

日坂隆行* 大島 武**
 佐々木 肇*
 小野田 忍**

GaN HEMTの耐宇宙放射線性の解析

Analysis of Space Radiation Resistance in GaN HEMT

Takayuki Hisaka, Hajime Sasaki, Shinobu Onoda, Takeshi Ohshima

要 旨

窒化ガリウム(GaN)高電子移動度トランジスタ(HEMT: High Electron Mobility Transistor)は、高出力・高効率動作が可能で信頼性にも優れたデバイスである。増幅器の小型軽量・高信頼性が実現できることから、衛星搭載用SSPA(Solid State Power Amplifier)への適用が期待されているが、宇宙環境で使用するためには、宇宙放射線に対して十分な耐性を確保することが要求される。

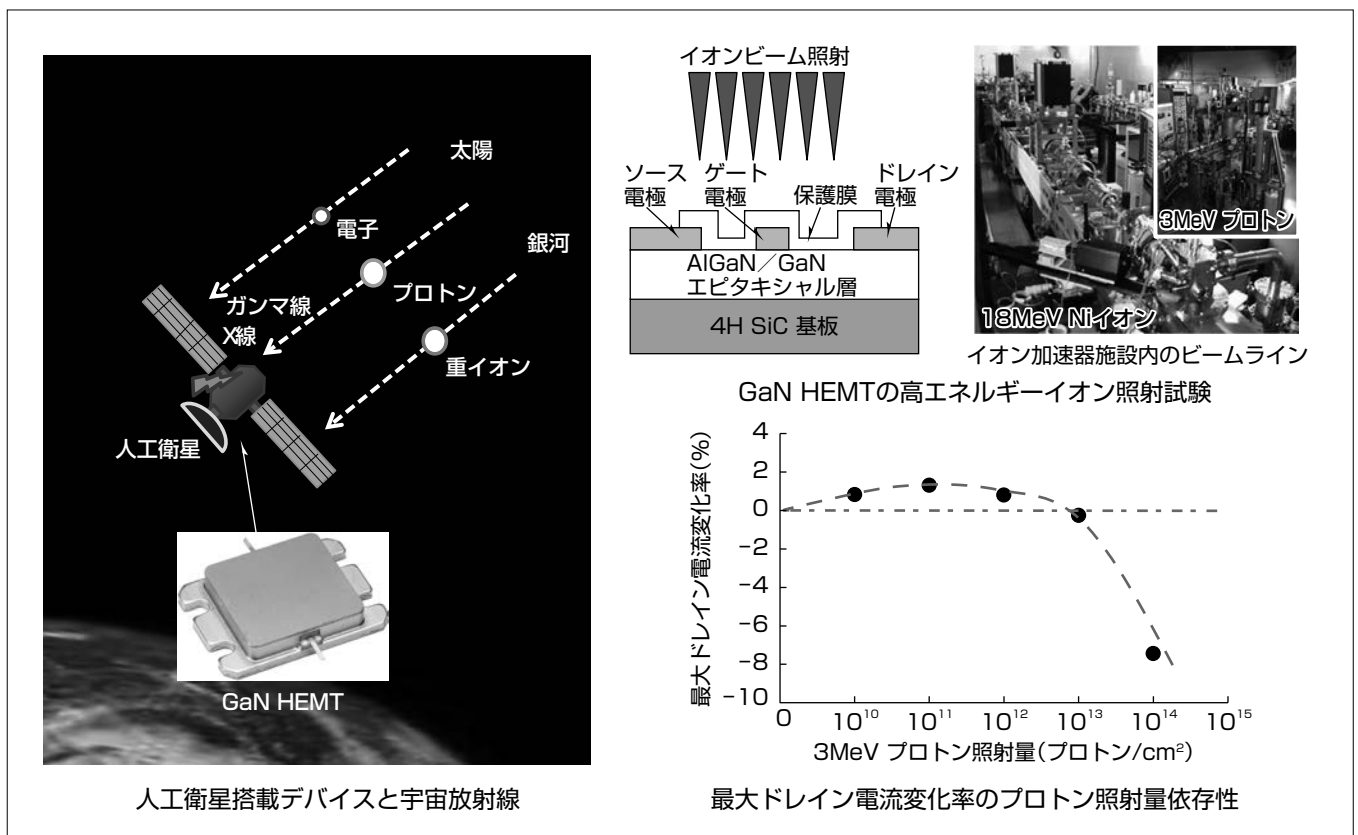
今回、GaN HEMTの耐宇宙放射線性を評価するため、高エネルギーイオン加速器施設を用いてイオン照射試験を行った。

