

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 22 日現在

機関番号：13903

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011~2012

課題番号：23760012

研究課題名(和文) 4H-SiCにおける点欠陥の電気的影響解明とキャリアライフタイム制御プロセス確立

研究課題名(英文) Elucidation of effects of point defects on electrical properties of 4H-SiC and development of processes for carrier lifetime control

研究代表者

加藤 正史 (KATO MASASHI)

名古屋工業大学・工学研究科・准教授

研究者番号：80362317

研究成果の概要(和文)：本課題では4H-SiC中に欠陥を導入し、欠陥に起因する深い準位およびキャリアライフタイムの影響を観測した。その結果、2 MeVの電子線照射を施したn型試料で観測される準位は炭素アンチサイト-空孔構造に関連した欠陥によるものと示唆された。また、キャリアライフタイムには表面再結合ではなく再結合中心による影響が支配的であること示された。一方、160 keVの電子線照射を施したp型試料では、炭素に関連した欠陥が導入され、再結合中心として働くことが示唆された。

研究成果の概要(英文)：In this work, we introduced defects in 4H-SiC samples, and then observed deep levels and carrier lifetimes in the samples. The results show that deep levels were introduced in n-type samples by 2 MeV electron irradiation, and the deep levels would originate from carbon-antisite-vacancy related defects. Surface recombination does not significantly effect on the carrier lifetime. On the other hand, p-type samples irradiated with 160 keV electrons show deep levels from carbon-related complex defects and the deep levels possibly act as a recombination center.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、応用物性・結晶光学

キーワード：半導体、結晶評価、デバイス作製プロセス

1. 研究開始当初の背景

シリコンカーバイド(SiC)は古くより省エネルギー半導体デバイス用材料として期待されており、近年、4H-SiCを用いたショットキーバリアダイオード(SBD)や接合電界効果トランジスタ(JFET)などのユニポーラデバイスの実用化が活発となっている。さらに研究室レベルではバイポーラトランジスタ(BJT)、絶縁ゲート型BJT(IGBT)などのバイポーラデバイスの積極的開発が行われている。ここでバイポーラデバイス実用化のキーポイントの一つとしてキャリアライフタイムの制御が挙げられる。この制御の手

法として長時間の熱酸化または炭素イオン注入および拡散による4H-SiC中のキャリアライフタイムの増大が確認されている。しかしながら、この二つのキャリアライフタイム増大法はエピ層内のキャリアライフタイムに最も影響を与える点欠陥(ライフタイムキラー)が $Z_{1/2}$ 中心と呼ばれる欠陥のように炭素空孔に関連したものの場合にのみ有効である。一方、4H-SiC中のライフタイムキラーは $Z_{1/2}$ 中心のみではなく、炭素空孔に関連のない点欠陥もデバイス作製プロセスにおいて導入され、ライフタイムキラーとして働く可能性が示唆されている。従って、点欠陥の

物理的構造とそのキャリアライフタイムへの影響の相関性は未だに重要な研究対象であり、欠陥構造に応じたキャリアライフタイム制御プロセスも必要不可欠である。

ここで近年スウェーデンの Linköping 大学のグループが電子線照射により高純度 4H-SiC に対して点欠陥を意図的に導入し、核磁気共鳴(EPR)と熱処理の繰り返しにより点欠陥構造の熱処理による変化を報告している (P. Carlsson et al., Phys. Rev. B 82, 235203 (2010))。つまり点欠陥の物理的構造と熱処理温度の相関性については明確な情報が得られたことになる。ここで、同様な条件の試料を準備し、熱処理と他の手法による評価を繰り返せば評価情報と熱処理の相関性が明らかになる。つまり、熱処理温度への依存性を通じて、評価により得られる情報と点欠陥の物理的構造を結び付けることが可能となる。

以上の背景を基に、深い準位過渡応答測定(DLTS)法およびマイクロ波光導電減衰(μ -PCD)法を駆使することにより、電子線照射および熱処理によって形成される 4H-SiC 中の点欠陥に起因するバンドギャップ中の深い準位を同定し、そのキャリアライフタイムへの影響(電気的影響)を評価する。最終的にこれら評価結果を利用し、特定の点欠陥の濃度制御によるキャリアライフタイム制御プロセスを確立する。

2. 研究の目的

申請者は Linköping 大学のグループにより報告されている点欠陥構造の熱処理依存性と、DLTS 法および μ -PCD 法による観測結果の熱処理依存性を比較することで、

