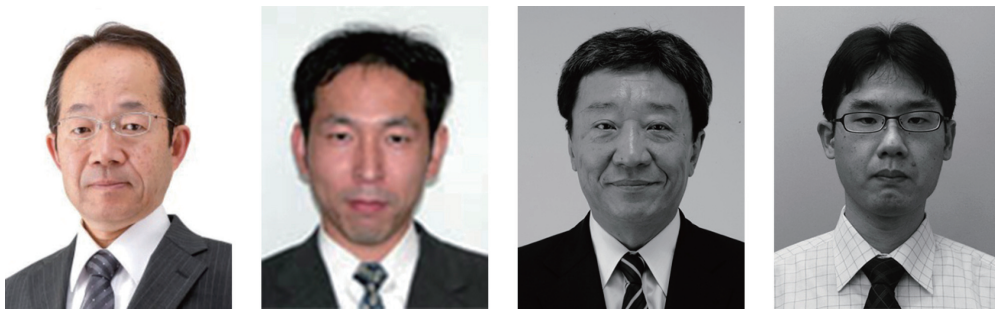


## DNA をチャネルとする Si 半導体 MOSFET ～ DNA のメモリ機能を発見～

兵庫県立大学 松尾 直人, 部家 彰, 山名 一成, 高田 忠雄  
 広島大学 佐藤 旦, 福山 正隆, 横山 新



(左から) 兵庫県立大学 松尾 直人, 部家 彰, 山名 一成, 高田 忠雄



(左から) 広島大学 佐藤 旦, 福山 正隆, 横山 新

### 1. はじめに

CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) 回路の作製は、従来トップダウン手法で行われてきた。しかし、デバイスの微細化が進むに従い、その作製が困難になってきている。近年では、ULSI (Ultra-Large Scale IC) の集積度が 1.5 ～ 2 年で約 2 倍というムーアの法則 (Moore's Law) がもはや成立しない段階に到達している。CMOS のゲート長が 22nm 世代においては、Si に代わる材料の出現が期待されている [1]。DNA (Deoxyribonucleic Acid) は、導電性を持ち、かつ自己組織化によってナノ構造体を形成する特徴があることから [2]、カーボンナノチューブ [3] やグラフェン [4] と同様に Beyond CMOS の材料として期待されている。DNA をチャネルとする MOSFET (Field Effect Transistor) においても、無機半導体と同様にゲート電圧を変化させることでトランジスタ特性を示すことが知られている [5][6]。本研究では、

DNA メモリー FET を作製し、DNA/SiO<sub>2</sub>/Si 構造におけるキャリア挙動について調査した。図 1 に作製した DNA メモリー FET の概略構造を示す。

### 2. 作製方法

DNA メモリー FET の作製工程を図 2 に示す。図 2(a)「DNA メモリー FET の作製工程 (Si 細線の作製)」についてはナノテクノロジープラットフォーム事業を利用して広島大学で実施した。図 2 (b)「DNA メモリー FET の作製工程 (DNA の作製と基板への固定)」については兵庫県立大学において実施した。

#### 2.1 SOI (Silicon on Insulator) 基板の Si 層薄膜化

熱酸化と希フッ酸 (2.5%HF) 処理を繰り返し、初期 Si 層 350nm を 60nm まで薄層化した。熱酸化は、

H<sub>2</sub>:O<sub>2</sub>=3:3slm, 1000°C, 160分の条件で行い, 1回の処理で730nmの酸化膜を形成した. 次に, この熱酸化SiO<sub>2</sub>膜を2.5%HFで処理し, SiO<sub>2</sub>膜が完全に除去され基板表面が撥水性を示すまでエッチングする. これを繰り返した.