GaN HEMTに3 MeVのプロトンを照射し、照射前後のデバイス特性の変化を評価した結果、照射量 1×10^{13} プロト

ン/cm²まで特性は変化せず安定であり、宇宙環境で使用するためには十分に高い耐性があることを確認した。

イオン照射による損傷がデバイスに与える影響を明らかにするため、更に高い照射量のプロトン、又は質量の大きいニッケル(Ni)イオンを照射し、デバイス特性の評価のほか、電界、リーク電流分布の解析を行った。その結果、ドレイン電流の減少が見られたが、電界集中やゲートリーク電流の増加は生じず致命的な故障には至らないことを確認した。

これらの結果から、GaN HEMTは宇宙環境耐性に優れたデバイスであり、衛星搭載用SSPAの小型軽量・高信頼性化に貢献できる。



GaN HEMTの耐宇宙放射線性の評価

人工衛星に搭載されるデバイスは宇宙放射線環境で使用される。GaN HEMTの耐宇宙放射線性を評価するため、高エネルギーイオン加速器施設を用いてイオン照射試験を行った。3 MeVのプロトンを照射した結果、 1×10^{13} プロトン/cm²まで最大ドレイン電流は変化せず安定であり、宇宙環境で使用するためには十分な耐性があることが分かった。さらに、高照射量の照射によって電流が減少するが、致命的な故障には至らないことを確認した。

*三菱電機(株) 高周波光デバイス製作所(工博) **国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構(工博)

1. ま え が き

GaN HEMTは、高い飽和ドリフト速度や高い破壊電圧といったGaNの優れた材料物性を活用し、高出力・高効率動作が可能であり、さらに、ガリウムと窒素の結合力が強く化学的に安定であることから、信頼性にも優れたデバイスである。GaN HEMTを用いることで、小型軽量・高信頼性の送信用増幅器が実現できることから、衛星搭載用SSPAへの適用が期待されている⁽¹⁾。

宇宙環境では、超新星爆発や太陽活動から放出された高エネルギーの電子、プロトン、重イオンからなる宇宙放射線、及び遮蔽によって発生するX線、ガンマ線に曝(さら)されるため、衛星搭載用デバイスはこれらの放射線に対して十分な耐性を確保することが要求される。

宇宙放射線がデバイスに与える影響として次の3つの効果が考えられている。

- (1) トータルドーズ効果：X線やガンマ線による電離効果
- (2) シングルイベント効果：重イオンによる電離効果
- (3) はじき出し損傷効果：イオンによるはじき出し損傷効果

(1)や(2)の電離効果については、GaN HEMTへの影響は小さく問題ないことを確認している⁽²⁾。一方、宇宙環境に大量に存在するプロトンによるはじき出し損傷によるGaN HEMTへの影響は確認されていない。また、少量であるが重イオンによる影響も考えられる。

今回、GaN HEMTのはじき出し損傷効果について調査を行った。はじき出し損傷がデバイスに与える影響を調べるため、プロトン、及び更に質量が大きく損傷効果の大きいNiイオンを照射し、デバイス特性評価だけでなく新たな評価手法を用いて解析を行った。また、宇宙環境で使用するための耐放射線性を評価した。

2. イオン照射試験

評価に用いたGaN HEMTの断面構造を図1に示す。4H SiC(シリコンカーバイド)基板にAlGaN(窒化アルミニウムガリウム)/GaNエピタキシャル層を形成している。イオン照射試験は、量子科学技術研究開発機構が持つイオン

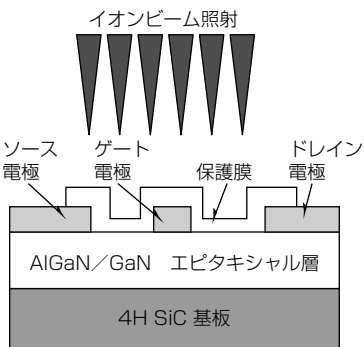


図1. デバイス構造とイオンビーム照射

加速器施設⁽²⁾を用いて、3 MeVのプロトン、18MeVのNiイオン照射を行った。イオン照射に用いた加速器施設内のビームラインの外観を図2に示す。プロトンは試料全面に照射を行い、Niイオンは集束イオンビームを用いてトランジスタ上の一部に照射を行った(図3)。

