

カーボンナノチューブ電界効果型トランジスタの 金属電極における大気の影響

石井 聡¹⁾ 岸本 茂²⁾ 大野 雄高^{1)*} 水谷 孝^{2)**}

1. はじめに

カーボンナノチューブ(CNT)は、小さなサイズに加えて、高電流密度、高移動度を有することから、CNTをチャンネルに使用したCNT電界効果型トランジスタ(CNTFET)に関する研究が精力的におこなわれてきた。当然、CNTFETを使用した集積回路の研究も注目を集めており、将来の実用化に向けた数々の有望な成果が報告されている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。こうしたCNTFET集積回路の作製には、p-型とn-型の両CNTFETが必要であるが、現状では大気中で安定動作するp-型デバイスが得られているのに対して、大気中で安定にn-型動作するデバイスを得にくいことが問題となっている。

問題の詳細について述べる前に、まずCNTFETとその動作機構について簡単に説明する。図1にバックゲート型CNTFETの模式図を示す。CNTFETでは、電流が金属電極端の近傍からCNTへ流れ込むエッジ伝導をする⁽⁴⁾⁽⁵⁾。そのため、ソース電極端近傍の電極-CNT界面に形成されるショットキ障壁をゲート電圧(V_{GS})で制御することで、CNTチャンネルに流れるドレイン電流(I_D)を制御するショットキ障壁動作をする。そこで、図2の I_D - V_{GS} 特性の模式図に示すように、CNTFETには V_{GS} を正に印加すると電流が増加するn-型(図2(a))、 V_{GS} を負に印加すると電流が増加するp-型(図2(b))、 V_{GS} を正負の両方に印加すると電流が増加する両極性の3種類がある。

これについて説明するため、各伝導型のデバイスについて

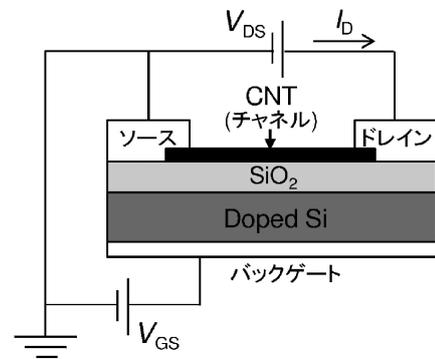


図1 バックゲート型CNTFETの構造。

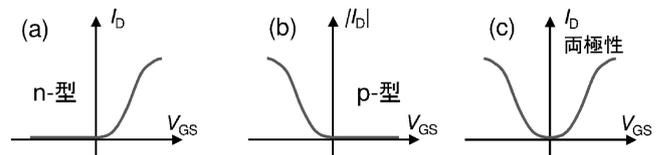


図2 CNTFETにおける I_D - V_{GS} 特性の模式図(V_{DS} の極性が同じ場合)。(a) n-型。(b) p-型。(c) 両極性。

金属電極-CNT界面近傍のエネルギーバンドを図3に模式的に示した。n-型デバイスの場合、図3(a)のように金属電極の仕事関数(ϕ)が小さくフェルミ準位(E_f)がCNTの伝導帯下端(E_c)の付近にあるため、電子に対するショットキ障壁の高さ(ϕ_{Bn})は低くなる。そこで、 V_{GS} を十分正に印加する

* 名古屋大学ベンチャー・ビジネス・ラボラトリー；1)非常勤研究員(現在；東京電機大学理工学部)(〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂) 2)助教

** 名古屋大学大学院工学研究科；1)准教授，2)教授
Effect of Air on Metal Contact of Carbon Nanotube Field-Effect Transistors; Satoshi Ishii*, Shigeru Kishimoto*, Yutaka Ohno** and Takashi Mizutani** (*Venture Business Laboratory, Nagoya University, Nagoya. **Graduate School of Engineering, Nagoya University, Nagoya)

Keywords: CNT (carbon nanotube), CNTFET (CNT field-effect transistor), air-free system, air-free fabrication, oxygen adsorption, passivation, CNT p-n junction

2013年1月4日受理[doi:10.2320/materia.52.266]

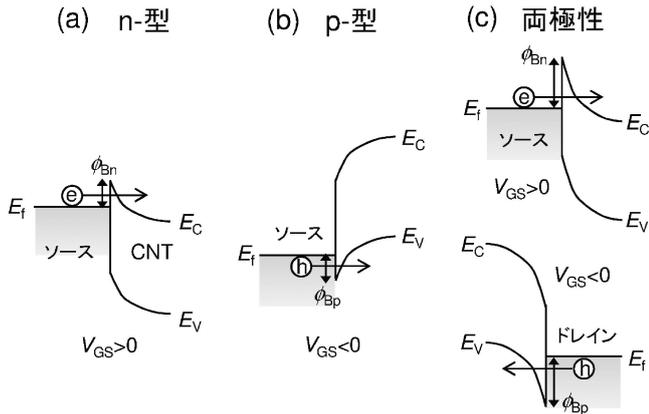


図3 CNTFETの金属電極-CNT界面近傍におけるエネルギーバンド. (a) n-型. (b) p-型. (c) 両極性.

