

**硬 X 線光電子分光法を用いた
窒化物半導体／金属界面の電子状態評価 III
Evaluation for electronic states
at the interface between nitride semiconductor and metals
by using hard x-ray photoelectron spectroscopy III**

宮嶋孝夫^a、細井 慎^a、新井龍志^a、越谷直樹^a、工藤喜弘^a、池永英司^b

Takao Miyajima^a, Shizuka Hosoi^a, Ryuji Arai^a, Naoki Koshitani^a, Yoshihiro Kudo^a and Eiji Ikenaga^b

^a ソニー (株) 先端マテリアル研究所、^b 高輝度光科学研究センター

^a Advanced Materials Laboratories, Sony Corporation, ^b Japan Synchrotron Research Institute

n 型 GaN 基板の低欠陥密度領域（貫通転位密度が 10^6cm^{-2} 以下）に X 線マイクロビームを局所的に照射することで、低欠陥密度領域における n 型 GaN と Ti 金属が形成するショットキー障壁高さを見積ることに成功した。そのショットキー障壁高さは、貫通転位密度が 10^8cm^{-2} 程度であるサファイア基板上の n 型 GaN 上の Ti 金属の場合より大きくなった。これは、貫通転位密度の低減の効果と考えられる。

We succeeded in estimating a Schottky barrier height for Ti/n-type GaN substrate in a low defect-density ($<10^6 \text{cm}^{-2}$) region by selectively irradiating an x-ray micro-beam on the region. The obtained value is higher than that for Ti/n-GaN grown on a sapphire with a high defect density ($>10^8 \text{cm}^{-2}$). It is thought that this is caused by the reduction of the defect density in GaN.

背景と目的： 近年、GaN 系半導体を用いた青色半導体レーザーや青色及び緑色 LED が実用化されたが、さらなる高出力化、高輝度化、発光波長の短波長化、長波長化などを目指して、活発な研究開発が行われている [1, 2]。これらのデバイスの高機能化を行う場合、金属/GaN、 $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 等の界面制御が非常に重要になる。界面の電子状態を評価する有力手段として光電子分光法があるが、表面敏感な測定手法であるために、表面より 5nm 以上深いところにある界面を評価することは難しくなる。これに対して、SPring-8 での光電子分光法では、表面から 10nm 程度のバルク情報を得ることができることから、実際のデバイスに用いるような界面でも評価することが可能である。なぜならば、高エネルギー高輝度の X 線源を用いることで、光電子の運動エネルギーを高め、脱出深さを深くできるからである。すでに我々は、p 型及び n 型 GaN 上に様々な金属を蒸着した試料を測定することで様々な金属に関するショットキー障壁高さを求め、その有効性を確認してきた。

ただし、実際のデバイスにおけるオーミック電極/GaN 界面の評価を行うためには、数十ミクロン程度の空間分解能を有する局所領域の測定が必要となる。なぜならば、GaN 基板には貫通転位密度が 10^6cm^{-2} 以下の低欠陥密度領域と高欠陥密度領域が周期的に混在しているからである。この問題に対しても、SPring-8 の X 線が解決法を与えることができる。すなわち、高輝度の X 線から数十ミクロン角のマイクロビームを作り出すことが可能であり、これを試料に照射することで、局所領域の光電子分光測定が可能になる。ここでは、実際のデバイスに使われる GaN 基板上の金属のショットキー障壁高さを求めることを試みた。

本研究の目的は、ナノメータ領域の窒化物半導体／金属界面を詳しく解析することで、電極のコンタクト抵抗を決定する要因を考察し、GaN 系発光デバイスの更なる高効率化を促進しようというものである。

実験方法： 測定試料としては、n 型 GaN 基板を用意し、その上に Ti 金属を厚さ 10nm 蒸

着した。硬X線を用いた光電子分光測定は、SPring-8のビームラインであるBL47XUにおいて行った。図1に実験のレイアウトを示した。SPring-8の挿入光源からの準白色放射光X線をSi(111)単結晶でE=6keVのエネルギーに単色化。さらに、Si(333)単結晶によりエネルギー幅を250meVに狭めた後、鉛直及び水平集光ダブルミラーにより2次元集光したX線を試料に照射。試料位置でのX線ビームサイズは $34 \times 38 \mu\text{m}^2$ 。これにより、試料から放出される光電子のエネルギーを、Gammadata Scienta製のR-4000光電子分光器で測定した。測定は、すべて室温で行われた。

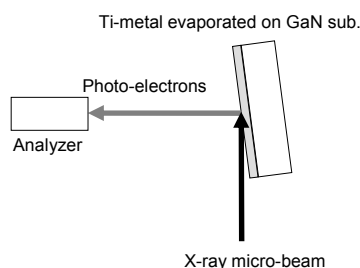


Fig.1 Schematic diagram of sample assembly

実験結果と考察： Ti/n型 GaN 基板のショットキー障壁高さ ϕ は、n型 GaN 上の Ti 金属の試料からの Ti 金属の Fermi 準位と Ga 3s の内殻準位からの光電子の運動エネルギー ($E_F(\text{Ti})$ と $E_{3s}(\text{Ga})$)、金属蒸着をしていない n 型 GaN 基板からの価電子帯端および Ga 3s の内殻準位からの光電子の運動エネルギー ($E_V(\text{GaN})$ と $E_{3s}'(\text{Ga})$) から、次のような式で求められる。

$$\phi = E_g - [E_F(\text{Ti}) - E_{3s}(\text{Ga}) - (E_V(\text{GaN}) - E_{3s}'(\text{Ga}))]$$

図2に示すように、n型 GaN 基板の低欠陥密度領域 (貫通転位密度 $<10^6 \text{ cm}^{-2}$) に X 線を照射することによって得られた Ti/n 型 GaN 基板のショットキー障壁高さを、前回の実験で得られたサファイア基板上 n 型 GaN (貫通転位密度 $>10^8 \text{ cm}^{-2}$) 上の各金属から得られたショットキー障壁高さとの関係のグラフ上にプロットした。今回得られた低欠陥密度領域の Ti/n 型 GaN 基板のショットキー障壁高さは前回の値に比べ 170meV 高くなっている。この値の変化は、貫通転位密度が低減することによって起きているもの

であり、貫通転位がフェルミ準位のピンングとなり、貫通転位の近傍が電子のリークパスになっている可能性を示している。

本実験の光電子は界面のみならずバルクからも検出されている。その影響でショットキー障壁高さが本来の値より小さくなり、一部の金属の値が負になっているが、定性的な議論は可能であると考えられる。

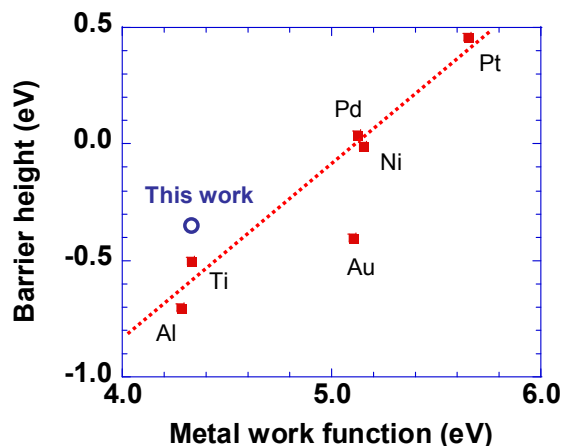


Fig.2 The obtained schottky barrier heights are shown as a function of the work function of the metal.

結論： X線マイクロビームを入射させることで、貫通転位密度を 10^6 cm^{-2} に低減した GaN 上の Ti ショットキー障壁高さを見積ることに成功した。得られた値は、貫通転位密度が 10^8 cm^{-2} 以上の場合である GaN 上の Ti の値に対して、170meV 大きな値であることが分かった。このことは、貫通転位がフェルミ準位のピンング源となり、その低減がショットキー障壁高さの上昇につながると考えられる。

今後の課題： 本課題によって、SPring-8 の硬X線光電子分光測定法が、実際のデバイスに使われている金属/GaN 界面の電子状態の解析に非常に有効であることが分かった。今後、GaN と金属接合界面を包括的に考察し、GaN系発光デバイス及び電子デバイスの特性向上に寄与する。

参考文献

- [1] M. Ohta, Y. Ohizumi, Y. Hoshina, T. Tanaka, Y. Yabuki, K. Funato, S. Tomiya, S. Goto and M. Ikeda, phys. stat. sol. (a) **204**, 2068 (2007).
- [2] Y. Narukawa, M. Sano, M. Ichikawa, S. Minato, T. Sakamoto, T. Yamada and T. Mukai, Jpn. J. Appl. Phys. **40**, L963 (2007).