

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)

研究代表者

嘉数 誠⁽¹⁾ NTT物性科学基礎研究所

研究分担者

植田 研二^{†(2)} 小林 康之[†] 中川 匡夫^{††}

[†]NTT物性科学基礎研究所 ^{††}NTT未来ねっと研究所

研究期間 平成18年度～平成22年度

現在所属 (1) 佐賀大学大学院工学系研究科

(2) 名古屋大学大学院工学研究科

半導体の物性値と高周波電力デバイス性能

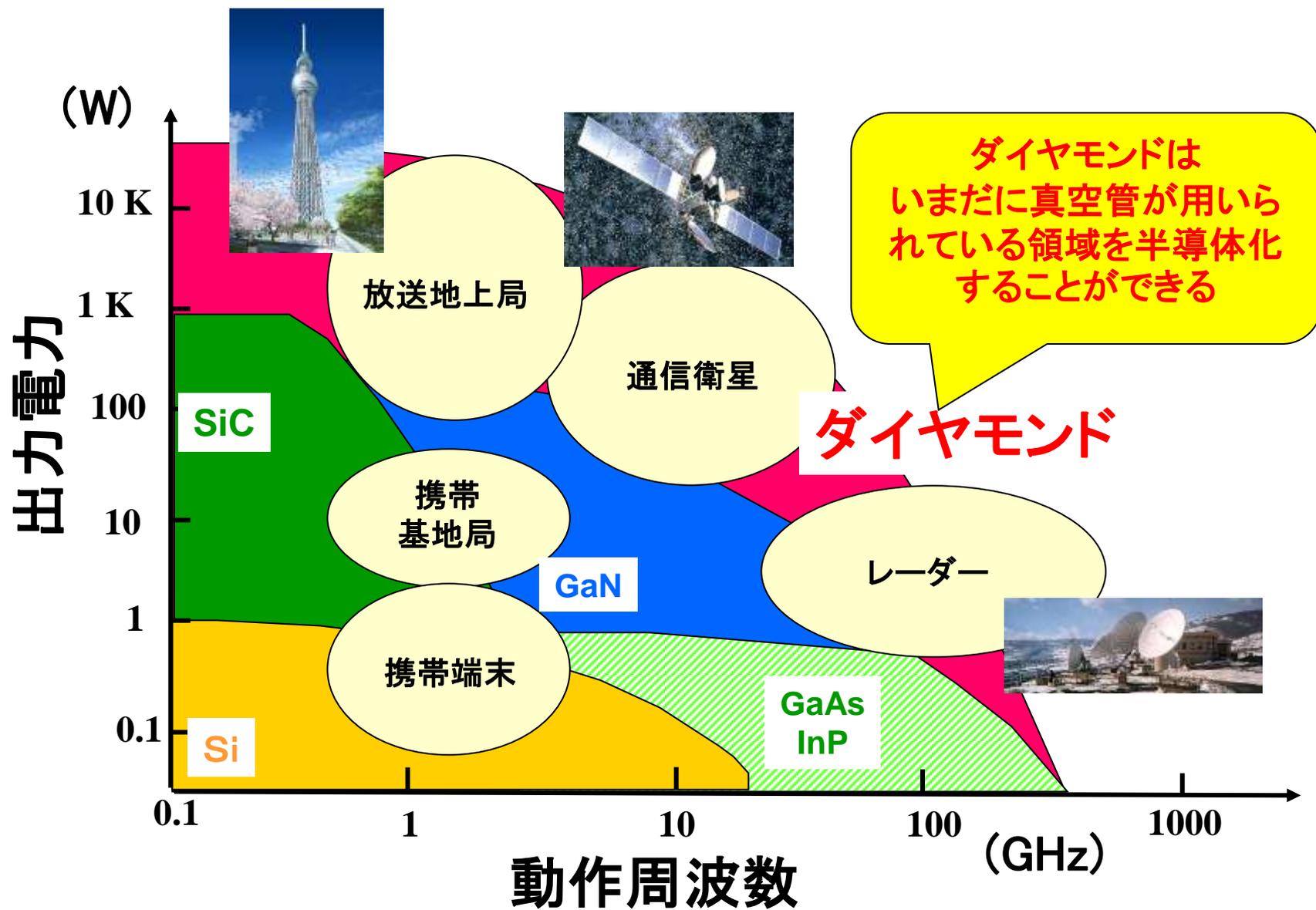
材料	禁制帯幅	絶縁破壊電界	飽和速度	移動度	比誘電率	熱伝導率	性能指数
Material	E_G (eV)	E_{BR} (MV/cm)	v_{sat} ($\times 10^7$ cm/s)	μ (cm^2/Vs)	ϵ_r	λ (W/cmK)	JFOM
Diamond	5.47	>10	1.5 (e) 1.1 (h)	~ 4500 (e) ~ 3800 (h)	5.7	22	1340 (h)
GaN	3.42	3	2.4 (e)	~ 2000 (e)	8.9	1.5	580
SiC	3.26	2.8	2.2 (e)	~ 1000 (e)	9.7	4.9	420
Si	1.12	0.3	1.0 (e)	~ 1350 (e)	11.9	1.5	1

