

氏名	ささきてつお 佐々木哲朗		
授与学位	博士(工学)		
学位授与年月日	平成10年3月25日		
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項		
研究科、専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)機械電子工学専攻		
学位論文題名	静電誘導サイリスタの高速化		
指導教官	東北大学教授 江刺 正喜		
論文審査委員	主査 東北大学教授 江刺 正喜	東北大学教授 小柳 光正	
	東北大学教授 石井 慶造	東北大学教授 須藤 建	

論文内容要旨

パワーエレクトロニクス技術は、産業分野においてばかりでなく、電力、運輸交通、家庭電化製品に至るあらゆる分野で、重要な基盤技術となっている。パワーエレクトロニクスを発展させるもっとも重要な要素のひとつは電力用半導体デバイスであり、その中でも自己消弧型の半導体デバイスを用い、直流を交流に変換する技術は応用性が高い。身近な例をあげるならば、電車・電気自動車等の交流電動機の数値制御や、UPS (Uninterruptible Power Supply) などに用いられる。また直流送電技術への応用なども期待されている。電力回路に望まれるものはいうまでもなく高効率であり、スイッチング損失・ON損失を低減するためこれらの電力用半導体デバイスには高速・低ON電圧であることが求められている。この要求を鑑みるに、静電誘導サイリスタは非常に優秀であり、その利用には大きな期待が寄せられている。本論文は、静電誘導サイリスタおよび静電誘導サイリスタと同時に用いられるpinダイオードの高速化手法について検討・実験を行ったものである。

第1章は序論である。

第2章においてシリコン中の深い準位について述べる。深い準位の導入法として用いたプロトン照射、深い準位の測定法として用いたフォトキャパシタンス(PHCAP)測定、およびその実験結果について述べる。

静電誘導サイリスタのみならず、電力用半導体デバイス一般に用いられる高速化の技術としてライフタイムキラーの導入がある。この手法として重金属の拡散や電子線照射などが旧来から行われてきた。また最近の技術であるプロトン(H⁺)等の高エネルギー粒子線照射を用いれば、局所的にライフタイムを変化させることができメリットは大きい。しかしながら、そのメカニズムは未だわからないところが多く、詳細な説明が求められている。

一定容量法によるフォトキャパシタンス測定によって、プロトン照射により生成した深い準位について測定した。加速電圧 1MeV、ドーズ量 10¹³cm⁻² の条件でプロトン照射した場合、20K におけるフォトキャパシタンス測定によって、伝導帯の下 0.42, 0.56, 0.78, 0.81eV に、価電子帯の上 0.7, 0.75, 0.80eV に準位が検出された(図1)。

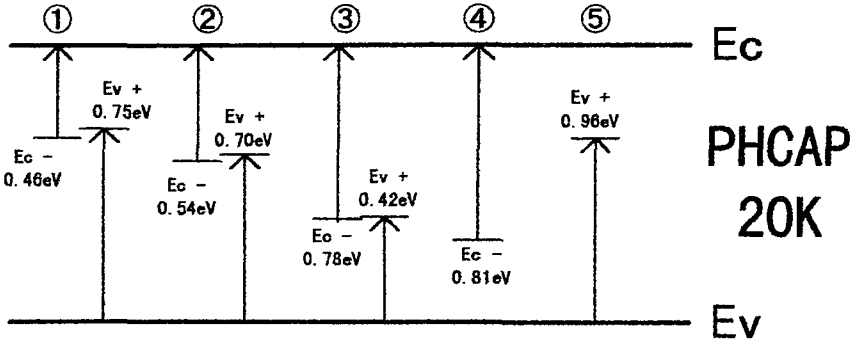


図1 深い準位のバンド図

また、一定容量値を変化させることによって深い準位の空間的分布を測定し、1MeVのプロトンの加速電圧ではいずれの準位も表面から約16.8 μm 付近に、1.7MeVの加速電圧では約37.5 μm 付近に集中的に生成されていることがわかった(図2)。これらの値はプロトンの停止領域に対応していると考えられる。更にこれらの準位はp型、n型のいずれでも検出されるため、その成因は注入した水素あるいはシリコンの格子欠陥であると考えられる。次に高真空中でアニール温度を変化させて熱処理した後、フォトキャパシタンス測定を行った。この結果、アニール温度を上げると生成された準位は消滅していくことが分かった(図3)。また、熱励起法の測定として Isothermal GC-DLTS 測定を行った。この結果得られた準位は、従来 DLTS 法で報告されているものとほぼ同じであったが、光励起法と熱励起法により求めた深い準位を比較した場合、はっきり同定できる準位は見られなかった。

