

DLTS 法による SiC ショットキダイオードの電子トラップの評価

DLTS study of electron traps in SiC Schottky diodes

中嶋 紘治[†] 徳田 豊^{††}
Koji NAKASHIMA[†], Yutaka TOKUDA^{††}

Abstract : Electron traps in commercially available SiC Schottky diodes have been characterized by deep level transient spectroscopy (DLTS). Two discrete DLTS peaks corresponding to the energy levels of $E_c - 0.16$ and 0.67 eV are observed in addition to broader signals with deeper energy levels. The $E_c - 0.16$ and 0.67 levels are identified as the Cr impurity and Z1 center, respectively. A 140% increase in concentration for the Z1 center is found by the 2.5 A forward current stress for 1200 min. The broader signals are resolved by isothermal DLTS and are found to consist of five components with the emission activation energies ranging from 0.71 to 0.85 eV. These five components show the filling pulse width dependence in the s range.

1. はじめに

現在、情報通信機器が生活のあらゆる場面で使用される環境になってきている。その中で環境対策を考えるとエネルギー開発が必要となってくる。すなわち電力開発と省エネルギー対策が必要される。電力の省エネルギー化には電力変換における損失の低減が課題である。これに対しワイドバンドギャップ半導体である SiC (シリコンカーバイド) は、バンドギャップが大きいだけでなく原子間の結合距離が小さく結合エネルギーが大きく、さらに融点が高く、熱的・化学的に安定である。また、その技術の立ち上がり時期に多くの研究が報告され、パワーデバイス材料としての可能性が確認された半導体である。現状、パワーデバイスは Si (シリコン) の独壇場となっているが、SiC は Si よりも絶縁破壊電界が約 1 桁大きいことから、同一耐圧での抵抗を大幅に低減することができる。このため、Si と比較すると高耐圧 (>100V) でも SBD (ショットキバリアダイオード) の定常損失が小さくでき、また少数キャリアの注入を伴わないことからスイッチング損失も小さいので、全体として Si よりも小さな損失が期待できる。

しかし、SiC は天然には存在しない化合物であることから、その結晶成長を行う過程においてマイク

ロパイプと呼ばれる貫通欠陥や結晶欠陥が多く含まれることが報告されている。よって、それらの欠陥の低減を行わなければならない¹⁾。そのため、まずそのデバイスの結晶内の欠陥構造を明確にし、その欠陥の特徴を調査する必要がある。このような欠陥を調査するために電気的な評価法が有効であり、今回用いた測定法は DLTS (Deep Level Transient Spectroscopy) 法である。

また、パワーデバイス材料として高耐圧、高温動作などに優れている。よって、厳しい環境下で用いられることが多いことから、そのデバイスの信頼性の有無を確認することは重要である。

本実験では、試料における信頼性を確認するために初めにその試料の素子特性を調査してから、通電を行い、その通電効果の変化を調査することで信頼性の評価を行った。

2. 試料及び実験方法

今回用いた試料は現在市販されている SiC ショットキダイオードである。試料の特徴としては V_{RRM} (Repetitive peak reverse voltage) は 600V、 I_F (Continuous forward current) は 6A のものである。SiC は、多様な積層構造をとるポリタイプ (結晶多形) 現象を示す材料として有名である。ポリタイプには主に 3C -, 4H -, 6H -, 15R - SiC が存在する。また、市販されている SiC ショットキダイオードの

[†] 愛知工業大学大学院 工学研究科
電気電子工学専攻 (豊田市)

^{††} 愛知工業大学 電気学科 電子工学専攻 (豊田市)

