

ダイヤモンド・高周波電力デバイスの開発とマイクロ波・ミリ波帯電力増幅器への応用 (061403014)

Diamond RF power amplifiers in micro- and millimeter wave range

研究代表者

嘉数 誠 NTT 物性科学基礎研究所
Makoto Kasu NTT Basic Research Laboratories

研究分担者

植田 研二[†] 小林 康之[†] 中川 匡夫^{††}
Kenji Ueda[†] Yasuyuki Kobayashi[†] Kunio Nakagawa^{††}
[†]NTT 物性科学基礎研究所 ^{††}NTT 未来ねっと研究所
[†]NTT Basic Research Laboratories ^{††}NTT Network Innovation Laboratories

研究期間 平成 18 年度～平成 22 年度

概要

次世代のマイクロ波・ミリ波帯の超高周波の情報通信システムには、超高周波、大出力電力で動作可能な電力増幅器が不可欠である。その電力増幅器の実現に向けて、究極の半導体の物性を有するダイヤモンド半導体が電子デバイスとして機能するために必要な基盤技術を確認した。具体的には、これまで可能性すら見いだされていなかったダイヤモンド半導体の新規ドーピング技術と新規デバイス構造を実現し、実用可能レベルの信頼性と高周波・電力特性を持つダイヤモンド電子デバイスを作製した。次にそのダイヤモンド電子デバイスをマイクロ波・ミリ波帯電力増幅器として動作させ、超高周波・情報通信システムの応用に向けた設計指針を得た。

Abstract

The next generation of information communications systems in the microwave and millimeter wave range will require RF power amplifiers that operate at much higher frequencies and higher output powers. In order to realize such RF power amplifiers, we have established technologies for diamond semiconductor, which possesses ultimate electronic and thermal properties. We have achieved diamond's novel impurity doping technologies and device structures and have fabricated diamond transistors that exhibit reliability and RF power characteristics practicable for the systems. We have also demonstrated diamond transistors as RF power amplifiers for the microwave and millimeter range and have made their design rule for the next generation of information communications systems.

1. まえがき

ダイヤモンドは半導体の中で最高の絶縁破壊電界と熱伝導率、高いキャリア移動度を有する。その物性の特徴を生かしたダイヤモンド高周波電力デバイスを実現し、現在でも進行波管 (TWT) が使われている超高周波帯の放送局、準ミリ波帯の通信衛星、ミリ波帯のレーダーの送信管を置き換え、また準マイクロ波～マイクロ波帯の無線基地局などの化合物半導体電力増幅器を置き換えて、電力効率、信頼性、出力電力を向上させることを本研究課題の目的とした。そのために、ダイヤモンド・デバイスの基盤技術、すなわちダイヤモンド半導体の電気伝導性制御 (不純物ドーピング) と新規デバイス構造の研究開発を行った。

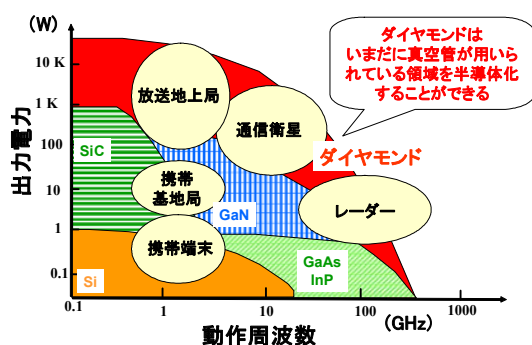


図 1 情報通信システムで期待されるダイヤモンド高周波電力増幅器の性能

2. 研究内容及び成果

本研究課題では、ダイヤモンド半導体の電気伝導性制御として、水素終端表面の機構の解明と高機構化と新規ドーパント元素の探索、また新規デバイス構造として、ダイヤモンド・窒化物ヘテロ接合構造の研究開発を行ったが、その主要な成果について述べる。

