

「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、ブレークダウン電界は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ら以下となっている。

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 微細ダイヤモンドMISFETの作製

我々は、 CaF_2 をゲート絶縁膜として用いた水素終端ダイヤモンド表面チャンネル型MISFETにおいて、寄生素子成分、特にソース抵抗成分の低減を目的として自己整合的にゲートを作製するプロセスを適用した(図1(a))。この結果、ゲート長

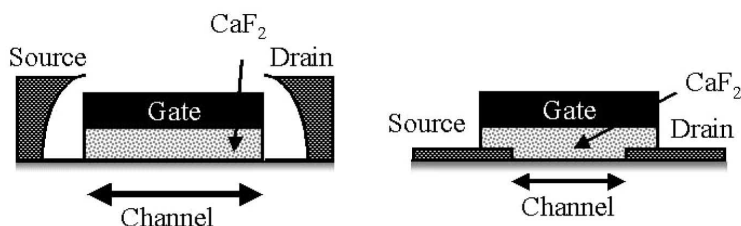


図1 (a)リセス型セルフアライン法によるMISFET (b)新プロセスによるMISFET

1.2mmのCu/ CaF_2 MISFETにおいては最高相互コンダクタンス86mS/mmの高利得MISFETを作製することに成功した。また、作製したMISFETにおいてドレインコンダクタンスから実効移動度を求めたところ、最高値は $280\text{cm}^2/\text{Vs}$ であった(図2(a))。

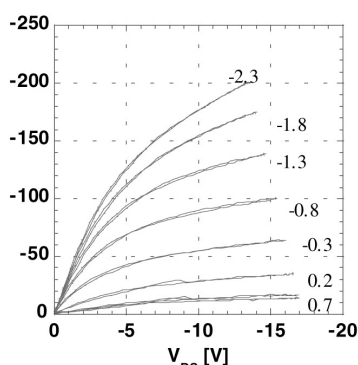
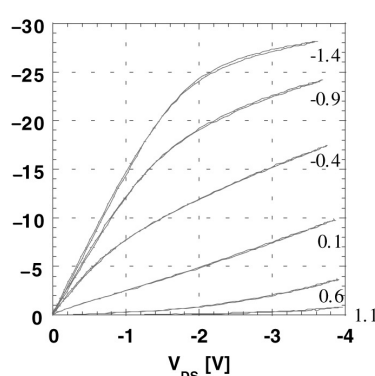


図2 (a)



(b)

図2

(a)リセス型セルフアライン法によるFET特性
ゲート長1.2 μm
相互コンダクタンス75mS/mm

(b)新プロセスによるFET特性
ゲート長0.2 μm
相互コンダクタンス30mS/mm

さらに、我々はソース・ドレイン間隔を生まない新プロセスを開発し(図1(b))、チャンネル長の微細化を図った。このプロセスを用いて、これまでのダイヤモンド表面チャンネル型FETで最短チャンネルとなるチャンネル長0.2 μm Cu/ CaF_2 /Diamond MISFETが実現している。図2(b)はこのFETの $I_{\text{DS}}-V_{\text{DS}}$ 特性である。FETとして動作しているが、チャンネル長0.5 μm 以上では見られることのなかったドレイン電圧2-3Vでのドレイン電流の立ち上がり、最大ドレイン電流の低下等のいわゆる短チャンネル効果が出現している。また、今回作製したFETではプロセス中に増加したと思われるソース・ドレイン接合での接触抵抗によって、チャンネル長の微細化が相

互コンダクタンスの上昇につながっておらず、 $0.2\ \mu\text{m}$ チャネル長で 30mS/mm にとどまった。今後、微細化による高性能化のためにはさらなる寄生抵抗成分の低減が必要となる。

2.2 ダイヤモンドMISFETでの短チャネル効果抑制

今回作製されたような極微細表面チャネル型ダイヤモンドデバイスにおいては、短チャネル効果などによって従来のデバイスとは異なる機構により動作が決まっていると考えられる。これにより、ゲート電極の微細化が進むにつれて、ゲート電界によるチャネルの制御性が低下する。ゲート長が $0.5\ \mu\text{m}$ 以上のデバイスでは、活性層であるダイヤモンド・エピタキシャル層全体をゲート電界によって空乏化できる。しかし、ゲート長 $0.5\ \mu\text{m}$ 以下のデバイスでは活性層全体を空乏化することが出来ないため、閾値の絶対値が増加しオフ電流が抑えられなくなる。これは消費電力という観点から好ましくない。この短チャネル効果の抑制についてデバイスシミュレーションを用いて考察した。シミュレーションの結果、活性層の厚みを 50nm 以下にすることで $0.1\ \mu\text{m}$ のゲート長のデバイスでも短チャネル効果を抑制することができることが分かった。

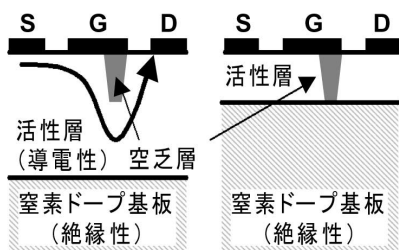


図3 ピンチオフ時の短チャネル効果の機構と抑制

- (a) 空乏層が活性層全体に広がらない
- (b) 空乏層が活性層全体に広がる

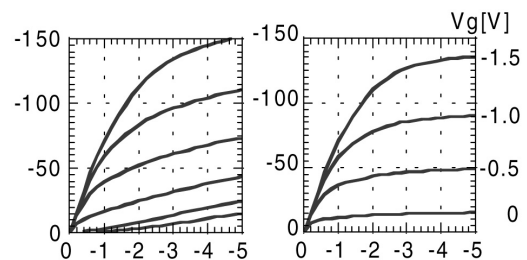


図4 ゲート長 $0.2\ \mu\text{m}$ のMISFETにおける短チャネル効果とその抑制
活性層の厚み(a) 300nm (b) 50nm

2.3 ダイヤモンド表面吸着制御による微細トンネルダイオードの作製

はじめに示したように、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。原子間力顕微鏡(AFM)を用いた表面陽極酸化技術によってダイヤモンド表面伝導層の nm スケールでの微細領域の導電性制御をこれまでおこなってきている。約 60nm の線幅で絶縁化された領域を描画することにより、M-I-Mトンネルダイオード構造を形成した(図5)。この絶縁領域をはさんだ表面伝導層間の電流-電圧特性を測定すると、図6に示したように、Fowler-Nordheim(F-N)トンネリング特性に従う電流が観測された。加工線幅のさらなる微細化をはかるために、交流電圧印

加モードでの酸化を行い、MHzオーダーの周波数で印加電圧を変調した場合、酸化線幅を～30 nm程度まで減少させることができた。これは、陽極酸化時に酸化物ダイヤモンド界面に形成されるHイオンによる空間電荷の蓄積を抑制できたためではないかと考えられる。このトンネルダイオードをさらに微細化し、トンネル接合に囲まれた伝導性アイランドを有する単正孔トランジスタを作製する予定である。

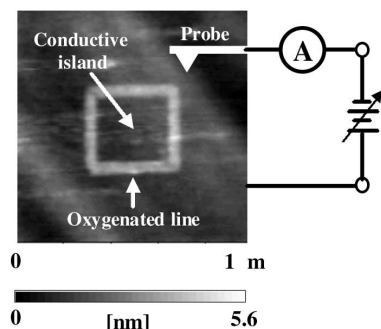


図5 電界支援酸化によって作製したM-I-Mダイオード構造

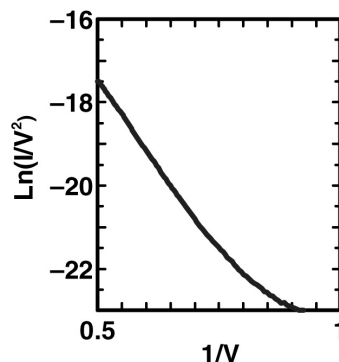


図6 絶縁領域を挟んだI-V特性のF-Nプロット

2.4 溶液ゲートFET

ダイヤモンド水素終端表面は化学的安定性および広い電位窓 (3eV以上) を有するため、電気化学的電極として注目されている。われわれは、この広い電位窓のなかで、つまりバイアス3V以内において、良好なFET動作を初めて確認した (特許申請中)。水素終端された多結晶ダイヤモンドで作製されたゲート長0.5mm (ゲート長と幅は電解質溶液に露出された表面より換算) のpチャネルFETでは、しきい値電圧 -0.2Vのノーマリーオフ型で、pH (1-14) 依存性はなかった。pHに依存しない性質は、FETの安定動作の上で重要であり、1) そのままで参照用FET、2) 既存のイオン感応膜形成によりpHセンサー、3) さらに酵素等を表面吸着させたバイオセンサーなどの応用が考えられる。炭素は生態適合性のある物質であり、体内埋め込み型のバイオセンサーに適している。

3. 主な研究成果の発表 (論文発表)

- A.Hokazono, K.Tsugawa, H.Umezawa, K.Kitatani, H.Kawarada "Surface p-Channel Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistors Fabricated on Hydrogen-Terminated (001) Surfaces of Diamond" *Solid State Electronics* Vol.43 pp.1465 (1999)
- K.Tsugawa, K.Kitatani, H.Noda, A.Hokazono, K.Hirose, M.Tajima, H.Kawarada "High-Performance Diamond Surface-Channel Field-Effect Transistors and Their Operation Mechanism" *Diamond and Related Materials* Vol.8 pp.927 (1999)

K.Kitatani, H.Umezawa, K.Tsugawa, K.Ueyama, T.Ishikura, S.Yamashita, H.Kawarada "MOSFETs on Polished Surfaces of Polycrystalline Diamond" Diamond and Related Materials Vol.8 pp.1831 (1999)

H.Umezawa, K.Tsugawa, S.Yamanaka, D.Takeuchi, H.Okushi, H.Kawarada "High-Performance Diamond Metal-Semiconductor Field-Effect Transistor with 1 mm Gate Length" Japanese Journal of Applied Physics Vol.38 11A pp. L1222 (1999)

D. Takeuchi, S. Yamanaka, H. Watanabe, H. Okushi and K. Kajimura, "Device Grade Homoepitaxial Diamond Thin Films Grown by Step-Flow Mode", Trans. Mater. Res. Soc. of Japan, 24 [4] 595-598 (1999).

D. Takeuchi, H. Watanabe, S. Yamanaka, H. Okushi, and K. Kajimura, "Defects in Device Grade Homoepitaxial Diamond Thin Films Grown with Ultra-low CH₄/H₂ Conditions by Microwave-Plasma Chemical Vapor Deposition", phys. stat. sol. (a), 174, 101-115 (1999).

S. Yamanaka, D. Takeuchi, H. Watanabe, H. Okushi and K. Kajimura, "Low Compensated Boron-doped Homoepitaxial Diamond Films Using Trimethylboron", phys. stat. sol. (a), 174, 59-64 (1999).