

機関番号：82108  
 研究種目：若手研究(B)  
 研究期間：2009～2010  
 課題番号：21760268  
 研究課題名(和文) ダイヤモンド・窒化アルミニウムを用いた紫外線ハイブリッド環境デバイスの実現  
 研究課題名(英文) Realization of ultra violet environment devices by using diamond and AlN hybrid structure  
 研究代表者  
 井村 将隆 (IMURA MASATAKA)  
 独立行政法人物質・材料研究機構・国際ナノエレクトロニクス研究拠点・ICYS-MANA 研究員  
 研究者番号：80465971

研究成果の概要(和文)：有機金属気相成長(MOVPE)法を用いてダイヤモンド基板上に窒化アルミニウム(AlN)をヘテロ成長させる技術を確立し、AlN/ダイヤモンドヘテロ構造を用いて、光デバイスでなく電子デバイスである電界効果トランジスタ(FET)を試作した。その結果、デバイスが p チャネル FET 特性を示し、ノーマリーオンモードで動作することを実証した。また次世代パワーデバイス実現のための新たな手法として、AlN/ダイヤモンドヘテロ構造型 FET を世界に先駆けて提案した。

研究成果の概要(英文)：AlN epitaxial layers were successfully grown on diamond substrates as heteroepitaxial growth by MOVPE. The electronic devices, such as FETs, were fabricated by using AlN/diamond heterostructure. As a result, the device behaved as a p-channel FET with normally-on depletion mode. The AlN/diamond heterostructure FETs were highly promising for the next generation power electronics.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,300,000	390,000	1,690,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電子デバイス・電子機器

キーワード：ダイヤモンド、窒化物半導体、電子デバイス、ヘテロ構造

#### 1. 研究開始当初の背景

近年、次世代新機能パワーデバイス(例えば過酷な環境下で動作可能な光・電子パワーデバイス)の開発が急務である。しかしながら新規材料の開拓やその材料の結晶成長技術の改善、デバイス構造の改良等、多くの解決すべき課題があり、実用化への障壁が高くなっているのが現状である。

#### 2. 研究の目的

このような背景を鑑みて申請者は、究極の

ワイドバンドギャップ半導体であるダイヤモンド半導体と窒化アルミニウム(AlN)半導体に着目し、両半導体のヘテロ構造を積極的に利用することで、新機能パワーデバイスの実現を試みた。

また申請者は、紫外発光・受光デバイスの実現を提案し本案件を獲得したが、研究遂行途中で電子デバイスの実現に目的を変更し実験を行った。

### 3. 研究の方法

既に窒化物半導体の結晶成長装置として実績のある有機金属気相成長(MOVPE)法を用いダイヤモンド基板の上にAINをヘテロ成長させた。様々な面方位を有するダイヤモンド基板の上にAINを成長させ、成長後のAINをX線回折法(XRD)と断面透過型電子顕微鏡法(TEM)およびその透過電子回折(ED)パターンにより評価した。

その後、AIN/ダイヤモンドヘテロ界面のバンド構造等の評価により、キャリアである正孔が蓄積していることを見出したため、電子デバイスである電界効果トランジスタ(FET)の試作・評価を行った。

以下に主なプロセス・評価手順を示す。

#### 1. メサ加工

- ① 基板洗浄…有機溶剤洗浄(アセトン、イソプロピルアルコール)。
- ② フォトリソグラフィ…レジスト塗布、ベーキング、メサパターン露光、現像、純水洗浄。
- ③ ICP…レジストをマスクとし  $\text{Cl}_2$  ガスを用いたメサ加工エッチング。
- ④ 計測…触針式表面段差測定装置による段差測定。

#### 2. ソース・ドレイン電極作製

- ① フォトリソグラフィ…レジスト塗布、ベーキング、ソース・ドレインパターン露光、現像、純水洗浄。
- ② ソース・ドレイン電極蒸着…超高真空スパッタ装置による Ti/Al/Ti/Au 系電極堆積。
- ③ リフトオフ…有機溶剤によるレジスト上金属剥離、純水洗浄。
- ④ 電極アニール…急速赤外線アニール炉による  $\text{N}_2$  雰囲気高温熱処理。

#### 3. ゲート電極作製

- ① フォトリソグラフィ…レジスト塗布、ベーキング、ゲートパターン露光、現像、純水洗浄。
- ② ゲート電極蒸着…E-gun 蒸着装置による Ti/Ni/Au 系電極堆積。
- ③ リフトオフ…有機溶剤によるレジスト上金属剥離、純水洗浄。

