHz 帯の周波数変換や位相変調特性も非常に優れていることを示した。⑤更にこの設計・作製技術を用いて、ビームリード及びパッケージ入りモノリシック集積型 SBD を各々5種類開発したことを示した。

第5章の“ビームリード GaAs ショットキバリアダイオードの変換損失”では、第4章で述べた 2000GHz 以上の f_c を有するビームリード GaAsSBD の変換損失と静特性との相関、特に本研究により初めて明らかにされた n -値も含めた静特性との定量的な相関を述べた。

① n -値は、1.15以上で変換損失 L_c (イメージ短絡状態) に影響を及ぼし、1.10以下では殆ど影響しないことを計算より明らかにした。②開発した挿入損失の非常に小さいテストフィクスチャ (Test Fixture) を用い、直流増分法で測定した変換損失 L_o (信号周波数: 10.74GHz) は、(i) 上記計算値 (L_c の n -値依存性) と約 0.2dB 以内でよく一致しかつ 2.1dB という非常に小さい値になり、(ii) R_s 及び $C_j(0)$ 依存性においても計算値 L_c と定量的によく一致し、更に、(iii) 本

素子を装着した広帯域ミキサ（イメージ短絡：12GHz帯から1GHz帯の500MHz帯域幅）の変換損失 L_c の測定値（約2.5dB）とも約0.3dB以内でよく一致することを示し、ミキサダイオードの変換損失の静特性依存性、特に n -値依存性を計算及び測定から初めて明らかにした。

③また本素子では、 I_F-V_F 特性に含まれる n -値と R_s を求めれば、変換損失を直接測定することなしに予測できることを測定結果より明らかにした。

第6章の“ビームリード GaAs ショットキバリヤダイオードの高信頼化”では、第4章で開発した小さい $C_i(0)$ を持ち20GHz帯域で優れた周波数変換特性を示すビームリード GaAsSBDの高信頼化について述べ、本素子が非常に高い信頼度も有していることを明らかにした。

①まず本素子の高信頼化の課題が、(i)ポリイミド膜と GaAs 及びビームリード電極との界面付着力の向上と、(ii)ショットキとビームリード電極との接触界面の高信頼化、にあることを素子構造や使用材料の特徴から明らかにした。②この課題解決のために、第2章と3章の技術により GaAs チップとポリイミド膜のコンタクトホールを制御し、第4章の素子設計法によりショットキ電極と上記(ii)の接触面積を拡大した。更に、ポリイミド膜の特性と適合できるウェハプロセス技術の開発により、上記(i)及び(ii)の付着力及び信頼性をより高めた。すなわち、ポリイミド膜を超高真空中で完全キュア(Cure)した後、引続いてビームリード金属(Ti/Pt/Au)を蒸着し、その上にメッキした約8 μ m厚のAuの応力を最小(約0.4kg/mm²)にした。またショットキ電極をTi/Ptで形成し、接触界面(Pt-Ti)の耐熱性を大幅に向上した。

③この結果、JISあるいはMIL規格より厳しい熱的・機械的環境試験においても、本素子は故障せず、優れた耐湿性を有し、かつビームリード電極の引張り強度も約50kg/cm²と大きいことを示した。更に本素子は、3エルグ以上の耐サージ(Surge)特性を有し、高温通電による寿命加速試験から求めた周囲温度60°C、順電流20mAの実効動作条件でのMTTFは約 5×10^7 時間、故障率は数フィット(FIT)という非常に高い信頼度を有していることを示し、従来のパッケージ入り GaAsSBDでも実現されなかった高信頼化が達成されたことを明らかにした。

第7章は“結論”で、本研究の意義と各章で得られた成果を要約した。

①本研究で開発・実用化された各種のビームリード GaAsSBDは、現在 SHF 帯域以上の各種の通信・計測システムなどに多く採用されており、また②プレファレンシャルエッチング及びポリイミド膜の形成・加工技術も、今日の GaAs デバイスの開発には非常に重要な技術になっている。よって、これらのシステムやデバイスの発展に貢献できたと考える。

審 査 結 果 の 要 旨

マイクロ波を用いた情報伝送の活発化に伴い、高性能でかつ量産性にも優れているミキサの開発が要求されている。実用的なミキサ実現のためには、高い遮断周波数の得られるミキサ構造ならびにその構成材である半導体および絶縁膜の微細加工技術等、それぞれに対して十分な考察・研究を行うことが必要である。本論文は、実用的なビームリード GaAs ショットキバリアダイオードミキサの開発に関する一連の研究成果をもまとめたもので全編 7 章よりなる。

第 1 章は序論である。

第 2 章は、GaAs の微細加工技術に関するもので、 $\text{Br}_2\text{-CH}_3\text{OH}$ 溶液を用いた GaAs のエッチングについて、エッチング速度の結晶方位依存性（プレファレンシャルエッチング）を見出し、その特性について詳細な検討を加えている。この成果は、ミキサダイオードはもとより、その他各種 GaAs デバイスに対して利用し得る重要な知見である。

第 3 章は、ポリイミド膜の形成およびホットエッチングに関するものである。化学エッチングにより、ミキサの絶縁膜構造に適している V 字形のエッチ孔をポリイミド膜に形成し得ることを明らかにしている。

第 4 章では、高性能ミキサを得るべくダイオード構造に関し理論的な考察を行い、その結果に第 2、3 章での微細加工技術を応用して、遮断周波数 2000GHz のダイオードの製作に成功したことを述べている。

第 5 章では、製作したミキサの性能を評価しており、12GHz 帯で 2.5dB 以下の変換損失を得ている。ここで、ショットキ接触の理想定数 n と変換損失との関係を明らかにしているが、これは新しい知見である。

第 6 章は、ダイオードの高信頼性に関するもので、先ず高信頼化のための問題点がダイオードを構成している異種材料間の界面、例えば膨張係数の差などによることを明らかにし、次いでそれに対する解決法を挙げ、結果として高い信頼度を達成し得たことを述べている。

第 7 章は結論である。

以上要するに本論文は、ビームリード GaAs ショットキバリアダイオードに関し、その構成材の微細加工技術の開発よりはじめ、性能評価法、さらに信頼性まで検討を加え、実用的なミキサの実現に成功した成果を述べたもので、半導体工学ならびに電子工学の発展に寄与するところが少ない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。