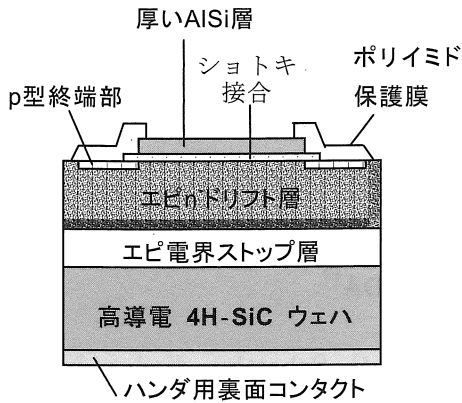


図 1 試料構造図

一般的な試料構造¹⁾を図 1 に示す。この試料を 2 つ用意し、それぞれ試料 1、2 と名づけることにした。これらの試料を I - V 測定、C - V 測定、DLTS 測定を行うことで評価を行った。

3. 実験結果及び考察

3. 1 I - V 特性

図 2 は I - V 測定結果を示す。

順方向特性は急峻に立ち上がっていることが観測される。この順方向側から n 値を求めたところ 1 となり、良好なショットキ特性を示す。また、逆方向特性は 10^{-10} A/cm² でほぼ一定であるが、これは測定器の測定限界によるもので、この試料はさらに逆

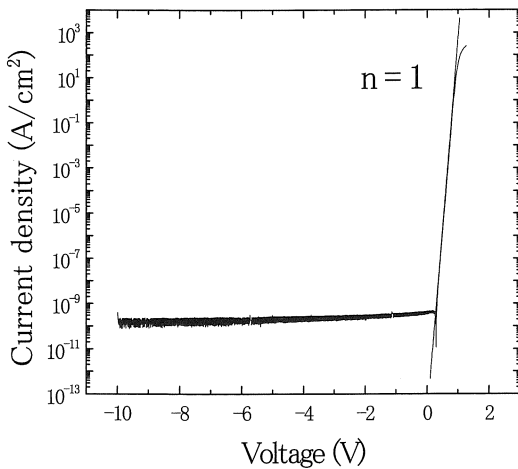


図 2 I - V 特性

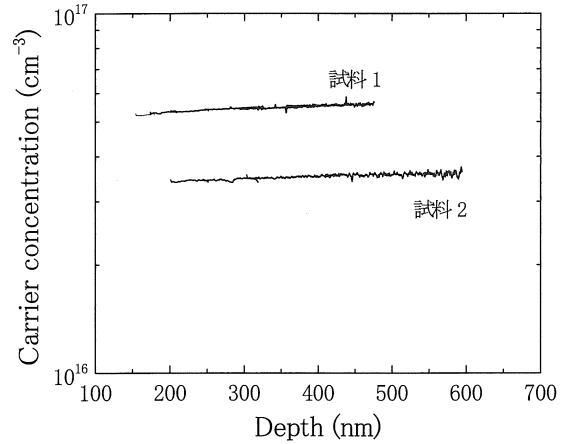


図 3 キャリア濃度分布

方向特性の値が小さいと考えられる。よって、この I - V 特性の結果から、用いた試料はショットキダイオードとして十分に整流性があるといえる。

3. 2 キャリア濃度分布

図 3 は C - V 測定から求めた深さに対するキャリア濃度分布を示す。2 つの試料においてキャリア濃度の値が異なっているものの深さに対してのキャリア濃度は、ほぼ一定であることがわかる。試料 1 は 5.5×10^{16} cm⁻³ であり、試料 2 は 3.5×10^{16} cm⁻³ である。

3. 3 DLTS 測定結果

図 4 に試料 1、2 の DLTS 測定を行ったものを示す。この結果から、試料 1 において 85、315、400 K 付近に 3 つのピークが観測された。また、試料 2 においては、さらに高温側 430 K 付近にピークが観測された。85 K で観測されるピークは現在までに報告されているトラップと比較すると Ti (チタン) か Cr (クロム) による汚染に関連した欠陥³⁾ではないかと推測される。315 K のピークは Z1 センターと呼ばれるトラップであると推測される。現在までに報告されている Z1 センターの特徴として、結晶成長時に混入される欠陥⁴⁾⁵⁾であることがわかっている。また電子線照射などによって誘起される炭素空孔 (C vacancy) ではないかと報告されている。また、高温側で観測された 2 つのピークはトラップがブロードになっていることから複合欠陥であると推測される。よって、この高温側のピークは信号分離を行って検討しなければならないが、DLTS 信号を信号分離する際にエネルギー準位と捕獲断面積の 2 つのファクターが必要であり、信号分離することが困難であるた

