

PiN ダイオードの逆回復時高周波振動の検討

川神 圭一朗* (九州工業大学) 附田 正則 (九州工業大学、国際東アジア研究センター)

高濱 健一 大村 一郎 (九州工業大学)

Discussion of High Frequency Oscillation on Power PiN Diode

Keiichiro Kawakami* (Kyushu Inst. of Tech.), Masanori Tsukuda (Kyushu Inst. of Tech., The Int'l Centre for the Study of East Asian dev), Kenichi Takahama, Ichiro Omura (Kyushu Inst. of Tech.)

Avalanche induced oscillation phenomena during reverse recovery of power PiN diodes are investigated for the purpose of "Design for EMI". The oscillation phenomena are the major barrier to improve power diode performance since the oscillation can cause serious EMI, affecting power electronics system reliability. The mechanism of the oscillation is precisely modelled under various diode structures and current ranges. The result will contribute to the design methodology to attain stable yet high performance diodes and power electronics systems.

キーワード : PiN ダイオード、逆回復、高周波振動、アバランシェ現象、シミュレーション、周波数 (PiN Diode, Reverse Recovery, High Frequency Oscillation, Avalanche, Simulation, Frequency)

1. まえがき

Si-PiN ダイオードの理論的な限界性能は、高性能といわれるワイドバンドギャップ半導体 SiC を用いたショットキーバリアダイオードの現状の性能と比較してもそれほど遜色の無い値を示している。

本研究では PiN ダイオードの性能を限界性能に近づけるために、回路のわずかな寄生インダクタンスにより引き起こされる高周波振動が大きな障害になることを示し、この振動現象を詳細に解析・モデル化を行った。

図 1 に SiC-SBD の理論曲線、Si-PiN ダイオードの理論曲線とシミュレーション結果を示す。Si-PiN ダイオードは i 層を短くすれば SiC-SBD の性能に近づくことがわかっていて、一方、高速ダイオード設計では高周波電圧振動による EMI (Electro Magnetic Interference) が生じやすい。高速 PiN ダイオードは逆回復時に共振振動と高周波振動が発生する (図 2 参照)。そのため高速 Si-PiN ダイオードの性能改善には高周波振動が大きな障害となっている。

高周波振動はアバランシェ現象に起因することを除いて、あまり知られていない。今回、我々はアバランシェによる高周波振動を分析するために TCAD シミュレーションによる電流源を用いた新しい計算方法を提案した。この計算方法により計算時間の短縮、i 層の厚みや逆回復電流密

度など、広範囲の現象を条件ごとに解析することが容易となった。我々はシミュレーションの解析結果からダイオードの i 層厚と逆回復電流密度に対する振動周波数のモデル化に成功した。

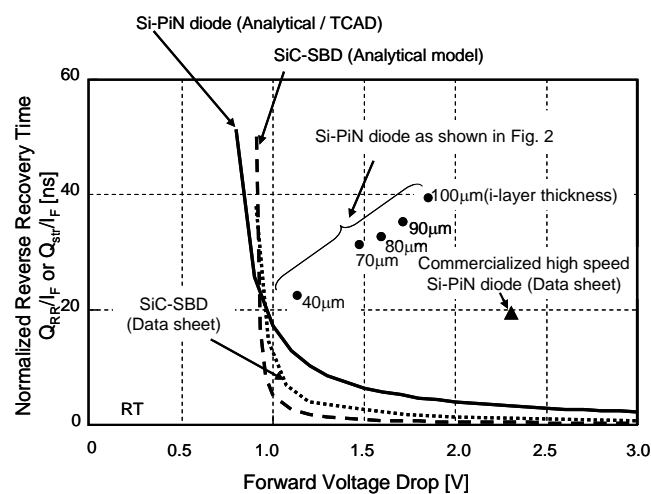


図 1 SiC-SBD、Si-PiN ダイオードの理論曲線
Fig. 1. Theoretical limit of SiC-SBD, Si-PiN diode.

