

2019B1692

BL20B2

放射光トポグラフィによる大口径窒化ガリウム基板の評価 Evaluation of Large-Diameter Gallium Nitride Substrate by Synchrotron X-ray Topography

山口 聡, 北住 幸介, 岸田 佳大
Satoshi Yamaguchi, Kosuke Kitazumi, Yoshihiro Kishida

(株)豊田中央研究所
Toyota Central R&D Labs., Inc.

縦型 GaN パワーデバイスは大電力動作が可能であり、大電流量への適用のメリットがある。ただし耐圧確保の課題が残っており、素子内に悪影響を及ぼす転位が含まれないことが求められる。今回、ポイントシード法による種結晶を用いた Na フラックス法によって、GaN 基板の高品質化と大口径化を同時に試みた。放射光トポグラフィを用いて非破壊で転位密度を評価し、市販のハイドライド気相成長基板よりも 1 桁低い転位密度であることが分かった。

キーワード： 窒化ガリウム (GaN)、X 線トポグラフィ、転位密度

背景と研究目的：

窒化ガリウム(GaN)は、次世代パワーデバイス用半導体の 1 つとして期待されている。低オン抵抗・高耐圧・大電流向けには、一例として図 1 に示すような GaN 基板を用いた縦型デバイスが研究されている[1-3]。

現在、縦型 GaN デバイスに用いられる GaN 基板の多くは、異種基板上に HVPE (Hydride Vapor Phase Epitaxy) 法により製造されている。格子定数の不整合により発生する転位密度は、パワーデバイスとして実用化されている半導体単結晶に比べて $1\text{-}3 \times 10^6 / \text{cm}^2$ と高く、転位がパワーデバイスの信頼性に悪影響を及ぼすことが考えられる[4,5]。そのため近年では、Na フラックス法により横方向成長を促進した低転位化が試みられている[6-8]。

Na フラックス法とは、温度：800°C程度、圧力：数 MPa 程度の下で、Na と Ga の金属融液に窒素を溶解させる方法である。最近では Na フラックス法の大口径化の基礎研究が進んでいる。ポイントシード法で作製した種結晶を用いることで高品質かつ大口径な GaN 基板が得られることが期待でき、これまで 2 インチ径の GaN 結晶の結晶性を X 線トポグラフィで評価した[9]。今回、さらに大口径化に成功した GaN 基板について、放射光を用いた反射 X 線トポグラフィにより転位分布を評価した。

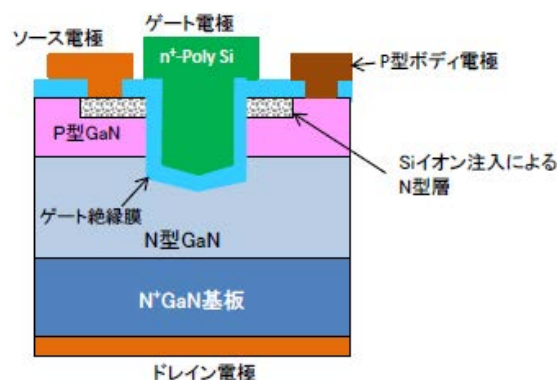


図 1. 縦型 GaN デバイスの断面構造例

実験：

試料は、ポイントシード法の種結晶を用いて Na フラックス法で作製した 1 辺が 42 mm の六角形の大口徑 GaN 基板である[6,7]。

実験は大型放射光施設 SPring-8 の BL20B2 において、単色 X 線を用いた反射 X 線トポグラフィで行った[10]。GaN に存在する転位の中で貫通刃状転位は歪み場が小さく、高い単色性 ($\Delta E/E \sim 10^{-4}$)、低い角度発散 (水平方向 ~ 1 mrad、垂直方向 ~ 0.1 mrad) を持つ放射光を用いて、数 μm の小さな欠陥像としてトポグラフ上で鮮明に捉えることができている[11]。大口徑な試料全体を一回の計測で評価するには、それ以上のビームサイズを有するビームラインでの実施が必要である。今回利用した BL20B2 は最大で 300 mm 幅の単色 X 線が得られ、それが実現可能である[12]。入射 X 線は Si (111)モノクロメータで 9.16 keV に単色化した X 線を用いた。図 2 に測定系の概略図を示す。X 線回折の測定条件として反射面は (11-24) として、入射角 $\theta_{in} = 3^\circ$ 、 $2\theta_B = 84.6^\circ$ を用いることで、表面から 4 μm 程度の結晶性を観察することができる。解像度の高い像を得るため、トポグラフ像は工業用高分解能 X 線フィルム (AGFA 社製 STRUCTURIXD2) に記録した。

