

ダイヤモンド高周波電力デバイス

通信衛星、携帯基地局などの情報通信システムの高周波化、高出力化とエネルギーの高効率化につながる、ダイヤモンド半導体と高周波電力デバイスの研究の状況と可能性を解説します。ダイヤモンド半導体は、高周波電力デバイスとして最高の物理的な性質を持っています。NTTでは最高品質ダイヤモンド結晶を育成し、それをを用いてトランジスタを作製し、世界最高の高周波電力特性を達成しました。

かすう まこと
嘉数 誠

NTT物性科学基礎研究所

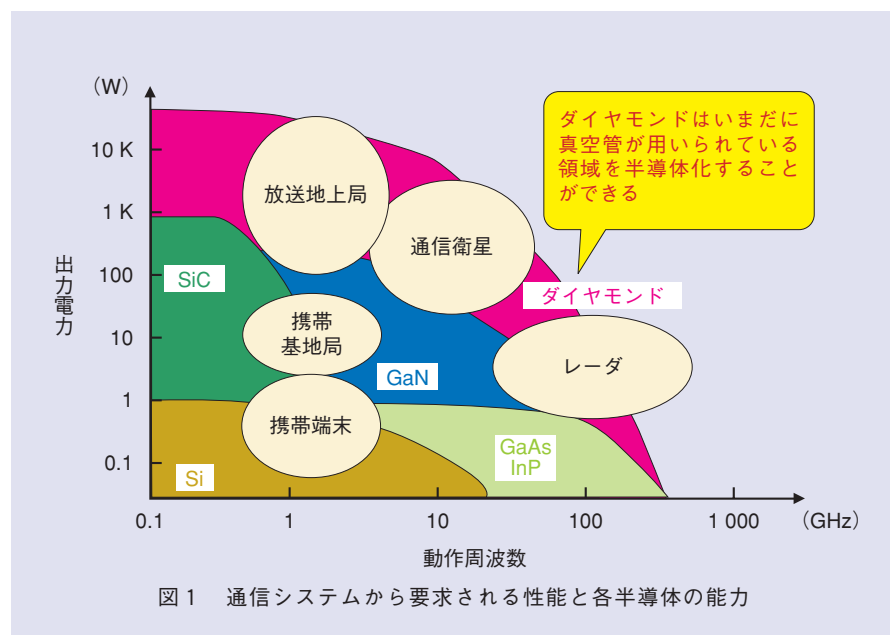
高周波化、高出力化、高性能化を可能にするダイヤモンド

情報通信のブロードバンド（高速大容量）化が急速に進み、情報通信システムを支える半導体デバイスの高周波化・高出力化がますます求められています。一方で、環境・省エネルギーの観点から、半導体デバイスのエネルギー高効率化も同時に求められるようになりました。これらの要件を同時に満たす半導体がダイヤモンドです。通信システムの各アプリケーションから要

求される動作周波数、出力電力、各半導体デバイスの性能を図1に示します。携帯端末はおよそ1 GHzで1 W程度の出力電力が必要です。携帯端末の高周波電力増幅器は、シリコン（Si）やガリウムヒ素（GaAs）デバイスが用いられています。携帯基地局では、GaAs電力デバイスが使われていますが、最近研究が盛んな窒化ガリウム（GaN）はこの領域をターゲットにしています。GaNと同様に研究が盛んなシリコンカーバイド（SiC）は大電力デバイスに向いていますが、動作周

波数は1 GHz程度が上限とされます。一方、放送地上局、通信衛星、レーダの動作周波数、出力電力は、現在の半導体の性能を超えているので、進行波管（TWT）と呼ばれる真空管が現在でも使われており、半導体化による信頼性の向上、高効率化、小型化が求められています。ダイヤモンドデバイスが実用化できれば、放送地上局、通信衛星、レーダなどの応用分野を半導体化でき、高周波、高出力性能を飛躍的に向上させることができます。

ダイヤモンドデバイスが電力デバイスの観点から「究極の半導体」と呼ばれる理由は、ダイヤモンドの半導体物性に由来します。表に示すように、ダイヤモンドはSiと比較すると、約5倍も広い禁制帯幅^{*1}を持っています。そのためダイヤモンドは、絶縁破壊電界がSiより30倍も高く、動作電圧をそれだけ高く設定することができます。電力は電圧と電流の積なので、それだけ



*1 禁制帯幅：バンドギャップとも呼びます。半導体などの結晶で、電子が存在できないエネルギー帯をいいます。禁制帯幅が広いほど、純粋な半導体での電子濃度が倍々低下し、高温や高電圧に耐える性質が出てきます。ダイヤモンドは、禁制帯幅の非常に広い半導体（一般にワイドギャップ半導体とも呼ばれる）なので、高温、高電圧に耐えることができます。

高い電力を出力できるのです。また、ダイヤモンドの移動度^{*2}はSiの2倍以上あるため、動作時のデバイス抵抗が低く、消費電力を低減させることができます。よく知られているように、ダイヤモンドは熱伝導率が金属の銅よりも高く、材料最大で、放熱性に極めて優れています。そのため動作時のデバイス温度があまり上がらず、それだけ高い電力を出力することができます。さらに、ダイヤモンドは飽和ドリフト速度^{*3}がほかの半導体に遜色がなく、高周波特性も優れています。以上を総合してみると、ダイヤモンドは実用化できると、最高の高効率で高周波・高出力半導体デバイスが実現することが分かります。

ダイヤモンドFETの作製

このようにダイヤモンドは高周波、高出力、高効率に優れていますが、ダ

イヤモンド結晶は非常に硬く、半導体デバイスレベルの高純度で高品質結晶を育成することは容易ではありませんでした。しかしNTTでは、長年の半導体結晶成長技術の経験や知識を基に、結晶欠陥が生成する機構を解明し、欠陥密度を1桁低減し、窒素などの不純物濃度を低減させ、最高品質ダイヤモンド結晶を育成する技術を確立しました⁽¹⁾。

次に、ダイヤモンド・デバイスの作製の研究に移りました。デバイスには、アクセプタやドナーになる不純物を微量に添加（ドーピング）し、p型やn型半導体^{*4}を得る必要があります。

NTTでは半導体産業で広く使われるイオン注入法を用いたダイヤモンドへのドーピング効率を1桁向上させる方法を開発しました。本稿では、水素終端というp型ドーピング法を用いた例について述べます。水素終端ダイヤモ

ンド電界効果型トランジスタ（FET）の断面構造と全体写真を図2に示します。最高品質ダイヤモンド結晶表面上にFETを作製しています。ダイヤモンド表面に水素が吸着することで、正孔チャンネルは表面から数nmの位置に2次元的に形成されています。ソースとドレイン電極には金（Au）を用い、水素終端ダイヤモンドに直接蒸着しました。ゲート電極の長さは短いほど、ゲート直下を正孔が走行する時間が短くなり、トランジスタを高速動作させることができますが、NTTではサブミクロンのゲート電極を形成するために、電子ビームリソグラフィを用いました。

ダイヤモンドFETの特性

ゲート長（ L_G ） $0.1\ \mu\text{m}$ 、ゲート幅（ W_G ） $50\ \mu\text{m}$ のダイヤモンドFETのDC出力特性を図3に示します。ドレイン電流密度の最大値は $550\ \text{mA/mm}$ に達し、実用的に遜色のない特性が得られました。

表 ダイヤモンドと他の半導体の物性値

| 材料 | 禁制帯幅 (eV) | 絶縁破壊電界 (MV/cm) | 飽和ドリフト速度 ($\times 10^7\ \text{cm/s}$) | 移動度 (cm^2/Vs) | 比誘電率 | 熱伝導率 (W/cmK) |
|--------|-----------|----------------|---|---------------------------------|------|-------------------------|
| ダイヤモンド | 5.47 | >10 | 1.1 (正孔) | ~3 800 (正孔) | 5.7 | 22 |
| SiC | 3.27 | 3.0 | 2.0 (電子) | ~1 000 | 9.7 | 4.9 |
| GaN | 3.4 | 2.5 | 2.5 (電子) | ~2 000 | 8.9 | 1.5 |
| Si | 1.1 | 0.3 | 1.0 (電子) | ~1 400 | 8.9 | 1.5 |

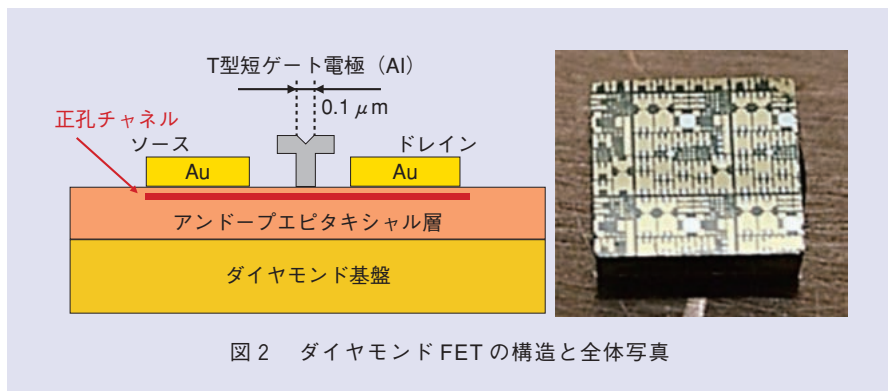


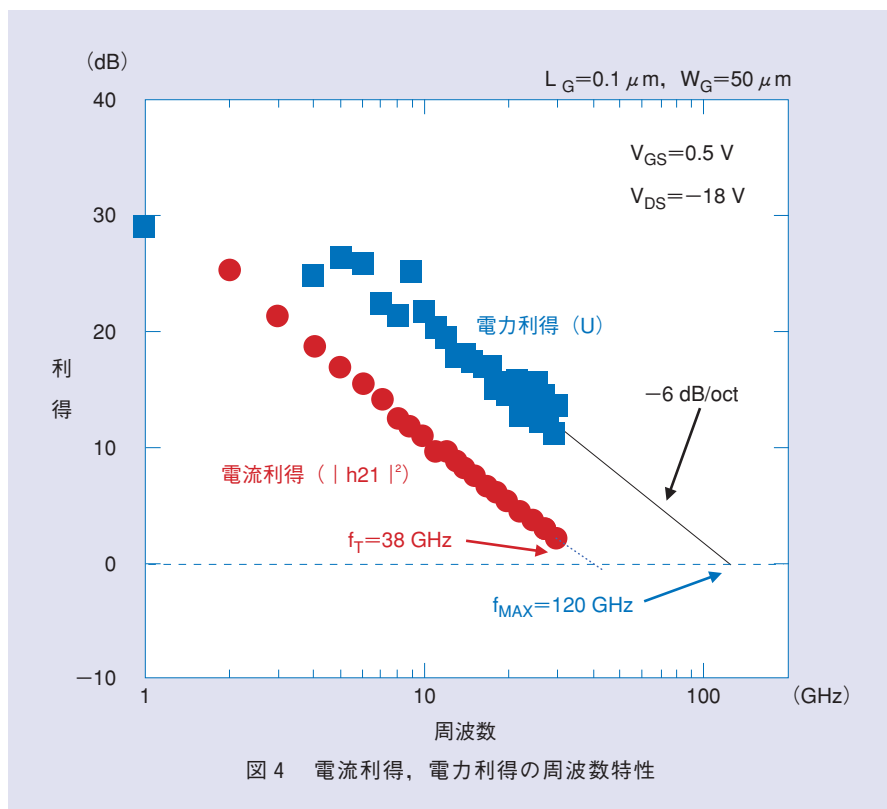
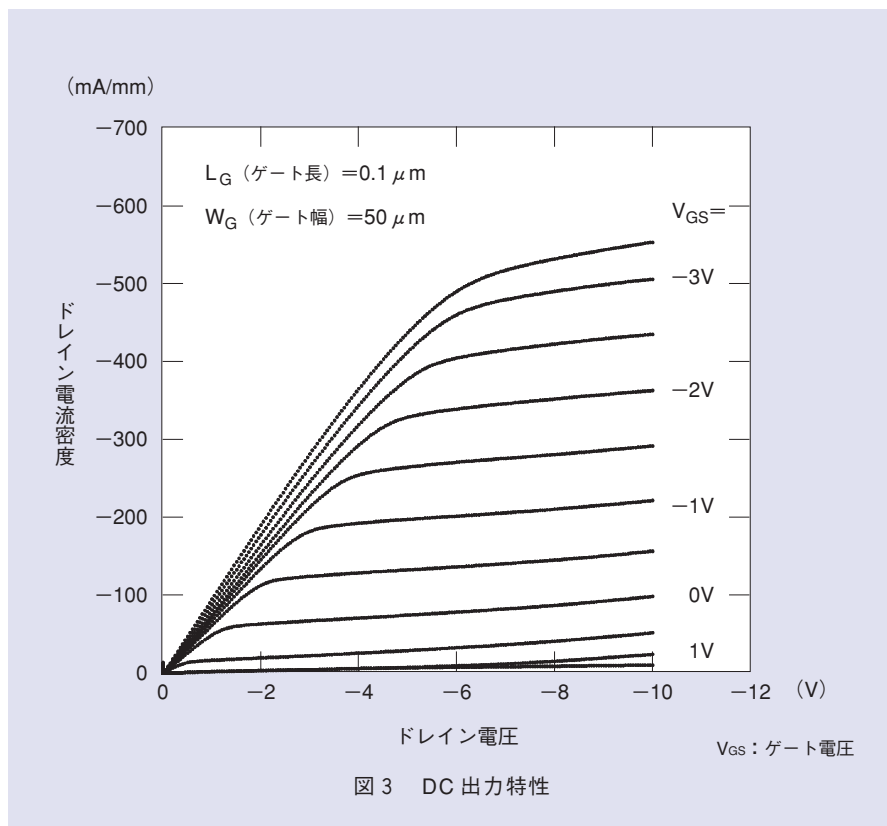
図2 ダイヤモンドFETの構造と全体写真

- *2 移動度：半導体中の電子や正孔といったキャリアは、電界に比例して、速度が高くなっていきますが、その比を移動度と呼びます。半導体の導電度（抵抗率の逆数）は、キャリア濃度とこの移動度の積に比例するので、移動度が高いほど、抵抗が低くなり、消費電力が下がる傾向を示します。
- *3 飽和ドリフト速度：半導体中のキャリアに高い電界を印加すると、電界に関係なく、速度が飽和します。この値を飽和ドリフト速度と呼びます。この値は、トランジスタの高速度性を決定します。
- *4 p型、n型半導体：ダイヤモンドやシリコンは4価の元素ですが、その結晶に微量に3価の元素（例えばホウ素）を添加すると、電子が足りないため、正の電荷を持った正孔（ホール）が生じます。そのような半導体をp型半導体と呼びます。また逆に5価の元素を添加すると、電子が余るため、n型半導体ができます。半導体デバイスは、このような正孔や電子の輸送を電圧で制御して動作させるため、p型、n型半導体にすることは必須です。

図3と同条件のダイヤモンドFETの電流利得、電力利得の周波数特性を図4に示します。電力利得の周波数依存性から120 GHzの電力利得遮断周波数*5（最大発振周波数 f_{MAX} ）が得られました⁽²⁾。このことは、ダイヤモンドFETがミリ波帯（30~300 GHz）でも電力増幅動作が可能であることを示すものです。

ダイヤモンドFET (L_G : $0.1 \mu\text{m}$, W_G : $100 \mu\text{m}$) の測定周波数 1 GHz, A級動作における 1 GHzでの高周波電力特性を図5に示します。2.1 W/mmの最大出力電力密度, 31.8%の電力付加効率, 10.94 dBの最大電力利得という値が得られました⁽³⁾。この周波数での出力電力密度は、実用のGaAs FETの約 1 W/mmのほぼ2倍の値に相当します。このようにダイヤモンドFETは、この周波数帯を用いている携帯基地局等の無線通信システムのGaAsマイクロ波電力増幅器を置き換える可能性があります。

図6は赤外線サーモグラフィによる、電力動作中のデバイス温度上昇の測定結果です。高周波電力動作前（図6(a)）と動作中（図6(b)）を比較すると、全消費電力0.84 Wの動作によってデバイス温度は $0.6 \text{ }^\circ\text{C}$ しか上昇しないことがわかりました。この温度上昇は、GaAs FETの温度上昇値の約50分の1に過ぎません。温度上昇値は物理的に、材料の熱伝導率に反比例するため、GaAsの熱伝導率（0.46



*5 遮断周波数：トランジスタの増幅度は、周波数が高くなるにつれて下がります。増幅度が1となり、全く増幅できなくなる周波数を遮断周波数と呼びます。この遮断周波数が高いほど、トランジスタは高い周波数で使えることがわかります。

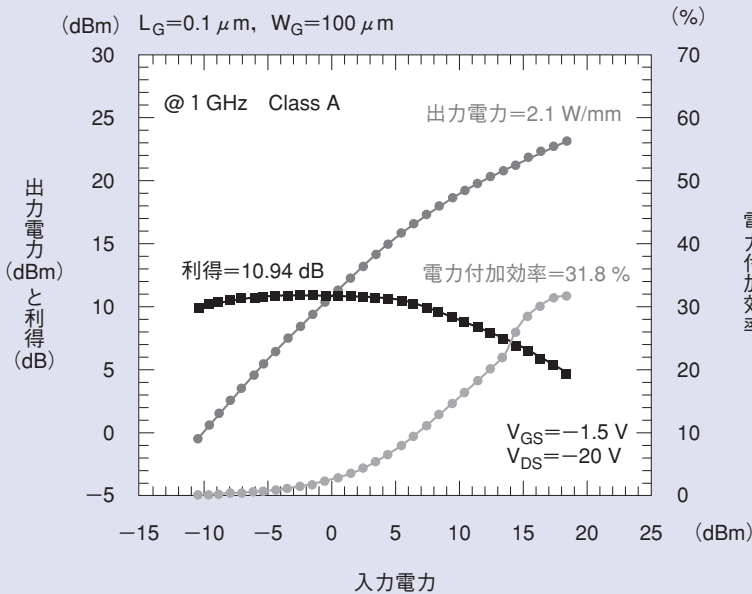


図5 高周波（1 GHz）電圧特性

以外に、NTTでは水素終端のp型ドーピング機構の解明、特性向上や信頼性向上、イオン注入によるドーピング技術などの研究も進めています。半導体デバイスとして必要な基盤技術を確立し、実用化につなげていけるように努めていきます。

■参考文献

- (1) 嘉数：“世界最高の周波数特性を持つダイヤモンド半導体の作製に成功,” NTT技術ジャーナル, Vol.16, No.1, pp.66-69, 2004.
- (2) 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_T of 45 GHz and f_{max} of 120 GHz,” IEEE Electron Device Letters, Vol.27, No.7, pp.570-572, 2006.
- (3) M. Kasu, K. Ueda, H. Ye, Y. Yamauchi, S. Sasaki, and T. Makimoto：“2 W/mm output power density at 1 GHz for diamond FETs,” Electronics Letters, Vol.41, No.22, pp.1249, 2005.

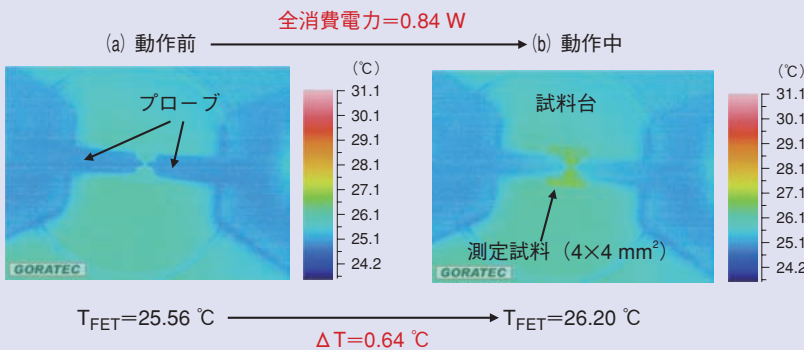


図6 デバイス電力動作時のデバイス温度変化

W/cmK) とダイヤモンドの熱伝導率 (22 W/cmK) の比から、温度上昇値の測定結果を説明することができます。高周波電力デバイス実装設計では放熱性を含む熱マネジメントが極めて重要になりますが、省エネルギーの観点から興味深い結果です。

今後の展開

本稿では、NTTが精力的に取り組んでいるダイヤモンド半導体、デバイス研究の現状について解説しました。ダイヤモンド・デバイスが実用化できれば、情報通信システムの能力を飛躍的に向上させ、省エネルギーにつなげることができます。本稿で述べた内容



嘉数 誠

環境問題、省エネルギーが社会問題と認識されるようになり、ダイヤモンドに注目が集まるようになりました。国内外では、シリコンのようにダイヤモンド・ウエハの大量生産が進んでおり、ダイヤモンドデバイスの研究が急がれます。

◆問い合わせ先

NTT物性科学基礎研究所
 薄膜材料研究グループ
 TEL 046-240-3451
 FAX 046-240-4729
 E-mail kasu@nttbl.jp