と、 E_c が電極の E_f より低くなり、ソース電極からは電子がCNTチャネルへ注入されるのでn-型動作する。

また、p-型デバイスの場合には、図3(b)のように逆に金属電極の仕事関数が大きく、 E_f がCNTの価電子帯上端(E_v)の付近にあるためホールに対するショットキ障壁(ϕ_{Bp})は低くなる。そこで、 V_{GS} を十分負に印加すれば E_f が電極の E_f より高くなり、ソース電極からはホールがCNTチャネルへ注入されるのでp-型動作する。

一方、両極性デバイスの場合には、図3(c)のように金属電極の E_f がCNTのエネルギーギャップ(E_g)の中央付近に存在し、 ϕ_{Bn} と ϕ_{Bp} が同程度の高さとなる。そのため、 V_{GS} を十分正に印加するとソース電極からは電子がCNTチャネルへ注入されるが、逆に V_{GS} を十分負に印加すればドレイン電極からは電子とは逆極性のホールが注入されるために両極性の動作をする(図3(c)参照)。

また、逆に V_{GS} を十分負に印加しソース電極からホールがCNTチャネルへ注入される場合には、こんどは V_{GS} を十分正に印加するとドレイン電極からはホールと逆極性の電子が注入されるので、やはり両極性の動作をする。このように、両極性デバイスでは、 V_{GS} の正負を換えることで、ソース電極から注入されるキャリアとは逆極性のキャリアがドレイン電極から注入されるため、 V_{GS} の正負で電流が流れるようになる。

ただし、図4(a)のn-型デバイスの例のように E_f がCNTの E_c 寄りである場合でも、 $V_{GS} < 0, V_{DS} > 0$ のOFF状態(チャネルに電流が流れない状態)で V_{GS} を大きく負に印加すれば、ドレイン電極近傍のエネルギーバンドが急峻になるためにショットキ障壁は薄くなる。そのため、ドレイン電極からは電子とは逆極性のホールがCNTチャネルへ注入されるので両極性になる。また、図4(b)に示すように、OFF状態ではドレイン電圧(V_{DS})を大きく正に印加することでもドレイン電極近傍のエネルギーバンドは急峻になるため、やはりドレイン電極からはホールが注入されてデバイスは両極性を示しやすくなる。

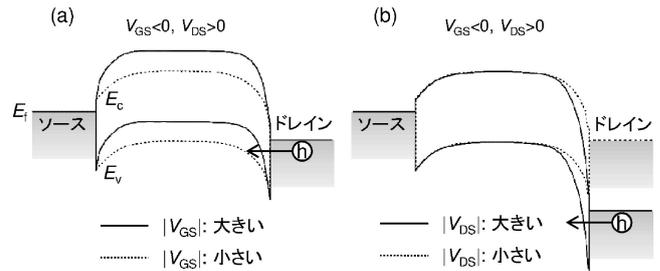


図4 n-型デバイスのOFF状態($V_{GS} < 0, V_{DS} > 0$)におけるエネルギーバンド. (a) V_{GS} を大きく負に印加した場合. (b) V_{DS} を大きく正に印加した場合.

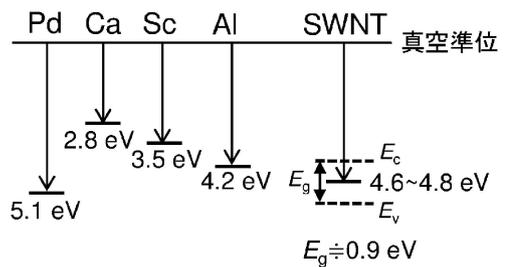


図5 金属電極の仕事関数とSWNTのエネルギーバンドとの関係.

