

氏名	野中賢一
授与学位	工学博士
学位授与年月日	昭和62年3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第5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) 電子工学専攻
学位論文題目	光トリガ・光クエンチ静電誘導サイリスタ
指導教官	東北大学教授 西澤 潤一
論文審査委員	東北大学教授 西澤 潤一 東北大学教授 村上 孝一 東北大学教授 竹田 宏 東北大学教授 脇山 徳雄

論文内容要旨

電力変換・制御に代表されるパワーエレクトロニクスは、今日、社会に計り知れない恩恵をもたらしている。パワーエレクトロニクスの分野において、近年発展のめざましい半導体電力変換素子の役割は大きく、その中であって静電誘導トランジスタ(Static Induction Transistor; SIT)の応用素子である静電誘導サイリスタ(Static Induction Thyristor; SIサイリスタ)は、その優れた特性により大きな注目を集めている。本論文は、光信号によりオン・オフを制御する光トリガ、光クエンチ静電誘導サイリスタ(Light Triggered and Quenched Static Induction Thyristor; LTQSIサイリスタ)の設計、試作、基本的特性について述べるものである。

はじめに、SIサイリスタの光トリガ特性とも深い係わりのある静電誘導ホトトランジスタ(Static Induction Photo-Transistor; SIPT)の光応等特性を調べた。図1は、SIPTの動作原理図である。図1(a)はSIPTの断面図で、図中の表面 n^+ 領域はソース(S)、基板側 n^+ 領域はドレイン(D)、ソースをはさむ表面 p^+ 領域はゲート(G)、 n^- 領域はチャンネル、 G^* はチャンネル中に生じるポテンシャルの鞍部点である真のゲート点をそれぞれ表わしている。図1(b)は、図1(a)のA-A', B-B'線上でのポテンシャル図、図1(c)は、図1(a)のC-C', D-D'線上でのポテンシャル図を示している。SITでは、ゲート接合の拡散電位とゲートバイアス、さらにドレインバイアスにより、チャンネル領域を空乏化し、 G^* の電位をゲート電圧とドレイン電圧により容量結合的に制御することをその動作の特徴としている。図1に示すSIT特有のゲート構造に起因して、SIPTの光感度は非常に高く、

素子に入射するフォトン数に対する光出力電流のキャリアの数で定義する光利得Gは、SIPTでは微弱光領域において、

$$G = \frac{D_n \cdot L_p \cdot n_s}{D_p \cdot W_G \cdot p_G} \cdot \exp \frac{q}{kT} (V_{biGS} - V_{biG^*S}) \dots\dots\dots (1)$$

と表わせる。式(1)中で、 D_n , D_p はそれぞれ電子, 正孔の拡散定数, L_p は正孔の拡散距離, W_G は真のゲート点の電位障壁の実効幅, n_s はリースの不純物密度, p_G はゲートの不純物密度, V_{biGS} はゲート・ソース間の電位障壁, V_{biG^*S} は真のゲート・ソース間の電位障壁, k , T , q はそれぞれボルツマン定数, 絶対温度, 単位電荷量である。図1または式(1)からもわかる様に, ゲートには正孔がより蓄積されやすくソースからチャンネルに電子が注入されやすいSIT特有のゲート構造が, 高光感度を有する理由である。図2は, ゲートバイアスがOVでチャンネルがピンチオフしてドレイン電流がほとんど流れないノーマリ・オフ型SIPTの光応答特性の一例である。

直流的な光利得Gとゲート電位変化 ΔV_G の入射光強度 p_i 依存性であり, 測定はゲート開放で行ない, ドレインバイアス V_D をパラメータとした。ゲート開放のため, ΔV_G は p_i に対して対数関数的に増加している。一方, Gは p_i が弱い程大きく, また, V_D に対して増加する。SIPTのGは, バイポーラホトトランジスタ(Bipolar Photo-transistor; BPT)より数桁大きく, 例えば図2の結果では $p_i = 10^{-10} \text{ W/cm}^2$ の下で 10^8 を越えるGが得られた。また, BPTでは, Gはコレクタ電圧に対して飽和する特性を示すが,