2. EMI の問題

高速 PiN ダイオード構造は i 層内の蓄積電荷を少なくするために薄型の i 層構造を持つ。i 層を薄くすることで PiN ダイオードの理論的な速度限界に近づけることができるが、EMI の原因となる高周波振動が発生するために特性を向上させることができない。

図 3 に図 1 と同様の 40 μm , 70 μm , 80 μm , 90 μm , 100 μm と i 層厚を変えて逆回復させた場合のシミュレーション結果を示す。電源電圧、順方向電流、逆回復電流の di/dt そして温度はそれぞれ 300V、300A/cm²、800A/cm² μs 、室温である。その結果、更なるダイオードの性能向上のために、振動現象に対するダイオード設計がポイントとなることが明確になった。

実験やシミュレーションによって PiN ダイオードの逆回復時に 2 種類の電圧振動が確認されている^{(1)~(12)}。図 2 はシミュレーションにより得られた典型的な振動波形である。1 つは共振現象による振動^{(1)~(6)}、もう 1 つはアバランシェ現象による高周波振動である^{(6)~(12)}。共振振動は、i 層からキャリアが掃き出された後に大電流の時間変化 (di/dt) が発生するために引き起こされる現象で、振動を抑制するための新構造がこれまでにいくつか提案されている^{(2)~(4)}。

それに対してアバランシェ現象による振動は共振による振動と完全に異なる動作原理であり、高周波用のアバランシェダイオードの特性に近い^{(6)~(10)}。近年 PiN ダイオードの逆回復特性を向上させる上でこのアバランシェによる振動が大きな問題になってきているため、多くの研究結果が報告されてきている。例えば、アバランシェによる高周波振動を抑制するために高濃度 P 型層と低濃度 N 型層の間に高濃度 N 型層を持つリードタイプ PiN ダイオードが提案されている。またこの振動現象は広くライフタイム制御技術として用いられているヘリウム、プロトンそして電子線照射が原因で生じる正電荷と関連しているという報告もある^{(11)~(13)}。

3. 高周波振動 (EMI) の解析方法

この章では逆回復時の高周波振動を模擬的に計算することで計算時間短縮、様々な条件で扱える容易さを兼ね備えた方法を紹介する。

逆回復現象を始めから終わりまでシミュレーションする方法に代えて、インダクタやキャパシタを用いずに電流源のみを用いた単純な方法を用いる (図 4)。

高周波振動はインダクタが逆回復電流を保持するために発生する。この方法では電流源で供給した直流電流が逆回復電流の役割をし、数回の振動周期をシミュレーションするだけで逆回復時の振動波形と同じ波形を得ることができる (付録を参照)。TCAD シミュレーション時間を劇的に短縮し、簡単な操作により逆回復時の波形を模擬できるため、多くの条件を変えたシミュレーションを可能にする。

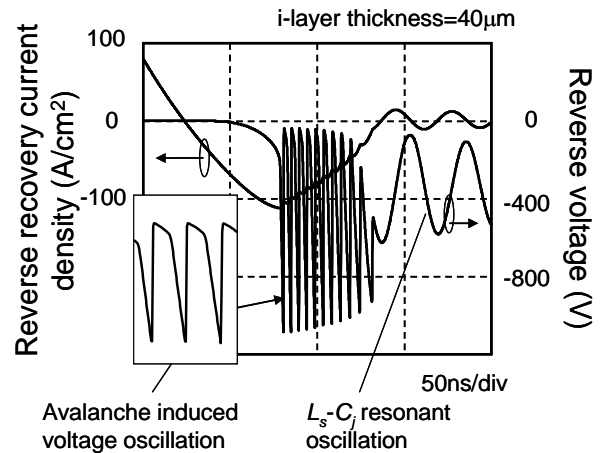


図 2 PiN ダイオードの逆回復時に見られる波形振動の例
Fig. 2. Typical example of oscillation waveforms during reverse recovery of PiN diode.