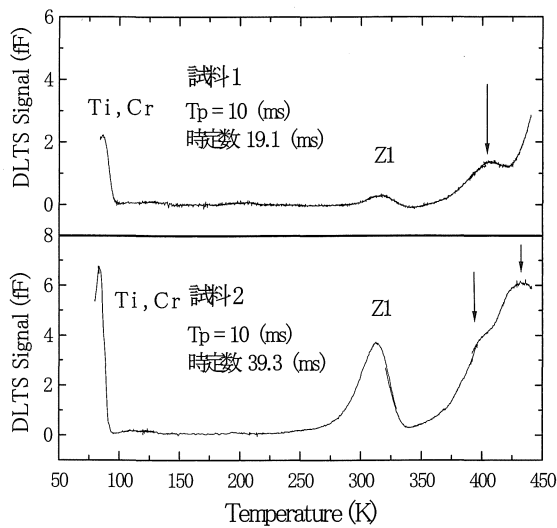


図4 DLTS測定結果

め、後で説明する。

図5はDLTS測定から得られたアレニウスプロットを示す。ここでは85、315 Kのピークのみをプロットし、このプロットからエネルギー準位を求めると、それぞれ $E_c - 0.16$ 、 0.67 eVとなる。この値は報告されているTi、Crの汚染に関する欠陥のエネルギー準位と類似している。また報告されているZ1センターのエネルギー準位と一致した。

また、これら2つのトラップの深さに対してのトラップ濃度を図6、7に示す。

SiCは厚膜化することで、その素子の高性能を実現することができる。厚膜化のための成長時間の増加や高速化のための成長温度の上昇は、高温部材の寿命低下あるいは高温部材からの不純物汚染によ

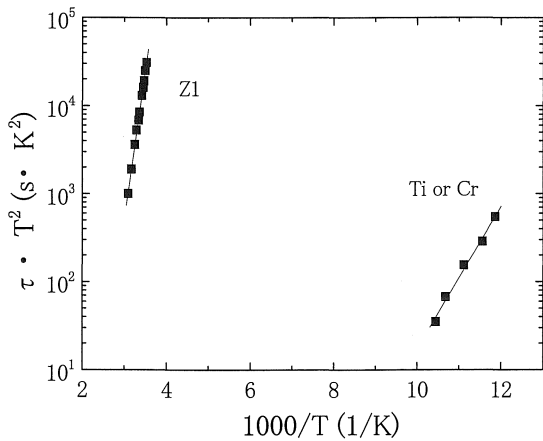


図5 アレニウスプロット

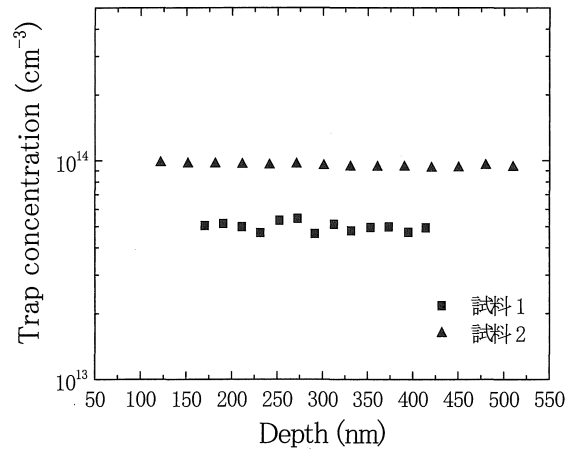


図6 トラップ濃度分布 (Ti or Cr)