3. イオン照射によるデバイスへの影響

3.1 プロトン照射による耐性評価

GaN HEMTにプロトンを照射し、デバイス特性の変化を調べた。図4は、照射前後の最大ドレイン電流(I_{max})変化率のプロトン照射量依存性を示す。 1×10^{12} プロトン/cm²までの低い照射量では、 I_{max} の1%程度のわずかな増加が確認できる。この I_{max} の変化は、150℃のアニールによって回復したことから、プロトン照射によって正の電荷がデバイス内にトラップされたと考えられる。照射量 1×10^{13} プロトン/cm²まで、 I_{max} の劣化は見られなかった。

さらに、 1×10^{14} プロトン/cm²以上の照射によって、 I_{max} が減少した。その場合でもゲートリークの増大や破壊等の致命的な故障は生じなかった。静止軌道にある人工衛星が

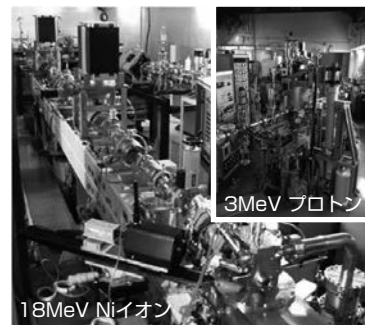


図2. イオン加速器施設内のビームライン

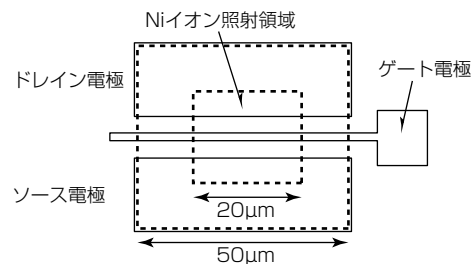


図3. GaN HEMTパターン図とNiイオン照射領域

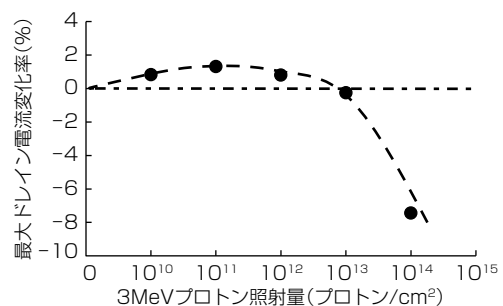


図4. I_{max} 変化率のプロトン照射量依存性

10年間に曝されるプロトン照射量の累積値は、3 MeVプロトンに換算すると、およそ 7×10^{11} プロトン/cm²である。船内に搭載されるデバイスへの影響は更に小さい。この結果から、GaN HEMTは、宇宙環境のプロトンに対して十分な耐性を持っていると判断できる。

3.2 Niイオン照射によるデバイスへの影響

プロトンより質量が大きいNiイオンを用い、更に18MeVの高エネルギーで照射を行い、デバイスへの影響を調べた。Niイオン照射前後のゲート電圧(V_G)-ドレイン電流(I_D)/相互コンダクタンス(G_m)波形を図5に示す。Niイオンは、照射量 7.0×10^{12} , 5.5×10^{13} イオン/cm²で照射した。

Niイオン照射を行うことによって、 I_D 及び G_m が減少した。しきい値電圧(V_{th})は照射によってほとんど変化していない。これは、図3に示すようにトランジスタのフィンガ内に照射している領域と照射していない領域が存在するためである。図6に、 I_{max} のNiイオン照射量依存性を示す。 I_{max} は、 1×10^{11} イオン/cm²まで安定であり、 2×10^{11} イオン/cm²以上で減少した。照射量の増加に伴い、照射損傷が大きくなり、 2×10^{11} イオン/cm²以上で特性に影響し始めると考えられる。図7は、Niイオン照射前後の順方向、逆方向のショットキー特性変化を示す。逆方向のゲートリーク電流($-I_G$)は照射後わずかに減少しており、ゲートリーク増大や破壊に至る劣化は生じなかった。

