

時分割ナノビームX線回折にもとづくAlGaIn/GaN HEMTにおける ゲート電圧印加下の圧電格子変形ダイナミクスのその場観察



研究ノート

藤 平 哲 也*

In situ time-resolved nanobeam X-ray diffraction analysis of
inverse-piezoelectric-effect-induced lattice deformation dynamics
in AlGaIn/GaN HEMT under gate biased condition

Key Words : Nitride semiconductor, Piezoelectric effect, Synchrotron XRD, In-situ measurements

はじめに

現在、最も広く用いられている Si 系パワーデバイスにおいて、パワーエレクトロニクス機器の省エネルギー・小型化のためのさらなる高耐圧・低オン抵抗化は、材料物性的にもデバイス構造的にも難しくなりつつある。窒化ガリウム (GaN) は Si の約 3 倍のバンドギャップを持ち、絶縁破壊電圧が高く、熱伝導率も比較的高いため、新規パワーデバイス用材料として期待されている。代表的デバイスである AlGaIn/GaN HEMT (高電子移動度トランジスタ) においては、Ⅲ族窒化物半導体の特徴である圧電性を利用しており、窒化物が本来持っている自発分極と、格子定数差による圧電分極の効果により、AlGaIn と GaN の界面に二次元電子ガス (2DEG) と呼ばれる高濃度の電子キャリアが誘起される [1]。高濃度な 2DEG を利用し高速動作ができることから、AlGaIn/GaN HEMT は高周波パワーデバイスとして注目を集めている。一方で、圧電性を有する窒化物半導体への電圧印加に起因するデバイス劣化も問題となっている。例えば、ドレイン側のゲート電極端における電界集中により引き起こされる局所逆圧電効果により、格子欠陥が誘起される現象が報告されている。このように、窒化物系 HEMT において圧電性は高濃度キャリアの生成に寄与すると同時に、局所歪みの誘起によりデバイス信頼性にも影響を与

えている。デバイス特性に影響する圧電特性を正確に制御するには、デバイス動作中の局所逆圧電応答の知識が不可欠であるが、局所における圧電物性とその動的挙動を定量的に測定する技術は十分には確立されていない。

X 線回折 (XRD) は、格子構造を直接観察し、結晶材料の特性やデバイスの性能に影響を及ぼす欠陥形成のプロセスを解析するための有効なツールである。特に放射光の集光光学系とパルス X 線を用いた測定系により、材料やデバイスの局所から高い空間・時間分解能で高精度の回折情報を得ることができる。先行研究において、時間分解 X 線回折技術を使用して、電圧印加下でチタン酸ジルコン酸鉛などの圧電材料の格子歪みを観察した例が報告されている [2]。これらのピエゾ化合物の圧電定数と比較して、本研究で対象とする窒化物の圧電定数は約 2 桁も小さい。それゆえ AlGaIn や GaN の圧電性歪みを XRD で観測することは、回折にもとづく歪み解析技術にとっても挑戦的な実験となる。本稿では、放射光ナノビーム X 線回折光学系 (nanoXRD) を用いたポンプ-プローブ測定実験により、AlGaIn/GaN HEMT デバイスの実動作状態で圧電物性が引き起こす局所格子変形ダイナミクスの定量評価を行った研究について紹介する [3,4]。

ゲート電圧印加下における AlGaIn 層逆圧電格子歪みの nanoXRD その場観察

nanoXRD にもとづく圧電測定の最大の特徴は、GaN HEMT デバイスにおけるエピタキシャル単結晶の格子構造をダイレクトに観察でき、AlGaIn 層の格子歪みに注目して逆圧電効果による局所格子変形をその場観察できることである。パルス放射光を用いることでナノ秒オーダーでの時分割測定も可能であり、電圧印加に対するデバイス局所の格子変形



* Tetsuya TOHEI

1978年7月生まれ
京都大学大学院 工学研究科 材料工学
専攻博士後期課程 (2006年)
現在、大阪大学 大学院基礎工学研究科
システム創成専攻 准教授
工学博士
専門／ナノ構造解析・電子材料物性
TEL : 06-6850-6301
FAX : 06-6850-6300
E-mail : tohei@ee.es.osaka-u.ac.jp

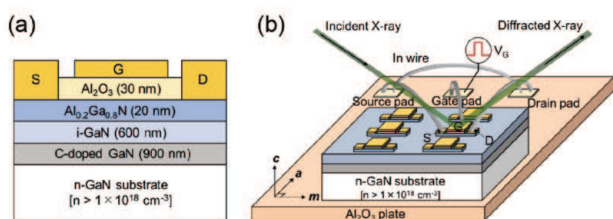


図1 (a) 本研究で用いた AlGaIn/GaN MOS-HEMT デバイス構造の断面図、および (b) 電圧印加その場 nanoXRD 測定 の概略図。(S: ソース、G: ゲート、D: ドレイン)

挙動を高い時空間分解能で観測することができる。本研究グループでは、SPring-8 の BL13XU ビームラインにおいて、放射光パルスに同期してデバイス試料へのパルス電圧印加が可能なオペランド（デバイス動作下その場）回折測定系を構築してきている。

図1(a)に本研究で用いた AlGaIn/GaN MOS-HEMT デバイス構造の概略図を示す（HEMT デバイス試料は北海道大学の橋詰保教授よりご提供を頂いた）[5]。ゲート長は 800 μm、ゲート幅は 400 μm であり、臨界膜厚と回折強度の両方を考慮して AlGaIn 層の膜厚は 20 nm、Al 組成を 20% とした。これらの値は実用 HEMT デバイスで用いられる AlGaIn 層の良いモデルとなっている。本研究では、ゲート電圧の印加が AlGaIn バリア層の格子変形に与える影響を観察することを目的とした。電界方向を単純化するため、ドレインとソースは短絡させた条件で電圧印加を行った。nanoXRD 測定は SPring-8 の BL13XU ビームラインにおいて、ゾーンプレートで集束されたシンクロトロン X 線ビーム (200 nm × 500 nm) を用いて行った。電圧印加下で

の回折を測定するためのポンプ-プローブ実験では、プローブパルスとしての X 線に同期したゲート電圧をポンプパルスとして印加し、遅延発生器を用いて X 線パルスに対して電圧パルスの位相を任意に変化させながら測定を行った。具体的には、図1(b)のようにゲート電極にパルス電圧を印加した状態で、ゲート電極上に m 方向から X 線を入射し、AlGaIn の対称 (0004) 面 (c 面) 回折スポットの変化を観測した。入射角 ω を走査しながら 2 次元検出器を用いて回折像 (2θ - ϕ マップ) を取得することで、 ω - 2θ - ϕ 3 次元 (3D) 逆格子マッピング像を得ることができる [6]。本研究では、格子面間隔に対応する 2θ 値を定量化するために、測定された 3D 回折プロファイルを ω 方向と ϕ 方向にわたって積算し、1 次元の 2θ プロファイルを得た。

図2(a),(b)に、ゲートに負 (0 ~ -7 V) 及び正 (0 ~ +7 V) の電圧を印加した状態で観測された AlGaIn (0004) 回折面の 2θ -強度プロファイルを示す。この測定では、SPring-8 のハイブリッドバンチ X 線パルスモード (H モード、周期 4.789 μs) のトレイン部 (幅 1.815 μs の連続パルス部) の照射タイミングに合わせて、ゲートにパルス電圧を印加している。図2(a)より、 2θ プロファイルとそのピークは、ゲート電圧が負に増加すると低角度にシフトすることが観察された。一方、正のゲート電圧が印加された場合は測定精度の範囲内で 2θ の顕著なシフトは観察されなかった (図2(b))。図2(c)は、 2θ プロファイルのピークからブラッグの式に基づいて計算された AlGaIn c 面格子間隔のゲート電圧依存性を示す。負のゲート電圧が増加すると、格子