- 1) 点欠陥が形成する深い準位の同定
 - 2) 点欠陥が与えるキャリアライフタイムへの影響
- の二点の点欠陥の電気的な影響を明らかにし、さらに得られた結果を利用することで
- 3) 点欠陥濃度制御によるキャリアライフタイム制御法の確立を行う。

本研究では Linköping 大学のグループが使用したものと同等の試料に対して DLTS 信号およびキャリアライフタイムの熱処理依存性を明らかにすることで、報告データとの相関性を見出し、項目 1), 2) の解明を達成する。その上で、キャリアライフタイムに最も影響を与える点欠陥(ライフタイムキラー)に的を絞り、その濃度を制御することでキャリアライフタイムの制御をも可能なプロセスを確立し、項目 3) を達成する。

3. 研究の方法

(1) 研究方法の概略

本研究は電子線照射された n 型 4H-SiC に対する DLTS 測定により点欠陥が形成する深

い準位を同定し、さらに μ -PCD 測定により点欠陥がキャリアライフタイムに与える影響を評価する。この評価を熱処理とを繰り返し、報告されている EPR 信号との比較を行うことで、深い準位・キャリアライフタイムと点欠陥構造とを結びつける。また p 型 4H-SiC に対しても同様の手順で評価を行い、深い準位および少数キャリアが電子の場合でのキャリアライフタイムと点欠陥構造との関連を明らかにする。得られた結果を基にライフタイムキラーとなる点欠陥を同定し、その構造を変化させるプロセスを開発することでキャリアライフタイム制御プロセスを確立する。

(2) n 型 4H-SiC に対する実験手法

n 型 4H-SiC における点欠陥の影響を観測する試料は n 型 4H-SiC エピウェハ(ドーパ量: $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, 厚さ: 130 μm)から切り出したものである。これらに対して電子線照射(エネルギー: 2 MeV, 照射量: $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$)したものを(as-irradiated)、およびその後 Ar 中で 200°C、400°C、600°C、800°C、1000°C で 10 分間熱処理を施した試料(...°C-annealed)である。 μ -PCD 法で用いたパルス励起光は第 3 高調波 YAG レーザ(侵入長: 48 μm)及び第 4 高調波 YAG レーザ(侵入長: 1.2 μm)である。なお、本測定において、過剰キャリアのピーク値を 1 と規格化し、そこから 1/e まで減衰する時間を 1/e ライフタイムと定義した。また、電流 DLTS 法を用いた電気的特性の解析を行うため、試料裏面(sub)にオーミック電極として Al、試料表面(epi)にショットキー電極として Ni を蒸着した。電流 DLTS 法では電圧 0~-10 V、パルス幅 10 ms のパルス電圧を用いた DLTS 法では多数キャリアトラップのみ観測できるが、多数キャリアトラップ・少数キャリアトラップのどちらも観測できる測定として光導入電流過渡応答法

(PICTS 法)による測定も行った。その際にショットキー電極を、紫外光が透過するほど薄く蒸着した。PICTS 法は紫外発光 LED(波長: 365 nm, 最大出力 1.7 mW)を用い、測定は光照射時間 10 ms、測定時間 25 ms で行った。

ここで点欠陥以外にキャリアライフタイムに影響を与える要素として、表面再結合が懸念されるため、その評価も行った。試料は上記のものと同じウェハから切り出したものであるが、電子線照射は施していない。また、epi 側を研磨することで厚みの異なる試料を用意した。なお epi 側も sub 側も化学機械研磨(CMP)により、欠陥層を可能な限り除去している。これらの試料に対して、 μ -PCD 法によりキャリアライフタイム測定を行った。

(2) p 型 4H-SiC に対する実験手法

p型の試料はAl ドープの10 μmの厚みを持つエピタキシャル膜を用いた。この試料に対して160 keVの電子線照射を実施した。照射量は 10^{16} cm^{-2} もしくは 10^{17} cm^{-2} である。また、これらの試料に対して1000°Cのアニールを施した試料も準備し、μ-PCD法によるキャリアライフタイム測定および電流DLTS測定を行った。

4. 研究成果

(1) n型4H-SiCから得られた実験結果

点欠陥の影響を観測するための試料に対してμ-PCD測定を行った。ここで得られた信号の、ピークから1/eまで減衰した時間を1/eライフタイムとして図1に示す。熱処理温度に応じて1/eライフタイムは変化しているように見える。しかしながら、基のμ-PCD信号の減衰曲線におけるSN比を考慮すると、1/eライフタイムの見積りには±0.015 ns程度の誤差があると考えられる。従って、熱処理温度による変化は誤差範囲内であり、キャリアライフタイムに対する熱処理の影響はないと考えられる。ここで、図2(a)に示すEPRによる報告データを見ると、点欠陥濃度は欠陥構造に応じて変化しているため、特定の点欠陥がキャリアライフタイムを支配しているのではないと考えられる。