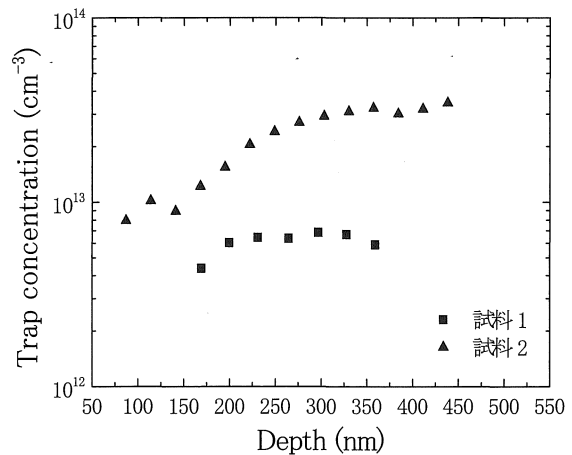


図7 トラップ濃度 (Z1)

て高純度化の妨げとなる。また、不純物として混入されるのは(Al、B、Ti、V、Cr)が確認されている。これら不純物のおもな発生源は成長炉内のサセプタ・グラファイトや断熱材であることがわかっている²⁾。ここで、図6の汚染によるトラップのトラップ濃度は測定領域では一様に含まれていることがわかる。それぞれ試料1は $5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ であり、試料2は $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ である。また、図7はZ1センターの深さに対するトラップ濃度である。深さが250 nmより深い位置ではそれぞれの試料で濃度はほぼ一定であるが、それより浅い位置では表面に近づくほど濃度が減少していることがわかる。

3. 4 電界依存性

次に DLTS 測定結果で得られた 85 K 付近のピークが Ti によるものか Cr によるものかを Poole - Frenkel 効果の電界依存性で判断をすることにした。現在までに報告されている Ti と Cr の汚染による欠陥での違いとして Poole - Frenkel 効果での電界依存性がある。Ti は電界依存性がなく、Cr には電界依存性がある。このことを考慮して電界依存性を調べることにした。図 8 は電界のルートに対してエネルギー準位の変化を示す。

Poole - Frenkel 効果は電界のルートに対して放出割合をプロットすると直線にのるという特徴がある。今回は放出割合からのエネルギー準位を求め、そこから電界依存について調べた。図 8 で電界に対してエネルギー準位が直線にのっていることがわかる。しかし、直線にのるだけでは Poole - Frenkel 効果の電界依存があるとはいえない。この直線の傾きが Poole - Frenkel と考えて妥当かどうかを計算値と実験値で比較すると計算値は $2.4 \times 10^{-4} \text{ V/cm}^{1/2}$ で実験値は $2.62 \times 10^{-4} \text{ V/cm}^{1/2}$ であったことから強い電界依存性を示しているといえる。よってこのトラップはドナー型のトラップであり、また、電界依存性があることから Cr による汚染欠陥であると推測される。

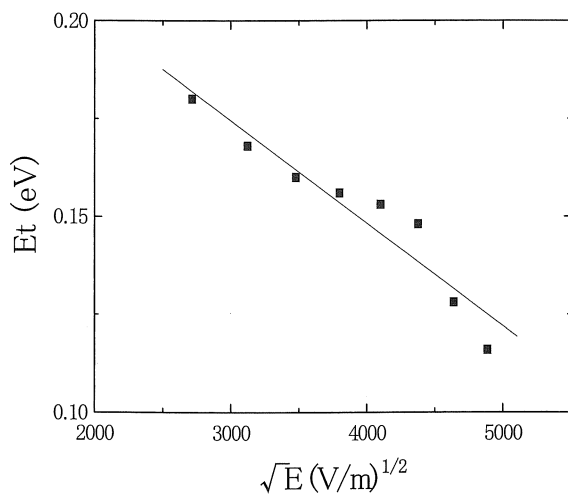
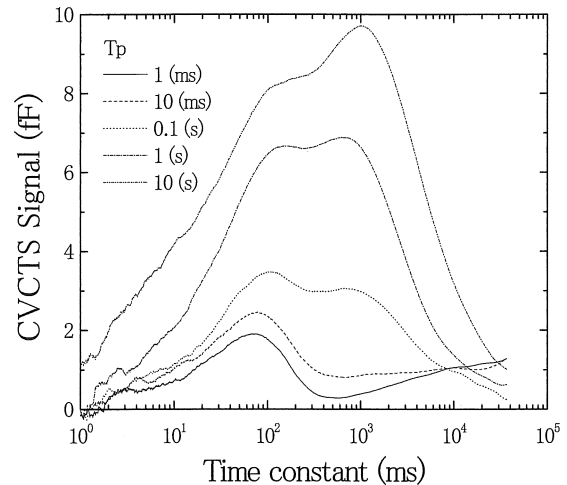


