

窒化インジウム系ヘテロ構造のマイクロ X 線回折による局所歪解析 Microarea Analysis of InN Based heterostructure by High Resolution Microbeam X-ray Diffraction

横川 俊哉^a, 吉田 俊治^a, 今井 康彦^b, 木村 滋^b
Toshiya Yokogawa^a, Shunji Yoshida^a, Yasuhiko Imai^b, Sigeru Kimura^b

^aパナソニック(株), ^b(公財)高輝度光科学研究センター
^aPanasonic Co. Ltd., ^bJASRI

III - V 族窒化物半導体として知られる窒化インジウムと窒化物ガリウムのヘテロ界面における格子不整合から生じる局所的な格子歪みの解明は、将来のデバイス特性向上に重要である。我々は近年注目されている非極性面において発生する面内異方性に起因した歪み緩和現象を理解するために、本申請課題では格子緩和が無い状態で局所的歪みを積極的に発生させ、面内異方性の歪みをマイクロビーム X 線回折を用いて観察した。

キーワード： マイクロビーム X 線、逆格子マップ、インジウムガリウムナイトライド

背景と研究目的：

III - V 族窒化物半導体の研究開発は近年急速に進展し、青色、緑色、白色 LED や青紫色レーザとして実用化が進んでいる。また III - V 族窒化物半導体の一つである窒化インジウム(InN)は、バンドギャップが 0.63 eV と小さく、直接遷移型のバンド構造であるため、窒化ガリウム(GaN)との組み合わせにより、紫外から赤外までカバーする光デバイスへの応用が期待される。特に太陽光のスペクトルを広くカバーできる点で次世代の超高効率太陽電池への応用が期待される。そこで、我々は InN と GaN から成る超格子構造の物性研究を行っている。

超格子構造は InN と GaN とのヘテロ接合で構成されるが、InN と GaN の格子定数は大きく異なるため、その InN/GaN 超格子構造は格子不整合により内部に大きな歪みエネルギーを持つ。そのため、それぞれの層厚、周期数などの変化によって InN の 3 次元成長や In の離脱の現象、またはそれに伴った欠陥の形成などが起こり、均一な InN/GaN 界面を形成することが難しい課題がある。つまり局所的かつ大きな格子歪が、InN/GaN 界面成長過程において面内揺らぎを発生させ、In 原子の偏析あるいは拡散によって局所的に高 In 組成インジウムガリウムナイトライド(InGaN)層形成を促進させることに影響していると考えられる。まずは高 In 組成の InGaN/GaN 超格子構造における局所的な格子歪を解析し、歪を制御することは、さらに大きな格子歪を形成する InN/GaN 超格子構造におけるデバイス特性の向上に大きく役立つと期待される。

これまで、我々は 2010B の課題(2010B1718)で、格子定数に面内異方性を有する非極性 m 面を用いて、非対称反射に加え対称反射の詳細な解析により、InGaN/GaN 界面にミスフィット転位が発生することに伴って、InGaN 層に格子の傾斜が生じること、また<11-20>方向と<-1-120>方向に異なった二種の傾斜が存在し、それぞれ十数ミクロン程度の大きさで分布することを見出した[1]。

本申請の目的は、格子定数が大きくなり、大きな歪みエネルギーを持つ窒化物ヘテロ接合の局所的な歪みを明らかにするため、格子緩和が発生していない高 In 組成の InGaN/GaN 超格子構造におけるミクロンオーダーサイズの歪みの面内分布を調査することとした。

実験：

試料には、非極性 m 面 GaN 基板上に MOCVD 法によって成長された高 In 組成(>30%)InGaN/GaN を各々 1.5 nm/7.5 nm で 50 周期の超格子構造を用いた。マイクロ X 線回折を用いてこの試料の逆格子マップ測定を行った。マイクロビームを用いた X 線回折測定は BL13XU 装置を利用し、X 線エネルギーは 8 keV で行った。また入射 X 線形状においては、実験ハッチ上流に設置されている X 線ビーム集光装置を用いて、ゾーンプレートとスリットを組み合わせることによりビーム径が縦 0.29 μm と横 0.34 μm 程度に集光された X 線ビームを試料に入射し測定を行った。受光部には

CCDカメラを用いて、カメラ長は約280 mmとした[2, 3]。測定実験としては試料ステージを500 nm ずつ2次元方向へ精密に移動し、それぞれの位置におけるX線回折(逆格子マッピング)の測定を行った。