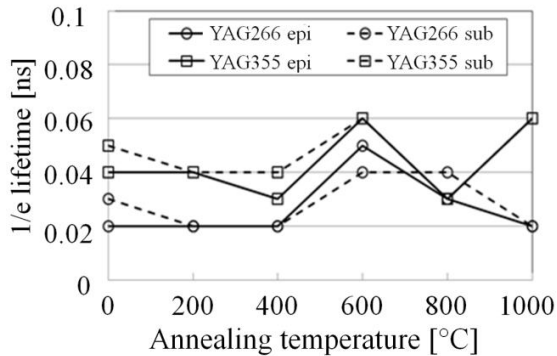


図1 1/e ライフタイムの熱処理温度依存性

また、電流DLTS測定を100~600 Kの範囲(ただしas-irradiatedでは100 K~室温、200°C-annealedでは100~400 Kの範囲)で行った。その結果、全ての試料において250 K付近にピークが現れた。また、点欠陥濃度を反映するピーク高さに着目すると、熱処理温度により変化はしているものの、誤差の範囲内での変化しかなかったため、熱処理温度による濃度の推移を確認することはできなかった。従って、図2(a)の点欠陥濃度の推移と電流DLTS信号におけるピーク高さ推移との相関を見出すことはできなかった。

電流DLTS法では観測できない価電子帯側の深い準位を観測するためにPICTS測定を実施した。測定温度範囲は電流DLTS測定と同様である。その結果、270 K付近と370 K付

近にピークを観測した。それぞれをpeak A、peak Bと名付ける。これらのピーク高さは熱処理温度に応じて誤差範囲(±0.06 nA)以上に推移しており、有意に変化していると考えられる。従って、図2(b)にPICTSピークの高さの熱処理温度依存性を示した。図に示されるようにどちらのピークも800°Cで最大の高さを示した。図2(a)に示すEPR信号を見ると、800°Cで濃度が最大となる点欠陥としてEI4 ($C_{Si}V_C$ と1つまたは2つのVCによる複合欠陥)もしくは $C_{Si}V_C$ が挙げられる。従って、peak Aおよびpeak Bはこれら二種類の点欠陥のどちらかが形成する準位によるものだと考えられる。

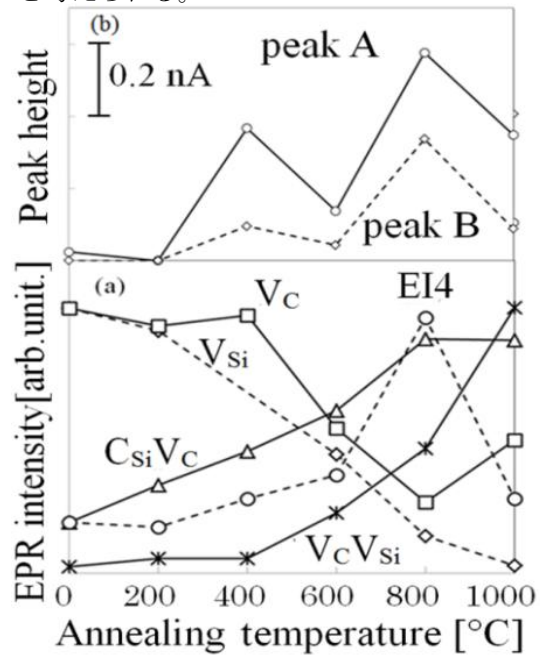


図2 (a) Linkoping大学のグループが報告している点欠陥に起因するEPR信号の熱処理温度依存性、(b) PICTS信号のピーク高さの熱処理温度依存性

一方、表面再結合速度を評価するために膜厚の異なる試料に対して、μ-PCD測定を行い1/eライフタイムを見積もった。図3に1/eライフタイムの膜厚依存性を示す。膜厚に応じて1/eライフタイムが長くなっており、膜厚が厚いと裏面の表面再結合の影響が低減していることがわかる。また、得られた1/eライフタイムと数値計算(Y. Ogi ta, J. Appl. Phys. 79 (1996) 6954.によるモデル)とを比較し、表面再結合速度を見積もった。その結果、epi側では1000 cm/s、sub側では2000 cm/sでの計算と実験結果が近く、表面再結合速度はおよそこの値であることがわかった。これらの値を考慮すると、図1における短い1/eライフタイムは表面再結合によるものではなく、バルク中の再結合中心によるものと理解できる。