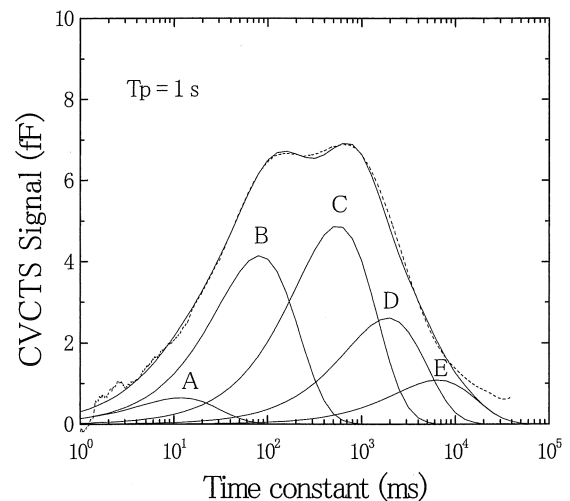
図 8 欠陥のエネルギー準位による電界依存性

3. 5 高温側ピークの解析

DLTS 測定結果のところ高温側ピークは信号分離しなければならないことを述べた。しかし、DLTS 測定結果を信号分離するのは困難なので、今回は一定温度 DLTS 測定を用いて、信号分離するファクターを時定数のみにすることで、この高温側のピークの解析を行うことにした。また、この高温側のピーク



(a) パルス時間変化による一定温度 DLTS 測定結果



(b) 一定温度 DLTS 測定結果によるフィッティング例

図 9 一定温度 DLTS 測定結果 (380K)

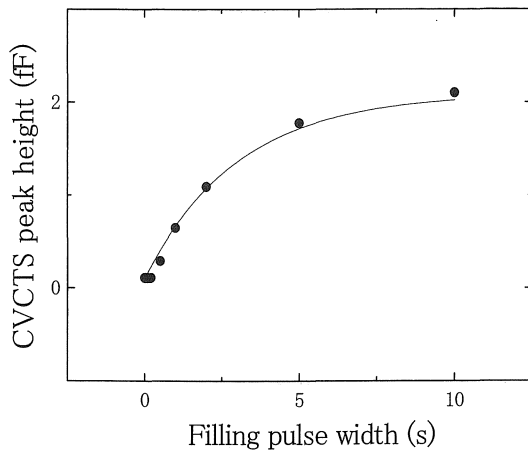


図10 トラップAのパルス幅依存性

にはms以上のパルス幅依存性を観測されたので、その依存性も平行して調べることにした。図9に380 Kで温度一定にした測定結果を示す。

図9(a)は捕獲のパルス時間を長くするとピークが増加する傾向がある。しかし、一般的な点欠陥トラップでは μ sオーダーの捕獲時間で十分に電子を捕獲することができるが、ここではms以上の捕獲パルス幅依存性が観測された。また、高温側のピークは複合欠陥であることから信号分離する必要があるので、図9(b)で信号分離した例を示す。高温側のピークを信号分離した結果5つの単一のピークによる合成ピークが実験結果と一致したことから、この複合欠陥は5つのトラップから成り立っていることがわかる。これらのトラップを低時定数側からトラップA、B、C、D、Eと名づけた。また、同様な測定を370 Kから400 Kの温度範囲で行い、1 msから10 sまでのパルス幅依存性を調べ、パルス幅に対してのピーク高さの変化を観測した。さらにそのパルス幅に対して信号分離したものが、全ての実験結果が5つのトラップの合成ピークでフィッティングすることができた。