同様に、p-型デバイスでもOFF状態($V_{GS} > 0, V_{DS} < 0$)で大きな V_{GS} 、もしくは V_{DS} を印加すれば、ドレイン電極からはホールと逆極性の電子がCNTチャネルへ注入されるため両極性を示しやすくなる。そのため、Au($\phi = 5.1$ eV)やPd($\phi = 5.1$ eV)のように仕事関数の大きな金属電極を使用した場合でも(図5参照)、両極性を示すようになる。

いずれにせよ、図3で説明したように、CNTFETの基本的な伝導型は金属電極の仕事関数とCNTのエネルギーバンドに依存した電子とホールに対するショットキ障壁の高さで決まることから、電極金属種を介した伝導型の制御が期待されている⁽⁶⁾。

実際に、図5に示すような金属電極の仕事関数とCNT($\phi = 4.6 \sim 4.8$ eV)⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾のエネルギーバンドとの関係をもとに、Pdのように大きな仕事関数の金属を電極に使用して大気中で安定にp-型を示すCNTFETが作製されている⁽¹⁰⁾。なお、図5中では単層CNT(SWNT)の E_g が直径(d_t nm)にほぼ反比例し $E_g \approx 0.9/d_t$ eVで表せることから⁽¹¹⁾、 $d_t = 1$ nmにおける $E_g = 0.9$ eVを使用している。

そこで、同様の手法を適用し、CNTFETがn-型になるのを期待してCa($\phi = 2.8$ eV)⁽¹²⁾やSc($\phi = 3.5$ eV)⁽¹³⁾のように仕事関数の小さな金属を電極に使用しても、デバイスは大気中で安定にn-型を示さない。この原因として、CaやScが大気中で酸化しやすい活性な金属であることが考えられた。これに対して、仕事関数がCaやScよりは大きいものの、大気中で比較的安定なAl($\phi = 4.2$ eV)を電極に使用することで、デバイス(Al-CNTFET)が安定にn-型動作することが期待された。しかしながら、Al-CNTFETについてはn-型

になるという報告⁽¹⁴⁾だけでなく、p-型になるという矛盾した報告⁽¹⁵⁾もされており、Al-CNTFETを安定にn-型動作するデバイスとして実用化するには、より詳細な研究が必要不可欠であった。

こうしたAl-CNTFETのデバイス特性に関する矛盾した報告の原因のひとつとして、大気が金属電極に与える影響が示唆されてきた。これに対して、これまでに多くのグループが、金属電極を含むデバイスに大気が及ぼす影響を調べるために、真空中でデバイス特性を評価してきた。しかしながら、デバイスは大気中で作製される上に、電極作製のためのリソグラフィプロセスで使用する水やレジストなどの有機物が、デバイス特性に影響を与えていることも懸念された⁽¹⁶⁾。したがって、将来のCNTFETの実用化のためには、完全に水と酸素を排除した嫌気環境下でリソグラフィプロセスを使用せずにデバイスを作製し、評価まで行うことが、デバイスに対する大気の影響を厳密に調査する上で必要であった。

そこで、本研究では、嫌気環境システムと嫌気環境プロセスを開発することにより、CNTの成長からデバイスの作製と評価に至るまでを完全な嫌気環境下で実験することを可能にし、Al-CNTFETについて、大気がデバイス特性に与える影響を調べた。さらに、嫌気環境システムを利用することで、デバイス表面のパッシベーションに加え、CNT p-n接合の作製も行った。

2. 嫌気環境システムを利用したCNTFETの作製

(1) 嫌気環境システム

本研究で構築した嫌気環境システムの概略を図6(a)に、またその外観を図6(b)、(c)にそれぞれ示す。システムは、CNT成長用のコールドウォールCVD装置のチャンバと、電極金属の作製に使用する電子ビーム(EB)蒸着装置のチャンバが、窒素ガスで満たされたグローブボックス(GB)を介して接続された構成となっている(図6(a)参照)。GBの内部は酸素濃度が0.5 ppm以下、また水分濃度は0.029 ppm以

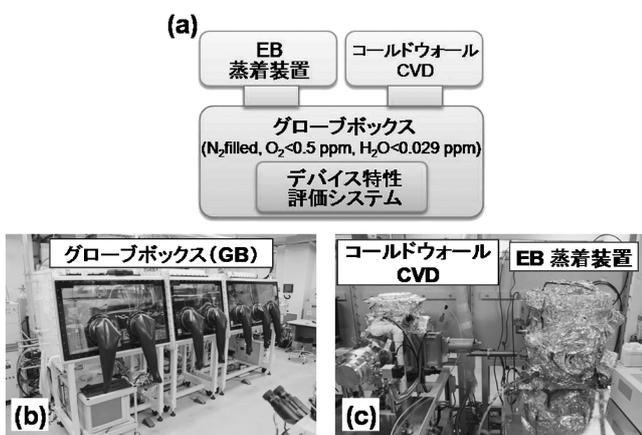


図6 嫌気環境システム。(a)概略図。(b)前面写真。(c)背面写真。

下の嫌気環境に維持されている。さらに、GBの内部には、デバイス特性評価用の測定システムが設置されている。この嫌気環境システムを使用し次に説明する嫌気環境プロセスでデバイスを作製することにより、CNT成長からデバイス特性の評価までを完全な嫌気環境下で実験することが可能となる⁽¹⁷⁾。

