

外96-18

早稲田大学大学院理工学研究科

博士論文概要

論文題目

化合物半導体FETにおけるホットキャリア効果
と深い準位に起因した諸現象の研究
-キック効果を中心にして-

申請者

春山純志
JUNJI HARUYAMA

1996年7月

半導体電界効果トランジスタ(Field-Effect-Transistor以下FET)は、その製造工程の簡略さから、発明からわずか40年近くの間に大きく技術革新が進み、コンピュータ、通信装置、家電製品等に搭載され、現在の我々の生活にとってキーデバイスとなっている。その高性能化の指針として、主に二つの流れが存在する。一つは、FETの材料物性の研究、改善であり、もう一方はFETサイズの縮小である。前者では、Ge、Siを経てGaAs、InGaAs等の化合物半導体の開発が行なわれ、後者では、FETのゲート長、チャネル長等のサブミクロンオーダーへの縮小が実現した。しかし反面、これらの流れは、必然的に、前者において化合物半導体特有の深い準位に起因した特性の不安定性を、後者において高電界に起因したホットキャリア効果と呼ばれる特性劣化要因を、各々FET中にもたらしてきた。

これら二つの現象を顕著に反映した物理現象の一つにキンク効果がある。キンク効果は、FETのドレン電流(ID)が、I-V特性中の、あるドレン電圧(VD)で急激に増加する現象である。この効果は、FETの静特性においてドレン耐圧、相互コンダクタンスの低下を招き、高周波特性において、出力、線形利得、歪特性の劣化を生ずる。さらに、長期的にはFETの信頼度の劣化を生じさせる場合もあり、キンク効果の低減はFET特性向上のために必須である。本論文では、化合物半導体のキンク効果のメカニズムを明らかにすると共に、キンク効果の一因である衝突電離、セルフサイドゲート効果(SSG効果)の振舞いを究明し、キンク効果低減への指針を示した。

以下に、各章の概要を述べる。

第一章では、序論として、化合物半導体FET研究開発の背景と、それに伴って発生した数種類のキンク効果のメカニズム、そのFET高周波動作への影響について述べ、本研究の目的、意義を明らかにした。

第二章では、本研究の発端ともなったGaAs Metal-Semiconductor FET(以下MESFET)の静特性で観察されたキンク効果について論じた。このFETでは高性能化実現のために、MBE成長によるGaAs結晶層に形成されたLightly-Doped-Drain構造、高濃度キャリアを持つチャネル層、AlGaAs/GaAsヘテロ接合バッファ層、B+イオン注入による絶縁化、等の新技術を採用したが、逆にそれらがこの構造特有の新しいメカニズムのキンク効果を発生させた。

まず、このキンク効果が負の温度係数・印加ゲート電圧係数を有する事、また、キンク効果が発生するVD付近で、ゲート電流・基板電流が負側に急激に増大する事、基板電位が負から正へ急激に増加し、GaAsのバンド端であるエネルギー1.4 eV付近の発光強度が急激に増加する事、を同一FETで、初めてすべて測定する事に成功した。これによりFETのチャネル電流経路に沿ったドレン側で衝突電離が発生し、過剰な数の正孔がヘテロバッファ界面に蓄積される事を明らかにした。また、それらの値からC. Huiらの方法に基づき、衝突電離のイオン化係数が算出された。その結果、ゲート電流と基板電流からの算出値はチャネル電界に対して同じ依存性を示すが、係数の絶対値は基板電流からの算出値の方が約250倍大きい事、衝突電離の臨界電界はゲート電流からの算出値の方が小さい事、等がわかった。さらに、発光強度が基板電位に大きく依存する事が発見され、これらは、上述したFET構造に強く依存している事が明らかにされた。

次に、衝突電離以下のVDでの現象として、基板電位がゲート電圧に比例した負の値をとる事、バックゲート効果の過渡応答を利用したDeep Level Transient Spectroscopy(DLTS)により、基板中に正孔トラップが存在する事、等を確かめた。これよりp型化したB+層と基板を介したSSG効果(チャネルから遠く離れた自身のゲートパッドに印加した負電圧が、基板電位を負に変調し、IDを減少させる効果)の存在を明らかにした。

最後に、このキンク効果は、前記した衝突電離により生成された正孔蓄積が、このSSG効果を遮蔽する事により発生する、というメカニズムを初めて報告した。さらに、サイドゲート電極を用いる事で、初めて観察に成功した基板電位の負から正への変化が、このメカニズムを最も直接的に表しており、これら衝突電離、SSG効果の低減により、キンク効果の低減が可能である事について述べた。

第三章では、第二章で論じたキンク効果のメカニズムの確認と、その低減の一指針として、バッファ層(FETのチャネル直下の層)依存性を論じた。第二章と全く同じ構造でありますながら、FETのバッファ層のみを置き換える事でキンク効果の振舞いは大きく変化した。特に、MBEにより低温(292°C)で成長されたノンドープGaAsバッファを用いる事で、静特性において、このキンクがほぼ完全に消滅する事が初めて発見された。発光特性等の測定結果は、このFETにおいても第二章で論じたと同様の衝突電離が発生している事を示唆したが、基板電位、SSG効果の測定結果から、SSG効果は消滅している事が明らかになった。これらよりこのキンク効果の消滅は、衝突電離により生成された正孔蓄積、SSG効果、の両方の消滅に起因している事がわかった。

