

「電子・光子等の機能制御」
平成10年度採択研究代表者

川原田 洋

(早稲田大学理工学部 教授)

「表面吸着原子制御による極微細ダイヤモンドデバイス」

1. 研究実施の概要

今後発展が期待される産業分野において、現在の Si を基盤とした半導体デバイスにかわる、新たな半導体デバイスへの期待は大きい。例えば、電気自動車の電力制御用のハイパワー低消費電力 FET、移動体通信や衛星通信の中継点に必要な小型高出力高周波送信用 FET などの開発要請が高まっている。Si や GaAs では不可能なこれらの用途には SiC、ダイヤモンド、GaN 等のワイドバンドギャップ半導体材料の使用が検討されている。これらワイドバンドギャップ半導体の中でダイヤモンドは電子および正孔移動度が最高、ブレイクダウン電界は SiC、GaN の数倍 (Si の 30 倍)、熱伝導度は SiC の 4 倍、GaN の 15 倍 (Si の 10 倍) であり、未来の超高集積デバイスに不可欠な物性を有している。また、SiC や GaN で問題となっている反位相境界やポリタイプがなく、将来結晶成長の完成度が最も高くなると考えられる。実際、気相合成ホモエピタキシャルダイヤモンドの欠陥密度は近年著しく減少し、現在 SiC や GaN と同等あるいはそれ以下となっている。

研究代表者らは、完全性の高い水素終端ダイヤモンド単結晶表面において、Si-MOSFET 反転層や AlGaAs/GaAs ヘテロ界面の 10 倍以上の表面キャリア密度 (正孔表面密度で 10^{13} cm^{-2} 以上) を有し、しかも、正孔が表面から 5 nm 以下の浅い分布を持つ p 型表面伝導層が発現することを明らかにした。これを、ソース、ドレインおよびチャンネルに使用し、電流駆動能力で Si-MOSFET と同等の新型 FET を開発している。ダイヤモンド水素終端構造は、その上に他の膜を堆積しても安定であり、これを使用した極微細構造における新デバイスが期待される。

本研究では、このダイヤモンド表面チャンネル型 FET を基礎に、ヘテロエピタキシャル成長技術、微細加工技術の高精度化により FET 特性の向上を行い、高電界、高周波数でのデバイス動作を検討する。さらに、表面吸着原子層を nm スケールあるいは原子スケールで行い、他の半導体では不可能な超微細 FET あるいは新機能デバイスを作製する。ダイヤモンドは、表面電子構造を決定する表面吸着構造が大気中で安定であり、nm スケールデバイス形成には最も適した半導体材料である。本研究は、表面科学と電子デバイスの 2 分野の知的資産が有機的な連携をとるおそらく

最初の例となり得る。

2. 研究実施内容

2-1. デバイスシミュレーションを用いたダイヤモンド FET の動作機構解析

水素終末端されたダイヤモンド表面はアンドープでも p 型の伝導性を示す。この水素終末端表面伝導層をチャンネルおよびソース/ドレイン接合に用いて、高性能な MESFET および MISFET が作製されている。これらの FET は、正孔の蓄積状態をゲート電圧で制御する蓄積デバイスである。その電流 電圧 (I-V) 特性は、明確なチャンネルのピンチオフとドレイン電流の飽和を示す。また、MESFET においてはデプレッション型だけでなくエンハンスメント型も得られている。

このように、実際に FET が作製され動作しているにもかかわらず、その動作機構や水素終末端表面伝導層の詳細については明らかにされていなかった。そこでこれらの問題を明らかにするため、MESFET の直流特性のデバイスシミュレーションを行った。シミュレーションの際、表面伝導層のアクセプタ分布深さを、表面だけの 2 次元分布から分布深さ 10 nm まで変化させた。その結果、表面伝導層のアクセプタ分布深さは 1 nm 以下であり、特に 2 次元分布が現実の特性を良く再現することがわかった。このとき正孔密度は、深さ 10 nm で表面での密度より 3 桁減少する。分布深さが 1 nm を超えると、実際のデバイスのしきい値電圧を再現することができない。このように浅いアクセプタ分布が、明確なチャンネルのピンチオフやドレイン電流の飽和をもたらし、またエンハンスメント型 MESFET を可能にしていることがわかった。図 1 に Cu ゲート MESFET の I-V 特性を 2 次元表面アクセプタ分布を用いてシミュレーションした結果と、実測した特性を示す。また、この 2 次元表面アクセプタで MISFET の直流特性も再現できることがわかった。

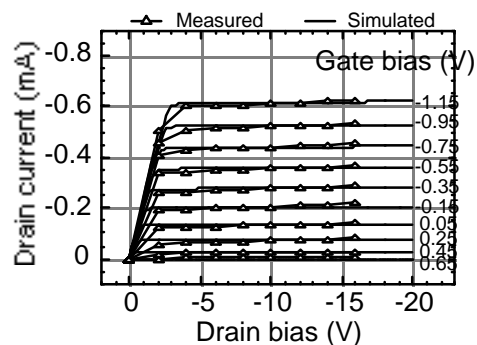


図 1 Cu ゲート MESFET の I-V 特性の測定結果とシミュレーション結果

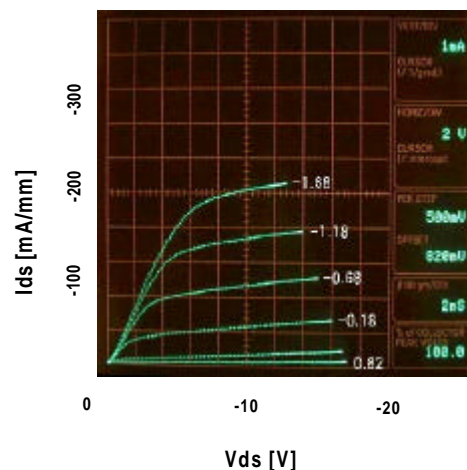


図 2 1 μ m ゲート長 Cu ゲートダイヤモンド MESFET の I_{DS} - V_{DS} 特性
ゲート長 $L_G = 1\mu\text{m}$ 、ゲート幅 $W_G = 26\mu\text{m}$