Johnson デバイス性能指数
(高周波電力性能)

$$JFOM = \left(\frac{E_{BR} \cdot v_{sat}}{2 \pi} \right)^2$$

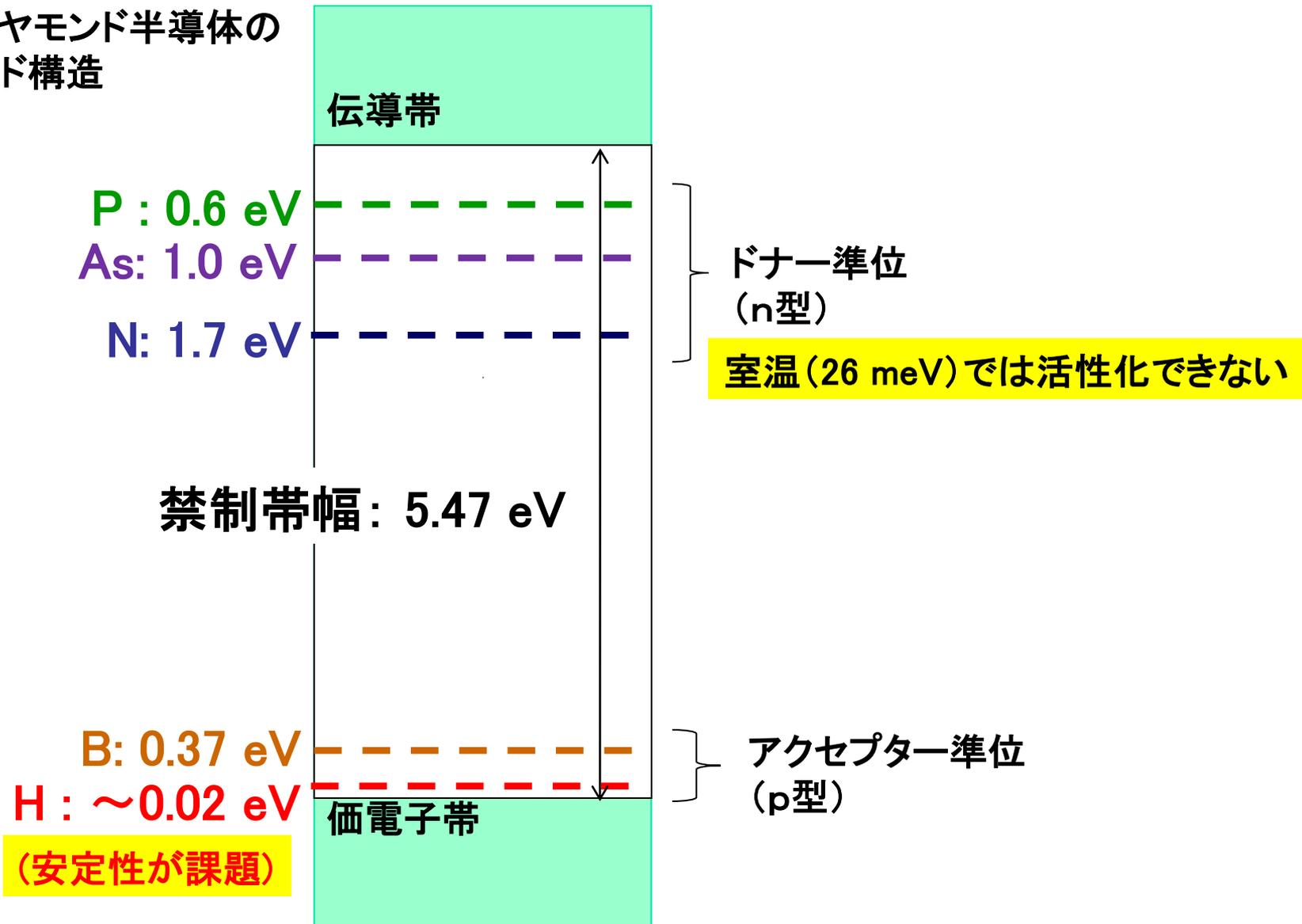
$$\frac{Diamond}{SiC} = 3.2$$

通信システムからの要求と半導体の能力