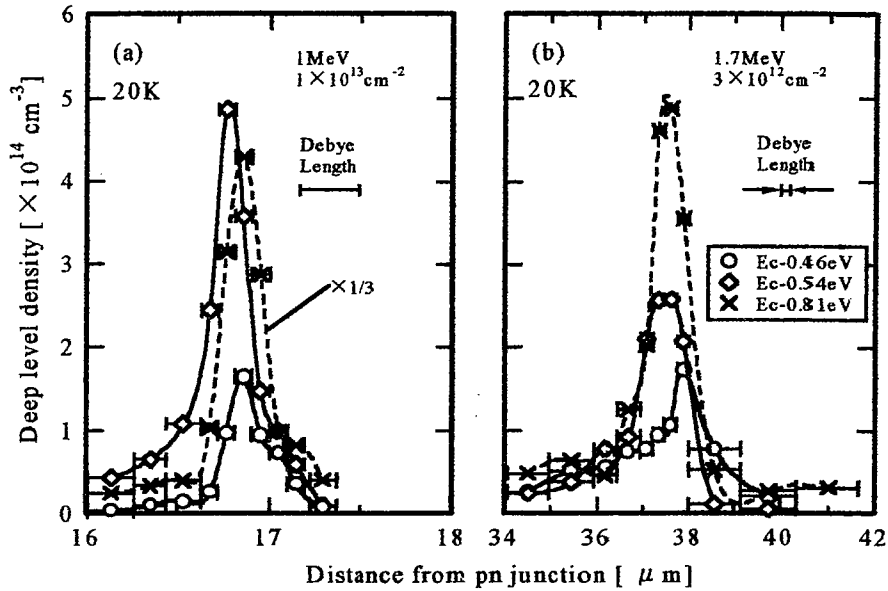


図2 深い準位の空間分布

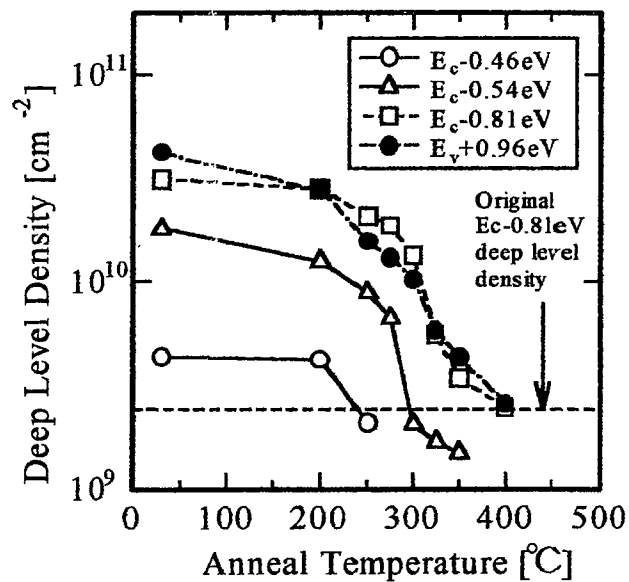


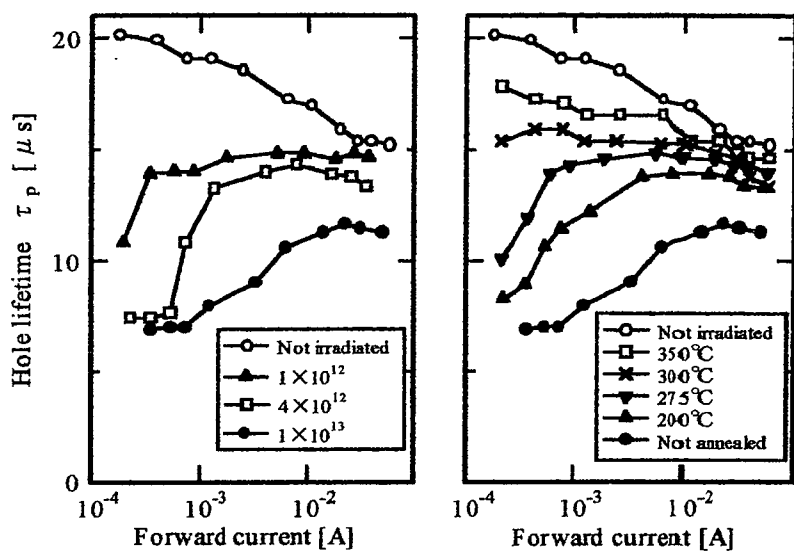
図3 アニールによる深い準位密度の減衰

第3章では半導体パワーデバイス中の最も重要なパラメータであるキャリア寿命について考察する。プロトン照射によりキラセンターとしての深い準位を導入した pin ダイオードにおいて、プロトンドーズ量依存性・アニール温度をパラメータとし、深い準位密度と順方向電圧降下、逆回復電荷、少数キャリア寿命の関係性を求めた。

プロトン照射 pin ダイオードのインピーダンス測定結果に西澤の式を適用し、バルク中のホールの寿命を求めた。プロトン照射したダイオードでは少数キャリア寿命は順方向電流の関数となり、大電流では深い準位での再結合割合が飽和するため長くなり、プロトンを照射していないダイオードのそれに近づく。(図4) これは高電流時には、注入されたキャリアの深い準位での再結合の速度が有限であるためにキャリアが効果的に再結合せず、“すり抜けて”高抵抗層中に注入されるためであると考えている。