(2) 嫌気環境プロセスによるデバイスの作製

実験では、図7に示すような構造のバックゲート型Al-CNTFETを嫌気環境プロセスにより作製した。その作製方法について説明する。始めに単層CNT(SWNT)を成長させるが、ここではまず成長用の触媒としてAl/Co(=3.0/0.3 nm)をフォトリソグラフィとEB蒸着を使用したリフトオフプロセスを用いてSiO₂/p⁺-Si(=100 nm/300 μm)基板の表面にパターンニングした。触媒は、Alのみを蒸着したあとに基板を大気中に30分間さらしてAl表面を酸化させ、その上にCoを蒸着することで形成した。

触媒の形成後、基板はGBを介してコールドウォールCVD装置のチャンバ内に設置し、真空中(到達真空度: 6 × 10⁻⁵ Pa)で昇温した。そして、成長温度で基板の約5 cm上部に設置されたシャワーノズルから原料ガス(C₂H₂)を基板表面に供給することで、触媒金属からSWNTを成長させた。SWNTの成長条件は、原料ガスの流量を5 sccm、成長温度を800℃、成長時間を20分とした。なお、基板表面の吸着分子は、SWNT成長時の高温、高真空下で脱離するため、触媒パターンニングで行ったフォトリソグラフィプロセスにおける吸着分子は、デバイスの特性に影響しない。

続いて、成長させたSWNTの両端に、嫌気環境システム内でソースドレイン電極を形成した。ソースドレイン電極は、メタルマスクを通したEB蒸着により、厚さ50 nmのAlをSWNTの両端に堆積させることで形成した。メタルマスクの位置合わせは、GB内でメタルマスクに対する基板ホルダの位置をマネージャで動かす方法で行い、GB内のCCDカメラを使用してメタルマスクと基板ホルダの様子を観察しながら位置を調節した。また、測定用プローブを置くためのPad電極についても、ソースドレイン電極と同様にメタルマスクを通したTi/Au(=20/80 nm)の蒸着によりGB内で形成した。図8(a)は、実際に作製したデバイスの光学顕微鏡写真である。このようにメタルマスクを使用し

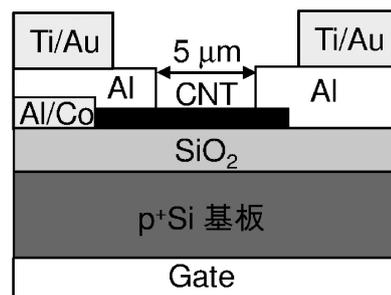


図7 作製したバックゲート型Al-CNTFETの構造。

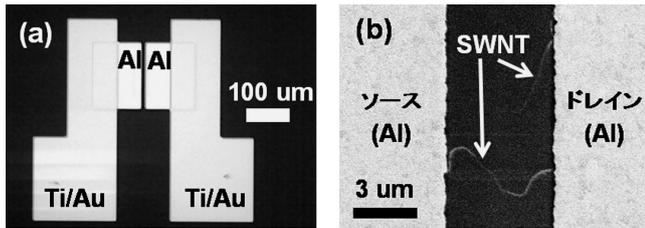


図8 作製したデバイスの(a)光学顕微鏡写真と(b)ソースドレイン電極間に架橋したSWNTのSEM像.

て、短いチャネル長(5 μm)のきれいなデバイスを作製することができた. また、図8(b)に示すように、ソースドレイン電極間には2~3本のSWNTが架橋していることを実験後のSEM観察により確認している.

3. 大気がデバイス特性に与える影響

(1) 大気による n-型から p-型への伝導型変化

図9に、GB中で測定したAl-CNTFETの(a) I_D - V_{GS} 特性と(b) I_D - V_{DS} 特性を示す. ここで、図9(a)において $V_{GS} = +10$ Vのときの I_D を、電子がSWNTチャネルを流れるn型伝導のON電流($I_{ON}(n)$)と定義する. 一方、 $V_{GS} = -10$ Vのときの I_D を、ホールがSWNTチャネルを流れるp型伝導のON電流($I_{ON}(p)$)と定義する. すると、図9(a)では $I_{ON}(n)$ が $I_{ON}(p)$ より3桁以上も大きく、主に電子がSWNTチャネルを流れることを示している. つまり、Al-CNTFET固有の伝導型はn型であり、大気がなければデバイスの伝導型はAlの仕事関数に支配されていることがわかる.