シミュレーションの結果から、水素終端表面伝導層は厚さ 10 nm 以内にキャリアのほとんどが存在するという特性をもつことがわかった。また水素終端表面と Au、Pt などの接合は良好なオーミック特性を示し、これをソース/ドレイン接合に用いて 10 nm 以下という浅い接合が得られる。このような浅いソース/ドレイン接合は、ゲート長 50 nm 以下のナノデバイスには必須のものである。

2 - 2 . 1 μ m ゲート Cu ゲートダイヤモンド MESFET の作製

水素終端ダイヤモンド表面には低抵抗の表面伝導層が現れる。この伝導層は大気中で安定、高キャリア密度であり、表面から 10nm 以下の薄い領域にキャリアのほとんどが存在する構造を持つ。これらの特性によって、ゲート長の微細化に伴う短チャネル効果に対して抑制する効果が大きく、ダイヤモンド表面伝導層は微細 FET のチャネルとして非常に有用であると考えられている。また、これまでにダイヤモンド表面伝導層を用いた FET において、ゲート長の微細加工による FET の高性能化のシミュレーション結果が発表されている。1 μ m ゲート長 Cu ゲート MESFET の作製において、電子ビームリソグラフィを利用した自己整合的ゲート作製プロセスを採用し、寄生抵抗となるソース・ゲート間距離を 0.2-0.05 μ m にまで低減することが可能となった。ダイヤモンド基板として、電子技術総合研究所で低メタン濃度によって合成された、平坦で低抵抗のホモエピタキシャル基板を用いた。図 2 は完成した FET の I_{DS} - V_{DS} 特性である。相互コンダクタンスはダイヤモンド FET 中最高の 110mS/mm を示した ($V_G=-1.5V$)。この値は同ゲート長に換算した Si-nMOSFET に匹敵する特性となった。さらに、ゲート長を 1 μ m から 5 μ m まで変化させた Cu ゲート MESFET を作製したところ、ゲート長の逆数に比例して相互コンダクタンスが改善されていることが実験的に求められた。しかし、ゲート長 1 μ m 付近よりゲート長の微細化に対して相互コンダクタンスの飽和傾向が見られた。寄生抵抗となっているソース・ゲート間隔がゲート長に対して無視できなくなっていくことが原因と考えられる。今後、寄生抵抗をさらに効果的に排除した FET 作製プロセスを採用することによって、ゲート長の微細化に伴う相互コンダクタンスの改善が見込める。

2 - 3 . AFM 電界支援酸化を用いた水素終端ダイヤモンド表面伝導の超微細制御

アンドープダイヤモンド薄膜表面は水素終端状態においては p 型の電気伝導を示し、酸素終端状態においては電氣的に絶縁体となる。このため、走査トンネル顕微鏡 (STM)、原子間力顕微鏡 (AFM) などの技術を用いて、表面吸着種を水素から酸素に置き換えることにより、nm ス

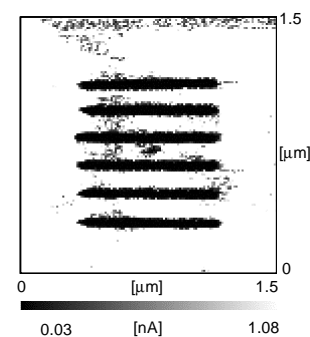


図 3 AFM により電解支援酸化を行った後のダイヤモンド表面の電流像(サンプルへのバイアス 2V で測定)

ケールでの微細領域の導電性制御が可能となる。導電性の AFM プローブを使用し、ダイヤモンド表面伝導層に 3~6V の DC バイアスを加えながら大気中で局所酸化を行った。図に一例として示したように、6V のバイアスによる電界支援酸化により、約 60~70nm の線幅で電流の流れない、絶縁化された領域を形成することに成功している。さらに、酸素末端領域で囲んだ導電性のアイランドを形成し、この絶縁化領域を挟んでの電流 電圧測定を行った結果、M-I-M (Metal-Insulator-Metal) 構造に特有な I-V カーブを得ることができた。ダイヤモンド表面伝導層の厚みは表面より 10nm 程度であると見積もられているので、この技術を使うことによって非常に微少な容量を持つトンネル接合を形成することができるであろう。このような構造は単正孔トランジスタなどの single charge tunneling device を、室温において実現するのに有望である。さらに、AFM, STM によりナノ領域での微細加工を行うことで、2次元正孔系を利用したバリスティックな伝導や、量子アンチドット系などのメゾスコピック効果の実現および、デバイスへの応用が期待される。そのほかナノスケールでの電界効果トランジスタ作製などの応用も考えられる。

3. 主な研究成果の発表 (論文発表)

無し