

高密度正孔ガスを利用したダイヤモンド

高出力ミリ波トランジスタに関する研究

Development of High Power and Millimeter-long Wave
Diamond Transistors Using Two Dimensional Hole Gas

川原田 洋 (KAWARADA HIROSHI)

早稲田大学・理工学術院・先進理工学研究科・教授



研究の概要

ダイヤモンドは降伏電界が半導体中最も高く、物質中最高の熱伝導率をもち、従来の半導体で不可能であった高出力高周波デバイスや低損失電力素子が期待される。本研究では、ダイヤモンド電界効果トランジスタの性能を表面やバルクでの異種原子制御より向上させ、ミリ波帯で動作する高周波デバイスや超伝導ダイヤモンドを利用した新機能デバイスの開発を行う。

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学

キーワード：電子デバイス

1. 研究開始当初の背景

移動体通信基地局やレーダー等の高周波高出力用途において Si や GaAs は、微細化と降伏電界の関係から出力電力密度が限界となり、SiC、GaN、ダイヤモンドなどのワイドバンドギャップ半導体の実用化が急務となっている。ダイヤモンドは、正孔移動度が最も高く、pチャネル電界効果トランジスタ(FET)として優れ、ブレイクダウン電界はSiCやGaNの数倍、熱伝導率はSiCの4倍、GaNの15倍である。ダイヤモンド・エピタキシャル層の高品質化が進み、pチャネル高周波FETの研究が始まった。

2. 研究の目的

代表者が先駆的に開発した2次元正孔ガスによる表面p型蓄積層を利用したダイヤモンドpチャネルFETを基礎に、以下の目的で研究を実施する。

- 1) 新たなヘテロ界面創出による2次元正孔ガスのキャリア密度と移動度を向上させる。
- 2) FET構造最適化により高電圧、高周波、耐環境での性能向上を行い、実用に耐えうる高出力・高周波動作を検討する。
- 3) 高濃度ボロンドープp型層での超伝導を利用したゼロ抵抗ソース・ドレインのFETやチャネルの開閉に超伝導-常伝導を利用する超伝導FET等の斬新なデバイス開発を行う。

3. 研究の方法

メタン等の気体をプラズマ分解して高純度のダイヤモンドを合成し、ドーピング等を行い半導体化する。また、ダイヤモンド表面

を水素で覆う(終端する)ことで表面近傍に正孔が蓄積するp型蓄積層も利用する。

4. これまでの成果

4.1 (110)および(111)面での高キャリア密度
(001)面の表面蓄積層は面キャリア密度で $1 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ 程度あり、Si MOSFETの反転層より高く、AlGaA/GaN界面の二次元電子ガスと同程度である。高周波ダイヤモンドFETはこの正孔蓄積層をソース、ドレイン、チャネルに利用する。今回、(110)面および(111)面の利用で、チャネル表面のC-H双極子モーメント密度を20-30%上昇させたところ、従来の(001)面と比べ、キャリアの蓄積密度が $2 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ 以上に増加し、シート抵抗が半減し、高性能FET開発に結びついた。(論文1,2)

4.2 TiC極浅オーミック接合の形成

熱的に安定なオーミック接合形成に浅い($\sim 3 \text{nm}$)TiC形成を行い、 $10^{-7} \Omega \text{cm}^2$ 台の低コンタクト抵抗を実現した。この浅い接合は半導体技術ロードマップ(ITRS 2012-16)を満たすナノデバイス技術である。また、ソース・ドレインをTiCで形成後にゲートを形成し、最後に水素終端表面を作成する全く新しいダイヤモンドMOSFET製造プロセスの開発につながった。これによりしきい値電圧等デバイスの制御性が向上した。(論文3)

4.3 水素終端表面のショットキー障壁形成機構の解明

水素終端ダイヤモンド表面のp型蓄積層は、金属/半導体界面の形成により、面キャリア

密度が変動し、実効的な接触面積が変化し、真のショットキー接合高さの測定が困難であった。即ち、金属/ダイヤモンド界面の正確なモデルが不明のままFET開発が先行していた。今回、接触面積がわからなくても正確な障壁を求まる測定法にて、各種金属で精密測定した。この結果を基に界面双極子、負性電子親和力、界面電荷の影響を定量的考慮した金属誘起準位モデルにて、金属/水素終端ダイヤモンド界面の障壁が説明された。金属半導体 (MES) FETやMOSFETの性能向上に重要な指針となる。(論文4)