## 2.2 Si アイランド形成

長さ100 μm, 幅120nmの細線を形成させた試料に対し, マスクレス露光装置(DL-1000 ナノシステムソリューションズ)によりリソグラフィーを行い(露光量:

150mJ/cm<sup>2</sup>), エッチング装置(CDE SiN用)を用いてSiアイランドの形成を行った(選択ガス種:CF<sub>4</sub>, O<sub>2</sub>). ここで, 先に形成した細線がチャンネル長となるSiアイランドが完成する. Siアイランドは100 μm × 20 μmの大きめのパターンであるため, リソグラフィーやエッチングに厳しい条件が発生しない. そのため, 細かい条件出しは細線形成に絞り, 後にSiアイランドを形成するプロセスを選択した. 図3に形成したSiアイランドの光学顕微鏡写真を示す. 素子分離も確認され, 100 μm × 20 μmのSiの中心に細線が存在するSiアイランドの形成に成功した.

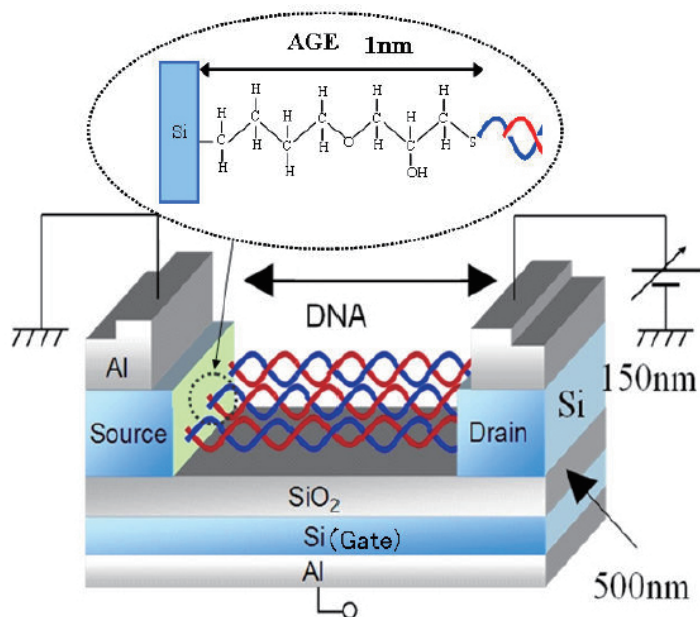