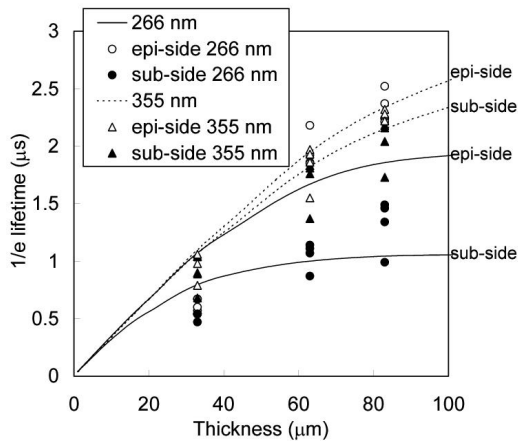


図3 1/e ライフタイムの膜厚依存性 (プロット) および epi 側を 1000 cm/s、sub 側を 2000 cm/s とした数値計算結果 (線)

(2)p 型 4H-SiC から得られた実験結果
 p 型 4H-SiC 試料に対する μ -PCD 測定から得られた 1/e ライフタイムを図 4 に示す。なお、この測定は 266 nm のレーザを使用してフィルタにより励起強度を変化させて得られたものである。図に示されるように励起強度に応じて 1/e ライフタイムが長くなっている。この依存性は励起強度が強くなると高水準注入の条件になるためだと考えられる。また、電子線照射を施すことで 1/e ライフタイムが短くなっていることもわかる。これは電子線照射により再結合中心が導入されたことを意味している。なお、電子線照射後のアニールにより 1/e ライフタイムが回復しており、導入された再結合中心はアニールアウトされると考えられる。

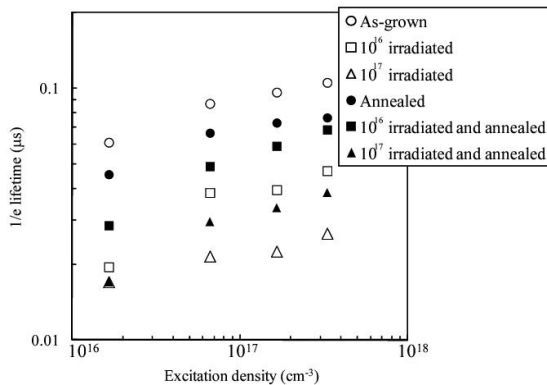


図4 p 型 4H-SiC 試料における 1/e ライフタイムの励起強度依存性

これら p 型 4H-SiC 試料内の再結合中心を観測するために電流 DLTS 測定を行った。アニールを施していない試料に対するその結果を図 5 に示す。各試料において 3 つのピークが観測された。それらのピークにおいて電子線照射量に応じて単調増加するピークは

存在しなかった。電子線照射は SiC 中の炭素原子のみを弾き飛ばすエネルギーで実施しているが、照射量に応じて増加するピークがないということは、観測されたピークは炭素空孔もしくは格子間炭素に対応するものではないということを示唆している。従って、電子線照射後の試料から観測されたピークは炭素に関連する複合欠陥によるものである可能性が高い。

さらに、観測されたピークによる正孔の捕獲断面積を評価し、室温における正孔捕獲の時定数を見積もった。その結果、図 5 に現れたピークによる正孔捕獲時定数は図 4 で示された 1/e ライフタイムの値よりも小さく、これらのピークは再結合中心として働く可能性がある。一方で、アニールを施した試料から観測されたピークも複数存在したが、それらのうち幾つかは再結合中心として働かないと考えられるものだった。従って、アニールにより再結合中心が減り、図 4 に示されるような 1/e ライフタイムの増加に反映されたと考えられる。