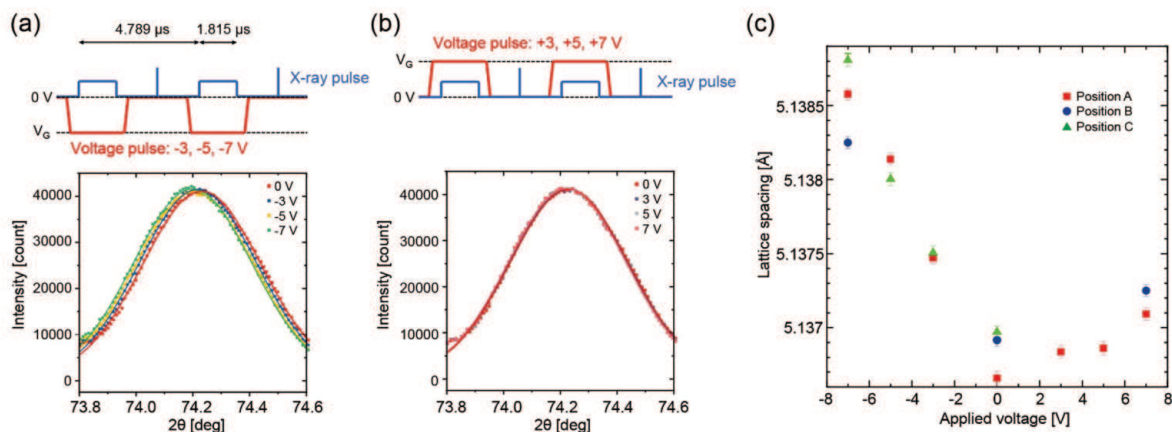


図2 (a) 負および (b) 正のゲート電圧印加に対する AlGaIn 0004 回折 2θ プロファイルの測定結果。(c) AlGaIn (0001) 格子面間隔のゲート電圧依存性。

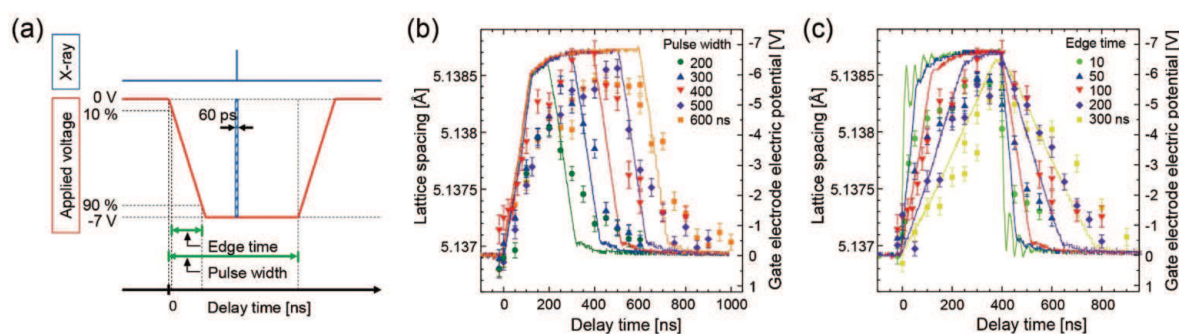


図3 (a) ダイナミクス測定におけるX線とゲート電圧パルスの印加シーケンス。(b), (c) ゲートパルス電圧印加時のAlGaIn (0001) 格子面間隔の時間依存性 (シンボルが格子面間隔、実線が印加ゲート電圧波形)。ゲート電圧のパルス幅 (b) およびエッジ時間 (c) を系統的に変化させた条件で測定を行った。

間隔が直線的に増加することが明瞭に見てとれる。解析の結果より、この挙動はAlGaIn層に加えられた電界と圧電係数、および基板からのクランプ効果を考慮に入れた圧電格子歪みと定量的に一致していることが確認された。これらの結果より、本測定法によってゲート電圧印加下のAlGaIn層の逆圧電応答による格子変形を直接観測することが可能なことが示された。