【1】水素終端ダイヤモンド FET

水素終端化されたダイヤモンド表面には正孔が生成し p 型伝導性を示すことは 30 年前より知られており、それを用いたデバイスの報告例は数少なくない。しかし水素終端は短寿命で、機構も明らかでなかった。本研究課題で、我々は正孔生成に寄与する表面吸着物質が NO_2 と同定し、高濃度の NO_2 吸着を行うことにより、従来より 20 倍も高い正孔濃度 ($2 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$) が得られるようになり、FET の最大ドレイン電流値を約 1.5 倍に増加させ、最大発振周波数 (f_{MAX}) は 1.7 倍に増加させた (APEX2009)。またダイヤモンド結晶の更なる高品質化と電子ビーム露光技術を改良した結果、電流利得遮断周波数 (f_T) を 45GHz に、電力利得遮断周波数 (f_{MAX}) を 120GHz に世界最高値を更新した (IEEE EDL2006)。

つぎに FET の入出力側をインピーダンス整合する回路を設計し、ダイヤモンド・デバイス実装技術の開発を行った。ダイヤモンド高周波電力増幅器を試作し、1GHz で世界最高値 2.55W/mm の出力電力密度を得る成果を上げることができた (図 1)。

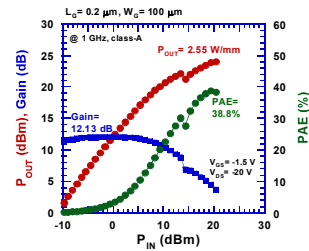
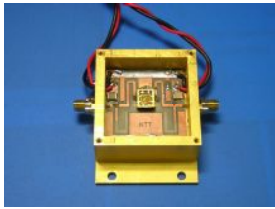


図2 試作したダイヤモンド高周波電力増幅器と特性

【2】新規ドーピング技術

イオン注入ダイヤモンドはドーピング効率が低く実用的ではなかったが、我々は高温高压アニールでイオン注入時に生じた欠陥を回復させる技術を発案し、効率を1桁向上させた。本手法を用いてB注入ダイヤモンドFETを作製し、耐電圧 (V_B) は530V (絶縁電界 1.1MV/cm) に達した (図3)。また本研究課題で製作した高温デバイス特性評価装置を用いて高温測定を行い、500℃での高温動作を確認した (JJAP2010)。

つぎに、本手法を用いて不純物ドーピング元素の探索を行い、砒素がドナーになることを見出し、N型ダイヤモンドを実現した (JJAP2011)。

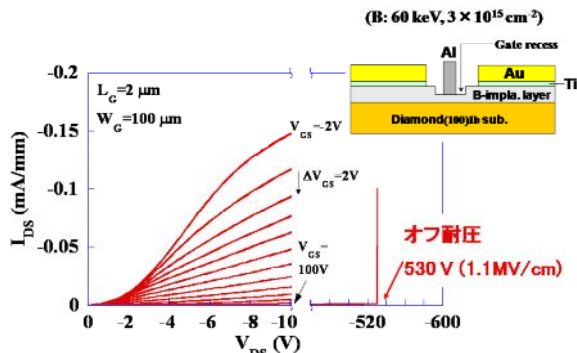


図3 イオン注入ダイヤモンドFETと絶縁耐圧

【3】新規デバイス構造 (ヘテロ構造) の実現

ダイヤモンドと窒化物半導体をもし組み合わせることができれば、様々なヘテロ接合デバイスに発展できるが、両者は結晶構造が異なるという原理的な問題があった。我々は、ダイヤモンドの特定の面方位を用いればその問題が解決すると考え、ダイヤモンド上窒化物ヘテロ成長を実現した。本方法でP型ダイヤモンド/N型窒化アルミニウム発光ダイオードを作製し、波長 235nm の遠紫外の電流注入発光に成功した (APL2011)。

つぎに本方法を用いダイヤモンド上に AlGaIn/GaN ヘテロ接合トランジスタ (HEMT) を作製し、ダイヤモンドの極めて高い熱放出力による世界最高水準の 4.1Kmm/W のデバイス熱伝導性を実現した (図4)。この成果は、AlGaIn/GaN パワー HEMT の高周波出力電力を飛躍的に向上させるものである (APL2011b)。