ダイヤモンドの電気伝導性

ダイヤモンド半導体の
バンド構造



デバイス基盤技術の3つのアプローチ

1. 水素終端ダイヤモンドFET

2. 新規ドーピング技術

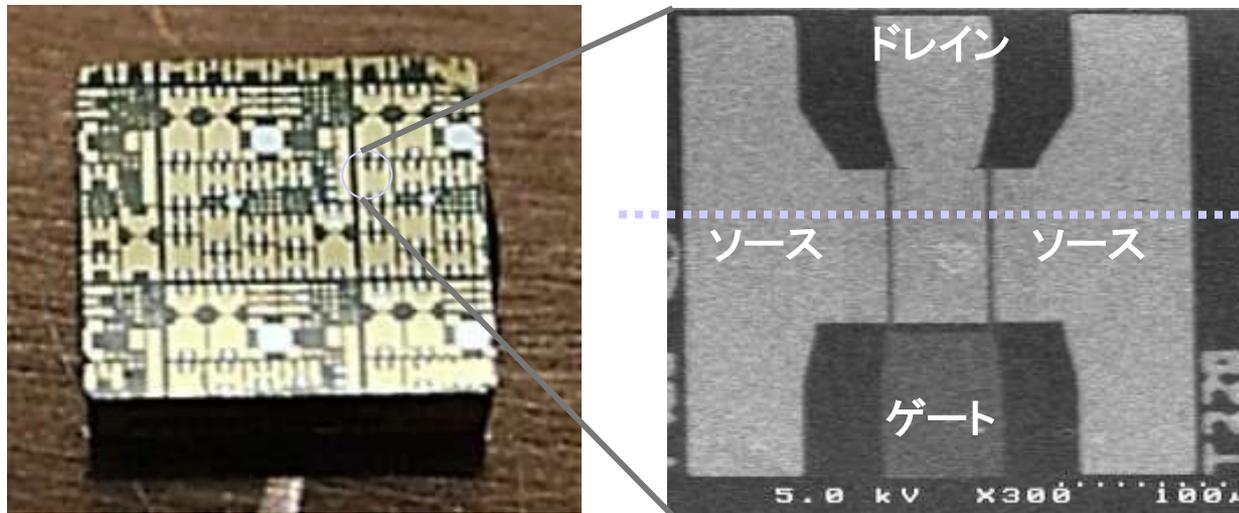
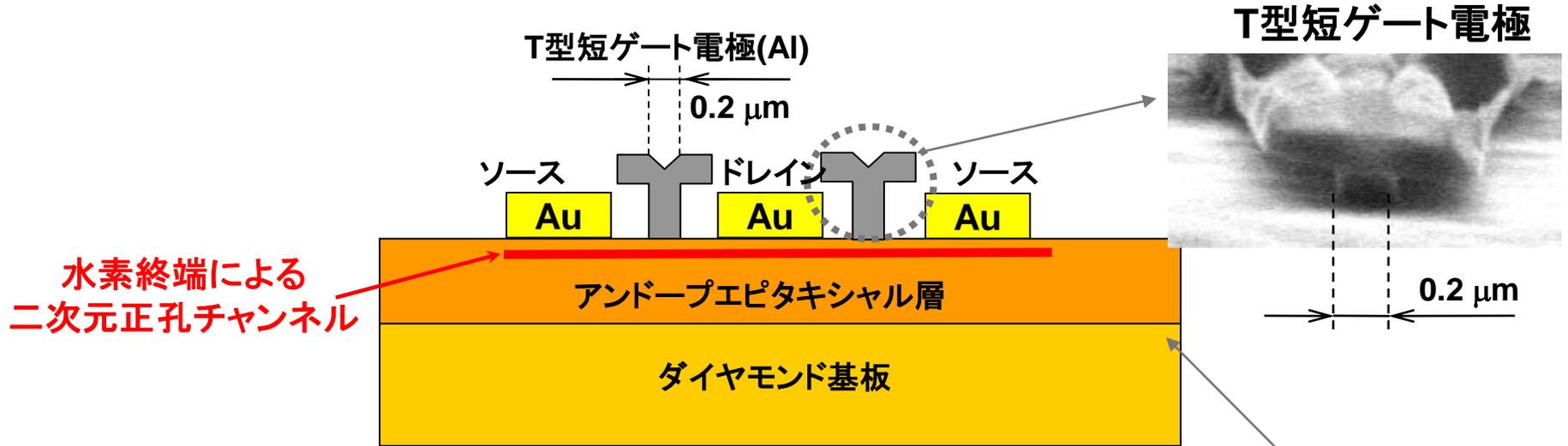
イオン注入の高効率化

