

論文の内容の要旨

論文題目 砒化ガリウム高速高機能プレーナデバイスの研究

氏名 車田 克彦

ガリウム砒素半導体単結晶の半絶縁性基板上のN形動作層に Schottky ゲートを備えたプレーナ構造であることを共通点とする図 1.に示すガン効果素子と MESFET を対象にして、前者の素子に関するそれまでのDCバイアス動作異常の原因の究明と同動作を可能にする新構造の提案およびその実験的な検証の結果、後者のデバイスに関するデジタル集積化に適したドナー密度設計とデバイスプロセスの検討結果を記している。

プレーナガン効果素子では、ガン効果の閾値の周りの動作把握が鍵となる。そこで冒頭に、ガン効果の臨界から始動まで(pre-threshold から threshold 状態まで)のバイアス電圧-電流(静特性)を、従来よりも精度よく記述できる楕円群近似解析法を提案し、次いでパルスバイアス動作素子特性と比較し本近似が実験に整合することを示している。楕円群近似は、プレーナガン効果素子の動作層の厚さとキャリア密度の条件が、それまで動作解析に用いられた FET の Gradual 近似の条件範囲から外れるためにガン効果素子のゲート下の空乏層形状の近似が崩れているとの問題意識から新たに提案している。Gradual 近似は、ゲート下の空乏層の形状がチャンネル電流の方向に沿ってわずかに変化すると的前提のもとで精度の良い近似であるが、その適用範囲のガイドライン値には、FET のゲート長 L_G と動作層の厚み d を基準にして、 $2.5 \leq L_G/d$ 等の目安が提案されている。一方本デバイスの L_G/d の領域は、 $0.02 \sim 0.05 \leq L_G/d \leq 2 \sim 5$ となり、本素子の動作層厚さを、Gradual 近似ではカバーし得ない。

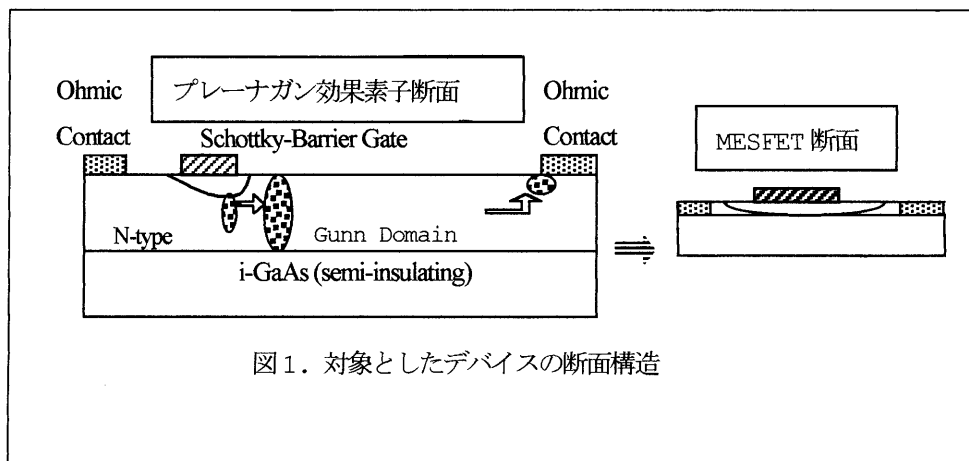


図1. 対象としたデバイスの断面構造

上記の静特性の把握に続き、閾値素子の動特性に焦点をあて、これを支配する **threshold** からパルス発生までの出力パルスのジッタ量、パルス生成の誤り率を評価した。この動特性の評価では、実用DCバイアス動作を可能にしたテトロード構造の採用によって素子の濃度、厚さ等の観点で初めて広範囲の測定が可能となり、本素子の本来の動作状態における性能限界が明らかになった。

次に実用DCバイアス状態での基礎データ把握の一環として、ゲート抜き二端子素子で動作層全域の電界分布を測定し、バイアス上昇に伴い陽極側電界が他の領域に先行して **Gunn** 効果の閾値を越えることを始めて確認した。

さらにプレーナ形の本 **Gunn** 効果素子において前提にしてきた **Gunn** ドメイン生成走行消滅を繰り返す動作モードに加えて、静止滞留モードが同一素子の特定バイアス条件下で生ずる現象を素子測定結果から確認した。

次の3章で、はじめに n^+nn^+ 形の縦型二端子ガン素子で報告されていた **Gunn** ドメインの静止滞留がプレーナ構造の素子においても理論上起こり得るか否かを、解析している。本解析では、静止滞留がX谷への電子遷移電界までの広い電界範囲での拡散係数の電界依存性に強く影響を受けるとの諸報告を考慮し、拡散係数の電界依存性を既報告の曖昧幅をカバーする広い範囲で動かして、ドメイン静止の条件をシミュレートした。その結果、電界依存性を持つ拡散係数が、試作素子で認められた陽極側での電界上昇に効くとすれば、その効果は他報告が指摘したプレーナ構造特有の形状である陽極側拡がり部分において静止させる作用ではなく、陽極の n^+ 層への電流集中部分での静止を促進している可能性が強いとの結論に到った。この結論は、プレーナガンに必須の陽極近傍の形状拡がりがかえってドメインを静止させるとする根本的な動作問題の疑念を解消する役割を持っていた。