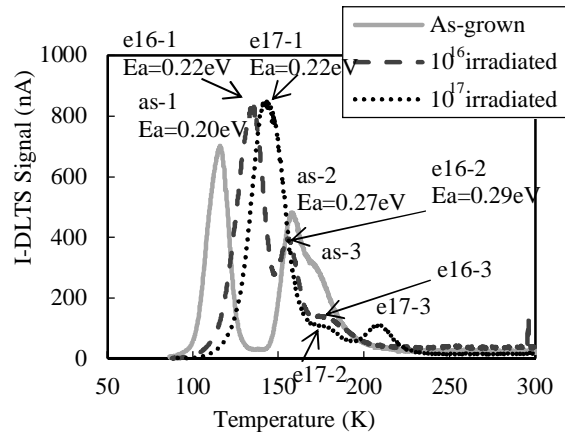


図5 アニールを施していない p 型 4H-SiC 試料から得られた電流 DLTS スペクトル

(3) 成果のまとめ

以上のように、本研究により n 型の試料に導入される準位の構造の推定、および再結合中心は特定できていないものの、表面再結合が支配的ではないことから、キャリアライフタイムは再結合中心により律速されることが明らかになった。一方で、p 型試料においては電子線照射により導入された複合欠陥が再結合中心として働くことが示唆された。しかしながら、キャリアライフタイムの制御には至っておらず、今後も研究が必要である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

(1) Kazuki YOSHIMURA, Masashi KATO, Masaya

ICHI MURA, Tomoaki HATAYAMA, Takeshi OHSHIMA, Deep levels in p-type 4H-SiC induced by low-energy electron irradiation, Materials Science Forum、査読有、740-742 巻、2013、373-376
DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.740-742.373

(2) Masashi Kato, Atsushi Yoshida, Masaya Ichimura, Estimation of the Surface Recombination Velocity from Thickness Dependence of the Carrier Lifetime in n-type 4H-SiC Epilayers, Japanese Journal of Applied Physics、査読有、51 巻、2012、02BP12-1-6
DOI: 10.1143/JJAP.51.02BP12

(3) Masashi Kato, Yoshinori Matsushita, Masaya, Ichimura, Tomoaki Hatayama, Takeshi Ohshima, Excess Carrier Lifetime in p-Type 4H-SiC Epilayers with and without Low-Energy Electron Irradiation, Japanese Journal of Applied Physics、査読有、51 巻、2012、028006-1-2
DOI: 10.1143/JJAP.51.028006

〔学会発表〕(計 8 件)

①中根浩貴、加藤正史、市村正也、大島武、4H-SiC 中の深い準位を形成する欠陥構造の同定の試み、電子情報通信学会 電子デバイス研究会、2013 年 5 月 16 日、静岡大学創造科学技術大学院

②吉原一輝、加藤正史、市村正也、畑山智亮、大島武、p 型 4H-SiC 中の深い準位における捕獲断面積の温度依存性、2013 年 第 60 回応用物理学会春季学術講演会、2013 年 03 月 28 日、神奈川工科大学

③吉原一輝、加藤正史、市村正也、畑山智亮、大島武、p 型 4H-SiC 中の深い準位の捕獲断面積に関する考察、第 21 回シリコンカーバイド(SiC)及び関連ワイドギャップ半導体研究会、2012 年 11 月 19 日、大阪市中央公会堂

④Kazuki YOSHIMURA, Masashi KATO, Masaya ICHIMURA, Tomoaki HATAYAMA, Takeshi OHSHIMA, Deep levels in p-type 4H-SiC induced by low-energy electron irradiation, 9th European Conference on Silicon Carbide and Related Materials, 2012 年 9 月 3 日、St. Petersburg, Russia

⑤吉原一輝、加藤正史、市村正也、畑山智亮、大島武、低エネルギー電子線照射を施した p 型 4H-SiC における再結合中心の評価、電子

情報通信学会 電子デバイス研究会、2012 年 5 月 18 日、豊橋技術科学大学 ベンチャー・ビジネス・ラボラトリー

⑥吉原一輝、加藤正史、市村正也、畑山智亮、大島武、低エネルギー電子線照射を施した p 型 4H-SiC における価電子帯近傍の深い準位の観測、第 59 回応用物理学関連連合講演会、2012 年 3 月 17 日、早稲田大学

⑦Masashi Kato, Atsushi Yoshida, Masaya Ichimura, Estimation of the Surface Recombination Velocity from Thickness Dependence of the Carrier Lifetime, in n-type 4H-SiC Epilayers, 2011 International Conference on Solid State Devices and Materials, 2011 年 9 月 29 日、Aichi Industry & Labor Center

⑧加藤正史、吉田敦史、市村正也、自立 4H-SiC エピ膜のキャリアライフタイム測定による表面再結合評価、第 72 回 応用物理学会学術講演会、2011 年 8 月 30 日、山形大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

加藤 正史 (KATO MASASHI)

名古屋工業大学・工学研究科・准教授

研究者番号：80362317