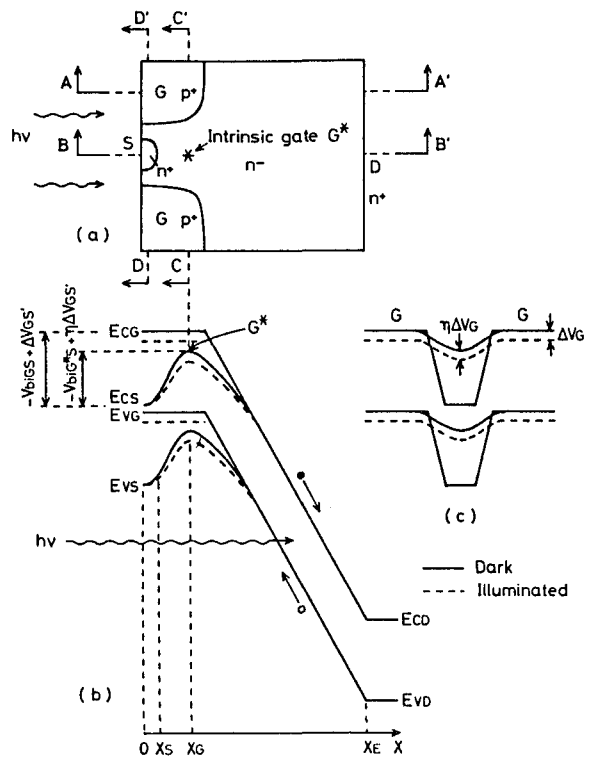


図1 SIPTの動作原理図, (a)構造断面図, (b) (a)のA-A', B-B'線上でのポテンシャル図, (c) (a)のC-C', D-D'線上でのポテンシャル図

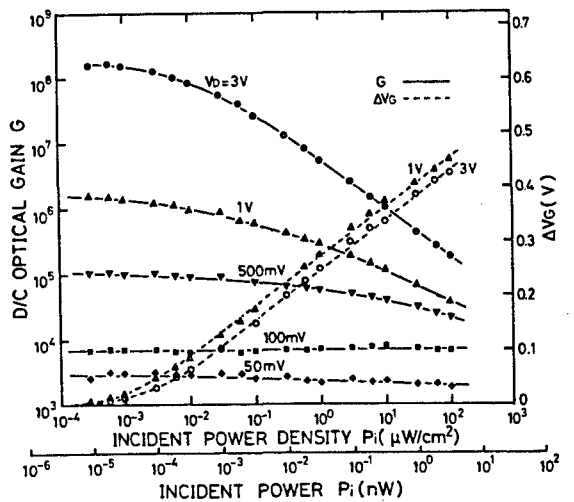


図2 ノーマリ・オフ型SIPTの直流的な光利得G及びゲート電位変化 ΔV_G の入射光強度 p_i 依存性

SIPTのGは V_D に対し不飽和特性を示す。以上の様に、SIPTは光感度が高く、以下に示すLTQSIサイリスタの他に光通信等にも応用可能である。

次に、SIサイリスタの光信号によるスイッチング実験を行なった。はじめに、図3によりLTQSIサイリスタの動作原理を略説する。LTQSIサイリスタは、光トリガ(LT) SIサイリスタとクエンチ用光感応素子とで構成される。図3には、LTSIサイリスタは断面構造で示され、光感応素子はpチャンネルSIPTを用いる例が示されている。光感応素子は、LTSIサイリスタをターン・オフするのに十分な電流容量及び、高光感度特性、高速性が要求される。初期状態では、LTSIサイリスタ、SIPTともにオフ状態にある。トリガ光パルス(LT)をLTSIサイリスタに入射することで発生する電子正孔対は、ゲートまたは第2ベースに流れ込む(a)。カソードからは電子、アノードからは正孔が注入され、それらがさらに第2ベースまたはゲートに流れ込み、一層キャリアの注入がさかんになる(b)。遂には、正帰還がかかりLTSIサイリスタはオンする(c)。次に、クエンチ光パルス(LQ)をSIPTに照射する。SIPTがオンすると、LTSIサイリスタ内の正孔が引き抜かれ、ゲート電位さらには真のゲート点の電位が上昇し、カソードからの電子の注入が抑えられ、やがて、第2ベース電位も上昇し、アノードからの正孔の注入も抑えられLTSIサイリスタはオフする(d)。以上のプロセスで、LTQSIサイリスタによる直流の光信号でのオン・オフ動作が実行できる。図4は、LTQSIサイリスタの光スイッチング波形の概略図である。図中には、アノード電圧(V_{AK})、アノード電流(I_{AK})、LTSIサイリスタのゲート電圧(V_{GK})、ゲート電流(I_G)波形及び、トリガ光パルス(LT)、クエンチ光パルス(LQ)波形を示してある。また、ターン・オン遅れ時間(T_{don})、立ち上がり時間(T_r)、ターン・オン時間(T_{on})、ターン・オフ遅れ時間(T_{doff})、立ち下がり時間(T_f)、テイル時間(T_{tail})、ターン・オフ時間(T_{off})、ターン・オンゲート電流(I_{Gon})及び、ターン・オフゲート電流(I_{Goff})を定義している。光トリガの実験は、

