ライフタイム制御GTOのデバイスシミュレーション

正員 杉本 健二 (四国総研)

正員 坂田 博 (愛媛大)

正員 磯村 滋宏 (愛媛大)

Device Simulation of Carrier Life-Time Controlled GTO

Kenji Sugimoto, Member (Shikoku Research Institute Inc.), Hiroshi Sakata, Member,
Shigehiro Isomura, Member (Ehime University)

Recent development in power semiconductor devices has made remarkable advances in power electronics. Among them, the *gate turn-off thyristor* (GTO) is one of the most important devices. The carrier life-time controlled device has been proposed recently to realize low turn-off switching loss. So, the computer simulation for the device is now necessary to predict its characteristics.

In this study, we simulated carrier life-time controlled GTO by FEM program. The life-time control, such as heavy metal diffusion and electron beam irradiation, showed trade-off relation between on-state and turn-off condition. The partial life-time control, which generates lattice defects by light ion irradiation locally, showed the possibility to reduce turn-off loss and improve the trade-off relations. Furthermore, the numerical inner analysis showed relations between the location of the radiated point and variations of inner carrier distributions.

キーワード: GTO, ライフタイム制御, 軽イオン照射, 有限要素法, デバイスシミュレーション

1. まえがき

近年のパワーエレクトロニクスの普及, 進展には著しいものがあり, 電力用半導体デバイスの大容量化・高性能化が急速に進んでいる⁽¹⁾。中でも, ゲートターンオフ・サイリスタ(GTO)は, 高耐圧・大電流を制御できる自己消弧型素子として知られ, 電鉄や鉄鋼などの産業用インバータのみならず, 最近では自励式SVC(静止形無効電力補償装置), 分散型電源や電力貯蔵システム用のコンバータ等にも適用されはじめており, なお一層の素子の大容量化, 低損失化が求められている⁽²⁾⁽³⁾。

GTOの特性として, オン電圧とターンオフ特性にはトレードオフの関係になることが知られ, 目的の特性を得るためにキャリアライフタイム制御技術などが導入される。これまでのライフタイム制御としては, 重金属拡散や電子線照射によって, シリコン基体全体のキャリアライフタイムを短縮する手法がとられている。一方, 近年, 高エネルギーのプロトンやヘリウムなどの軽イオンをIGBT, サイリスタなどに照射し, 局所的にキャリアライフタイムを抑える手法が提案されている。⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾ この方法は, 加速エネルギーを変えることにより格子欠陥位置を, また照射量によって格子欠陥の密度を任意に制御する特徴を持っている。このため, デバイス特性に対応した最適条

件を見い出せると期待されている。

このような新型デバイスの開発には, 計算機を使った特性予測が有効と考えられるが, シミュレーションを使った報告はまだ見受けられない。そこで, 筆者らが開発した有限要素法を用いたデバイスシミュレータ⁽⁹⁾を使って, GTOサイリスタのライフタイムを局所的に変化させることにより, 軽イオン照射の模擬を試みた。なお, 格子欠陥の位置と密度は通常は接合と平行な向きで帯状に一定となるのでその影響は一次元モデルでも十分表現できる。また, 実際のデバイスと対応させるには二次元以上の数値解析が望ましいが, パラメータの急激な変化が必要な場合, 二次元モデルでは安定した収束解を得るのが困難であることから一次元モデルを扱った。この結果, 既に報告されている実験⁽⁵⁾と同様, 従来のライフタイム制御方法に比べ, 良好なスイッチング特性を示す解析結果を得た。さらに, デバイスの内部状態の解析結果から, 格子欠陥の位置とキャリア分布につき種々の検討を加えた。⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾

2. 解析方法

<2.1> 半導体中の基本式 一般に, 半導体中における基本方程式として, Poissonの方程式, 正孔及び電子に関する電流連続の式が知られている。

$$\text{div}(\epsilon \text{grad} \phi) = -q(p - n + N_D - N_A) \dots\dots\dots(1)$$

$$q \frac{\delta p}{\delta t} = -\text{div } \mathbf{J}_p - q R \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$q \frac{\delta n}{\delta t} = \text{div } \mathbf{J}_n - q R \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここで、正孔及び電子電流密度 $\mathbf{J}_p, \mathbf{J}_n$ は、ドリフト・拡散モデルを適用すると、電界 $\mathbf{E}$ の式とともに

$$\mathbf{J}_p = q (p \mu_p \mathbf{E} - D_p \text{grad } p) \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\mathbf{J}_n = q (n \mu_n \mathbf{E} + D_n \text{grad } n) \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$\mathbf{E} = -\text{grad } \phi \quad \dots\dots\dots(6)$$