4.4 (110)及び(111)面での高性能FET

水素終端(110)面および(111)面での高キャリア密度をソース・ドレイン・チャンネルに利用したMOSFETでは800mA/mmと高いドレイン電流密度が得られた。さらにソース・ゲート、ゲート・ドレイン間の抵抗減少にて(111)面では最大ドレイン電流密度1.2A/mm(目標値1A/mm)、最大相互コンダクタンス400mS/mm(目標値200mS/mm)とダイヤモンドでは最高、シリコンや化合物半導体の先端FETに匹敵する値を記録した。この電流駆動能力の上昇を、高電界下での軽い正孔から重い正孔への遷移が(111)面では抑制され、移動度低下が起こりにくいことで説明した。(論文1,2)

4.5 遮断周波数の向上 (論文1)

(110)での高いドレイン電流密度、相互コンダクタンスより、(001)面では最高

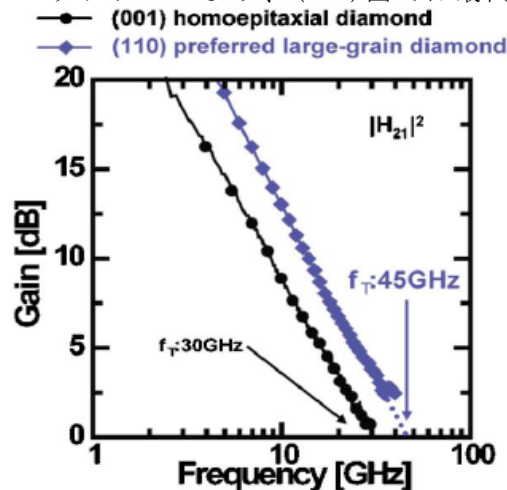


図1 ダイヤモンドpチャンネルMOSFETの遮断周波数。同ゲート長で(110)チャンネルはドレイン電流、相互コンダクタンス、遮断周波数で(001)チャンネルを上まわる。(論文1)

30GHzで止まっていた遮断周波数が、(110)面において45GHzまで上昇した。ダイヤモンドMOSFETでは最高値である。

4-6 高濃度ボロンドープp型層(論文5)での超伝導を利用したSNSジョセフソン接合

超伝導層/非超伝導層/超伝導層(SNS)を縦型あるいはプレーナ構造で形成し、ダイヤモンドジョセフソン接合に世界で初めて成功した。マイクロ波応答でのシャピロステップ、磁場応答でのフラウンホーハパターンの観測よりジョセフソン接合形成を確認した。3層全て同一物質のホモ接合で形成したジョセフソン接合は例がなく、プレーナ構造では臨界電流 I_c と常伝導接合抵抗 R_N の積($I_c R_N$ 積, 16mV@2K)が高く、特性振動数($2eI_c R_N/h$)に反映され、テラヘルツ帯での応答が期待される。

5. 今後の計画

5.1 ロバストFET

界面のC-Si結合に基づくSiO₂/ダイヤモンド界面を形成し、MOSFETでの特性評価を進め、水素終端チャンネルの代替を行い、高耐圧、高温安定動作が可能なFETを作製する。

5.2 超伝導FET

ホモエピタキシャル層200nm以下は無欠陥領域で、ゼロ抵抗温度 T_c 9K台が再現性よく観測される。この層を利用し、FET作製技術とジョセフソン接合技術を組み合わせ、超伝導FETを実現する。

6. これまでの発表論文等

- 1) K.Hirama, H.Kawarada "High-performance p-channel diamond MOSFETs with alumina gate insulator", IEEE IEDM 2007 pp873-876.
- 2) K.Hirama, H.Kawarada "High-performance p-channel diamond metal-oxide-semiconductor field-effect transistors on H-terminated (111) surface", Appl. Phys. Express **3**, 044001 (2010).
- 3) Y. Jingu, H. Kawarada, "Ultrashallow TiC source/drain contacts in diamond MOSFETs formed by hydrogenation-last approach" IEEE Trans. Electron Device **57**, 5 (2010) (in press).
- 4) K.Tsugawa, H.Noda, K.Hirose, H.Kawarada "Schottky barrier heights, carrier density, and negative electron affinity of hydrogen-terminated diamond" Phys Rev B **81**, 1, 045303/1-11 (2010).
- 5) A.Kawano, H.Ishiwata, S.Iriyama, R.Okada, T.Yamaguchi, Y.Takano, and H.Kawarada, "Superconductor-to-insulator transition in boron-doped diamond" Phys Rev B **81**, (2010) (in press)..

ホームページ等

<http://www.kawarada-lab.com/>