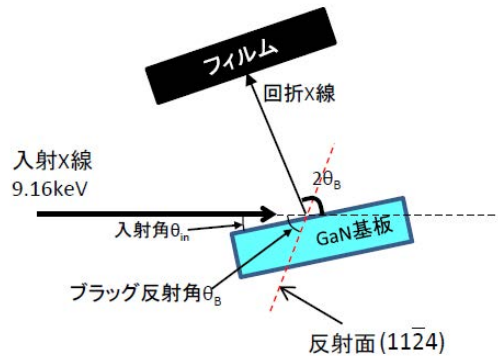


図 2. 反射 X 線トポグラフィの測定系の概略図

結果および考察：

図 3 に反射 X 線トポグラフ像の全体像を示す。この像は、入射角を固定 (θ_{in} -fixed) して取得した。基板の結晶格子面が反りを有するため、中央付近のブラッグ条件を満足している帯状の領域のみがフィルム上にトポグラフ像として現れている。図 4 は入射角を 0.015°ずつ変化させて多重露光し、試料の全領域を計測した像 (θ_{in} -スキャン) である。これより、曲率半径が 33 m であることがわかった。HVPE 法で作製した一般的な GaN 基板の曲率半径は数 m であり、それよりも曲率半径が大きく、結晶格子面の反りが小さいことが分かった[4,5]。

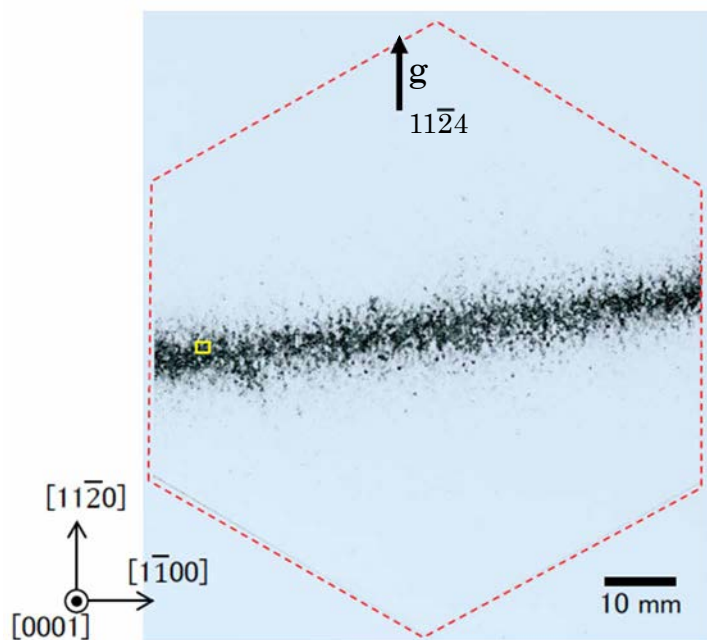


図 3. 反射 X 線トポグラフ像 (θ_{in} -fixed)

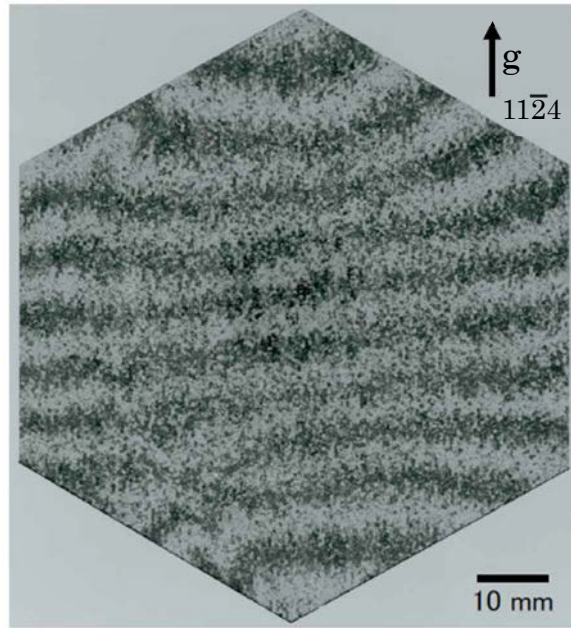


図 4. 反射 X 線トポグラフィ像 (θ_{in} -スキャン)