のように表すことができる。式(2),(3)中の再結合速度 R は、SRH(Shockley-Read-Hall)型の再結合過程のみを考慮し、

$$R = \frac{p n - N_t^2}{\tau_p (n + N_t) + \tau_n (p + N_t)} \quad \dots\dots\dots(7)$$

とする。ここで、表1に本稿中の記号の定義を示す。

<2・2> デバイスモデル デバイスの特性を規定する不純物密度は、アノード短絡型GTO（定格90A/1200V）を参考に、図1に示すようなGauss分布によって与えた。また、ゲート電極は図1のように p_B 層の接合 J_1 寄りに設ける。なお、アノード短絡構造を除いた一次元モデルでは、デバイスの特性が変わってターンオフにくくなる。このため、アノード短絡構造を考慮した二次元モデルのスイッチング時間と整合がとれるように、キャリアライフタイムをおよそ4分の1に縮めるなどの経験的な近似が必要であった。

ライフタイム τ のモデルとしては、不純物密度への依存を考慮したSelberherrらの公式を用い、 n_B 層のライフタイム τ_{ref} 、同不純物密度 N_{ref} を基準として

$$\tau = \frac{\tau_{ref}}{1 + \frac{N_D + N_A}{N_{ref}}} \quad \dots\dots\dots(8)$$

と表す。 τ_{ref} をパラメータとして、重金属拡散に相当するデバイス全体のライフタイム制御を模擬すると図2のようになる。

一方、軽イオン照射の模擬として、図3に示すようにアノード側から h_d の距離に照射して、格子欠陥を導入し、局所的にライフタイムが τ_{ref} から τ_d まで小さくなったと考える。また、局所性を幅 w_d として表す。

<2・3> 動作回路 動作回路としては、図4のスナバ回路を有するGTOと誘導性負荷を考える。また、使用した回路定数を表2に示す。

図4の動作回路から得られる外部回路方程式は

$$\left. \begin{aligned} V_{AK} &= E - R i - L \frac{di}{dt} \\ V_{AK} &= V_s + R_{eff} i_s = V_s + R_{eff} C_s \frac{dV_s}{dt} \\ i &= i_A + i_s \\ i_G &= (E_G - V_{GK}) g_G \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

である。ここで、 V_{AK}, V_G は各電極間の電位差を示し、 R_{eff} はダイオード D_s のバイアス状態により、

- 1)ダイオード D_s が逆バイアスの時： $R_{eff} = R_s$
- 2)ダイオード D_s が順バイアスの時： $R_{eff} = \frac{R_s R_D}{R_s + R_D}$

となる。

表1. 記号の定義
Table 1. Definition of symbols.

ϕ : 内部電位	N_A : アクセプタ密度
p : 正孔密度	N_D : ドナー密度
n : 電子密度	N_t : 真性キャリア密度
E : 電界	R : キャリア再結合速度
q : 電気素量	J_p, J_n : 電流密度
ε : 誘電率	D_p, D_n : 拡散係数
k : ボルツマン定数	μ_p, μ_n : 移動度
T : 絶対温度	τ_p, τ_n : キャリアライフタイム

図1 GTOの不純物密度分布
Fig.1. Doping profile of GTO.

図2 デバイスモデルのライフタイムの分布
Fig.2. Carrier life-time distribution of GTO.

図3 軽イオン照射による格子欠陥の導入と
デバイスモデルのライフタイムの分布
Fig.3. Generation of lattice defect by light ion irradiation,
and carrier life-time distribution of GTO.

図4 GTOの動作回路
Fig.4. Operating circuit of GTO.

表2 回路条件
Table 2. Circuit conditions.

主回路	$E: 400\text{V}, R: 40\Omega, L: 1.0\mu\text{H}$
スナバ回路	$C_s: 20\text{pF}, R_s: 30\Omega, R_D: 10\Omega$
オフゲート回路	$E_{Gq}: -1.5\text{V}, dg_{Gq}/dt: 2.0\text{V}/\mu\text{s}, g_{GqMAX}: 2.0\text{V}$

＜2・4＞ 計算方法 内部電位 ϕ ，正孔密度 p ，電子密度 n に関する基本方程式(1),(2),(3)を解くために，まず，有限要素法による離散化を行う。また，補助式(4),(5)についてScharfetter-Gummelの差分スキームを，(2),(3)の時間微分項についてはCrank-Nicolson法を，それぞれ適用する。さらに，導出された離散化方程式は非線形性を有するため，Newton-Raphson法によって線形化を施し，回路方程式(9)，とともに，一括して解く。なお，離散化式の導出方法，境界条件の取り扱い等の詳細については，既に(9)で詳しく述べたので，ここでは要点のみに留める。

3. 解析結果および検討

＜3・1＞ スイッチング特性解析 デバイス全体のライフタイムを変化させた場合のターンオフ波形の解析例を図5(a),(b)に，さらに，nベース層の一部のライフタイムを変化させた解析例を同図(c)に示す。デバイス全体のライフタイムを変化させた(a),(b)の場合，ライフタイムを減少させるとターンオフははやくなるが，アノード短絡の効果を考慮していない次元モデルのため，ライフタイムを現実のデバイスより小さく設定してもテイル電流が大きくなった。なお，さらにライフタイムを小さくした場合，本回路条件ではオン状態を保持できなくなる。一方，同図(c)のように，局所的なライフタイムキラー τ_d を導入することで，はやくターンオフし，テイル電流も抑えられることが分かる。

ライフタイム τ_d をパラメータとしたオン電圧 V_i とターンオフ損失のトレードオフの関係を図6に示す。局所的なライフタイム制御によりターンオフ期間，テイル期間と

(a) no partial control ($\tau_{ref} = 7.0\mu\text{s}$)

(b) no partial control ($\tau_{ref} = 6.0\mu\text{s}$)

(c) partial control ($\tau_{ref} = 6.0\mu\text{s}, \tau_d = 0.05\mu\text{s}, h_d = 160\mu\text{m}, w_d = 10\mu\text{m}$)

図5 ターンオフ波形

Fig.5. Calculated turn-off waveforms.

図6 局所ライフタイム制御によるオン電圧とターンオフ損失の関係

Fig.6. Relation between on-state voltage and turn-off losses. ($h_d = 160\mu\text{m}, w_d = 10\mu\text{m}$)

もターンオフ損失を削減し得ることが分かる。ターンオフ特性の指標としては，ターンオフ時間，ターンオフ損失，

オフゲート電荷などが考えられる。

そこで、ライフタイム τ_d をパラメータとしたオン電圧 V_i とオフゲート電荷 Q_{Gq} の関係を図7に示す。なお、ターンオフ特性のオフゲート電荷とは図5に示す網掛け部の面積に相当する。デバイス全体の制御（図中の●点）の場合、ライフタイムを小さくすることによりオフゲート電荷を小さく、すなわちターンオフ特性を改善できるが、反面オン電圧の上昇をもたらすというトレードオフ関係がみられる。また、 τ_d を小さくすると、局所的なライフタイム制御によりオフゲート電荷、オン電圧とも小さく、トレードオフ関係の改善が可能であることがわかる。

つぎに、ライフタイムの局所制御の位置 h_d を100, 120, 140, 160, 180, 200 μm に変化させた場合のトレードオフ曲線を図8に示す。同図より、中央の接合 J_2 から離れた接合 J_3 に近い位置に格子欠陥がある方が、オン電圧を抑え、トレードオフ関係の改善により効果がある。また、 τ_d が小さくなるほど位置による影響が大きくなることわかる。

ライフタイム制御の局所性を表す幅 w_d とライフタイム τ_d を変化させた場合のトレードオフ曲線を図9に示す。同図より、 w_d と τ_d を変化させて得られる関係は、ほぼ一曲線上にならび、ライフタイムの局所性がトレードオフ改善にほとんど寄与していないことがわかる。

<3・2> 内部解析 局所的なライフタイム制御の影響について、さらに詳しく解析するために、デバイスの内部状態を表示した。その結果の一例として図5の(b)及び(c)のターンオフ波形例に対応する $t=0.0, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0 \mu\text{s}$ 時の正孔密度の過渡変化状況を図10(a),(b)にそれぞれ示す。実線によって示したオン状態の分布($t=0.0 \mu\text{s}$)を比較すると、局所的なライフタイム制御の場合は、接合 J_2 から格子欠陥周辺にかけてキャリア密度が低くなっており、格子欠陥から接合 J_3 にかけてやや密度勾配がみられる。

オフゲート電流を流すことにより、蓄積期間から立ち下がり期間にかけて、接合 J_2 付近に空乏層が形成されるが、局所的なライフタイム制御の場合は、空乏層幅が広く、短時間で広がっていることが分かる。また、テイル期間において、局所的制御がない場合は、ベース層の残留キャリアの消滅が進まない。一方、局所的なライフタイム制御がある場合は残留キャリアはライフタイムの低い領域を中心に再結合によって消滅し、テイル電流の抑制が図られる。これらに対応して、内部電位分布の電位障壁の回復は局所的なライフタイム制御の方がはよい。

ライフタイムの局所制御の位置 h_d を 80 μm , 120 μm , 160 μm , 200 μm に変えたときのオン状態における正孔密度の分布の違いを図11に示す。局所制御なしの分布に対し、ライフタイムの局所制御位置を接合 J_2 に近づけると J_2 付近のキャリア密度が下がりオン電圧が高くなる。制御位置を接合 J_2 から離すとベース層のキャリア分布が比較的平坦になり、接合 J_2 付近のキャリア密度が高くなりオン電圧が抑えられる。

次に、ライフタイムの局所制御の位置 h_d 毎のオン電圧

図7 局所ライフタイム制御の影響
Fig.7. The effect of partial life-time control and comparison in trade-off with no partial life-time control.
($h_d = 160 \mu\text{m}$, $w_d = 10 \mu\text{m}$)

図8 局所ライフタイム制御位置の影響
Fig.8. The effect of partial life-time controlled point.
($w_d = 10 \mu\text{m}$)

図9 局所ライフタイム制御の局所性の影響
Fig.9. The effect of partial life-time controlled width.
($h_d = 160 \mu\text{m}$)

V_i およびオフゲート電荷 Q_{Gq} のグラフを図12に示す。本解析条件においては、 $h_d = 100 \mu\text{m}$ でオン電圧が最も低くなった。ライフタイムの局所制御の位置 h_d を小さくしていくと、接合 J_2 から十分離れた制御位置では、オン状態における接合 J_2 付近のキャリア密度は余り変化せず、逆にベース層全体の過剰キャリアが少なくなるため、オン電圧はやや高くなるものと考えられる。

図 10 ターンオフ中のポテンシャル分布および正孔密度の変化状況の比較

Fig.10. Comparson in calculated electric potential distribution and hole densities during the turn-off process.

図 11 ライフタイム制御位置のオン状態における正孔密度分布への影響

Fig.11. The effect of partial life-time controlled point for hole densities of on-state. ($\tau_{ref}=6.0 \mu\text{s}$, $\tau_d=0.1 \mu\text{s}$, $w_d=10 \mu\text{m}$)

図 12 オン電圧及びオフゲート電荷のライフタイム制御位置の依存性

Fig.12. The effect of partial life-time controlled point for on-state voltage and off gate charge. ($\tau_{ref}=6.0 \mu\text{s}$, $\tau_d=0.1 \mu\text{s}$, $w_d=10 \mu\text{m}$)

図 13 ターンオフ中の正孔密度の変化状況
Fig.13. Calculated hole densities during the turn-off process.
($h_d = 200 \mu m$)

一方、同図でオフゲート電荷 Q_{Gq} を最も小さく抑えることができたのは $h_d = 180 \mu m$ の条件の場合であった。これは、図 13 に示すターンオフ中の正孔密度分布の変化によって理由付けできる。すなわち、格子欠陥位置がターンオフ時の空乏領域に至るまで h_d を長くすると局所制御の効果が少なくなり、結果としてオフゲート電荷 Q_{Gq} が大きくなるものと考えられる。なお、ここでは $160 \mu m$ を標準として扱った。

4. 結 論

本論文では、GTOサイリスタのターンオフ特性の改善方法の一つとしてライフタイム制御を扱った。すなわち、従来から用いられている重金属拡散法または電子線照射法に相当してデバイス全体のライフタイムを変化させた場合の特性解析、および、近年提案されている軽イオン照射法に相当するデバイスの局所的なライフタイム制御の場合についての特性解析を、有限要素法を使って行い比較した。これらの解析により得られた主な結果は、以下の通りである。

- (1) デバイス全体のライフタイムを変化させることによるオン電圧とターンオフ特性のトレードオフの関係を確認した。すなわち、ライフタイムを小さく設定することによりターンオフ時間を短くすることが可能であるが、反面、オン電圧が増加する。
- (2) 部分的に格子欠陥をつくる局所的なライフタイム制御はターンオフ特性改善に有効な手段であることを確認し、従来のデバイス全体のライフタイム制御と組み合わせ、オン特性とターンオフ特性のトレードオフ関係も改善できることを明らかにした。
- (3) デバイスの内部解析により、格子欠陥と内部状態の変化の対応を明らかにした。すなわち、格子欠陥をnベース層の接合 J_2 に近い位置につくると、オン電圧が増加する傾向があり、格子欠陥位置が空乏領域になると

ターンオフ改善の効果が小さくなることを確認した。格子欠陥は接合 J_2 より十分離し、適切な位置を選ぶ必要がある。

なお、本研究に際し、ご支援ご議論を頂いた、日立製作所日立研究所 八尾 勉氏、東京大学 正田 英介教授、四国総合研究所 山本 博隆氏に感謝の意を表する。また、卒論研究として解析データのとりまとめに御尽力いただいた愛媛大学工学部博士前期課程 船井晃氏に感謝の意を表する。最後に数値計算には、愛媛大学情報処理センター FACOM M1600/6を使用したことを付記する。

(平成 7年10月 2日受付, 平成 8年 3月18日再受付)

文 献

- (1) 八尾, 内田: 「パワー半導体デバイスの進展」, 電学論B, **112**, pp.6 (1992)
- (2) 中島: 「高周波スイッチング素子の電力への適用」, 電学論B, **113**, pp.601 (1993)
- (3) 中川: 「パワーデバイスはここまで進んだー8kV,4kA級サイリスタも出現ー」, 電学誌B, **114**, pp.161 (1994)
- (4) A.Mogoro, Campero, R.P.Love, M.F.Chang, and R.Dyer: "Localized Lifetime control in Insulated-gate Transistors by Proton Implantation", *IEEE E.D.*, **33**, 11, pp.1667 (1986)
- (5) 中川, 佐藤, 秋山, 樋口, 藤本: 「プロトン照射による半導体デバイスの特性改善」, 電気学会研究会資料, 高電圧研究会, HV-91-88 (1991)
- (6) H.Akiyama, M.Harada, H.Kondoh, and Y.Akasaka: "Partial Lifetime Control in IGBT by Helium Irradiation Through Mask Patterns", *Proc. of ISPSD*, April, pp.187-191 (1991)
- (7) 田澤: 「軽イオン照射による半導体パワーデバイスの電気特性の改良」, *Radioisotopes*, **43**, pp.224 (1994)
- (8) 三浦, 秋山, 川村, 森川, 市川, 宮崎: 「電子線照射およびプロトン照射によるダイオードリカバリ特性の改善」, 電気学会産業応用部門全大, **136** (1995)
- (9) 坂田, 宮本, 杉本, 菊池, 磯村, 正田: 「有限要素法によるスナバ回路を含むGTOのスイッチング特性解析」, 電学論D, **113**, 728 (1993)
- (10) 杉本, 坂田, 磯村, 石井: 「GTOのライフタイム制御のデバイスシミュレーション」, 電気学会全大, **670** (1995)
- (11) 船井, 坂田, 磯村: 「GTOのライフタイム制御のデバイスシミュレーション」, 電気学会産業応用部門全大, T-16 (1995)

杉本 健二

（正員）昭和42年1月20日生。平成3年3月愛媛大学大学院工学研究科修士課程電気電子工学専攻修了。同年4月(株)四国総合研究所入社。平成7年3月愛媛大学大学院博士後期課程物質工学専攻修了，現在に至る。博士（工学）。主として，電力用半導体のデバイスシミュレーションおよび新エネルギーの研究に従事。日本シミュレーション学会会員。

坂田 博

（正員）昭和24年1月1日生。昭和48年3月東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻修士課程修了。同年4月関西電力(株)入社。52年4月愛媛大学工学部電気工学科助手。平成7年4月同電気電子工学科講師，現在に至る。博士（工学）。主として電力用半導体のデバイスシミュレーションおよびパワーエレクトロニクスの研究に従事。日本シミュレーション学会，IEEE会員。

磯村 滋宏

（正員）昭和11年1月17日生。35年3月東京大学大学院数物系研究科電気工学専攻修士課程修了。同年4月日本楽器製造(株)入社。39年5月科学技術庁金属材料技術研究所入所。52年4月愛媛大学工学部電気工学科教授，平成3年4月同電気電子工学科教授，現在に至る。工学博士。主として，デバイスシミュレーション及び半導体材料の研究に従事。電子情報通信学会，応用物理学会会員。