図1 DNAメモリFETの概略構造

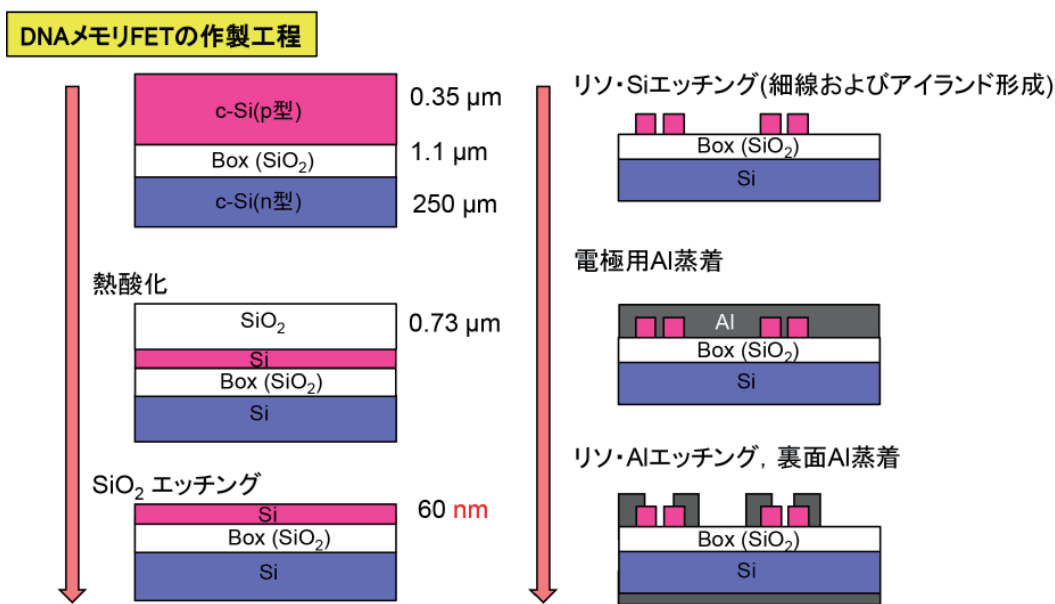
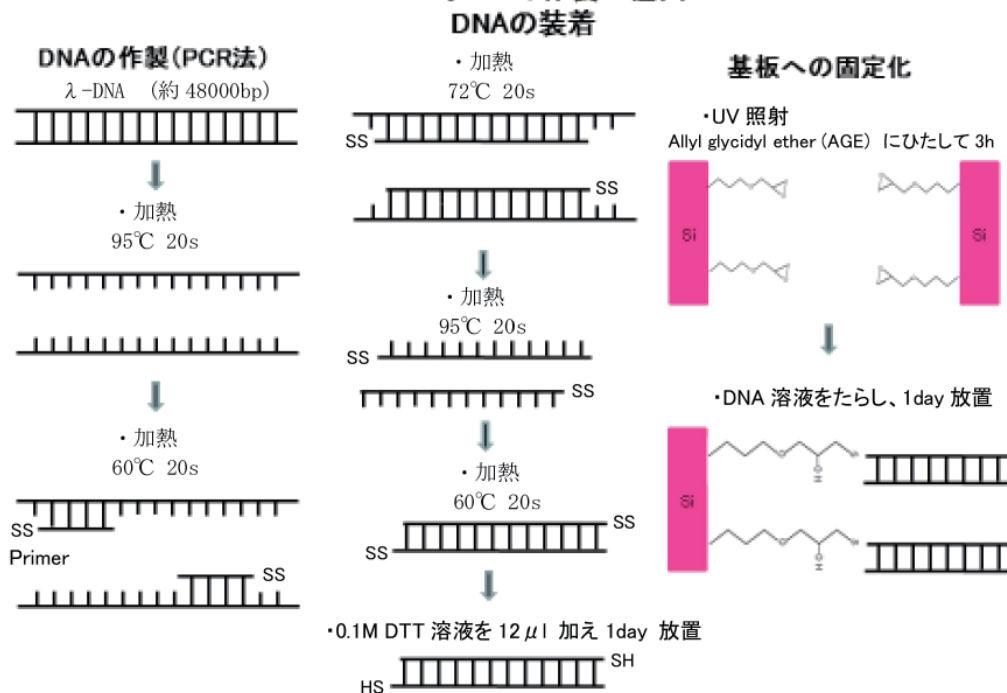


図2 (a) DNAメモリFETの作製工程 (Si細線の作製)

## DNAメモリFETの作製工程(2)



λ DNA: 約 50kb の直鎖状、ファージ粒子に含まれている DNA を精製したもの  
 DTT (dithiothreitol) 溶液: 低分子酸化還元剤  
 ss: 1本鎖 (single strand)  
 Primer: DNA 合成の出発点として用いられる核酸の要素  
 HS: 正確性と増幅効率を併せ持つ DNA の酵素

図 2 (b) DNA メモリ FET の作製工程 (DNA の作製と基板への固定)

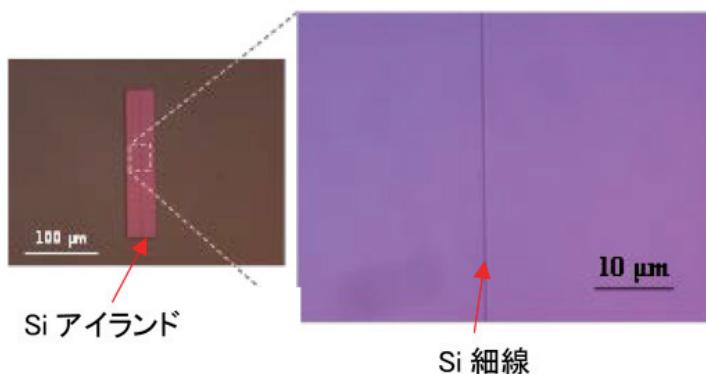


図 3 SOI 上に形成した Si アイランドの光学顕微鏡写真 (平面図)