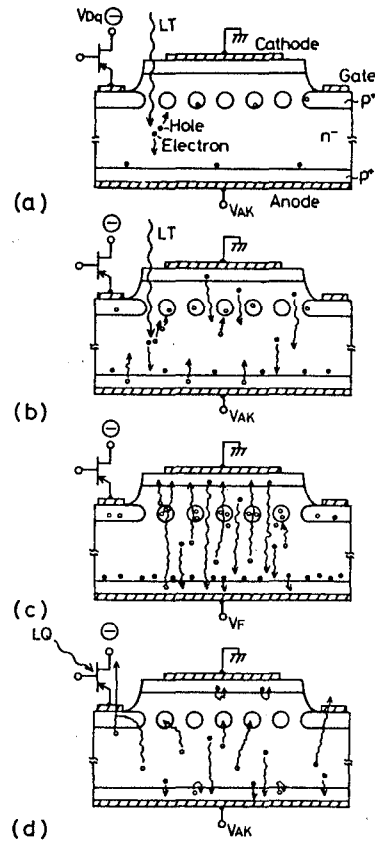


図3 LTQSIサイリスタの動作モデル図

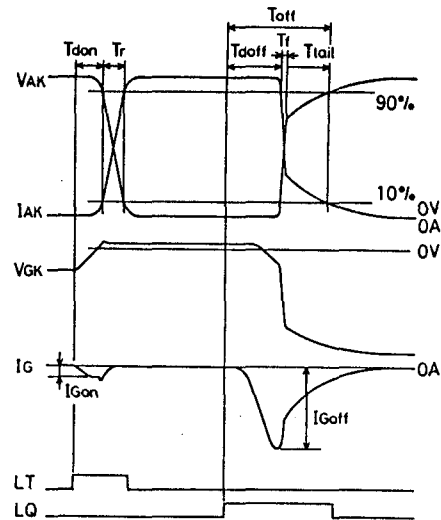


図4 LTQSIサイリスタの光スイッチング波形の説明図

LT SIサイリスタを直接光駆動する直接トリガ方式と、SIPTやLT SIサイリスタを増幅用素子として用いる間接トリガ方式について行なった。また、光クエンチの実験は、クエンチ用素子に単一のSIPTを用いる直接クエンチ方式と、SIPTダーリントン回路をクエンチ用素子とする間接クエンチ方式について行なった。実験には、埋め込みゲート型1 A級LT SIサイリスタと、埋め込みゲート型pチャンネルSIPTを使用した。光源には、中心波長 $\lambda=880$ nm、立ち上がり時間 $T_r=12$ nsのGaAsLEDを使用した。その結果、トリガ光エネルギーが10 pJ程度、クエンチ光エネルギーが10 pJ~10 nJの範囲での、光トリガ・光クエンチ動作を確認した。代表的なスイッチング特性としては、 $V_A=500$ V, $I_{AK}=1$ A, $P_{LT}=17.5$ mW/cm², $P_{LQ}=17$ mW/cm²で $T_{don}=0.28$ μ s, $T_r=0.28$ μ s(直接トリガ), $T_{doff}=0.43$ μ s, $T_{off}=5.4$ μ s(間接クエンチ)等が得られた。以上、1 A級素子の実験で、光信号によるSIサイリスタのスイッチングを実現し、その高速、高感度特性を確認した。

さらに、LTQSIサイリスタの集積化構造を検討し、600V-1 A級、1000V-10 A級の集積化LTQSIサイリスタを設計、試作した。ここでは、1000V-10 A級素子について述べる。図5は、1000V-10 A級集積化LTQSIサイリスタの断面構造図(a)と平面図(b)である。図5の構造は、埋め込みゲート型LT SIサイリスタとpチャンネル表面ゲート型SIPTダーリントンが集積化されたものである。ターン・オフ速度の高速化、ターン・オフ電流利得の向上を目的として、LT SIサイリスタには新型のアノードエミッタショート(AS)構造を導入している。新型AS構造は、アノード(またはエミッタ)間隔が電子の拡散距離以下としてあり、また、アノード拡散深さをエミッタ拡散深さよりも深くすることでオン電圧の上昇を抑えている。また、クエンチ用素子にSIPTダーリントンを採用することで、光クエンチ感度、光クエンチ速度及び、ターン・オフ電流容量の向上を実現できる。さらに、図5の構造では、n⁺分離領域によりLT SIサイリスタとSIPTダーリントンが電氣的に分離されている。製造工程は、LT SIサイリスタとSIPTの同時工程を含むため、比較的短くできる。マスク工程数は、12である。図6は、試作素子の光トリガ

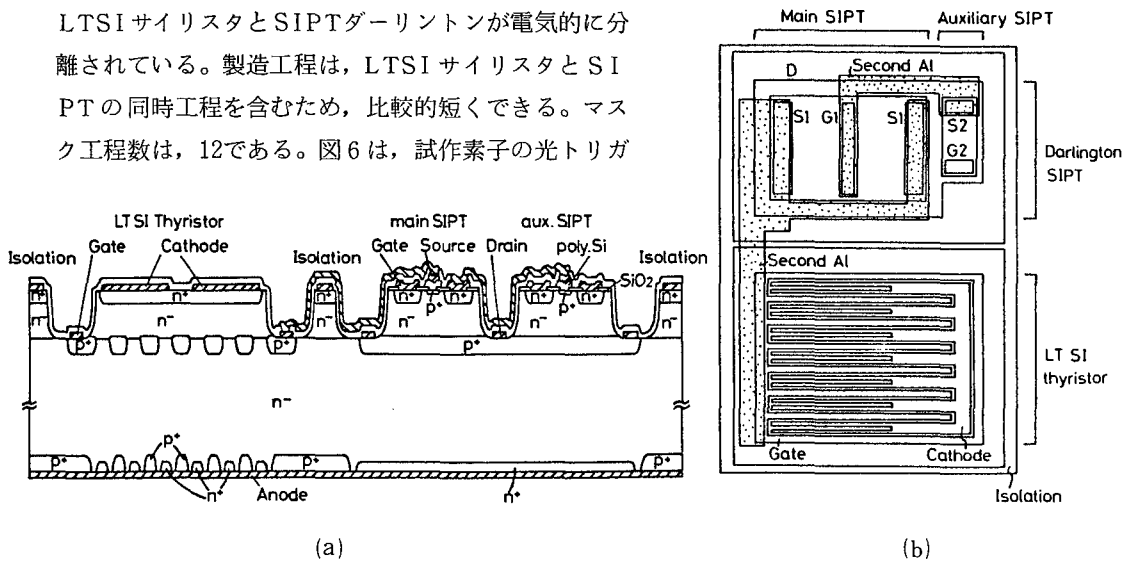


図5 1000V-10A級集積化LTQSIサイリスタの構造, (a)断面構造, (b)平面パターン

特性の一例であり、 T_{don} 、 T_r 及び、 I_{Gon} の P_{LT} 依存性を示している。 $T_{don} \propto P_{LT}^{-n}$ ($n \approx 0.8 \sim 0.9$)の関係にあり、 T_r は P_{LT} に依存しない。また、 T_{don} 、 T_r は V_{AK} の増加に伴い速くなる。 $V_{AK} = 500$ V、 $I_{AK} = 10$ A、 $P_{LT} = 250$ mW/cm² (=2.9 mW)の条件で $I_{don} = 2.5$ μ s、 $T_r = 1.1$ μ s、 $T_{on} = 3.6$ μ sの値が得られた(直接トリガ)。間接トリガ方式では、 T_{don} が25~40%改善された。図7は、光クエンチ特性の一例であり、 T_{doff} 、 T_{off} 、 I_{Goff} 及び、ターン・オフ電流利得 G_{off} の I_{AK} 依存性を示している。新型AS構造とSIPTダーリントンの導入により、ターン・オフ速度、ターン・オフ電流容量が改善された。 I_{AK} の増加に伴い T_{doff} が増加しているが、 $I_{AK} = 10$ Aにおいても10 μ s以下のターン・オフ速度が得られた。

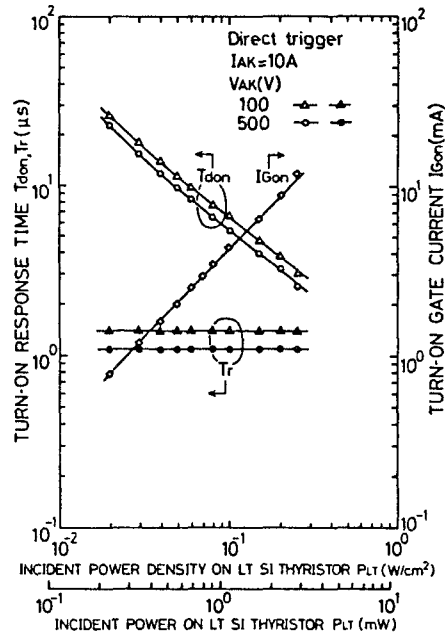


図6 ターン・オン遅れ T_{don} 、立ち上がり時間 T_r 、ターン・オンゲート電流 I_{Gon} の P_{LT} 依存性(直接トリガ)

SIPTの光応答特性、LTQSIサイリスタの基礎的な特性を測定し、集積化LTQSIサイリスタの設計・試作を行なった。最終的には1000V-10A級素子を試作し、10 μ s以下のターン・オフ速度を実現した、集積化LTQSIサイリスタは、光信号で直流を高速、低損失、高感度でスイッチングでき、さらに100 A級素子も実現可能であり、小~中電力の光スイッチとして有効である。

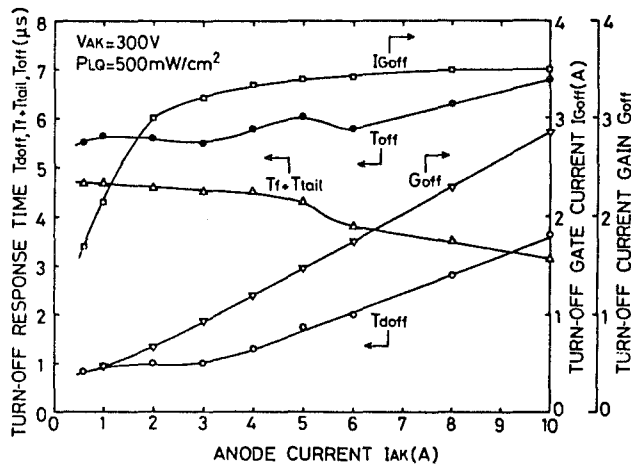


図7 ターン・オフ遅れ時間 T_{doff} 、 $T_f + T_{tail}$ 、ターン・オフ時間 T_{off} 、ターン・オフゲート電流 I_{Goff} 、ターン・オフ電流利得 G_{off} の I_{AK} 依存性

審査結果の要旨

静電誘導サイリスタは静電誘導効果を用いてキャリア流入量を制御し、特有の電流増幅機構によって低損失化された新しいスイッチデバイスであり、 $2\sim 3\ \mu\text{s}$ でオンオフできる等の多くの特徴を有している。本論文は、このサイリスタに光パルス照射によるスイッチ機能を付加すれば電力用デバイスとして極めて有用であることに着目し、光トリガ・光クエンチ静電誘導サイリスタの製作条件の追求を行った結果をまとめたもので、序論、結論を含め6章よりなる。

第1章は序論であって、本研究が行われるまでの電力用デバイスの研究・開発の経緯についてのべている。第2章より本論に入り、まず基本的な特性である静電誘導トランジスタ(SIT)に光照射したときの電流増幅現象について試作と測定を行った結果についてのべ、その機構を説明して理論的な根拠を明確にし、従来型のフォト・トランジスタと比較して、速度を落さず少なくとも4桁増倍率を大きくすることができることを示した。これは大きな貢献である。

第3章では前章の結果に基づいて、光パルスでスイッチオンする光トリガ静電誘導(LTQSI)サイリスタのゲート回路に光SITを入れて、ゲートに蓄積されたキャリアを抜き出すことによってスイッチオフさせる、光クエンチSIサイリスタを構成し、光トリガ・光クエンチ(LTQ)させた場合の実験結果についてまとめている。SIサイリスタが電気パルスでスイッチすると同様に極めて小さい光入力パルスエネルギーで動作することを実証すると共に、その機構を論じて、スイッチ作用が、殆どゲートに対するキャリアの充放電で決定されることを明確にしたのは新しい知見である。

第4章では、ゲートに接続されるSITを集積化した素子の試作とその測定結果についてのべている。LQ特性について、前章とほぼ一致する結果を確認すると共に、更にそれを改善するためには、集積される光SITの電流容量を大きくして希望する時間内に蓄積電荷を引き出せばよいことを結論している。第5章は更に大型のものについて同様の実験を行った結果をまとめたものであり、第6章は結論である。

以上要するに本論文は、初めて実用可能なLQ特性をもつLTQSIサイリスタの試作と測定を行って設計条件を明らかにしたもので半導体工学、電力電子工学に資するところが少なくない。

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。