図 5 に、顕微鏡で拡大したトポグラフィ像を示す。歪領域が 400-500 μm 間隔で点在している。これは種結晶のポイントシードから伝搬している転位と考えられる。転位分布は不均一であり、無転位領域や密集領域が存在している。図 5 中に示す 200 μm 角の領域を 3 か所 (A: 無転位領域、B: 転位存在領域、C: 転位密集領域) について転位密度を見積もった。その結果を表 1 に示す。転位密度は各々、0 / cm^2 、 2×10^4 / cm^2 、 1×10^5 / cm^2 と見積もることができた。5 桁の幅はあるが、転位密度が全範囲にわたって 10^6 / cm^2 である市販 HVPE 法基板に比べ、少なくとも転位密度が 1 桁は低いことが分かった[4,5]。

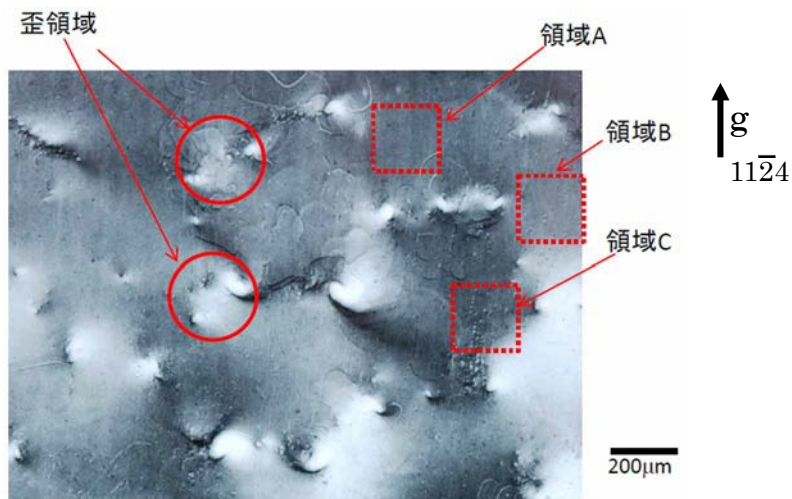


図 5. 反射 X 線トポグラフィ像 (θ_{in} -fixed) の拡大像 (図 3 の黄色枠部を拡大)

表 1. 転位密度の評価結果

	転位数 (個)	転位密度(/ cm^2)
領域 A	0	0
領域 B	9	2×10^4
領域 C	40	1×10^5

まとめ：

Na フラックス法により作製された 1 辺が 42 mm の六角形の GaN 基板を反射 X 線トポグラフィで転位密度を評価した。その結果、種結晶起因と推察される歪領域が存在していることが分かった。転位分布は不均一であり、無転位領域や転位密集領域が存在した。転位密集領域での転位密度は $1 \times 10^5 / \text{cm}^2$ であり、転位が多い領域であっても市販 HVPE 基板の転位密度の値よりも少なくとも 1 桁低い値であった。また、結晶格子面の反りに対応する曲率半径は約 33 m であった。市販 HVPE 基板のそれは数 m であり、反りが少ないことが分かった。

謝辞：

本実験は、JST の「ALCA (先端的低炭素化技術開発) 研究領域：高品位大口径 GaN 基板の開発 (JPMJAL1201)」の一環として実施した。議論をしていただきました大阪大学大学院工学研究科 森勇介教授、今西正幸助教に感謝いたします。

参考文献：

- [1] M. Kodama *et al.*, *Appl. Phys. Exp.*, **1**, 021104 (2008).
- [2] H. Otake *et al.*, *Appl. Phys. Exp.*, **1**, 011105 (2008).
- [3] T. Oka *et al.*, *Appl. Phys. Exp.*, **8**, 054101 (2015).
- [4] 大島祐一ら、日立電線：工学技術研究誌, No. 26, (2007).
- [5] A. Usui *et al.*, *J. Vac. Soc. Jpn.*, **54**, 34 (2011).
- [6] M. Imanishi *et al.*, *Appl. Phys. Exp.*, **12**, 045508 (2019).
- [7] M. Imade *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **53**, 05FA06 (2014).
- [8] 皿山正二、岩田浩和、Ricoh Technical Report, No. 30, 9 (2004).
- [9] 兼近将一ら、SPRING-8 利用課題実験報告書 (2018B1023).
- [10] SPRING-8 BL20B2 の概要、http://www.spring8.or.jp/wkg/BL20B2/instrument/lang/INS-0000000470/instrument_summary_view/ (アクセス日：2019 年 11 月 25 日)。
- [11] K. Horibuchi *et al.*, *Semicond. Sci. Technol.*, **31**, 034002 (2016).
- [12] S. Kawado *et al.*, *J. Synchrotron Rad.*, **9**, 166 (2002).

(Received: March 17, 2021; Accepted: July 16, 2021; Published: August 26, 2021)