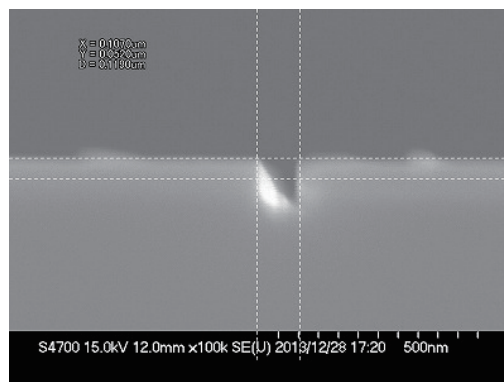


図 4 Si 細線の断面 SEM 像

### 2.3 DNA メモリ FET に必要なチャネル領域形成法

DNA は 400 ベースペア (bp) (136nm) の長鎖 SH-DNA-SH を使用する。その接続にはナノメートルオーダーの間隔を持つ領域が必要となる。そこで、SOI (Silicon on Insulator) 基板を使用し、幅 120nm を狙ったリソグラフィおよびエッチングを試みた。その Si 細線は、電子ビーム露光装置 (日立 HL700) とエッチング装置 (RIE コンタクト用) を用い幅 120nm、長さ 100  $\mu$  m の細線

を作製した。電子ビーム露光装置のドーズ量条件は 160  $\mu$  C/cm<sup>2</sup> であり、エッチングには CF<sub>4</sub> ガスを選択した。図 4 に Si 細線の断面 SEM 画像を示す。Si の貫通が確認された。異方性が取れており、DNA メモリ FET 駆動に最も重要である領域の形成が成功した。CF<sub>4</sub> ガスのみのドライエッチングでは、Si、SiO<sub>2</sub>、レジストの選択比は低いものであるが、それを除けばリソグラフィ通りのエッチングが可能であるため、DNA メモリ FET の作製には有効である。

## 2.4 DNAの作製と基板への固定

幅 120nm, 長さ 100  $\mu$  m の細線を作製した後, DNA は 400 ベースペア (bp) (136nm) の長鎖 SH-DNA-SH を接続した. まず① DNA を PCR (Polymerase Chain Reaction) 法により 2 本鎖を 1 本にするために 95 $^{\circ}$ C 20 秒の加熱を行った (図 2 (b)). 次に②プライマーを DNA に結合するために 60 $^{\circ}$ C 20 秒のアニーリングを行ない, 最後に③ DNA ポリメラーゼを反応させ DNA を伸長させた. DNA を基板 (Si) に固定化するためには AGE (Allyl glycidyl ether) に浸して UV 照射を行い, さらに DNA 溶液をたらし, 1 日放置して AGE と DNA を接合した.



図 5 酸化炉

## 2.5 ナノテクノロジープラットフォームで利用した装置

広島大学ナノテクノロジープラットフォームで利用した装置を図 5, 図 6, 図 7, 図 8 に示した. 酸化炉, マスクレス露光装置, 電子ビーム露光装置, RIE 酸化膜エッチング装置等である.



## 3. 結果と考察 [7][8]

図 9 に FET チャンネル領域に DNA を作製した前後の AFM 像を示す. その前後のトレンチの幅と深さの差は各々 28.6 と 28.4nm であった. 以上の結果は DNA がトレンチ内に作製された事を示している.

図 10 にドレイン電圧 ( $V_D$ ) に対する  $dI_D/dV_D$  を示す.  $dI_D/dV_D$  は  $V_D$  が約 0.7V で最大となった. この理由は次のように考えている. DNA のイオンポテンシャルが小さいグアニン基がホールキャリアをたびたび発生させるためである. 電子をグアニン基が捕獲することにより, 発生した正孔が DNA の導電性を支配する. 電子と正孔の再結合により過剰の正孔が n-Si よりチャンネルに注入される.

図 11 はゲート電極に印加したリフレッシュ電圧と  $I_D$  の関係を示す. ドレイン電流の増加は -5V から -20V までは徐々に抑制されるが -30V から -50V までは減少する. この理由は DNA 中で捕獲された電子が -30V 以上のリフレッシュ電圧で放出されるためである. それ故, 電界効果の増幅が抑制される. このことより, DNA 中の放出レベルの密度が大きいと考えられる.

図 12 はリフレッシュの有無によるドレイン電流の増加 ( $\Delta I_D$ ) との関係を示す. -20V と -50V のリフレッシュ電圧をゲートに 30 秒印加し測定した.  $\Delta I_D$  は -20V で小さくなり, -50V では減少した. DNA メモリ FET のリフレッシュはゲートに印加される電圧とリフレッシュの持続の両方の影響によることである事が判明した. リフレッシュの持続は -20V の  $V_C$  で保持特性に影響を与えるが -50V の  $V_C$  では影響を与えない.

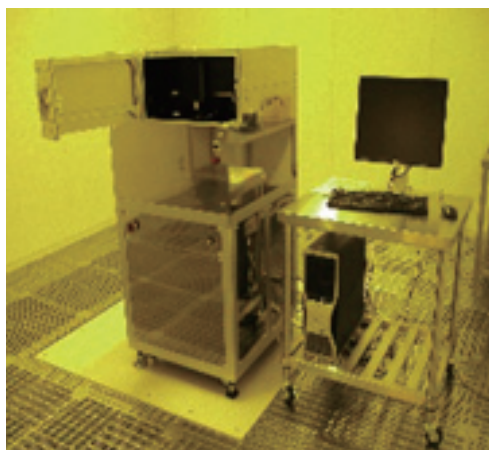


図 6 マスクレス露光装置

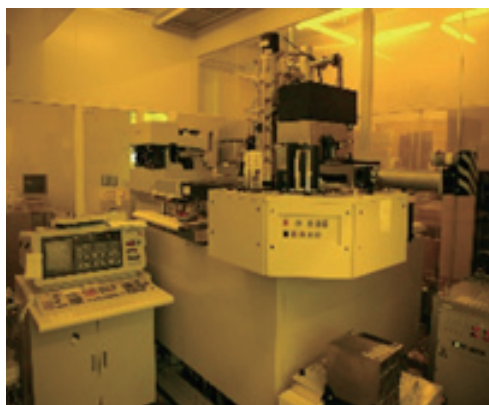


図 7 電子線描画装置



図 8 RIE 酸化膜エッチング装置

図 13 に  $I_D$ - $V_D$  特性のヒステリシスを示す。ドレイン電圧を双方向に印加した場合の差は 0.15V である。この現象が DNA-FET となることを示している。

図 14 に電荷の保持と伝導のモデルを示す。グアニン基 (③) で発生した又は Si 電極から AGE 膜 (①) を通して

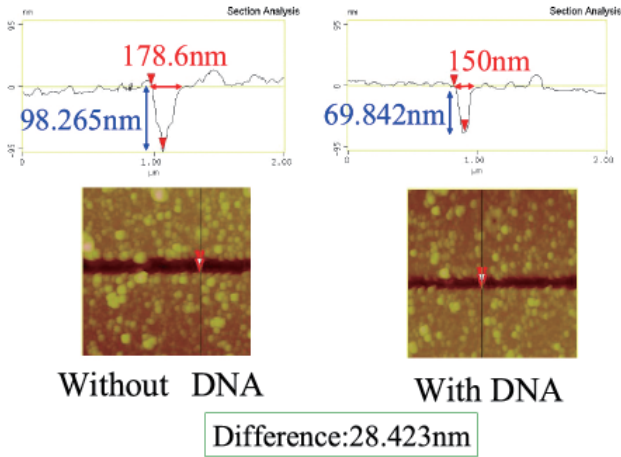


図 9 DNA 作製前後の AFM 像

直接トンネリングによりチャンネルに注入された正孔は DNA のチャンネルにドリフト (②) により流れる。T または A 基 (⑥) で発生した電子はグアニン基 (⑦) で捕獲されるか AGE 膜 (⑧) を通って n<sup>+</sup>Si ドレインに到達する。

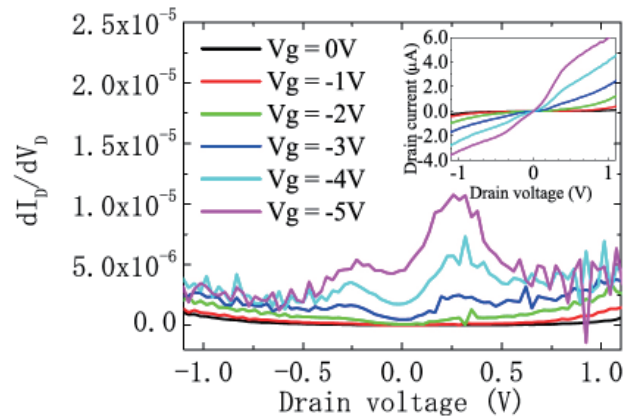


図 10 ドレイン電圧 ( $V_D$ ) と  $dI_D/dV_D$  の関係

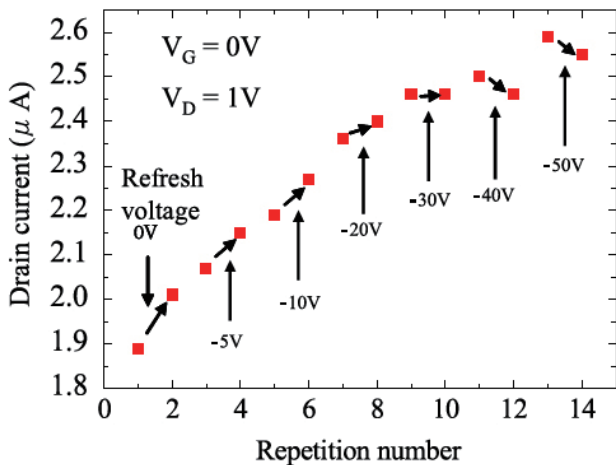


図 11 リフレッシュ電圧と  $I_D$  の関係

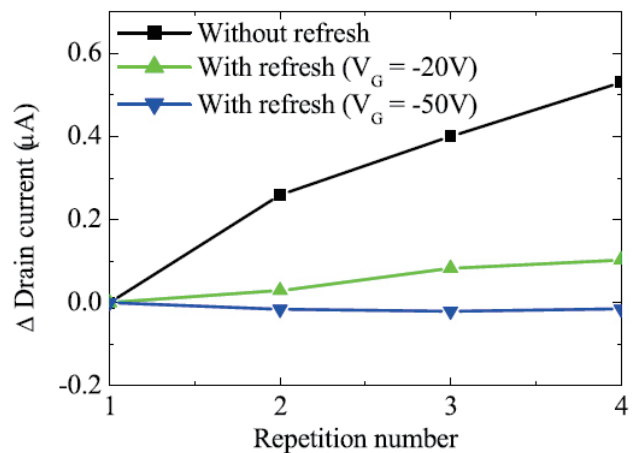


図 12 リフレッシュの有無と  $\Delta I_D$  の関係

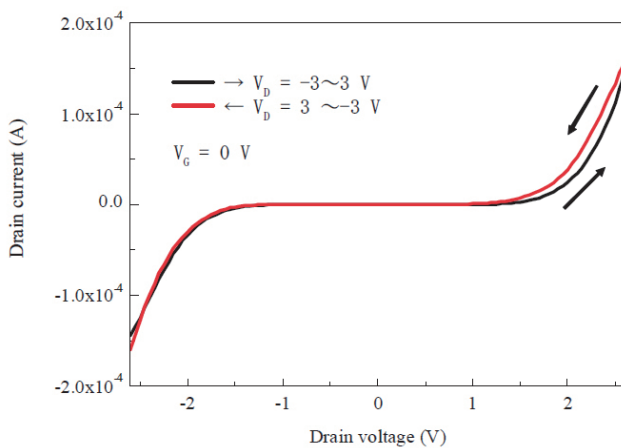


図 13  $I_D$ - $V_D$  特性とヒステリシス

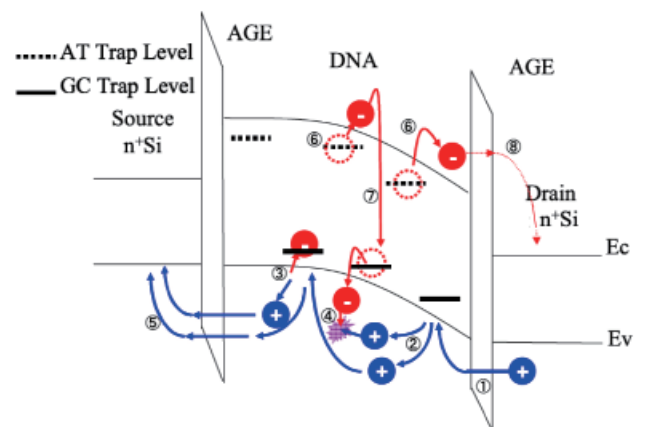


図 14 DNA におけるキャリア伝導のモデル



## 4. まとめ、今後の展望

DNA/SiO<sub>2</sub>/Si 構造におけるキャリア挙動について DNA の電荷保持特性を調べた。

- 1) 電子をグアニン基が捕獲することが電荷の保持特性に関係する。
- 2) DNA メモリ FET はゲート印加電圧とリフレッシュの両方より影響を受ける。
- 3) 電子の捕獲されたエネルギーレベルはグアニン基のバンドギャップの価電帯のエッジ近傍にあり、その密度は大きい。
- 4) I<sub>D</sub>-V<sub>D</sub> 特性のヒステリシスによりメモリ機能を確認した。

今後は DNA チャンネルが 30-40nm の寸法のトランジスタを作製し評価する。ソースドレインを形成する Si 電極の抵抗を低減する事が重要となるのであわせて検討する。この場合は、広島大学に新たに導入された超高精度電子描画装置 (エリオニクス ELS-G100) を使用する予定である。



## 5. 謝辞

本研究は、文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム事業の支援・協力を受けて行われた。



## 6. 参考文献

- [1] R. Martel, H.-S. Philip Wong, K. Chan and P. Avouris, IEEE IEDM Tech. Dig. (2001) 159-162.