電流電圧特性とスイッチング

の逆回復特性から、工業的に重要な意味を持つ pin ダイオードのオン電圧と逆回復電荷のトレードオフ曲線が得られた。(図5)



(a) ドーズ量パラメータ (b) アニール温度パラメータ

図4 ホール寿命の電流依存性

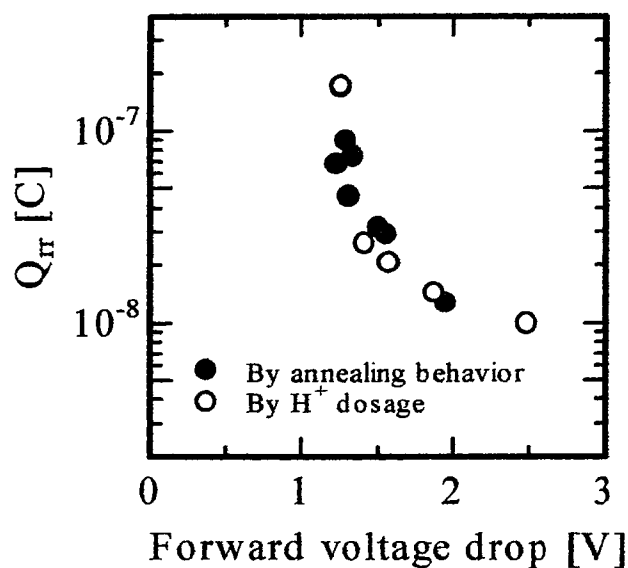


図5 順方向電圧降下と逆回復電荷

第4章では、ゲートの負電源を必要としない静電誘導フォトトランジスタ(SIPT)とのカスコード接続型の光制御静電誘導サイリスタについて、その動作を調べた。

静電誘導サイリスタ(SIサイリスタ、SIThy)は現在までに大電力化、また製作法の簡易化等のために様々な改良が加えられ、その応用分野も広がりつつある。その中で、静電誘導サイリスタの高速化とゲート駆動の簡易化は広く求められている。

静電誘導サイリスタの駆動方式の一つとして、SIPTとカスコードに接続した光駆動方式(図6)を試し、良好な動作を得た。なお、この方式は静電誘導サイリスタのゲートに負電源を必要としないことに特徴がある。制御信号光の強度、波長の最適化が非常に重要であることがわかった。