図10(a)には、別のデバイスのGB内における I_D - V_{GS} 特性を示す. このデバイスも、 $I_{ON}(n)$ が $I_{ON}(p)$ よりも大きいn型である. ところが、このn型デバイスを大気中へ曝露すると、図10(b)の I_D - V_{GS} 特性に示すように、 $I_{ON}(p)$ はすぐに $I_{ON}(n)$ よりも大きくなり、デバイスは主にホールがSWNTチャネルを流れるp型に変化した. このように、n型特性が大気中でp型に変化することを確認できた.

また、デバイスが動作していないときのOFF電流は、大気中曝露前の 5×10^{-10} A(図10(a)参照)から大気中曝露後には 2×10^{-14} A(図10(b)参照)へと減少している. このOFF電流の減少について原因は不明であるが、可能性のひとつとして界面ダイポールの形成が考えられる. 界面ダイポールは、図11(a)に示すように酸素が金属に吸着することで、電子による電荷移動が金属から酸素へ起こるために形成される. この界面ダイポールが金属電極-CNT界面近傍に存在すると、図11(b)のようにCNTのエネルギーバンドを持ち上げることが示唆されており⁽¹⁸⁾⁻⁽²⁰⁾、電子に対するショットキ障壁が高くなる一方で、逆にホールに対するショットキ障壁が低くなったことが考えられる. また、大気中曝露後のOFF電流が小さいのは、使用したSWNTの直径がラマン分光から約1 nm程度と見積もられていることから⁽²¹⁾、こ

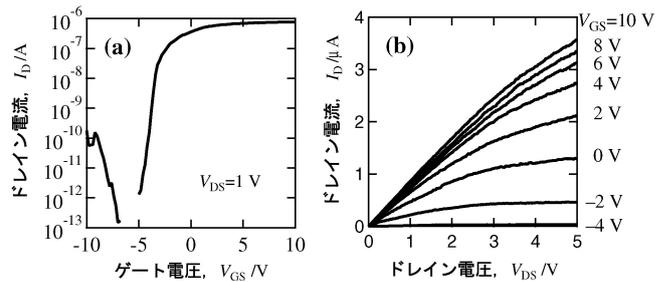


図9 嫌気環境プロセスで作製後にGB中で測定したAl-CNTFETの(a) I_D - V_{GS} 特性と(b) I_D - V_{DS} 特性.

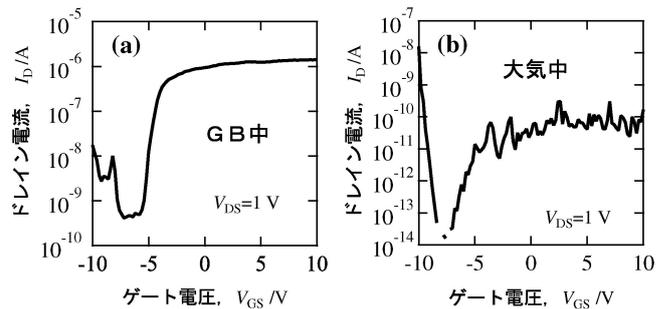


図10 Al-CNTFETの I_D - V_{GS} 特性. (a)大気中曝露前. (b)大気中曝露後.

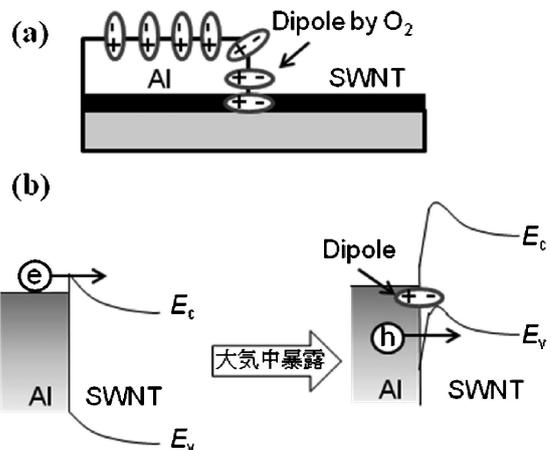


図11 (a) Al電極表面における酸素吸着と界面ダイポールの形成. (b) Al-SWNT界面の界面ダイポールによるエネルギーバンドの変化.

の直径の細さに起因してバンドギャップが大きいためだと考えられる.