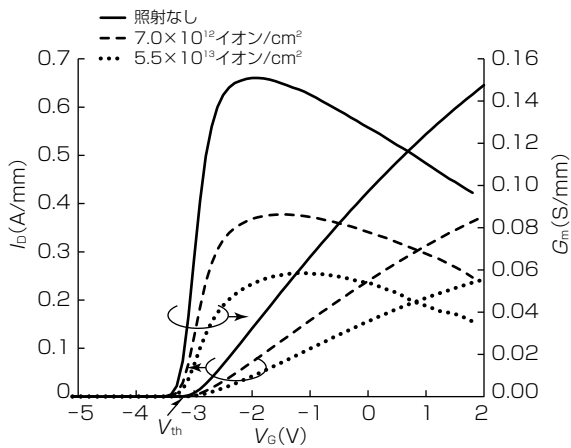


図5. Niイオン照射前後の V_G - I_D / G_m 波形

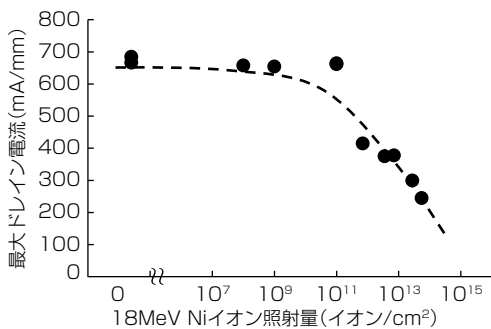


図6. I_{max} のNiイオン照射量依存性

次に、Niイオン照射による影響をミクロな視点で調べるために、PEM(Photo Emission Microscope), OBIRCH (Optical Beam Induced Resistance CHange), PL (PhotoLuminescence)による分析⁽³⁾を行った。PEMは電界強度分布、OBIRCHはリーク電流分布、PLは発光分布を観察することができる。表1は、Niイオン(7×10^{12} イオン/cm²)の照射前後のPEM, OBIRCH, PL像を示す。

ゲートバイアスは、PEM観察時は-70V、OBIRCH観察時は-10V印加した。Niイオンは、点線で示す四角の領域内に照射した。Niイオン照射後のPEM, OBIRCH, PL像は、全てNiイオン照射領域で均一に信号強度が減少した。それぞれの信号強度の減少は、照射領域の電界強度の減少、リーク電流の減少、再結合中心の増大を示している。ゲートリークが増大した素子に典型的に見られるスポット状の信号は、照射領域には見られないことから、照射によって局所的な電界集中やゲートリークは生じていないことを示している。この結果は、図7のゲートリーク電流の増大が見られなかったことと一致する。

これらの結果から、Niイオン照射によって均一にキャリア濃度が低下し、電界集中によるゲートリーク増大は生

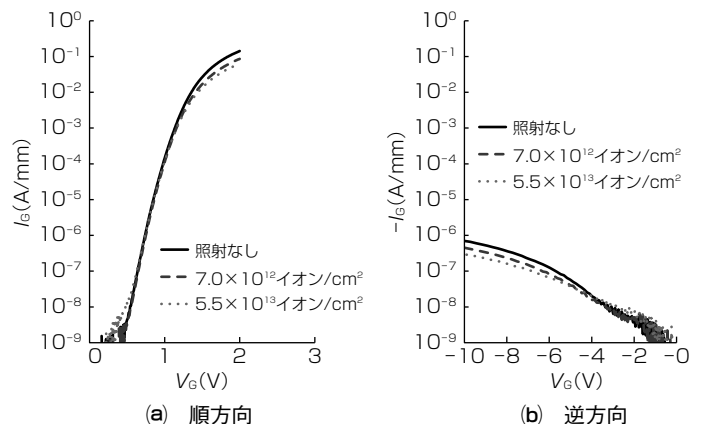


図7. Niイオン照射前後の順方向と逆方向のショットキー特性

表1. Niイオン照射前後のPEM・OBIRCH・PL像

| | Niイオン照射前 | Niイオン照射後 (7×10^{12} イオン/cm ²) |
|--------|----------|--|
| PEM | | |
| OBIRCH | | |
| PL | | |

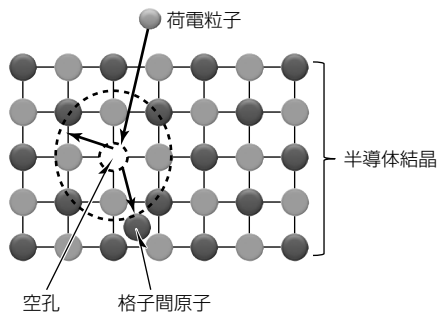


図8. 荷電粒子(イオン)照射によって発生する格子欠陥

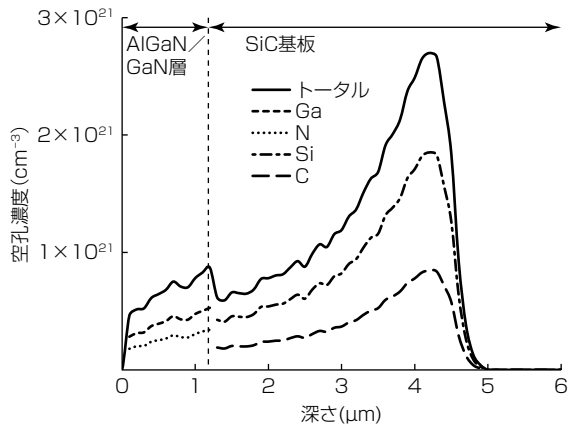


図9. AlGaIn/GaN/SiC結晶中の空孔濃度の深さ方向分布

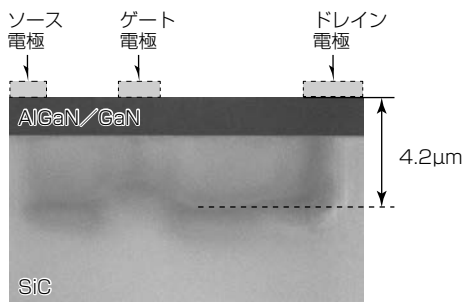


図10. Niイオンを照射したGaN HEMTの断面TEM像

じないと解釈できる。

イオン照射がGaN HEMTに及ぼす影響について考察する。半導体にイオンを照射すると、図8に示すように入射イオンとの相互作用によって結晶を構成している原子が正規の格子点からはじき出される。はじき出された原子が格子位置に戻らない場合には、格子間原子となり、空の格子点は原子空孔になる。SRIM/TRIM(Stopping and Range of Ions in Matter/TRansportation of Ion in Material)⁽⁴⁾シミュレーションを用いて、Niイオンの照射によってAlGaIn/GaN/SiC結晶中に発生する空孔濃度の深さ分布を計算した結果を図9に示す。Niイオンの加速エネルギーは18MeV、照射量は 2.8×10^{13} イオン/cm²である。空孔濃度のピークは、表面から4.2μmのSiC基板内にあることが分かる。

照射損傷を観察するために、Niイオンを同条件18MeV 2.8×10^{13} イオン/cm²でGaN HEMTに照射し、断面TEM (Transmission Electron Microscope)観察を行った結果を図10に示す。1.5μm厚にサンプルを加工し、2 MeVの超高压電子顕微鏡⁽⁵⁾によって観察した。照射による損傷領域が黒いコントラストとして観察されており、その深さはシミュレーションのピーク位置とほぼ一致している。また、ゲート電極下部の損傷領域は約0.4μm浅くなっているが、Niイオンがゲートメタルを通過して照射されることで説明できる。

これらの結果からGaN HEMTに18MeVのNiイオン照射を行うことによって、表面からSiC基板まで及ぶ格子欠陥が形成されることが分かる。AlGaIn/GaNチャネル層付近に発生した格子欠陥によって、キャリア濃度及び移動度が低下し、その結果ドレイン電流が低下するが、イオンが通過した軌跡に沿った線状の欠陥はなく電界集中やリーク電流増大の原因とはならないと考えられる。

4. む す び

プロトン(3 MeV)、Niイオン(18MeV)をGaN HEMTに照射し、デバイス特性への影響を調査した結果、プロトン照射の場合 1×10^{13} プロトン/cm²まで、Niイオン照射の場合 1×10^{11} イオン/cm²まで安定である。さらに、過剰なイオン照射によって生じた格子欠陥によって、ドレイン電流が減少するが、電界集中やゲートリーク電流の増加は生じず致命的な故障には至らない。GaN HEMTは、高出力・高効率で宇宙環境耐性にも優れたデバイスである。

参 考 文 献

- (1) Yamasaki, T., et al.: A 68% Efficiency, C-Band 100W GaN Power Amplifier for Space Applications, Proc. 2010 IEEE MTT-S Microwave Symp., 1384~1387 (2010)
- (2) Onoda, S., et al.: Enhanced Charge Collection by Single Ion Strike in AlGaIn/GaN HEMTs, IEEE Trans. on Nuclear Science, **60**, No.6, 4446~4450 (2013)
- (3) Sasaki, H., et al.: Irradiation Effect on Ions on AlGaIn/GaN HEMTs, ROCS Workshop Proceedings, 59~67 (2016)
- (4) Ziegler, J.F., et al.: The Stopping and Range of ions in Solids, **1**, Pergamon Press (1985)
- (5) 微細構造解析プラットフォーム, 大阪大学超高压電子顕微鏡センター
<http://www.uhvem.osaka-u.ac.jp/nanoplatform-kouzoukaiseki/index.html>