次にこの高温側のパルス幅依存性について検討することにした。前述したようにこれら高温側のトラップを5つに分離することができた。これら5つのトラップにはms以上のパルス幅依存性がある。一般的な点欠陥でのパルス幅依存性では式(1)を用いることでフィッティングを行うことができる。

$$\Delta C(t_p) = \Delta C \{1 - \exp(-\frac{t_p}{\tau})\} \quad \dots (1)$$

ここで、上式を用いて380 Kで温度一定にした結果でフィッティングを行うことにした。

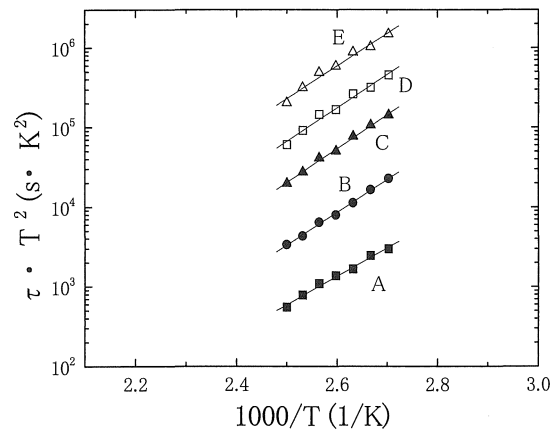


図11 アレニウスプロット

図10はトラップAのパルス時間に対してのピーク高さの変化を示す。これを(1)式を用いてフィッティングを行ったところ実験結果とフィッティングが一致した。この変化は指数的な増加を示すことがわかる。このように指数的な増加を示すパルス幅依存性は一般的な点欠陥のトラップであると推測される。また、後の4つのピークに対しても同様に行ったところ全てのピークが指数的な増加を示した。さらに、温度別に行ったものの同様な結果が得られた。これら高温側の複合欠陥は5つの点欠陥の重なりによるものであるとわかった。また、これら5つのトラップのアレニウスプロットを図11に示す。

それぞれのトラップにおけるエネルギー準位の値は(0.71 - 0.85) eVの範囲となった。

3.6 通電による効果

今回測定した試料は規格上6 Aまで使用可能であることから通電による効果を調べるためには6 Aを加えたほうがよいが、測定器が3 A仕様であることから、2.5 Aを加えることにより、その試料における劣化を促進させることで信頼性の評価を行うことにした。図12は通電を行う前の信号を実線で示し、室温で1000分と100°Cで200分電流を加えたものを破線で示す。

また、図13にそれぞれのピーク高さの変化率を示す。汚染に関する欠陥には通電することによる信号変化は見られなかった。また、高温側のピークもほとんど変化しておらず、通電による効果は少ないと考えられる。Z1センターのみ通電することによってその値が約1.5倍となった。