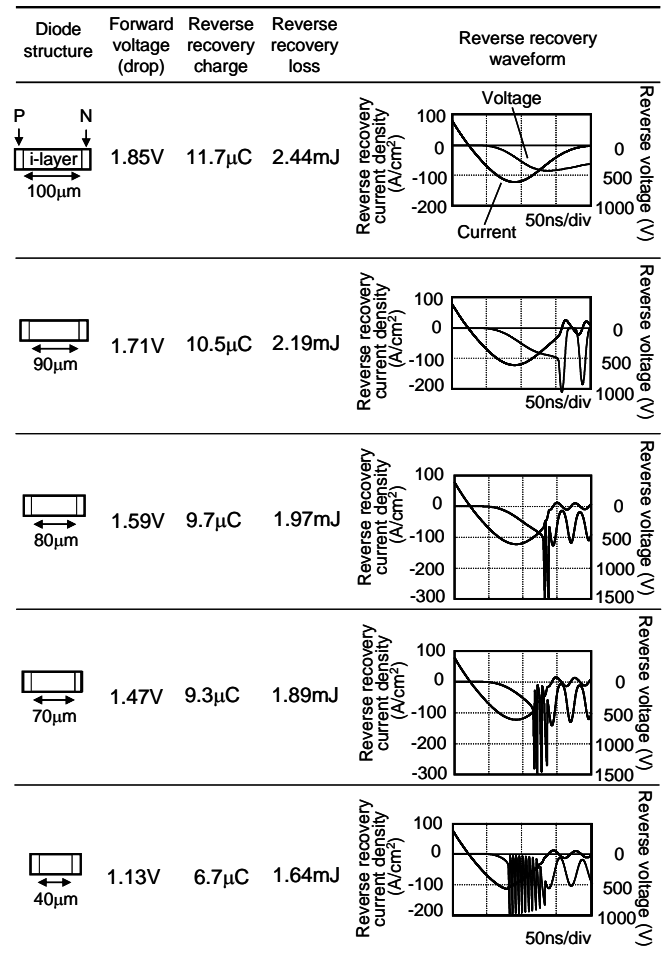


図 3 PiN ダイオードの i 層厚とリカバリ波形の変化
Fig. 3. Simulated reverse recovery waveforms of diodes with different i-layer thickness.

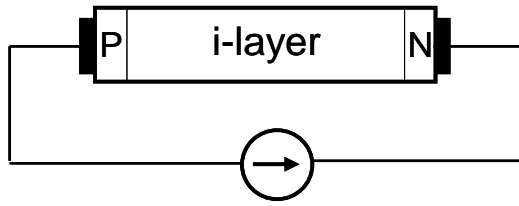


図 4 高周波振動解析の回路

Fig. 4. Circuit for analysis of high frequency oscillation

4. 振動波形のモデル化

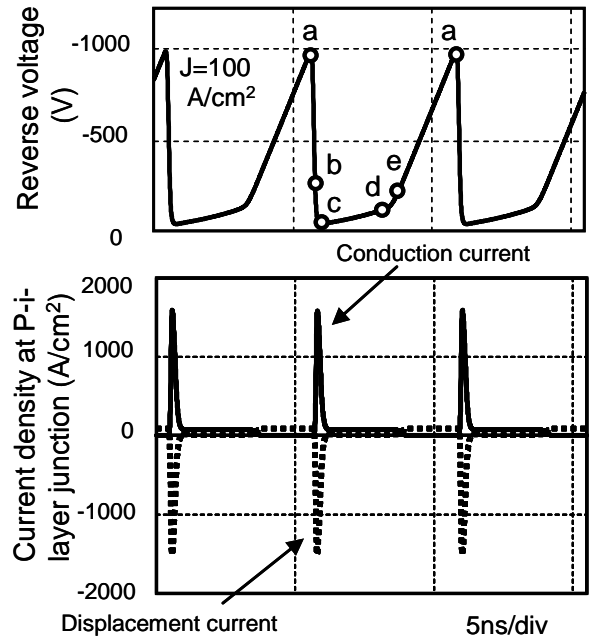
アバランシェ現象による電圧波形の振動は図 5 (a)に示すようなノコギリの刃のような特殊な形をしており、急激に電圧が低下した後に緩やかに電圧上昇する部分と急峻な部分に分かれている。電流密度は伝導電流と変位電流に分けて示している。最大電圧 (a 点) に到達した直後にアバランシェ現象による放電が起こり、ダイオードの接合容量に応じたキャリアが i 層の中に蓄積される (c 点)。電圧が急激に低下する時の最大変位電流密度は接合部で 1600A/cm^2 と高く、アバランシェ現象によるキャリアの発生のため伝導電流密度も変位電流に応じて電流密度が高くなる。急激な電圧降下の後、 dv/dt の傾きが小さい時に蓄積キャリアが i 層から掃き出される。i 層内から全ての蓄積キャリアが掃き出されると (d 点)、 dv/dt が大きく変化し逆回復電流によって再び接合容量が充電される (e 点)。

したがって振動周波数は次のようにモデル化できる。急激な電圧降下直後のアバランシェ現象により発生する蓄積キャリア量は接合容量に蓄えられた電荷 ϵE_{crit} に等しい。ここで ϵ と E_{crit} はそれぞれシリコンの誘電率とシリコン結晶がアバランシェ現象を生じる臨界電界である。 dv/dt が小さく傾斜が緩やかな部分は蓄積キャリアを掃き出す時間であり $\epsilon E_{crit}/J$ で表される。ここで J は電圧振動中の逆回復電流密度である。 dv/dt が高くなり電圧上昇の傾斜が大きくなると変位電流のみが流れ、この波形の期間も $\epsilon E_{crit}/J$ で表される。急激な電圧降下にかかる時間は微小なため無視すると、振動 1 周期は $2 \epsilon E_{crit}/J$ となるので振動周波数は式 (1) のよう表される。