(2) 大気中における n-型不安定性の原因

大気中における伝導型の不安定性(n型からp型への変化)に関してはいくつかの調査報告があり、その原因として吸着酸素によるCNTへのホールドーピングに加え⁽²²⁾⁽²³⁾、前節で説明した金属電極-CNT界面の界面ダイポール形成⁽¹⁸⁾⁻⁽²⁰⁾やAl電極の酸化⁽²⁴⁾などが示唆されていた. その後、酸素か

らのホールドープは伝導型にほとんど影響しないことがわかったものの⁽⁹⁾⁽¹⁸⁾⁻⁽²⁰⁾, 依然として不安定性の原因については明らかにされていなかった. そこで, Al-CNTFETにおける大気中の不安定な n-型特性の原因について, 嫌気環境システムを使用して調査をしたので説明する.

実験では, 嫌気プロセスで作製したデバイスの I_D - V_{GS} 特性を次の①~④の手順で評価した.

- ①デバイスの作製後に GB 中で測定.
- ②デバイスを大気中へ曝露してから25時間後に測定.
- ③デバイスを 1×10^{-1} Pa で10分間真空引きした後, GB 中で測定.
- ④デバイスを 1×10^{-5} Pa, 220°C で5時間真空中アニールした後に GB 中で測定.

これまでと同様に, ①の大気中曝露前には図12(a)に示すように n-型であったデバイスが, ②の大気中曝露で図12(b)のように p-型に変化した. しかしながら, ③でデバイスを真空引きしてから大気中に曝さずに GB 内で測定すると, 図12(c)に示すように再び n-型が回復した. さらに, ④で真空中ベークしてから GB 中で測定すると, 図12(d)に示すように n-型は若干強まった.

②でデバイスを大気中に曝露した際, Al 電極表面には自然酸化膜が形成されるが, これは③のような真空引きや, ④のような真空中アニールでは還元されない⁽²⁵⁾. したがって, ③で観測された n-型の回復(図12(c))は, 大気によるデバイスの p-型化の原因が, Al 電極の酸化ではないことを意味している. つまり, 大気中の Al-CNTFET における n-型の不安定性は, デバイス表面への酸素吸着が原因であることを示している. そして, Al 電極の酸化がデバイスの p-型化に影

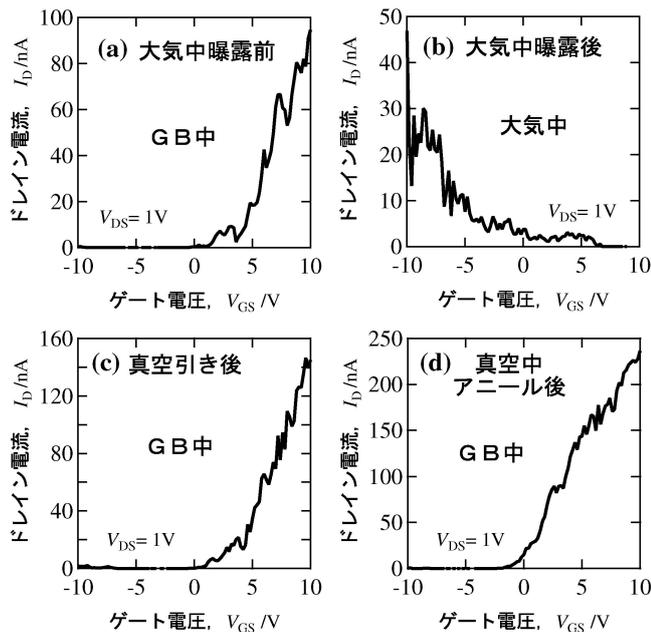


図12 Al-CNTFET の I_D - V_{GS} 特性. (a) 大気中曝露前. (b) 大気中曝露後. (c) 真空引き後. (d) 真空中アニール後.

響しないのは, おそらく Al 電極の厚さが 50 nm と自然酸化膜の厚さ(~ 4 nm⁽²⁶⁾)と比較して厚いためであると考えられる.