- [2] K. Nagashio, T. Nishimura, K. Kita and A. Toriumi, IEEE IEDM Tech. Dig. (2009) 565-568.
- [3] International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS) (2010) Edition.
- [4] D. Porath, A. Bezryadin, S. de Vries, and C. Dekker: Nature **403** (2000) 635-638.
- [5] B. Xu, P. Zhang, X. Li, and N. Tao: Nano Lett. **4** (2004) 1105-1108.
- [6] S.Takagi, T.Takada, N.Matsuo, S.Yokoyama, M.Nakamura and K.Yamana. Nanoscale, **4** (2012) 1975-1977.
- [7] S. Maeno, N. Matsuo, S. Nakamura, A. Heya, T. Takada, K. Yamana, M. Fukuyama, and S. Yokoyama, IEICE Electronics Express, **11** (2014) 1-6.
- [8] S. Nakamura, N. Matsuo, K. Yamana, A. Heya, T. Takada, M. Fukuyama, and S. Yokoyama, AM-FPD (2014), 173-175.

(兵庫県立大学 松尾 直人)



広島大学

### 【お問い合わせ】

微細加工プラットフォーム

広島大学

☎ 082-424-6265

E-mail [nanotech@hiroshima-u.ac.jp](mailto:nanotech@hiroshima-u.ac.jp)

ホームページ

<http://www.nanofab.hiroshima-u.ac.jp/>