

## 〔研究〕

# 窒化物ワイドバンドギャップ半導体の耐放射線性

## Radiation Tolerance of Wide-bandgap Nitride Semiconductors

梨山 勇

I. NASHIYAMA

Radiation tolerance of wide-bandgap semiconductors is discussed. By applying a simple theoretical model, potential tolerance against single-event effects and total displacement-damage effect in electronic devices fabricated with nitride semiconductors are examined in terms of densities of electron-hole pairs and displaced atoms introduced by energetic ion irradiation. Energy levels and spatial structures of radiation-induced and native defects are reviewed.

### § 1 はじめに

半導体デバイスの放射線照射効果は素子構造や作製プロセスに依存するが、半導体の種類が本質的に関係する部分も多い。そこで先ず、半導体の放射線効果を議論する上で重要な変位損傷耐性とシングルイベント効果耐性について簡単に考察する。

デバイスの照射効果を基礎過程の視点から見ると電離効果と変位損傷効果に分類できる。電離効果は、放射線によって半導体中の電子が励起されて伝導電子や正孔を生じ、その結果、デバイスの動作状態が変化する効果である。これは、さらにシングルイベント効果とトータルドーズ効果に分類できる。シングルイベント効果は、高エネルギー粒子線が半導体に入射して過渡的に高密度の電子や正孔を発生し、素子の局所的なノードの電位を瞬間的に変化させてアップセット（メソフトエラー）、CMOSのラッチアップ、パワー素子のバーンアウト等を生じる現象である。トータルドーズ効果は、MOSデバイスを構成するSiO<sub>2</sub>等の絶縁膜中の電荷蓄積や絶縁膜・半導体界面での界面準位の発生が原因となって生じる特性劣化であるが、本稿では触れない。変位損傷効果は、半導体の結晶格子原子が放射線によってはじき出されて格子欠陥を作り、それが半導体の電気特性を劣化させる効果である。

### § 2 シングルイベント効果

シングルイベント効果はLSIのパッケージや金属配線

から出る線で起こるソフトエラーとして良く知られている。また、宇宙開発では宇宙線で生じる宇宙機の故障原因として深刻な問題になっている。さらに最近では、地上で使用するデバイスでも、地表に到達する宇宙線でシングルイベント現象が発生すると言われている。そこで、この現象の原因となる放射線誘起電荷の発生量を簡便な方法で求め、種々の半導体のシングルイベント耐性を考察する。

シングルイベント効果は入射した高エネルギー粒子がその飛跡に沿って発生する高密度の電荷に起因する。粒子の入射で生じる電荷は、1) 高エネルギー粒子の飛跡の中心部に生じるプラズマ柱の電荷、2) その周辺に発生する電荷、に分類される。この内、シングルイベント効果の発生に関与するのは主として1)の成分であり、プラズマ柱を通して多量の電荷が電極に集められる機構はファネリングと呼ばれる。

プラズマ柱の電子・正孔対の線密度Qは入射粒子の線エネルギー付与(LET)と電子・正孔対を作るのに必要な平均エネルギー(W値)を使って簡単に求めることができる。LETの代わりに阻止能Sを使って、

$$Q [\text{対/cm}] = S [\text{eV/cm}] / W [\text{eV/対}]$$

シングルイベント効果に関与する粒子線のエネルギーは、Bethe-Bloch領域であり、阻止能Sは以下の式で表される。

$$S = (4\pi Z_1^2 e^4) / mv^2 \times N \times Z_2 \times \ln(2mv^2 / I)$$

KEY WORDS : シングルイベント効果, 変位損傷, トータルドーズ効果, 宇宙半導体素子, ソフトエラー

表1 1MeV陽子線の照射で発生する変位損傷の密度と電子・正孔対の線密度

半導体	平均原子番号 Z	結晶構造 原子密度 N (x10 <sup>22</sup> )	しきい値エネルギー Ed (eV)	フルエンス当たりの一次欠陥濃度 Nd (x10 <sup>-20</sup> cm <sup>-3</sup> )	禁制帯幅 Eg (eV)	W値 W (eV/対)	阻止能 S (keV/μm)	フルエンス当たりの電荷密度 Q (対/μm)
C	6	D 17.63	80	1	5.4	15.3	9.8	740
Si	14	D 5.00	12.8	16	1.11	3.62	6.5	1800
Ge	32	D 4.42	15	25	0.66	2.8	13.1	4680
SiC	10	ZB 9.66	~33	~4.4	2.2	6.7	9.0	1340
SiC	10	6H 9.66	~33	~4.4	2.9	8.6	9.0	1050
BN	6	ZB 16.93	~75	~1.1	6.4	~18	~9.4	~520
BN	6	Hex 10.59	~38	~2.2	5.8	~16.4	~5.9	~360
AlN	10	W 9.57	~33	~4.3	6.2	~17.4	~8.9	~510
GaN	19	W 8.74	~29	~8.7	3.39	~9.9	~15.4	~1560
InN	28	W 6.37	~18	~20	2.05	~6.3	~16.6	~2630