イオン化可能な不純物の探索

3. 新規デバイス構造

ダイヤモンド・窒化物へテロ接合

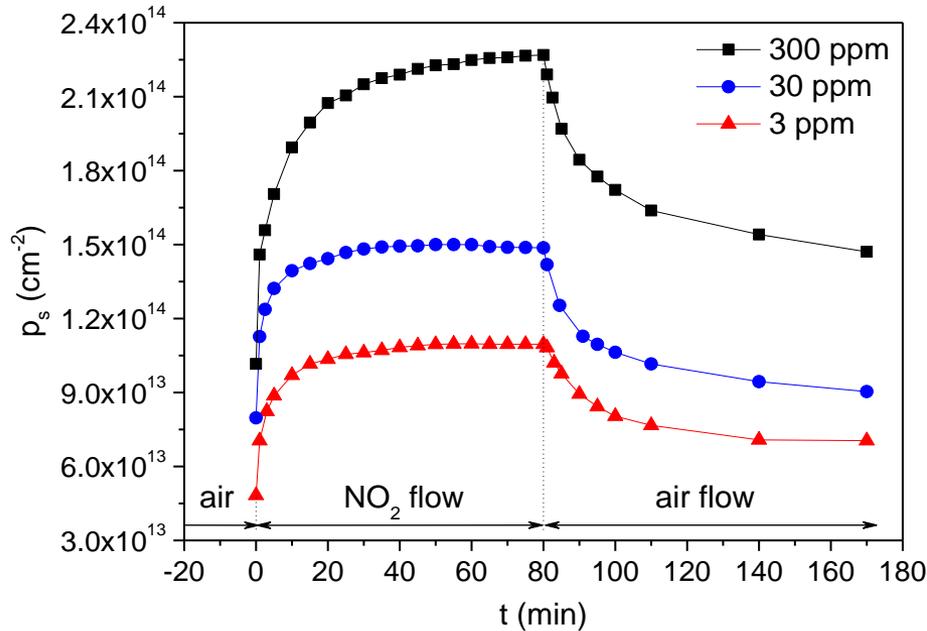
水素終端ダイヤモンドFET構造



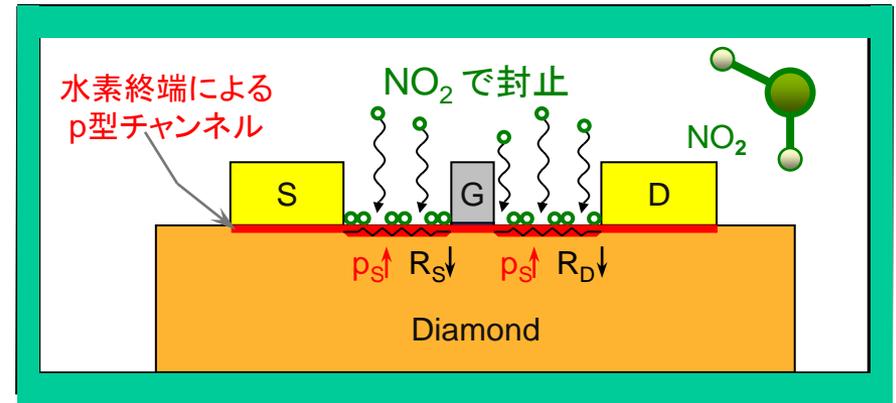
成果(1)水素終端p型伝導層の機構の解明

水素終端面の正孔生成機構を実験的に解明
半導体で最高の二次元キャリア濃度を達成