結果および考察：

図1は、X線マイクロビームを入射する基板面内の任意位置における非極性m面対称反射(1-100)面の逆格子マップ結果を示す。横軸(Qx)は、InGaN層界面と平行方向の格子定数に関する数値、縦軸(Qy)はInGaN層界面と垂直方向の格子定数に関する数値を示す。横軸、縦軸とも数値が増大することは格子定数が減少することに相当する。逆格子マップにおいて、図中上部に見られるGaN基板のピークと図中下部に見られるInGaN層の0次ピークが横軸Qx方向には変化がほぼ無いように見られる。これは高In組成InGaN/GaN超格子構造の全膜厚が臨界膜厚を越えることなく格子整合して歪緩和が発生していないことを示す(また断面透過型電子線顕微鏡(TEM)観察結果から確認した転位による格子緩和が無いことと整合している)。

次に、X線マイクロビームを入射する位置を同様1.0 μm ずつ移動させ、図1の格子整合しているInGaN層0次ピーク位置(2θ-ω)で固定してピーク強度のスキャンをX線入射方向(c軸方向)および入射方向に対して垂直方向(a軸方向)へ2次スキャンを行った(図2)。図2のピーク強度分布の見方としては、まず始めにGaN基板のピーク位置はスキャン位置に依存して変化せず一様であることを確認しているため、InGaN層の0次回折強度ピーク位置の変化に対応しているとみなせる。つまり、InGaN層の0次ピーク位置が2次元で僅かに揺らいでいる。この現象は、断面TEM観察で本試料には格子緩和が無いことを確認していることから、InGaN層の歪みが揺らぐことにより、主軸方向から回折ピークが変化しているためだと考えられる。よって図2より、約十数マイクロメートルの周期で、高In組成InGaNの格子整合がC軸方向を主として局所的な歪みの面内分布として観察された。

ここで注目されるのは、前回の臨界膜厚を超えた非極性m面InGaN単膜では、格子緩和におけるInGaN層傾斜が局所的に分布していたのに対して、本研究で用いた非極性m面高In組成InGaN/GaN超格子構造では、格子緩和における傾斜は存在しておらず、サブマイクロメートルで局所的歪みの揺らぎが発生していることが判明したことである(20pulse=1.0μm)。この結果は、断面TEM観察結果から局所的な高In組成の大きな歪みが要因となってC軸方向へ揺らぎを形成している結果と対応している。



図1. 非極性m面InGaN/GaN超格子構造における逆格子マップ結果

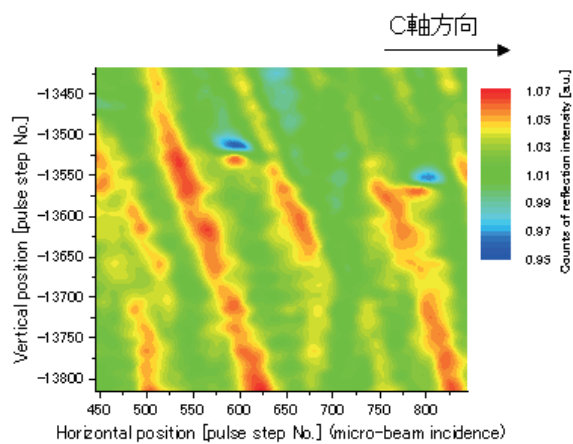


図 2. InGaN の局所的歪みの面内分布(図 1 の回折強度分布)

結論：

X 線マイクロビームを入射する基板面内の位置を変化させて逆格子マップの変化を調べることによって、非極性 m 面 GaN 基板上的高 In 組成(>30%)InGaN/GaN 超格子構造の局所的歪が引き起こす界面揺らぎの面内分布を明らかにした。

参考文献：

- [1] S. Yoshida, T. Yokogawa, Y. Imai, S. Kimura and O. Sakata, *Appl. Phys. Lett.* **99**, 131909 (2011).
- [2] Y. Imai, S. Kimura, O. Sakata and A. Sakai, in “CP1221, X-ray Optics and Microanalysis, Proceedings of the 20th International Congress”, M. Denecke and C. Walker ed., P.30.
- [3] S. Takeda, S. Kimura, O. Sakata and A. Sakai, *Jpn. J. Appl. Phys.* **45**, L1054 (2006).