

研究種目：基盤研究（S）
 研究期間：2007～2011
 課題番号：19106006
 研究課題名（和文） 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
 研究課題名（英文） Development of High Power and Millimeter-long Wave
 Diamond Transistors Using Two Dimensional Hole Gas
 研究代表者
 川原田 洋（KAWARADA HIROSHI）
 早稲田大学・理工学術院・教授
 研究者番号：90161380

研究代表者の専門分野：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. 研究計画の概要

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。

2. 研究の進捗状況

- (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4,6,10, 学会2)

- (2) (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。(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。(論文4,6,10, 学会2)

- (3) 遮断周波数の向上
 (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30GHzで止まっていた遮断周波数が、(110)面で45GHzまで上昇した。ダイヤモンドMOSFETでは最高値である。(論文10, 学会2)
- (4) 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(~3nm)TiC形成を行い、 10^{-7}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。(論文2)

- (5) 水素終端表面のショットキー障壁形成機構の解明

各種金属でショットキー障壁の精密測定を初めて実施した。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5)

- (6) 高濃度ボロンドープ層での超伝導を利用したSNS型ジョセフソン接合

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。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。
(論文1,3)

3. 現在までの達成度

おおむね順調に進展している。

理由：最大ドレイン電流密度、相互コンダクタンス等、既に目標値を超えた結果があり、これに基づく高周波特性において新たな進展が期待される。また、高い高周波応答が期待されるジョセフソン素子が動作し、超伝導トランジスタ実現に近づいた。

4. 今後の研究の推進方策

(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 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。

(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 T₀9K 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。

5. 代表的な研究成果

〔雑誌論文〕(計 30 件のうち 10 件を記載)すべて査読有

- 1) 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).
- 2) Y. Jingu, K. Hirama, H. Kawarada, "Ultrashallow TiC source/drain contacts in diamond MOSFETs formed by hydrogenation-last approach" *IEEE Trans. Electron Device* **57**, 5 (2010) (in press).
- 3) M. Watanabe, A. Kawano, S. Kitagoh, T. Yamaguchi, Y. Takano, H. Kawarada "Stacked SNS Josephson junction with heavily B-doped CVD diamond superconducting thin film", *Physica C* (2010) (in press).
- 4) K. Hirama, K. Tsuge, S. Sato, T. Tsuno, Y. Jingu, S. Yamauchi, H. Kawarada "High-performance P-channel diamond metal-oxide-semiconductor field-effect transistors on H-terminated (111) surface", *Appl. Phys. Express* **3**, 044001/1-3 (2010).
- 5) 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).
- 6) K. Hirama, H. Takayanagi, S. Yamauchi, J. H. Yang, H. Umezawa, H. Kawarada "Channel mobility evaluation for diamond MOSFETs using

gate-to-channel capacitance measurement", *Diam. Relat. Mater.*, **17**, 7-10, 1256-1258 (2008).

7) 川原田洋 "電解質溶液ゲートFETを利用したDNAセンサー" *応用物理* **77**,10, 1229-1234 (2008).

8) S. Kuga, J. H. Yang, H. Takahashi, K. Hirama, T. Iwasaki, H. Kawarada "Detection of mismatched DNA on partially negatively charged diamond surface by optical and potentiometric methods", *J. Am. Chem. Soc.*, **130**, 13251-13263 (2008).

9) J. H. Yang, S. Kuga, K. S. Song, H. Kawarada "Characterization of hybridization on diamond solution-gate field-effect transistors for detecting single mismatched oligonucleotides", *Appl. Phys. Express*, **1**, 11801, (2008).

10) K. Hirama, H. Takayanagi, S. Yamauchi, J. H. Yang, H. Umezawa, H. Kawarada "Spontaneous polarization model for surface orientation dependence of diamond hole accumulation layer and its transistor performance", *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 11, 112107/1-3 (2008)

〔学会発表〕計 89 件うち著名会議 2 件記載)

- 1) S. Kuga, S. Tajima, J. H. Yang, K. Hirama, H. Kawarada "Precise detection of singly mismatched DNA with functionalized diamond electrolyte solution gate FET.", *IEEE IEDM 2008 (International Electron Devices Meeting)*, San Francisco, U.S.A., December 2008 p.483-486.
- 2) K. Hirama, H. Takayanagi, S. Yamauchi, Y. Jingu, H. Umezawa, H. Kawarada, "High-performance p-channel diamond MOSFETs with alumina gate insulator", *2007 IEEE IEDM (International Electron Devices Meeting)*, Washington DC, U. S. A., December 2007 pp873-876.

〔図書〕(計 3 件の 1 件記載)

- 1) H. Kawarada 4.1.3 Diamond p.243- 248 (2007 in *Wide Bandgap Semiconductors*, edited by K.Takahashi, A.Yoshikawa, A.Sandhu (Springer 2007)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 3 件うち 1 件を掲載)

名称：ダイヤモンド薄膜と電界効果トランジスタ

発明者：川原田洋、嘉数誠

権利者：早稲田大学 N T T

種類：特許

番号：2009-173053

出願年月日：2009 年 7 月 24 日

国内外の別：国内