

山崎 聡

(独)産業技術総合研究所エネルギー技術研究部門・総括研究主幹

超低損失パワーデバイス実現のための基盤構築

## § 1. 研究実施体制

### (1)「山崎」グループ

① 研究代表者:山崎 聡((独)産業技術総合研究所、総括研究主幹)

#### ② 研究項目

##### 1) ダイヤモンド半導体基盤研究

1)－1. ダイヤモンド製膜技術開発と物性研究

1)－2. 界面制御・解析技術開発

##### 2) 新構造パワーデバイスの作製・解析とデバイス物理の構築

2)－1. デバイス作製技術開発

2)－2. 新しい物性を取り込んだデバイス物理の構築

2)－3. 新構造パワーデバイスの提案

### (2)「小泉」グループ

① 主たる共同研究者:小泉 聡((独)物質・材料研究機構、主幹研究員)

#### ② 研究項目

##### 1) ダイヤモンド半導体基盤研究

1)－1. ダイヤモンド製膜技術開発と物性研究

### (3)「波多野」グループ

① 主たる共同研究者:波多野 睦子(東京工業大学、教授)

#### ② 研究項目

##### 2) 新構造パワーデバイスの作製・解析とデバイス物理の構築

2)－1. デバイス作製技術開発

(4)「斎藤」グループ

① 主たる共同研究者: 斎藤 丈靖 (大阪府立大学、准教授)

② 研究項目

1) ダイヤモンド半導体基盤研究

1) - 2. 界面制御・解析技術開発

## § 2. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(3-1)に対応する)

本課題3年目にあたる平成24年度から、産総研に加え、東工大、物材機構、阪府大を加えた陣容で研究にあたった。中心はつくばであり、議論の後、試料作成、デバイス作製はつくば(産総研・物材機構)で行い、一部測定を東工大・阪府大で行った。また、産総研外来研究員として、東芝、大阪大学、金沢大学の協力を得ている。

### 研究トピックス:接合型FETの作製に成功

ダイヤモンドには、半導体材料として最も高い絶縁耐圧と最も高い熱伝導率という非常に優れた特長がある。一方、一般的には電気抵抗が非常に大きな、絶縁体に近い半導体であり、そのため大電流を流すことができない。このことがダイヤモンドをパワーデバイスとして利用する上で大きな課題となっている。これまでに、品質の劣化を極力押さえつつ高濃度の不純物を添加した低抵抗ダイヤモンド薄膜の作製に成功し、この低抵抗ダイヤモンド薄膜を用い、さらにダイヤモンド固有の性質を活かすことで、従来のパワーデバイスとは原理的に異なる超低損失パワーデバイスを提案している。また、常温常圧での炭素系固体の最安定相はグラファイトであり、ダイヤモンドではない。そのため、ダイヤモンドの場合には、イオン注入後の熱処理によりグラファイト化し、ダイヤモンドに戻らない。

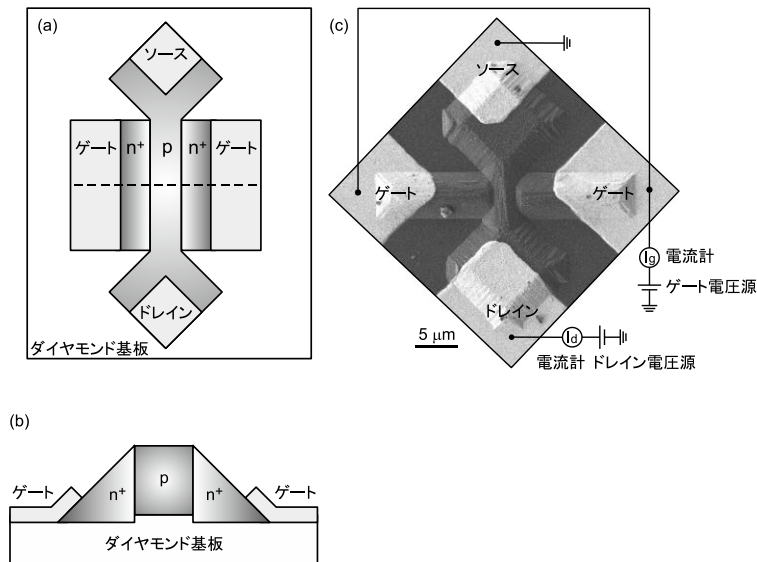


図1 ダイヤモンド半導体による接合型電界効果トランジスター  
(a) 上から見た模式図。ソースからドレインに向かって流れる伝導キャリアをゲートの電圧で制御する。(b) 点線部分の断面模式図。  
(c) 選択成長技術で作製した接合型電界効果トランジスタの電子顕微鏡像と測定に用いた回路図。

そこでダイヤモンド半導体デバイス作製プロセスにおいては工夫が必要となる。ダイヤモンドに特徴的な選択成長技術はこのプロセスの困難さを克服するための大きな手段となる。当チームでは、この低抵抗高濃度ドーピング技術と選択成長技術を組み合わせることにより、世界に先駆けダイヤモンド接合型 FET (Field Effect Transistor、接合型電界効果トランジスタ) の作製に成功した。図1に、構造、また、図2にトランジスタ動作の様子を示した。このデバイスは 高温環境下や高ドレイン電圧下においても非常に低いリーク電流を示すなど、ワイドバンドギャップ半導体であるダイヤモンド特有の特性を示し、室温において整流比  $10^8$ 、 $10^{-15}$  A オーダーの低いリーク電流、サブスレッショルドスウィングが 105 mV/decade の急峻な立ち上がり特性、高ドレイン電圧  $V_d = -100$  V においても  $10^{-15}$  A オーダーの低いリーク電流と急峻なサブ立ち上がり特性、高温下 773K においても安定した FET 動作を確認した。