#### 4. 電気的特性

- ① I-V測定( $I_d$ - $V_d$ 特性および $I_d$ - $V_g$ 特性)
- ② C-V測定( $C_{sg}$ - $V_g$ 特性)

### 4. 研究成果

図1にXRDプロファイルとTEMから得られたEDパターンを示す。AINはc軸配向しており、面内でダブルドメイン構造を有している事が明らかとなった。

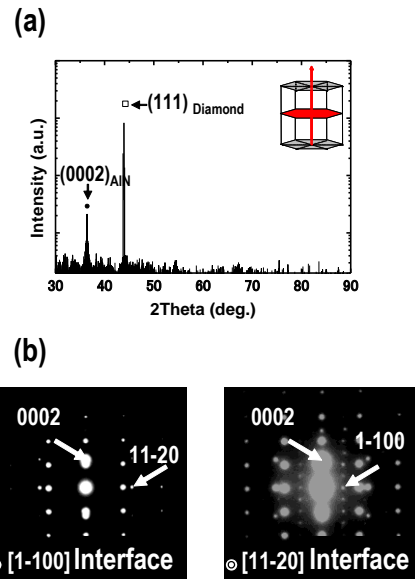


Fig. 1. (a)XRD プロファイルおよび(b)TEM から得られた ED パターン

次に、デバイスプロセス後の(a)表面光学顕微鏡像および(b)デバイス断面概略図を示す。AINメサ構造、ソース・ドレイン電極およびゲート電極が問題なく作製出来ていることがわかる。

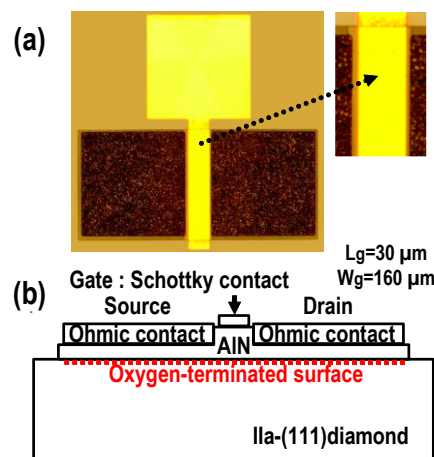


Fig. 2. デバイスプロセス後の(a)表面光学顕微鏡像および(b)デバイスの断面概略図。ここではゲート長およびゲート幅は、30 μm, 160 μmである。

続いて図3に  $I_d$ - $V_d$  特性の結果を示す。この図より、トランジスタ動作していることを確認することができる。また本研究により、世界で初めて AlN/ダイヤモンドヘテロ構造を用いた p 型 FET デバイスを実現させることに成功した。

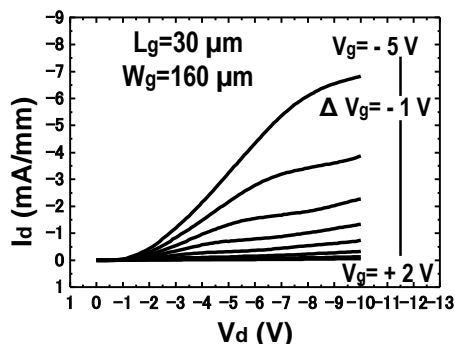


Fig. 3.  $I_d$ - $V_d$  特性。ここでは電流値はゲート幅にて規格化している。

その後の更なる詳細な評価により、同デバイスが高いポテンシャルを有することが明らかとなり、新機能パワーデバイスとして有望であることを実証した。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① M. Imura, R. Hayakawa, E. Watanabe, M. Y. Liao, Y. Koide, and H. Amano "Demonstration of Diamond Field Effect Transistors by AlN/Diamond Heterostructure" *Physica Status Solidi (RRL)*, 3 (2011) 125-127. 査読有
- ② M. Imura, T. Ohnishi, M. Sumiya, M. Y. Liao, Y. Koide, H. Amano, and M. Lippmaa "Analysis of polar direction of AlN grown on (0001) sapphire and 6H-SiC substrates by high-temperature metal-organic vapor phase epitaxy using coaxial impact collision ion scattering spectroscopy": *Physica Status Solidi (c)*, 7 (2010) 2365-2367. 査読有
- ③ M. Imura, K. Nakajima, M. Y. Liao, Y. Koide, and H. Amano "Growth mechanism of c-axis-oriented AlN on (111) diamond substrates by metal-organic vapor phase epitaxy": *Journal of Crystal Growth*, 312 (2010) 1325-1328. 査読有
- ④ M. Imura, K. Nakajima, M. Y. Liao, Y. Koide, and H. Amano "Microstructure of AlN with two-domain structure on (001) diamond substrate grown by metal-organic

