

**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 I  
Evaluation for electronic states  
at the interface between nitride semiconductor and metals  
by using hard x-ray photoelectron spectroscopy I**

宮嶋孝夫<sup>a</sup>、工藤喜弘<sup>a</sup>、新井龍志<sup>a</sup>、池永英司<sup>b</sup>  
Takao Miyajima<sup>a</sup>, Yoshihiro Kudo<sup>a</sup>, Ryuji Arai<sup>a</sup>, and Eiji Ikenaga<sup>b</sup>

<sup>a</sup> ソニー（株）マテリアル研究所、<sup>b</sup> 高輝度光科学研究センター

<sup>a</sup> Material Laboratories, Sony Corporation, <sup>b</sup> Japan Synchrotron radiation Research Institute

p 型 GaN:Mg 上に蒸着した金属 Al, Ti, Au, Ni, Pd, Pt によって形成されるショットキー障壁高さを、SPring-8 の硬 X 線を用いた光電子分光法で求めた。その結果、得られた障壁高さは、金属の仕事関数の大きさに対する減少関数となり、界面準位によるピンニングは強く起きていないことが分かった。

Schottky barrier heights for Al, Ti, Au, Ni, Pd and Pt metals evaporated on Mg-doped GaN were determined by using hard x-ray photoelectron spectroscopy in SPring-8. The obtained values decrease with the increasing of the work function of the metals. This means that Fermi level is not pinned at the interface between Mg-doped GaN and metals.

**背景と目的：** 近年、GaN 系半導体を用いた青色半導体レーザや青色及び緑色 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、Ga<sub>x</sub>In<sub>1-x</sub>N/GaN、Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/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、信頼性のある実験結果を得るためには、大気開放せずに界面を形成する結晶成長と評価を連続して行う必要がある。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。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。ここでは、この実験系を用いることで、p 型 GaN 上に蒸着した様々な金属に関するショットキー障壁高さを求め、オーミック電極形成のメカニズムを考察した。

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。GaN 系光デバイスは、可視域波長領域を広くカバーするとともに、白熱電球や蛍光灯を凌駕する有力な固体照明デバイスとして、その有用性が認められ、国際的な開発競争が進められており、ナノテクノロジー分野における研究として大変重要である。

**実験方法：** 測定試料としては、有機金属気相成長（MOCVD）法で成長した c 面サファイア基板上の Mg-doped GaN を用意した。窒素雰囲気において、800°C、10 分間のキャリア活性化のアニール処理後、Al, Ti, Au, Ni, Pd, Pt の金属を厚さ 10nm 蒸着。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=8keV 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

100meV 以下に狭めた後、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 $40 \times 40 \mu\text{m}^2$ 。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。

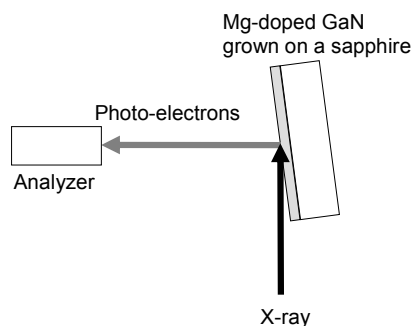


Fig.1 Schematic diagram of sample assembly.

**実験結果と考察：** p型 GaN 上の金属のショットキー障壁高さは、金属の Fermi 準位と GaN の価電子帯端のエネルギー差により決定される。しかしながら、金属蒸着をした Mg-doped GaN 試料からは、金属の Fermi 準位からの光電子が検出され、その運動エネルギー  $E_F(\text{metal})$  を求めることができるが、表面の金属からの信号が重畳することから、GaN の価電子帯端からの光電子の信号を明瞭に分離することができない。一方、Ga 3s の内殻準位からの光電子は金属の影響を受けることなく測定することが可能であり、その運動エネルギー ( $E_{3s}(\text{Ga})$ ) は求められる。そこで、金属蒸着をしていない Mg-doped GaN より、価電子帯端および Ga 3s の内殻準位からの光電子を測定し、その運動エネルギー差  $E_V(\text{GaN}) - E_{3s'}(\text{Ga})$  を求め、下記の式より、ショットキー障壁高さ  $\phi$  を見積った。

$\phi = E_F(\text{metal}) - \{E_{3s}(\text{Ga}) + [E_V(\text{GaN}) - E_{3s'}(\text{Ga})]\}$ .  
 図2に各金属から得られたショットキー障壁高さと仕事関数との関係をプロットした。Auを除くと、ショットキー障壁高さは金属の仕事関数に対する減少関数となっていることから、金属/半導体の界面準位によるフェルミ準位のピンングが強く起きていないと考えられる。したがって、本実験結果は、p型 GaN に

対するオーミック接合のコンタクト比抵抗を下げるためには仕事関数のできるだけ大きな Pt, Ni, Pd を使うべきという考え方を強く支持するものとなる。

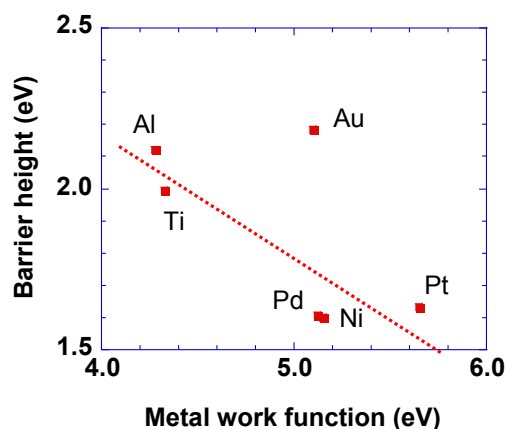


Fig.2 The obtained schottky barrier heights are shown as a function of the work function of the metal.

**結論：** 表面の影響を受けにくい硬X線光電子分光法を用いて、p型 GaN 上に厚さ 10nm の Al, Ti, Au, Ni, Pd, Pt 金属を蒸着した場合のショットキー障壁を求めたところ、金属の仕事関数に対して減少関数となることが分かった。このことは、界面準位によるフェルミ準位のピンングが強く起きていないことを示している。

**今後の課題：** Au については、上述のこの傾向から外れており、その原因については今後調査を行う必要がある。また、本課題によって、SPring-8 の硬X線光電子分光測定法が、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ので、n型 GaN に対しても同様な測定を計画したい。これにより、GaN と金属接合界面の電子状態を包括的に考察し、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).