さらに、第二章と同じ方法の電流DLTSの測定から、この低温成長GaAsバッファ層でのみEL-2に類似した電子トラップと、三種類もの正孔トラップが、高濃度で検出された。これより、Shockley-Read-Hall(SRH)統計に基づいて、正孔蓄積とSSG効果消滅のメカニズムが論じられ、これら複数の深い準位を介した、FET中の自由正孔のSRH再結合がその主な原因である事が結論された。バッファ層のみを変える事でキンク効果が消滅した事により、第二章で論じた基板/バッファ層に起因したメカニズムが裏付けられ、この方法がキンク効果低減への大きい指針となる事がわかった。

第四章では、第三章で述べた低温成長GaAsバッファを用いたFETの、高周波でのキンク効果の振舞いを、ゲート電圧の過渡応答測定に基づき論じた。第三章で静特性で消滅したキンク効果は、過渡応答特性から算出されるパルスI-V特性において、周波数の上昇に伴い、以下の二種類に別れて出現する事が初めて明らかにされた。

第一のキンク：ゲート入力パルス電圧の周波数10kHz以上で、衝突電離発生より高いVD領域のパルスIDが突然増加する事により生じる。過渡応答波形の直接の観察から、このメカニズムは、衝突電離により発生した正孔数が過剰であるため、その再結合時定数がゲート周波数に追随しない事に起因している事が明らかになった。またこれより、過剰な正孔の寿命は少なくとも300μs程度である事がわかった。

第二のキンク：ゲート電圧周波数100kHz以上で、衝突電離以下のVD領域で減少したパルスIDが、衝突電離により上記10kHzでのID値に増加する事により生じる。ゲート入力

パルスの低レベル値を変化させた測定から、この ID減少はSSG効果の過渡応答に起因している事を明らかにし、約200nSという短い時定数を持つ異常な過渡応答波形の観察に初めて成功した。そのメカニズムとして『ゲート周波数の上昇→深い準位の電子占有確率、自由正孔の再結合確率の減少→バッファ中の過渡的正孔蓄積→SSG効果の出現』というモデルを提案した。このモデルに基づけば、この自由正孔の寿命は約200nS程度である事がわかった。また、第二のキンク効果は上記した衝突電離により生成された正孔がこのSSG効果の過渡応答を遮蔽する事により、出現する事が明らかにされた。

本章より、低温成長GaAsバッファを用いる事による、高周波でのキンク効果の改善のためには、深い準位の最適化がさらに必要である事がわかった。

第五章では、前章までのMESFETと異なり、AlGaAs/InGaAs HEMT(High Electron Mobility Transistor)において観察されたキンク効果が論じられた。HEMTは電子の供給層と走行層を分離し、かつ、走行層を二次元量子井戸化したFETである。そのため、MESFETに比べ、電子は高移動度であり、ゲート電圧による高制御性を持ち、前述してきた深い準位等による表面、基板側での電荷蓄積に対して、キンク効果が出現し易い可能性を持つ。この章では、同一のHEMTにおいて光応答に依存した三種類のキンク効果の観察に初めて成功し、それらのメカニズムについて論じた。

まず、明状態では、前章までと同じメカニズムの第一のキンク効果が、暗状態では、SSG効果の消滅により、高VD領域で衝突電離のみに起因した第二のキンク効果が、低VD領域で、基板側の電子トラップへの、電子の捕獲、放出に起因した第三のキンク効果が、各々観察された。ゲート電流、基板電位、SSG効果等の測定結果に基づき、それらのメカニズムが論じられた。次に、HEMTでは初めて、ゲート電圧の過渡応答測定による電子トラップからの電子放出、キンク効果の照射単色光エネルギー依存性、サイドゲート電極を用いた電流DLTSの測定による深い準位の観察、に成功し、論じたメカニズムの正当性が確認された。

これにより、前章までで確立されたキンク効果のメカニズム、またその解析方法が、HEMTにも応用できる事が発見され、その低減の方向が明らかになった。

第六章では、キンク効果から離れて、ホットキャリア効果、深い準位に起因した他の現象の一例として、GaAs MESFETにおいて観察された『Long Term Drift』と呼ばれる現象が論じられた。この現象は、室温で、ゲートショットキー接合部の逆方向バイアス印加による衝突電離発生という過程を経た後、FETのIDが増加し、2~3日もの長い時定数を経た後回復する、というもので、FETの使用時に悪影響を及ぼす。現象の初期化特性、温度依存性、基板電位、DLTS等の測定結果から、この現象が、衝突電離により発生した正孔の、ゲートショットキー空乏層内に存在するAlGaAs中のDXセンターと呼ばれる準位に類似した正孔トラップへの捕獲に起因している事を明らかにし、ゲートからの機械的応力が、この深い準位からのキャリア放出に対してエネルギー障壁を形成し、時定数を長くしている可能性を論じた。

第七章では、本研究の成果についてまとめ、今後の課題を明らかにし、総論とした。