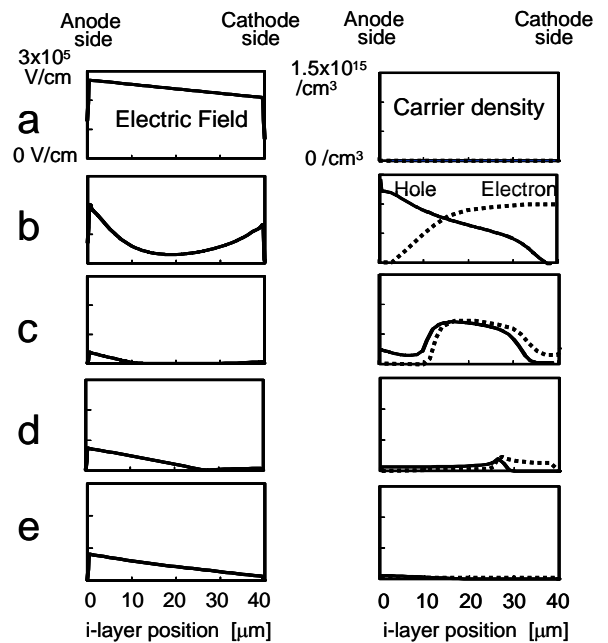
$$f = \frac{J}{2 \cdot \epsilon \cdot E_{crit}} \dots\dots\dots (1)$$

この式は振動周波数が振動時の逆回復電流に比例し、他の条件に影響されないことを示している。

前章で我々が提案した効率的な方法を用い、逆回復時のアバランシェ現象による振動周波数を詳しく考察した。i 層厚が異なる 5 種類のダイオードについて逆回復電流密度が 10A/cm^2 から 10000A/cm^2 まで変化した場合のシミュレーション結果を図 6 に示す。 100A/cm^2 から 1000A/cm^2 までの範囲では式 (1) のモデル式で表される振動周波数が逆回復時の振動周波数にほぼ一致することが確認できた。またこの結果は、振動周波数が i 層厚にほとんど影響されないことも示している。



(a) Waveforms of voltage, conduction current and displacement current.



(b) Electric field and carrier density distribution in i-layer.

図 5 電流源による振動波形と、1 周期分の電界・キャリア変化

Fig. 5. Waveforms and conditions in i-layer in a cycle of avalanche induced oscillation by TCAD simulation.

逆回復電流密度が 1000A/cm^2 以上の場合、全てのダイオードの振動周波数が飽和している。この大電流密度領域で見られる飽和した振動周波数を抽出して図 7 に示す。飽和した振動周波数はキャリア飽和速度 v_{sat} ($\sim 10^7\text{cm/s}$) を i 層厚で除算した値に完全に一致し次の式で表される⁽¹⁴⁾。

$$f_{max} = \frac{v_{sat}}{W_i} \dots\dots\dots (2)$$

ここで W_i は i 層厚を示す。小電流密度領域と完全に異なり、大電流密度領域では振動周波数が i 層厚で決定される。

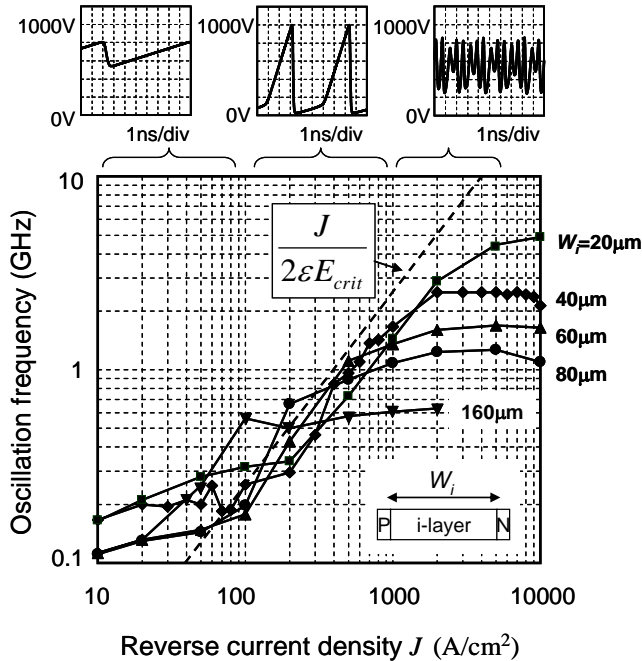


図 6 広範囲に電流密度と i 層厚を変化させたシミュレーションと解析モデルからの振動周波数
 Fig. 6. Simulated oscillation frequencies by wide ranges of current densities and i -layer thicknesses.