$I = 11.5 \times Z_2 [eV]$  (物質固有の平均励起ポテンシャル)

ここで、 $m$ は電子の質量、 $v$ は粒子線の速度、 $N$ は原子密度であり、 $Z_2$ は化合物半導体に対しては平均的原子番号を用いる。 $W$ 値は半導体の禁制帯幅と密接に関係しており、 $W = 2.67 \times E_g + 0.87 eV$  (Kleinの経験式)を使っておおよその値を求めることができる。

入射粒子の種類とエネルギーが同じならば  $S \propto N \times Z_2$  となるから、原子密度と平均原子番号が低いほど阻止能が小さい。従って、電子・正孔対の発生が少ないので高いシングルイベント耐性が期待できそうである。4族元素及び窒化物半導体について、1MeV陽子線の単位フルエンス当りに発生する電子・正孔対の線密度を上記の方法で計算した結果を表1に示す。駆動電荷が同程度のデバイスを比較すると、BNとAlNはかなりのシングルイベント耐性が期待できそうである。しかし、GaNの耐性はSiと同程度かそれより少し良い程度であろう。

### §3 変位損傷

変位損傷で発生する一次格子欠陥の量はその後の回復や複合欠陥の形成があるため、最終的に残存する格子欠陥の量とは一致しない。しかし、変位損傷は半導体の照射劣化やイオン注入を論ずる上で最も重要な過程である。そこで、各種半導体の変位損傷の“しきい”エネルギーを推定してその発生量を簡便な計算法で求め、変位損傷耐性を議論する。

イオン線照射による“はじき出し”原子の濃度  $C_d$  は古典的なラザフォード散乱式とキンチン・ピース模型から次式で与えられる。

$$C_d = \Phi \pi Z_1^2 Z_2^2 e^4 (M_1 / M_2) (2E_0 E)^{-1} \ln (E_{pmax} / E_d)$$

ただし、 $E_{pmax} = 4 M_1 M_2 E / (M_1 + M_2)^2$ 。ここで、 $Z$ は原子番号、 $M$ は質量、 $E$ はイオン線の入射エネルギー、添字1, 2はそれぞれイオン線と半導体を示す。 $E_d$ は変位損傷の“しきい値”エネルギーであり、 $E_d = 0.895 (10/a_0)^{4.363}$  (Corbettの経験式)を使っておおよその値を求めることができる。

上式から、 $Z_2^2 / (M_2 E_d)$ の値が小さいほど、即ち低Z半導体ほど、変位損傷原子の密度は小さくなる。1MeV陽子線の単位フルエンス当りに発生する一次欠陥の密度を上記の方法で計算した結果を表1に示す。InNを除き窒化物半導体の一次欠陥密度はSiの半分以下であり、比較的高い変位損傷耐性が期待される。しかし、実際には一次欠陥は再結合、複合欠陥形成、アニール等を経て安定な二次欠陥を形成する。電気特性に影響を与えるのはこの二次欠陥であり、その密度は必ずしも一次欠陥密度に比例しない。また、二次欠陥の性質や挙動は照射効果に極めて大きな影響を与える。従って、照射欠陥(二次欠陥)の本性を知ることは耐放射線性を論じる上で極めて重要である。

### §4 GaNの格子欠陥

照射欠陥の性質と挙動の解明は耐放射線性だけでなく、デバイスプロセスで重要なイオン注入技術と密接に関連している。そこで、研究事例が比較的多いGaNについて、格子欠陥研究の現状を以下に紹介する。

#### 4.1 未照射GaNの格子欠陥

n-GaN: DLTS, ICTS, I-V, C-V, W.Goetz et al.<sup>1), P.Hacke et al.<sup>2)</sup></sup>

Ec - 0.18, 0.49 ± 0.01 eV 構造: 不明

Ec - 0.264 ± 0.01 eV 構造: 不明

$E_c - 0.580 \pm 0.017 \text{ eV}$ ,  $0.665 \pm 0.017 \text{ eV}$  構造: ガリウム置換窒素 $N_{Ga}$

## § 5 おわりに

p-GaN: 理論, D.J.Chadi<sup>3)</sup>

$E_v + 0.9 \sim 1 \text{ eV}$ ,  $E_v + 1.4 \text{ eV}$ ,  $E_v + 1.8 \sim 2 \text{ eV}$  構造: ガリウム空格子点 ( $G_a$ )

n-GaN: 陽電子消滅, K.Saarinen, et al.<sup>4)</sup>

エネルギー準位: 不明 構造:  $V_{Ga}$  電子補償として働く

n & p-GaN, 理論, C.V.Van de Walle<sup>5)</sup>

エネルギー準位: 不明 構造:  $V_{Ga} + H$ ,  $V_N + H$

### 4.2 電子線照射欠陥 (~ MeV電子線)

低フルエンス照射 ( $10^{14} \sim 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ )

n-GaN: DLTS, Z.-Q. Fang et al.<sup>6)</sup>

$E_c - 0.18 \text{ eV}$  Lookの $V_N$ と同じ。

中フルエンス照射 ( $10^{16} \sim 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ )

n-GaN: Hall, D.C. Look et al.<sup>7)</sup>

$E_c - 64 \pm 10 \text{ meV}$  (浅いドナー) 構造: 窒素空格子点 ( $V_N$ )