vapor phase epitaxy": *Diamond & Related Materials*, 10 (2010) 131-133. 査読有

- ⑤ M. Imura, K. Nakajima, M. Y. Liao, Y. Koide, and H. Amano "Growth mechanism of c-axis oriented AlN on (001) diamond substrates by metal-organic vapor phase epitaxy": *Journal of Crystal Growth*, 312 (2010) 368-372. 査読有

[学会発表] (計 9 件)

- ① M. Imura, R. Hayakawa, H. Oosato, E. Watanabe, D. Tsuya, M. Y. Liao, Y. Koide and H. Amano 1. "Diamond Field Effect Transistors by AlN/Diamond Heterostructure", International Conference on New Diamond and Nano Carbons 2011 (NDNC2011), 2011/05/19, Kunibiki Nesse, Matsue, Japan.
- ② M. Imura, R. Hayakawa, H. Oosato, E. Watanabe, D. Tsuya, M. Y. Liao, Y. Koide and H. Amano 1. "Demonstration of AlN/Diamond Heterostructure Field Effect Transistors" MANA International Symposium 2011 (MANA Sympo. 2011), 2011/03/03, Epochal Tsukuba, Tsukuba, Japan.
- ③ M. Imura, K. Nakajima, M. Y. Liao, Y. Koide, and H. Amano, "Growth of AlN on (001), (110), and (111) diamond substrates", The 4th International Conference on New Diamond and Nano Carbons (NDNC2010), 2010/05/17, the Garden hotel, Suzhou, China.
- ④ 井村将隆、中島清美、廖梅勇、小出康夫、天野浩, "様々な面のダイヤモンド基板上への窒化アルミニウム結晶成長", 第 57 回応用物理学関係連合講演会, 2010/03/18, 東海大学.
- ⑤ M. Imura, K. Nakajima, M. Y. Liao, Y. Koide, and H. Amano, "Microstructure of AlN layer on (001) and (111) diamond substrates by metal organic vapor phase epitaxy", MANA International Symposium 2010 (MANA Sympo. 2010), 2010/03/04, Epochal Tsukuba, Tsukuba, Japan.
- ⑥ M. Imura, T. Ohnishi, M. Sumiya, M. Y. Liao, Y. Koide, H. Amano, and M. Lippmaa, "Analysis of polar direction of AlN grown by metal-organic vapor phase epitaxy using coaxial impact collision ion scattering spectroscopy", The 36th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2009), 2009/09/01, University of California, Santa Barbara, USA.
- ⑦ M. Imura, K. Nakajima, M. Y. Liao, Y. Koide, and H. Amano, "Microstructure analysis for growth process of AlN layer on

(001) and (111) diamond substrates by a metal-organic vapor phase epitaxy", The 17th American Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ACCGE17), 2009/08/12, Lake Geneva, Wisconsin, USA.

⑧ 井村将隆、中島清美、廖梅勇、小出康夫、天野浩, "MOVPE 法による(001)面ダイヤモンド基板上の窒化アルミニウムの成長", 第 28 回電子材料シンポジウム, 2009/07/10, ラフォーレ琵琶湖.

⑨ M. Imura, K. Nakajima, M. Y. Liao, Y. Koide, and H. Amano, "Growth of AlN on (001) diamond substrate by metal-organic vapor phase epitaxy", The 3rd International Conference on New Diamond and Nano Carbons (NDNC2009), 2009/06/09, Traverse City, Michigan, USA.

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 電界効果トランジスタ及びその製造方法

発明者: 井村将隆、小出康夫、リャオメイヨン、早川竜馬、天野浩

権利者: 井村将隆

種類: 特願

番号: 特願 2010-231352

出願年月日: 2010 年 10 月 14 日

国内外の別: 国内

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

井村 将隆 (IMURA MASATAKA )

独立行政法人物質・材料研究機構・国際ナノアーキテクトニクス研究拠点・ICYS-MANA 研究員

研究者番号: 80465971

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし