

ダイヤモンド伝導制御による高周波・高出力トランジスタの開発 (042103024)

Development of RF high power diamond transistors
with controlled diamond surface conductivity.

研究代表者

宋 光燮 早稲田大学理工学部
Kwangsoup Song, Waseda university

研究分担者

梅沢 仁† 平間 一行††

Hitoshi Umezawa† Kazuyuki Hiramata††

† 独立行政法人・産業技術総合研究所 ダイヤモンドセンター †† 早稲田大学理工学部

† Advanced industrial science and technology (AIST) †† Waseda university

研究期間 平成 16 年度～平成 18 年度

本研究開発の概要

第 4 世代携帯電話では、基地局用ハイパワー高周波トランジスタによる高精度パワーアンプは、世界の単体市場で年間数千億円となり、数兆円におよぶ市場全体の成否を握る最重要デバイスである。ハイパワーアンプなどの高周波高出力用途において近い将来 Si や GaAs は、素子の微細化と破壊電界の関係から出力電力密度に限界(2W/mm 程度)を迎えるため、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である。とりわけダイヤモンドには、物質中最大の熱伝導率、高い破壊電界、高い移動度などの物性的優位性があり、未来の半導体材料として期待され、研究も盛んになっている。本プロジェクトでは低抵抗オーミック層の形成などの高周波デバイス、パワーデバイスに不可欠な技術の確立および、高周波高出力ダイヤモンド FET の開発・特性改善を行い、RF 特性・パワー特性において一部 SiC や GaAs を上回る優れた結果を得ることが出来た。

Abstract

In this project, we have improved diamond deposition and device processes and device characterization method for RF power diamond MISFETs. Diamond MISFETs with aluminum oxide gate insulator showed the highest cut-off frequency of 30GHz for diamond FETs and the cut-off frequency is higher than that of SiC MESFET. RF power characteristics of diamond MISFETs were evaluated for the first time and the saturated power density of 2.14W/mm was obtained. The power density of 2.14W/mm has exceeded the reported maximum power densities of GaAs FETs and Si LDMOSFETs.

1. まえがき

将来の移動体通信技術の発展には高出力高周波送信用 FET が不可欠である。Si や GaAs では、数～数十 GHz 以上の周波数において、素子の微細化と破壊電界の関係より出力密度に限界を迎える。これに対して、SiC、ダイヤモンド、GaN などのワイドバンドギャップ半導体が検討されているが、ダイヤモンドは他のワイドバンドギャップ半導体と比べてブレイクダウン電界が数倍高く、熱伝導率は SiC の 4 倍、GaN の 1.5 倍であり、SiC や GaN で問題となる反位相境界やポリタイプがない。さらに単元素結晶であるためストイキオメトリックな問題が無いため、結晶成長の完成度が将来的に最も高くなると予想される。

本研究では、ダイヤモンド表面チャネル型 FET を基礎に、高品質エピタキシャル成長およびダイヤモンドの表面近傍の導電性をナノレベル改質技術によって制御し、それに伴う FET 特性の向上を行い、高耐圧、高周波でのデバイス動作を検討することを目的としている。

2. 研究内容及び成果

2.1 ダイヤモンドデバイスプロセス開発

ダイヤモンド電子デバイスの特性改善にはダイヤモンド独自のプロセス開発が必要不可欠である。特に電界効果トランジスタにおいては寄生素子成分の除去や高品質ゲート絶縁膜の形成などの要素技術が必要不可欠となる。そこで、以下の技術の開発を行った。

(1) 寄生抵抗成分の除去を目的としたダイヤモンド上へ 500 Ω/sq. 以下の金属的伝導領域の形成

本研究では FIB による表面改質と、CVD による高濃度ボロンドープ層の選択エピタキシャル成長技術を確立し、この二つの方法で 500 Ω/sq. 以下の金属的伝導領域の形成に成功した。特に CVD 法では数値目標を大きく超える 10 Ω/sq. 以下・比抵抗 $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 以下の超低抵抗領域が得られた。この値は高濃度にドープしたシリコンとほぼ同等であり、これまでに報告されている p 型ダイヤモンドの中で最も低い値である。さらに我々は CVD で作製した高濃度ボロンドープダイヤモンドが超伝導転移することを世界で初めて報告し、ダイヤモンドの低温環境下での応用の可能性を切り開いた。

(2) ダイヤモンド FET に適した高品質ゲート絶縁膜形成技術の確立

Al_2O_3 はダイヤモンドの価電子帯に対して 4eV 以上のバンドオフセットを持っている。本研究では蒸着した 3nm 程度の薄いアルミニウムを大気中で酸化させることで高品質の Al_2O_3 ゲート絶縁膜の形成に成功し、ダイヤモンド MISFET では最も低いゲートリーク電流 10^{-6}A/mm^2 を達成した。

(3) 表面処理によるキャリア濃度制御技術の確立

高周波・高出力スイッチングデバイスでは待機電力を極力減らすためにノーマリーオフタイプが求められている。我々は本プロジェクトにおいて水素終端ダイヤモンド表

面の酸素被覆率をオゾン処理によって変えることにより、ダイヤモンド MISFET の閾値制御およびノーマリーオフデバイスの作製に成功した。ダイヤモンドデバイスの閾値制御技術の報告は世界でこれが初めてである。

(4) T ゲート構造作製技術の確立

EB リソグラフィの三層レジストプロセスを利用することで T ゲート構造の作製に成功した。T ゲート構造採用以前の $f_{\max}/f_T$ 比はほぼ 1 であったのに対して、T ゲート構造を用いたデバイスでは $f_{\max}/f_T$ 比は 4 以上となり、電力利得が大きく改善していることが明らかとなった。

2.2 高品質ダイヤモンド合成

移動度・キャリア速度の改善を目的として高品質ダイヤモンドの合成および、真性トランジスタの高周波化、高出力化に必要なキャリア速度の改善を行った。具体的には次の通りである。

(1) 水素終端構造における移動度と膜質の相関調査

CVD 基板の残留ボロン濃度およびその移動度と表面伝導層のキャリア密度・移動度の関係を調査した結果、移動度が高い CVD ダイヤモンドほど、表面伝導層の移動度も高くなることがわかった。この結果を利用し、表面伝導層のホール移動度は最高で $225\text{cm}^2/\text{Vsec}$ と、目標であった $150\text{cm}^2/\text{Vsec}$ を大きく上回る結果が得られた。

(2) 平均面粗さ (Ra) : 5nm 以下の CVD ダイヤモンドの合成

CVD プロセスにおけるメタン濃度と基板温度をパラメータに、ダイヤモンド基板がより平坦にホモエピタキシャル成長する条件を調査した結果、メタン濃度を 1% から 0.1%、基板温度を 750°C から 500°C にすることで Ra:3nm 以下の平坦なダイヤモンド表面が得られることが明らかとなった。

(3) 正孔におけるキャリア速度 $0.5 \times 10^7\text{cm/s}$ を実現

従来の CaF_2 をゲート絶縁膜に用いていたダイヤモンド MISFET ではキャリア速度が $0.3 \times 10^7\text{cm/sec}$ であったのに対して、本プロジェクトにおいて開発した高移動度単結晶ダイヤモンド基板と自然酸化アルミナ絶縁膜を利用することによって $0.6 \times 10^7\text{cm/sec}$ と約 2 倍程度に改善し、目標値であるキャリア速度 $0.5 \times 10^7\text{cm/s}$ をクリアした。また、単結晶上に作製されたダイヤモンド FET では世界最高であるカットオフ周波数 30GHz を達成した (図 1)。