しかし、Z1センターは空孔欠陥なので電流印加による変化があるとは考えられないが、増加する可能

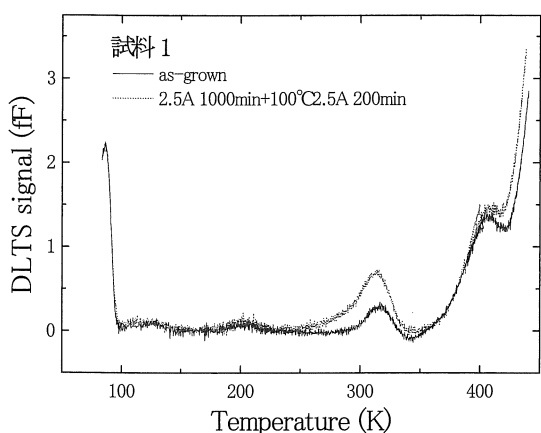


図 12 電流印加の効果による DLTS 信号の比較

性を考えると p n 接合の場合は少数キャリアの注入が起こることでピークが増加することもあるが、この試料はショットキダイオードなので、その可能性も考えにくい。少数キャリアの注入であると考え、その電流密度を求めることで確認することができる。SiC のショットキダイオードの少数キャリアの電流密度を求めると $1.27 \times 10^{-48} \text{ A/cm}^2$ となる。また、飽和電流密度は図 1 から $1 \times 10^{-12} \text{ A/cm}^2$ となり、この 2 つの電流密度の比は $7.9 \times 10^{35} \text{ A/cm}^2$ と大きいことがわかるので、この可能性は考えられない。よって、今回は多数キャリアの捕獲によるものではないかと推測した。

その例としてシリコンに水素イオン注入したもので、通電することで水素イオン注入中に形成された欠陥の水素原子を解離させ、水素が VO に結合し VOH となります。このようなことが Z1 センターで起こると仮定すると SiC にはマイクロパイプなどがあることから vacancy クラスターのようなものを想定すると通電によって C vacancy が解離することにより、Z1 センターが増加したと推測される。しかし DLTS 測定結果では他に信号が減少していないことから、それは今回では測定できなかった温度範囲で低温側に存在するか、あるいは、より高温側に存在するかであると推測される。

4. まとめ

SiC の結晶評価を行うことでトラップ準位 $E_c-0.16 \text{ eV}$ と $E_c-0.67 \text{ eV}$ の 2 つの欠陥があること

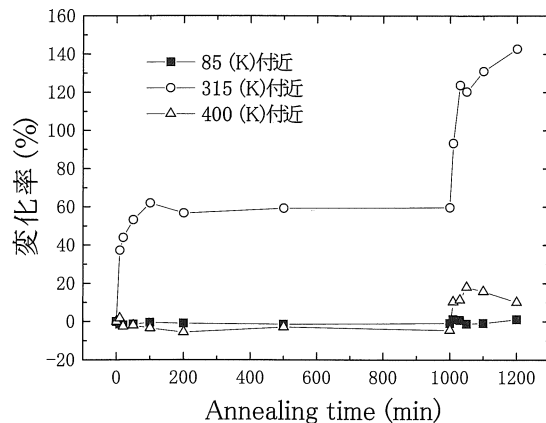


図 13 電流印加時間に対するピークの変化率

を観測し、さらに高温側に複合ピークを観測した。この 2 つのトラップは C_r の汚染による欠陥と Z1 センター (C vacancy) である。

高温側に現れたピークは複合欠陥であり、信号分離することで、5 つのトラップから成り立っていることがわかった。またこれら 5 つのトラップにはパルス幅依存性があり、全てのトラップが指数的な増加を示すことから、高温側のトラップは 5 つの点欠陥の重なりである。

2.5 A で電流印加することで Z1 センター (C vacancy) に大きな変化が生じたが、その変化に対しての原因は SiC にはマイクロパイプなどがあることから vacancy クラスターのようなものが存在し、そこから C vacancy が解離して Z1 センターが増加したと推測した。

参考文献

- 1) 松波弘之 : 半導体 SiC 技術と応用, 日刊工業新聞社, 2003
- 2) 荒井和雄・吉田貞文 : SiC 素子の基礎と応用, オーム社, 2003
- 3) Norbet Achtziger, Wolfgang Witthuhn : Appl. Phys. Lett, 71, pp110-112, 1997
- 4) M. Weidner, T. Frank: Physica B, pp633-636, 2001
- 5) Z-Q. Fang, D. C. Look: Physica B, pp706-709, 2001

(受理 平成 17 年 3 月 17 日)