4. 嫌気環境システムを利用したデバイス表面のパッシベーション

続いて, 嫌気環境システムを利用したデバイス表面の保護(パッシベーション)について説明する. 本研究では, 図13(a)のようなフォトレジスト(PR) (= 1 μm)のみの単層膜と, 図13(b)のように PR/Au 薄膜/PR (= 1 μm /50 nm/1 μm)の3層膜による2種類のパッシベーションを試みた. 嫌気環境プロセスで作製し, GB 内で表面のパッシベーションをしたデバイスについて, 大気中に曝露した後の I_D - V_{GS} 特性の時間変化を測定した. 図14には, 大気中曝露後の I_D - V_{GS} 特性における $I_{ON}(n)/I_{ON}(p)$ の時間変化を示す. パッシベーションをしていないデバイスの $I_{ON}(n)/I_{ON}(p)$ は, 大気中曝露後にすぐに1より小さくなり p-型に変化したのに対し, PR のみでパッシベーションしたデバイスの $I_{ON}(n)/I_{ON}(p)$ は, 大気中へ曝露してから5時間後に1よりも小さくなり p-型に変化した. しかしながら, 3層膜によるパッシベーションの場合, $I_{ON}(n)/I_{ON}(p)$ は大気中曝露後も100時間以上にわたって10以上の値を示し n-型を保持した⁽¹⁷⁾. このよ

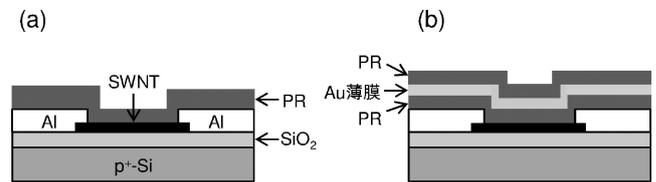


図13 デバイス表面のパッシベーション. (a) フォトレジスト(PR)のみの単層膜によるパッシベーション. (b) PR/Au 薄膜/PRの3層膜によるパッシベーション.

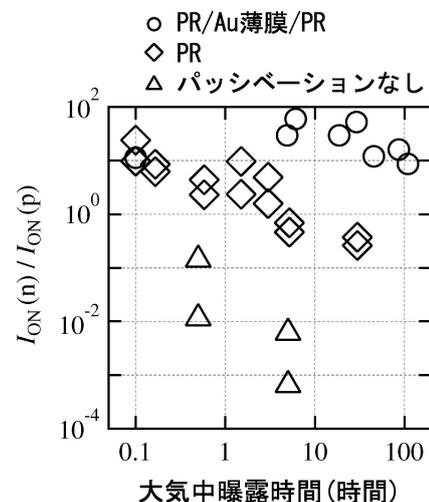


図14 大気中曝露後の $I_{ON}(n)/I_{ON}(p)$ の時間変化.

うに、3層膜によるパッシベーションが大気中でデバイスのn-型を保持するのに有効であるとともに、嫌気環境システムが新たなパッシベーション技術の開発にも有用であることを示した。

5. Au(p)/Al(n)非対称電極によるCNT p-n接合の作製

これまで説明してきたように、嫌気環境システム内でCNTFETは金属電極の仕事関数を反映した伝導型を示す。このことを利用し、非対称電極を用いてCNT p-n接合を作製したので説明する。

GB中でAl-CNTFETがn-型になるのに対し、ここでは示さないがAu($\phi=5.2$ eV)を電極に使用すると、デバイスはGB中でp-型になることを確認している。そこで、図15(a)の挿入図に示すように、Au(p)/Al(n)の非対称電極をCNTFETに使用することで、デバイスが電流を一方向のみに流す整流特性を示すことを期待した。

図15(a)は、実際に嫌気環境システムを使用して作製したp-n接合における、 V_{GS} を印加していないときのI-V特性である。GB内でデバイスの順方向(Au電極を正)にバイアスすると電流が流れたのに対し、逆方向にバイアスすると電流が抑制される整流特性を観測することができた。ただし、このp-n接合を大気中に24時間曝露すると、図15(b)に示すように整流特性は劣化した。この劣化の原因は、Al-SWNT界面に吸着した酸素分子が、界面をn-型の状態からp-型に変えたためと考えられる。以上のように、嫌気環境システムを利用することで、金属電極-CNT界面の固有状態を反映させたCNT p-n接合の作製も可能である⁽¹⁷⁾。しかしながら、大気中では整流特性が失われることから、整流特性の劣化を防ぐためにパッシベーションと組み合わせた新たなデバイス作製プロセスの開発が望まれる。