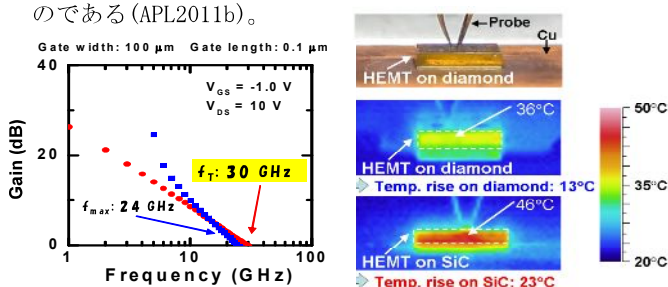


図4 ダイヤモンド上窒化物HEMTの高周波と熱特性

3. むすび

本研究課題ではダイヤモンド・デバイスの新規ドーピング技術および新規デバイス構造の基盤技術を開発する成果が得られた。今後これらの技術を、さらに発展させ、特に信頼性を上げる技術を開発することにより、究極のダイヤモンド高周波電力増幅器の実用化とマイクロ波帯、ミリ波帯情報通信の大容量化はますます加速すると期待される。

【誌上発表リスト】

- [1] K. Ueda, M. Kasu, Y. Yamauchi, T. Makimoto, M. Schwitters, D. J. Twitchen, G. A. Scarsbrook, and S. E. Coe, "Diamond FET using high-quality polycrystalline diamond with f_r of 45 GHz and f_{max} of 120 GHz", IEEE Electron Device Letters Vol.27 No.7 pp570-572 (2006 年 7 月)
- [2] M. Kasu, K. Ueda, Y. Yamauchi, A. Tallaie, and T. Makimoto, "Diamond-based RF power transistors: Fundamentals and applications", Diamond and Related Materials Vol.16 No.4-7 pp1010-1015 (2007 年 1 月 4 日)
- [3] K. Hirama, Y. Taniyasu, M. Kasu, "AlGaIn/GaN HEMT grown on single-crystal (111) diamond substrate", Appl. Phys. Lett. Vol.98 No.16 pp162112 (2011 年 4 月 22 日)

【申請特許リスト】

- [1] 植田研二、嘉数誠、ダイヤモンド半導体および作製方法、日本、特願 2009-033277 申請 2009 年 2 月 16 日
- [2] 嘉数誠、n 型ダイヤモンド半導体およびその製造方法、日本、特願 2010-033482 申請 2010 年 2 月 18 日
- [3] 平間一行、谷保芳孝、嘉数誠、半導体積層構造および電界効果トランジスタ、日本、特願 2010-186652 申請 2010 年 8 月 23 日

【登録特許リスト】

- [1] M. Kasu, T. Makimoto, K. Ueda, Y. Yamauchi, Diamond semiconductor device and its fabrication method、中国、2006 年、登録 2009 年、登録番号 ZL200680001082.5
- [2] M. Kasu, T. Makimoto, K. Ueda, Y. Yamauchi, Diamond semiconductor device and its fabrication method、韓国、2006 年、登録 2009 年、登録番号 00913401

【報道発表リスト】

- [1] "ダイヤモンド製トランジスタ 最速 120 ギガヘルツで動作 NTT など 車レーダー向け"、日経産業新聞、2008 年 1 月 7 日
- [2] "研究派 嘉数 誠氏 ダイヤモンド半導体 究極の技術で環境にも優しい"、電経新聞、2008 年 6 月 23 日
- [3] "ダイヤで『究極の半導体』、実用化へ"原石"磨く NTT、次世代の通信支える"、日経産業新聞、2009 年 7 月 23 日

【受賞リスト】

- [1] 嘉数誠、日本結晶成長学会 論文賞、"有機金属気相成長過程の研究と高効率窒化アルミニウム素子への応用"、2010 年 8 月 8 日
- [2] 平間一行、第 24 回ダイヤモンドシンポジウム 最優秀ポスター賞、"単結晶 n 型 AlN/p 型ダイヤモンドヘテロ接合ダイオード"、2010 年 11 月 18 日

【本研究開発課題を掲載したホームページ】

<http://www.brl.ntt.co.jp/people/kueda/scope/indexf.htm>