超短パルス (シングルバンチ) X線による圧電格子変形ダイナミクスの高時間分解能測定

パルス電圧印加時のAlGaIn層の格子変形ダイナミクスをさらに詳細に調べるために、SPRING-8のシングルバンチX線パルスを用いた高時間分解nanoXRD測定を行った。図3(a)に圧電格子歪み応答の動的解析におけるX線とゲート電圧パルスの印加シーケンスを示す。ダイナミクス解析の測定では、X線チョッパーデバイス[7]を使用してハイブリッドバンチモードX線パルス列のシングルバンチ部 (時間幅 60 ps) のみを選択的に射出する。このシングルバンチX線パルスをゲート電圧パルスに対して任意の時間だけ遅延させたタイミングでサンプルに照射することで、パルス電圧印加過程の各時刻におけるAlGaIn層の格子構造を観察することができる。図3(b), (c)に、本実験で測定されたゲートパルス電圧印加中のAlGaIn c面格子間隔の時間変化の結果を示す。図3の(b)と(c)は、印加ゲート電圧 (振幅 -7 V) のパルス幅とエッジ時間をそれぞれ系統的に変化させて測定を行った。これらのデータのいずれにおいても、c面格子間隔はゲートパルス印加の開始とともに増加し始め (最大値約

5.1385 Å)、電圧印加の終了後に初期値 (約 5.137 Å) まで減少することが観察された。この結果より、印加されたゲート電圧によって引き起こされる逆圧電効果によるc面格子間隔変化の動的挙動を、ナノ秒の時間スケールで捉えることにはじめて成功した。興味深いことに、これらの格子間隔の時間変化は、印加電圧波形に対して若干の遅れ (タイムラグ) を示している。このタイムラグは、パルス幅とエッジ時間に応じて数十から数百ナノ秒のオーダーであるが、パルス電圧立上がり時の過渡電流による電圧降下に起因していると推測される。ナノ秒スケールの時間分解測定により、デバイスに流れる過渡電流がゲート電圧印加時の格子変形応答に影響する可能性が示された点で興味深い。

おわりに

本稿では、ポンプ-プローブ法と組み合わせた放射光X線回折により、AlGaIn/GaN HEMTデバイスにおいてゲート電圧印加時に逆圧電応答が誘起する格子変形のダイナミクスを詳細に解析した研究を紹介した。一見静止しているように思われる窒化物半導体デバイスが、実際には動作条件下で顕著な動的格子変形を経験することを明らかにした点で、意義深い結果であると考えている。これは従来のIV族半導体 (Si, Ge) や化合物半導体 (GaAs 等) では見られない窒化物半導体に固有の特徴であり、窒化物デバイスの設計において動作時の圧電歪みの効果を考慮することがさらなる高機能化・高信頼性化にとって重要であることを示唆する。高い空間分解能と時間分解能を有する放射光 nanoXRD ベースのオペランド歪み解析を系統的に進めることで、窒化物

半導体のデバイス構造や格子欠陥に関連した動的圧電歪み挙動に関する詳細な知見が得られると期待される。

本稿で紹介した成果は、大阪大学の酒井朗先生、大学院生の植田瑛さん、塩見春奈さん、北海道大学の橋詰保先生、JASRIの木村滋先生、今井康彦先生、隅谷和嗣先生をはじめとする皆さまとの共同研究によるものです。ここに深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) O. Ambacher et al., J. Appl. Phys. 87, 334 (2000).
- 2) T. Sato et al., Jpn. J. Appl. Phys. 57, 0902B8 (2018).
- 3) H. Shiomi, A. Ueda, T. Tohei, Y. Imai, T. Hamachi, K. Sumitani, S. Kimura, Y. Ando, T. Hashizume and A. Sakai, Appl. Phys. Express 14, 095502 (2021).
- 4) T. Tohei, Y. Imai, A. Sakai, SPring-8/SACLA Research Frontiers 2021, p.40 (2022).
- 5) Y. Ando et al., Appl. Phys. Express 12, 024002 (2019).
- 6) S. Kamada et al., Appl. Phys. Express 9, 111001 (2016).
- 7) H. Osawa et al., Jpn. J. Appl. Phys. 56, 048001 (2017).