6. ま と め

本研究では、嫌気環境システムを構築し、CNTの成長からCNTFETの作製と評価までを大気に曝さずに実験するこ

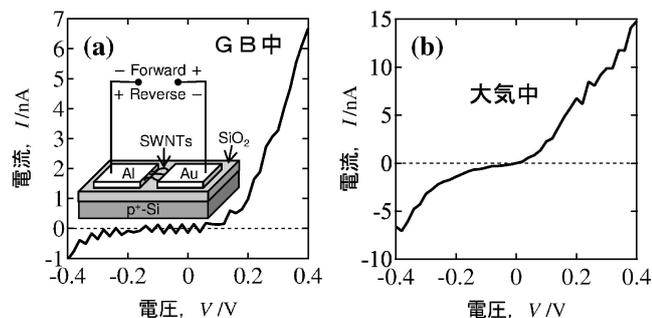


図15 Au(p)/Al(n)非対称電極で作製したCNT p-n接合のI-V特性。(a)大気中曝露前。挿入図はデバイスの構造を示す。(b)大気中曝露後。

とを可能にした。さらに、嫌気環境システムを使用することで、大気中におけるAl-CNTFETの不安定なn-型特性の原因が、Al電極の酸化ではなくデバイス表面への酸素吸着であることも明らかにした。その他にも、嫌気環境システムを使用することで、PR/Au薄膜/PRの3層膜によるパッシベーションが大気中でAl-CNTFETのn-型を100時間以上にわたり保持することや、整流特性を示すCNT p-n接合をAu(p)/Al(n)非対称電極を用いて作製できることも実証してきた。しかしながら、大気中においてAl-CNTFETはn-型からp-型に変化し、p-n接合では整流特性が劣化したことから、さらに強固なパッシベーション技術の開発が望まれる。

大気がデバイス特性に及ぼす影響は、CNTFETに限らず他の有機FETにおいても問題となっている。これに対し、嫌気環境システムを用いた大気の影響調査、およびパッシベーション技術の開発などを提案・実証した本研究の成果は、CNTFETのみならず今後多くのデバイス開発や研究において有意義であり、一連の技術はさらなる発展が期待されている。

文 献

- (1) T. Mizutani, Y. Okigawa, Y. Ono, S. Kishimoto and Y. Ohno: Appl. Phys. Exp., **3**(2010), 115101.
- (2) D. M. Sun, M. Y. Timmermans, Y. Tian, A. G. Nasibulin, E. I. Kauppinen, S. Kishimoto, T. Mizutani and Y. Ohno: Nature Nanotech., **6**(2011), 156-161.
- (3) Q. Cao, H. S. Kim, N. Pimparkar, J. P. Kulkarni, C. Wang, M. Shim, K. Roy, M. A. Alam and J. A. Rogers: Nature, **454**(2008), 495-500.
- (4) Y. Noshu, Y. Ohno, S. Kishimoto and T. Mizutani: Jpn. J. Appl. Phys., **46**(2007), L474-L476.
- (5) A. D. Franklin and Z. Chen: Nat. Nanotechnol., **5**(2010), 858-862.
- (6) Y. Noshu, Y. Ohno, S. Kishimoto and T. Mizutani: Nanotechnology, **17**(2006), 3412-3415.
- (7) S. Suzuki, C. Bower, Y. Watanabe and O. Zhou: Appl. Phys. Lett., **76**(2000), 4007.
- (8) R. Gao, Z. Pan and Z. L. Wang: Appl. Phys. Lett., **78**(2001), 1757.
- (9) X. Cui, M. Freitag, R. Martel, L. Brus and P. Avouris: Nano Lett., **3**(2003), 783-787.
- (10) A. Javey, J. Guo, Q. Wang, M. Lundstrom and H. Dai: Nature, **424**(2003), 654-657.
- (11) 齋藤理一郎, 篠原久典: カーボンナノチューブの基礎と応用, 倍風館, (2004).
- (12) Y. Noshu, Y. Ohno, S. Kishimoto and T. Mizutani: Appl. Phys. Lett., **86**(2005), 073105.
- (13) Z. Zhang, X. Liang, S. Wang, K. Yao, Y. Hu, Y. Zhu, Q. Chen, W. Zhou, Y. Li, Y. Yao, J. Zhang and L. M. Peng: Nano Lett., **7**(2007), 3603-3607.
- (14) M. H. Yang, K. B. K. Teo and W. I. Milne: Appl. Phys. Lett., **87**(2005), 253116.
- (15) Z. Chen, J. Appenzeller, J. Knoch, Y. Lin and P. Avouris: Nano Lett., **5**(2005), 1497-1502.
- (16) H. Shimauchi, Y. Ohno, S. Kishimoto and T. Mizutani: Jpn. J. Appl. Phys., **45**(2006), 5501-5503.
- (17) S. Ishii, S. Kishimoto, Y. Ohno and T. Mizutani: Mater. Express, **1**(2011), 285-290.
- (18) V. Derycke, R. Martel, J. Appenzeller and Ph. Avouris: Appl. Phys. Lett., **80**(2002), 2773.
- (19) S. Heinze, J. Tersoff, R. Martel, V. Derycke, J. Appenzeller