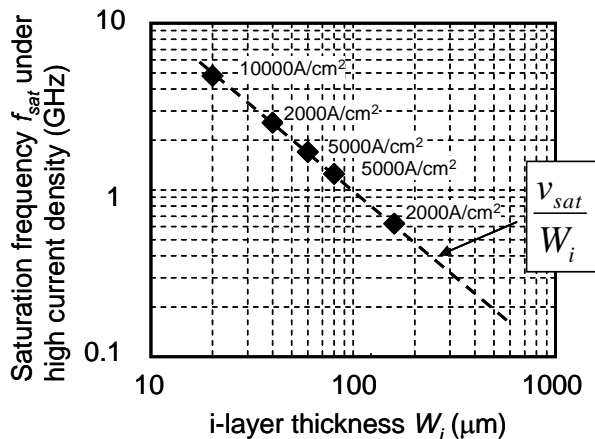


図 7 高電流密度における飽和振動周波数
 Fig. 7. Maximum oscillation frequency under high current density.

5. 結論

Si-PiN ダイオードの理論的な限界性能は SiC-SBD の現状の性能に近い。高速 PiN ダイオードの逆回復時に高周波振動 (EMI) が発生するため、高周波振動の検討を行った。振動を解析するのに独自の解析シミュレーションを用い、高周波振動の周波数のモデル化に成功した。

我々は検討に要するシミュレーション時間の短縮と分析方法の簡素化を図るために、電流源を用いた分析法を提案した。シミュレーション結果から振動原理を分析し、広範囲の i 層厚と電流密度において振動周波数をモデル化することができた。

今後、波形振動を起こさずに PiN ダイオードの理論的な限界性能に近づけるためには、これまでの延長線上にある i 層厚の薄化以外の手法が必要とされる。

付録. 電流源によるシミュレーションの妥当性

第 3 章で述べたように、電流源により直流電流を逆回復電流の代わりに用いる方法においてもアバランシェ現象による電圧振動の波形を再現できる。妥当性を確認するため、直流電流による電圧振動を逆回復時の電圧波形と比較した。その結果、図 8 に示すように振動周波数、振幅、そして波形が一致し、この方法の妥当性が示された。

また波形振動は順方向電流やライフタイムに大きく影響されないため、電流源を用いた方法で振動を再現させることが可能である。図 9 と図 10 はそれぞれ順方向電流とライフタイムの値を変えた場合の逆回復時の振動波形である。図 8 と同様に振動周波数、振幅、そして波形がほぼ一致している。

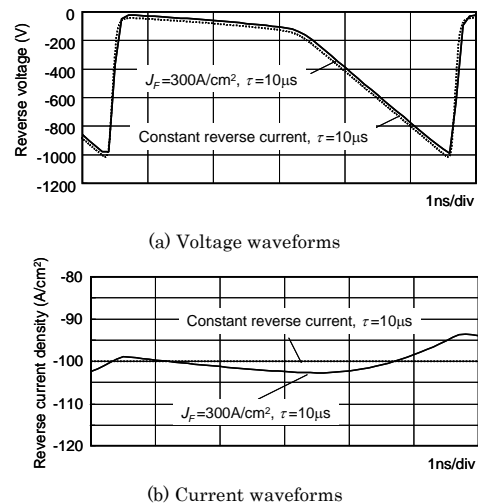
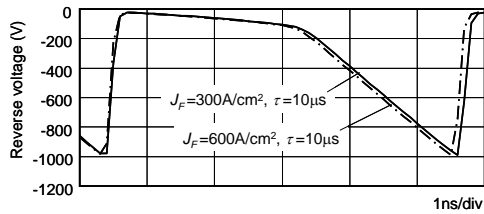
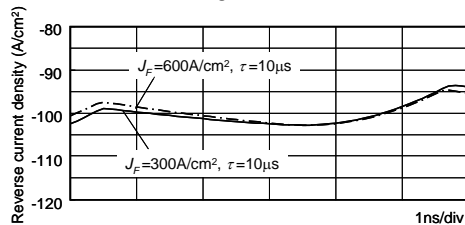


図 8 電流源と逆回復時の振動波形を比較
 Fig. 8. The proposed method with constant reverse current successfully reproduces voltage oscillations during reverse recovery.