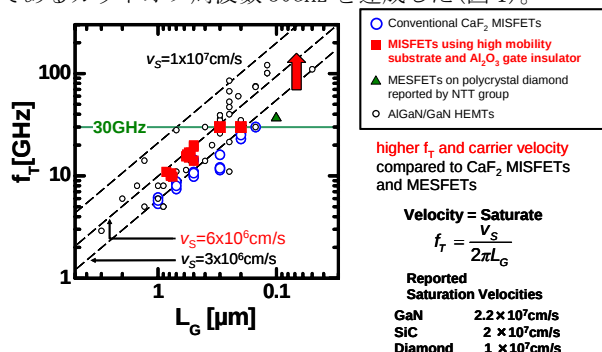


図 1 カットオフ周波数とゲート長の関係

2.3 デバイス設計と DC・RF 特性評価

(1) RF ダイヤモンド FET における De-embedding 手法の確立

本研究では RF 特性を測定した実デバイスをオープン化、ショート化する De-embedding 処理方法を確立した。De-embedding により得られた真性トランジスタの f_T と $f_{\max}$ はそれぞれ 22GHz, 23GHz から 26GHz, 36GHz へ上昇し、小信号等価回路フィッティングと合わせて真性トランジ

スタの解析に成功した。

(2) 1GHz のロードプル測定による RF パワー特性の評価

ダイヤモンド MISFET では世界で初めてロードプル測定によって 1GHz の入出力電力特性を評価し、出力電力密度: 2.14W/mm 、利得: 10dB、電力付加効率: 44% が得られた。この出力電力密度はダイヤモンド FET では NTT から報告されている MESFET のものと同程度で、これまで報告されている GaAs FET、Si LDMOSFET の最高値よりも高い。この結果はダイヤモンド FET が高周波高出力デバイスとして高いポテンシャルを有していることを示している (図 2)。

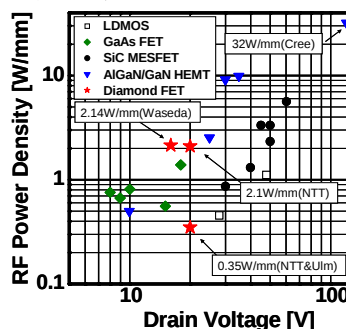


図 2 出力電力とドレイン電圧の関係

3. むすび

ダイヤモンドデバイスの高性能化のためのプロセス技術開発および高品質ダイヤモンドの合成を行った。本研究で確立した技術を利用して作製したダイヤモンド MISFET において、単結晶上に作製されたダイヤモンド FET では世界最高のカットオフ周波数 30GHz が得られた。またダイヤモンド MISFET では世界で初めてロードプル測定による 1GHz での飽和出力電力、ゲイン、電力付加効率の評価を行い、GaAs FET、Si LDMOSFET を上回る 2.14W/mm が得られた。ダイヤモンド FET の高周波高出力特性はすでに他の半導体材料と同程度のレベルにまで達しており、改めてダイヤモンド FET の可能性および物質中最大の熱伝導率を有するダイヤモンドで高出力高周波数 FET を作成する意義を確認した。

【誌上発表リスト】

- [1] H. Umezawa et al. "RF diamond transistors: Current status and future prospects", Jpn. J. Appl. Phys., 44, 11, 7789-7794 (2005)
- [2] K. Hiramata et al. "RF diamond MISFETs using surface accumulation layer" IEEE Power Semiconductor Devices and ICs, Proceedings (2006)
- [3] K. Hiramata et al. "Characterization of diamond metal-insulator-semiconductor field-effect transistors with aluminum oxide gate insulator", Appl. Phys. Lett. 88, 112117 (2006)

【受賞リスト】

- [1] K. Hiramata et al. 第 25 回電子材料シンポジウム EMS 賞 "RF power evaluation of diamond MISFETs using load pull measurement" (2006 年 7 月)

【報道発表リスト】

- [1] "ダイヤモンド超伝導状態に (物材機構と早大確認)" 朝日新聞 (朝刊) 2004 年 8 月 5 日
- [2] "気相成長ダイヤモンド薄膜ホウ素添加で超電導に" 日刊工業新聞 (朝刊) 2004 年 8 月 5 日
- [3] "ダイヤで超電導" 毎日新聞 (朝刊) 2004 年 8 月 5 日

【本研究開発課題を掲載したホームページ】

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