集積化の提案を行った。この場合エピタキシャル成長を利用して縦方向に積み重ねれば、面積を有効に使えるので大容量化にとって良いと考えられる(図7)。プロセスについて考えても、SIThyのカソードとSIPTのドレインが共通化できるため、電極のパッドがいらぬ。また、理想的にはSIPTのゲートもいらぬ。SIThyのゲートはSIPTのソースとウエハ上で接続すれば、インダクタンスも小さくできる。また電極パッドはSIThyのアノードとSIPTのソースの2つだけになる。

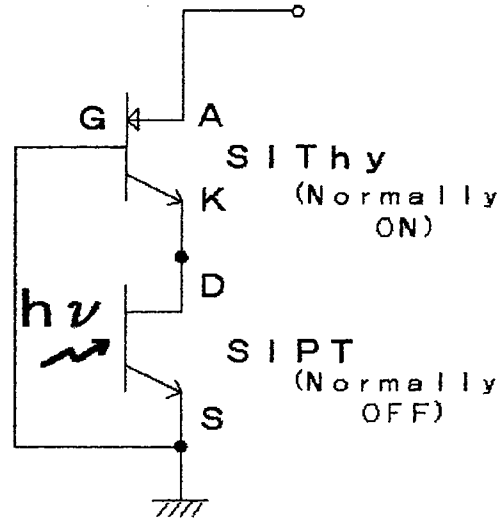


図6 カスコード接続による光駆動静電誘導サイリスタ

第5章に結論を述べる。

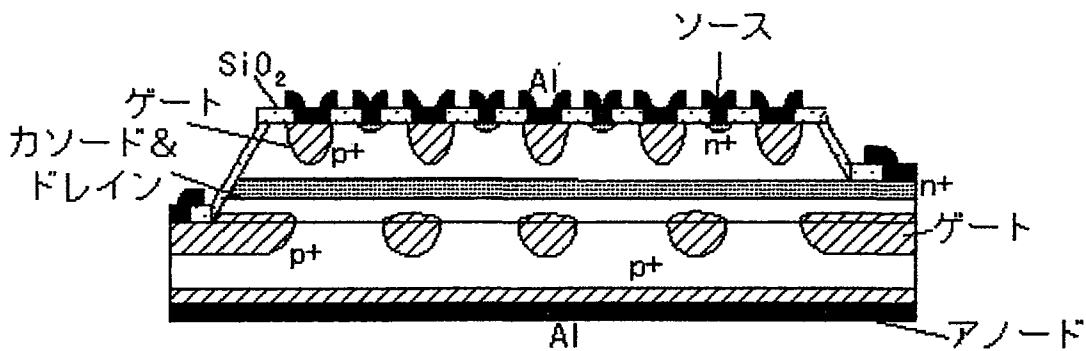


図7 集積化したカスコード接続による光制御静電誘導サイリスタ

審査結果の要旨

パワーエレクトロニクス技術はあらゆる分野の基盤技術で、省エネルギーにも大変重要である。電力を制御したり、あるいは直流送電のために直流を交流に変換したりするにはサイリスタと呼ばれる自己消弧型の半導体デバイスが用いられる。この中で静電誘導サイリスタは特に高速かつ低損失で、大きな期待が寄せられているが、本論文はさらなる高速化を目指して研究した成果を纏めたもので、全文5章よりなる。

第1章は序論である。第2章では、シリコン中の深い準位の測定について述べてある。深い準位はライフタイムキラーとして働いて少数キャリアを再結合で消滅させるが、これによって遮断時に高速化させることができる。この測定のためフォトキャパシタンス (PHCAP)法の装置を製作した。

第3章では、加速器を用いてプロトン照射した p i n ダイオードについての測定から深い準位の性質を明らかにしている。深い準位はプロトン照射で導入でき、PHCAP 法だけでなく、インピーダンスを用いたライフタイム測定、電圧電流特性、スイッチング特性などの結果から検討を行った。

第4章では、実用回路に適した光制御静電誘導サイリスタを提案し、実際の動作を確認している。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、静電誘導サイリスタの高速化に向けて、その鍵を握る深い準位に着目し、測定法の開発やそれを用いた測定評価、実用回路の検討などの総合的な研究を行い、静電誘導サイリスタの高速化の設計指針を明らかにしたもので、半導体工学、機械電子工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。