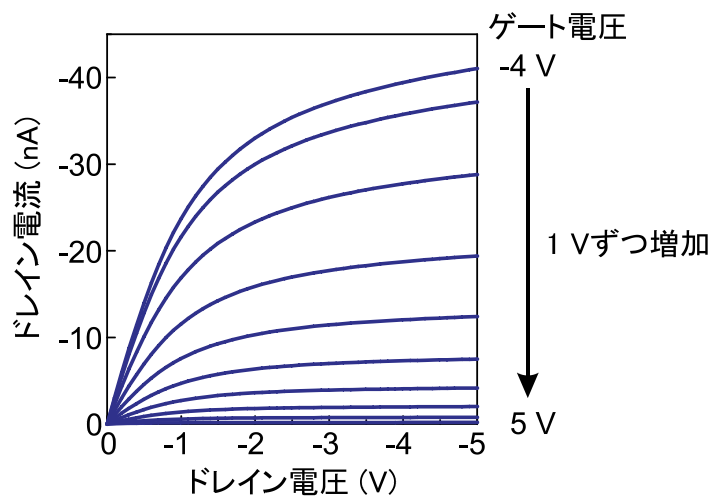


図2 ドレイン電圧ゲート電圧を変化させたときのドレイン電流。

ゲート電圧の増加とともにドレイン電流が減少していくので、空乏層の幅がゲート電圧によって制御でき、トランジスターとして動作していることが分かる。

### §3. 成果発表等

#### (3-1) 原著論文発表

##### ● 論文詳細情報

- 1) Hiromitsu Kato, Kazuhiro Oyama, Toshiharu Makino, Masahiko Ogura, Daisuke Takeuchi, Satoshi Yamasaki, “Diamond bipolar junction transistor device with phosphorus-doped diamond base layer”, DIAMOND AND RELATED MATERIALS, Vol.27-28, P.19-22, 2012 (DOI: 10.1016/j.diamond.2012.05.004).
- 2) Yuto Hoshino, Hiromitsu Kato, Toshiharu Makino, Masahiko Ogura, Takayuki Iwasaki, Mutsuko Hatano, Satoshi Yamasaki, “Electrical properties of lateral p-n junction diode fabricated by selective growth of n+ diamond”, PHYSICA STATUS SOLIDI A-APPLICATIONS AND MATERIALS SCIENCE, Vol.209, P.1761-1764, 2012 (DOI: 10.1002/pssa.201200053).
- 3) Toshiharu Makino, Shokichi Kanno, Hiromitsu Kato, Hideyo Okushi, Satoshi Yamasaki, “Nonlinear behavior of current-dependent emission for diamond light-emitting diodes”, PHYSICA STATUS SOLIDI A-APPLICATIONS AND MATERIALS SCIENCE, Vol.209, No.9, P.1754-1760, 2012 (10.1002/pssa.201200047).
- 4) Toshiharu Makino, Hiromitsu Kato, Daisuke Takeuchi, Masahiko Ogura, Hideyo Okushi, Satoshi Yamasaki, “Device Design of Diamond Schottky-pn Diode for Low-Loss Power Electronics”, JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, Vol.51, No.9, P.090116-1-7, 2012 (DOI:10.1143/JJAP.51.090116).
- 5) Hiromitsu Kato, Toshiharu Makino, Masahiko Ogura, Daisuke Takeuchi, Satoshi Yamasaki, “Maskless Selective Growth Method for p-n Junction Applications on (001)-Oriented Diamond”, JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, Vol.51, No.9, P.090118-1-7, 2012 (DOI: 10.1143/JJAP.51.090118)
- 6) Takayuki Iwasaki, Yuto Hoshino, Kohei Tsuzuki, Hiromitsu Kato, Toshiharu Makino, Masahiko Ogura, Daisuke Takeuchi, Tsubasa Matsumoto, Hideyo Okushi, Satoshi Yamasaki, Mutsuko Hatano, “Diamond Junction Field Effect Transistors with Selectively Grown n+ Side Gates”, APPLIED PHYSICS EXPRESS, Vol.5, P.091301-1-3, 2012 (DOI:10.1143/APEX.5.091301).

- 7) Norio Tokuda, Toshiharu Makino, Takao Inokuma, Satoshi Yamasaki, “Formation of Step-Free Surfaces on Diamond (111) Mesas by Homoepitaxial Lateral Growth”, JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, Vol.51, P.090107-1-5, (2012) (DOI: 10.1143/JJAP.51.090107).
  
- 8) Kazuro Murayama, Ryo Mizokawa, Manami Mori, Hiromitsu Kato, Hideyo Okushi, Satoshi Yamasaki, “Light penetration depth dependence of photocarrier life time and the Hall effect in phosphorous-doped and boron-doped homoepitaxial CVD diamond films”, DIAMOND AND RELATED MATERIALS, Vol.33, P.49-53, (2013).

**(3-2) 知財出願**

- ① 平成 24 年度特許出願件数(国内 1 件)
  
- ② CREST 研究期間累積件数(国内 3 件)