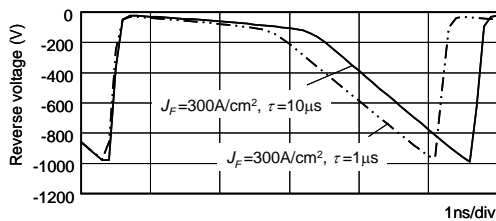
(a) Voltage waveforms



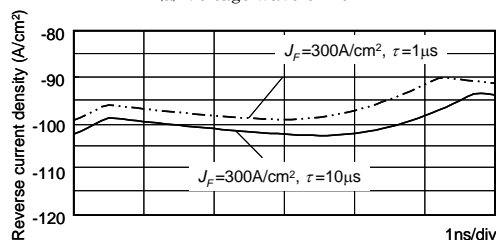
(b) Current waveforms

図9 アバランシェ現象による振動波形を比較
(順方向電流を変化させた場合)

Fig. 9. Simulated one cycle of oscillation waveforms by different forward currents. The two waveforms are identical.



(a) Voltage waveforms



(b) Current waveforms

図10 アバランシェ現象による振動波形を比較
(ライフタイムを変化させた場合)

Fig. 10. Simulated one cycle of oscillation waveforms by different carrier lifetimes. The waveforms are substantially identical.

- (4) M.Tsukuda, Y.Sakiyama, H.Ninomiya and M.Yamaguchi, "Dynamic Punch-Through Design of High-Voltage Diode for Suppression of Waveform Oscillation and Switching Loss", proceedings of the ISPSD'09, pp.128-131 (2009)
- (5) K. T. Kaschani and R. Sittig "How to avoid TRAPATT Oscillations at the Reverse recovery of Power Diodes", proceedings of the SMICND 1995, pp. 571-574 (1995)
- (6) K. Mayaram, C. Hu and D. O. Pederson, "Oscillations during inductive turn-off in rectifiers", proceedings of the Solid-State Electronics 43 (1999) pp. 677-681 (1999)
- (7) B. Gutsmann, P. Mourick and D. Silber, "Plasma extraction transit time oscillations in bipolar power devices", proceedings of the Solid-State Electronics 46 (2002), pp133-138 (2002)
- (8) P.Rose, D.Silber, A.Porst and F. Pfirsch, "Investigations on the Stability of Dynamic Avalanche in IGBTs", proceedings of the ISPSD'02, pp.165-168 (2002)
- (9) S.Milady, D.Silber, F.-J.Niedernostheide, H.P.Felsl, "Different type of avalanche-induced moving current filaments under the influence of doping inhomogeneities", Microelectronics Journal 39 (2008), pp.857-867 (2008)
- (10) R. Siemieniec, J. Lutz and R. Herzer, "Analysis of Dynamic Impatt Oscillations caused by Radiation Induced Deep Centers", proceedings of the ISPSD 2003, pp. 283-286 (2003)
- (11) T. Misumi, S.Nakagaki, M. Yamaguchi, K. Sugiyama, F. Hirahara and K. Nishiwaki, "Analysis of Dynamic Avalanche Phenomenon of PiN Diode Using He Ion Irradiation", proceedings of the ISPSD 2006, pp. 1-4 (2006)
- (12) K. Takahama and I. Omura, "Numerical study on very high speed silicon PiN diode possibility for power ICs in comparison with SiC-SBD," proceedings of the ISPSD'10, pp.119-122 (2010)

文 献

- (1) A.Mishima, S.Kimura, M.Mori, and H.Kozaka: "Analysis of Diode Recovery Phenomena using Transient Analysis Method for Semiconductor Devices Coupled with External Circuit", proceedings of the ISPSD'95, pp.396-399 (1995)
- (2) M.Rahimo, A.Kopta, S.Eicher, U.Schlapbach, S.Linder : "Switching-Self-Clamping-Mode "SSCM", a breakthrough in SOA performance for high voltage IGBTs and Diodes", proceedings of the ISPSD'04, pp.437-440 (2004)
- (3) F.Hille, M.Bassler, H.Schulze, E.Falck, H.P.Felsl, A.Schieber, and A.Mauder, "1200V Emcon4 freewheeling diode - a soft alternative", proceedings of the ISPSD'07, pp.109-112 (2007)