また **Gunn Domain Dynamics** の視点では、本シミュレーションにより次の二点が新

たな知見として明らかになった。①電子拡散が電界によらず一定と仮定する場合には、既報告のように電子の拡散現象はドメインの静止を促す効果も持つ。しかし、拡散に電界依存のある場合、拡散の電界依存は拡散の空間的变化も意味するので、静止ドメイン内の異なる場所でドメインを崩す方向とドメインを強める方向の双方に同時に作用している。②ドメインを崩す作用は、ドナー密度が高いほど強くなり、高密度側ではこの作用がドメインの静止を抑制する支配的な条件となる。以上、Gunn ドメインの静止現象に関わる電子拡散の取り扱いにおいては、その電子拡散の電界依存性が重要な因子の一つとなることが判明した。静止ドメインの内部における電子の拡散にもとづく上述の二つの要素の作用は、表 1. に示すような結論となる。

表 1. 静止ドメイン内における電子拡散効果の作用

$y = n - n_d$	正 (蓄積層)		0(電界 peak)		負(空乏層)	
	減速				加速	
電子速度						
$\partial n / \partial x$	正	0	負	0	正	負
$-D \cdot \partial n / \partial x$ の 電子速度への影響	減速		加速		減速	加速
静止ドメイン生成 への効果	促進		抑制		抑制	促進
$-nD_y (D_r \leq 0)$ の 電子速度への影響	加速				減速	
静止ドメイン生成 への効果	抑制				抑制	

プレーナガン効果素子の実用化を目指す構造上の新たな試みを 3 章後半に報告した。表 1. を含む前節のシミュレーションから推定される陽極側におけるドメインの静止滞留条件を緩和することを狙って、補助陽極を主陽極の手前に導入したテトロード構造の素子を考案試作し、DC バイアス動作状態で静止高電界抑圧が可能なこと、高感度のゲートトリガ動作を可能にすることを実証している。

次にドメインの静止滞留を抑制する第二の方法として、P 型陽極を用いた素子を提案し、その実験結果を示した。P 型陽極では、通常の N (N⁺) 型陽極の場合に生ずる DC 動作障害が解消され、本来のトリガ動作が可能なことを示した。

上記の新たな構造の提案であるテトロードと正孔注入形素子はプレーナガンの最大課題である DC 障害を解消できるという観点で実用化へ一歩踏み出したデバイスである。

これらのプレーナ形 Gunn 効果素子の研究で蓄積した技術と知見は、同じくディジタ

ル応用を狙う MESFET の開発に利用することになった。始めにデジタル動作の基本となるパルス出力電流波形の過渡応答の高速化が、密度プロファイルの工夫によって可能であることを数値解析により示した。MESFET のドナー密度分布と過渡応答電流出力の波形との関係に始めて具体的に言及したものであり、本数値解析によれば、

(1) 平坦な分布では立ち上がり時間が立ち下がり時間より長なり、さらに基板との境界に分布のダレを見込む現実に近い分布では、立ち上がり・立ち下がりの不均衡は大幅に助長されて、全体の応答時間は大きく遅れることが明らかになった。これはショットキー障壁の空乏層が on に近づいた状態で、(空乏層厚さ t) \propto (バイアス) $^{1/2}$ の勢いで薄くなり急激な容量増 ($C \propto 1/t$) を伴うことに起因すると考えられることから、相対的な密度分布としては、表面側の密度を低くし、基板界面に向け電子濃度を高め基板界面で鋭く下げるプロファイルが適しているとの見通しが得られた。

(2) 分布関数 $n(y)$ の3次および4次のべき級数の係数を変えながら、応答特性を速める分布形を探索した。評価基準は立ち上がり・下がり時間 ($t_r + t_f$) 及び立ち上がり・下がり時間の対称性 ($t_r \doteq t_f$) とした。基板との境界近く (表面から動作層深さにして約70%近傍に密度のピーク(表面濃度の3~4倍)を持つ分布を作ると閾値電圧 $V_0 = 0.4V$, 論理振幅 $v_1 = 0.6V$ なる一般の動作条件で、通常想定する矩形平坦形の分布の場合に比べて、立ち上がり時間で3倍、立ち上がり・下がり時間を足した時間で、2倍の高速化を図ることができる。

次に多数の MESFET の集積化に際して問題となるデバイスセル間の特性バラツキ問題に対して、起こりやすい三種類の材料/プロセス起因の素子特性バラツキを想定し、それらに起因する閾値変動の定量化を試みている。要因はドナー相殺形不純物 N_{BG} の変動、ゲート下の中性化、ゲート外部の中性化の三種類のモデルに集約され、これによって材料/プロセスのバラツキとして許容される基準を算出することができる。この基準は、集積化プロセスにおけるバラツキの許容幅のガイドライン (指標) の役割を果たした。

既報告等から得られた各種の公表データをもとにして、プロセスの各要素ごとにその技術的な弱点・欠陥の所在を分析し問題点を抽出した。次にこれらの要素プロセス間の親和性を保ちつつ諸プロセス全体を編成し、MESFET 集積化プロセス SAINT (Self-Aligned Implantation for N+layer Technology) を実現した。SAINT により 1kbSRAM の再現性のある試作が可能になった。始めて実現した同 SRAM の動作特性は、GaAsMESFET 集積技術の高速低電力性のポテンシャルを実証しており、その後の同技術の実用化への展開の出発点となっている。