エネルギー準位: 不明 (深いアクセプタ) 構造: 窒素格子間原子 ( $N_i$ )

高フルエンス照射 ( $10^{18} \text{ cm}^{-2}$ )

n-GaN: ODMR, PL, M. Linde et al.<sup>8)</sup>

$E_c - 0.93 \text{ eV}$  構造: ガリウム格子間原子 ( $G_a_i$ )

### 4.3 イオン注入

n-GaN (270keV- $N^{2+}$ 注入): DLTS, C-V, D.Haase, et al.<sup>9)</sup>

$549 \pm 20 \text{ meV}$ : Hacke の  $0.58 \text{ eV}$  ( $N_{Ga}$ ) に対応

n-GaN (160keV-Si, 120keV-Mg注入): RBS, PL, XTEM, N.Parikh, et al.<sup>10)</sup>

550 注入は $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ でも損傷少ない。

室温注入は $1 \times 10^0$  アニールでもPLの回復は不十分。

n-GaN (90keV-Si注入): RBS, XTEM, H.H.Tan, et al.<sup>11)</sup>

液体窒素温度注入でのアモルファス化フルエンスは $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$

n-GaN (180keV-Ca, -Ar): X線回折, C.Liu, et al.<sup>12)</sup>

液体窒素温度注入でのアモルファス化フルエンスはCa, Ar共に $6 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$

n-GaN (100-200keV- Si, Ca): 抵抗測定, RBS, J.C.Zolper, et al.<sup>13-14)</sup>

イオン注入欠陥のアニールは1300 まで有効

窒化物半導体は化合物系特有の複雑さを持っているため、比較的研究が進んでいるGaNにおいても照射欠陥の同定、挙動の把握は全く不十分である。あえて、現在までの知見をまとめると以下ようになる。1) As-grown GaNの残留ドナーは主として不純物 $Si_{Ga}$ ,  $O_N$ に起因すると思われる<sup>15-17)</sup>。2) 窒素空格子点 $V_N$ は浅いドナーとなる。3) アンチサイト $N_{Ga}$ は深いドナー準位をとる。4) ガリウム空格子点 $V_{Ga}$ は深いアクセプタとなり、n-GaNのキャリア補償の原因となる。5) 照射欠陥のアニールには1300 が必要である。なお、近年著しい発達を遂げたGaN発光素子の光劣化を論じる場合は、電子励起による格子欠陥の発生が重要になる。

## 参 考 文 献

- 1) W.Goetz et al., Appl.Phys.Lett. 65, 4 (1994) 463.
- 2) P.Hacke et al., J.Appl.Phys. 76, 1 (1994) 304.
- 3) D.J.Chadi, Appl.Phys.Lett. 71, 20 (1997) 2970.
- 4) K.Saarinen, et al., Phys.Rev.Lett. 79, 16 (1997) 3030.
- 5) C.V.Van de Walle, Phys.Rev. 56, 16 (1997-II) R10020.
- 6) Z.-Q. Fang et al., Appl.Phys.Lett. 72,4 (1998) 448.
- 7) D.C. Look et al., Phys.Rev Lett. 79,12 (1997) 2273.
- 8) M. Linde et al., Phys.Rev B55, 6 (1997) R10177.
- 9) D.Haase, et al., Appl.Phys.Lett. 69, 17 (1996) 2525.
- 10) N.Parikh, et al., Nucl.Instrum.Meth.Phys.Res. B127 / 128 (1997) 463.
- 11) H.H.Tan, et al., Appl.Phys.Lett. 69, 16 (1996) 2364.
- 12) C.Liu, et al. Appl.Phys.Lett. 71, 16 (1997) 2313.
- 13) J.C.Zolper, et al., SAND-96-2518C (1997), J.C.Zolper, et al., SAND-97-1134C (1997). J.C.Zolper, et al., J.Electron Mat. 25 893 (1996), J.C.Zolper, et al., Appl. Phys. Lett. 68 1945 (1996), J.C.Zolper, et al., Appl. Phys. Lett. 68 2273 (1996).
- 14) S.J.Pearnton, et al., Appl. Phys. Lett. 64 1435 (1997).
- 15) W.Goetz et al., Appl.Phys.Lett. 68, 22 (1996) 3144.
- 16) B-C.Chung et al., J.Appl.Phys. 72, 2 (1992) 651.
- 17) P.Perlin et al., Phys. Rev. Lett. 75, 2 (1995) 296.
- 18) J.Q.Duan, et al., Solid State Com. 104, 3 (1997) 134.
- 19) P.Thurian, et al., Appl.Phys.Lett. 71, 20 (1997) 2993. (1999. 2.12受付)