NO₂でFETを封止



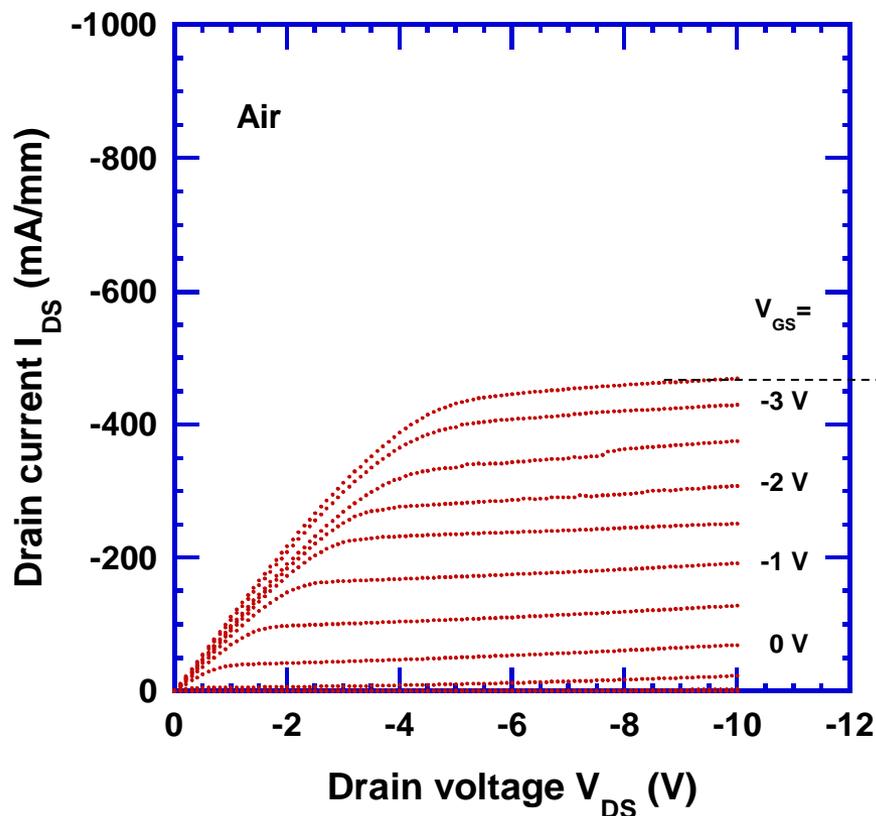
正孔濃度は従来より1桁増加



M. Kubovic and M. Kasu, Appl. Phys. Express 2 (2009) 086502
M. Kubovic, M. Kasu, H. Kageshima, Appl. Phys. Lett. (2010) 052101.

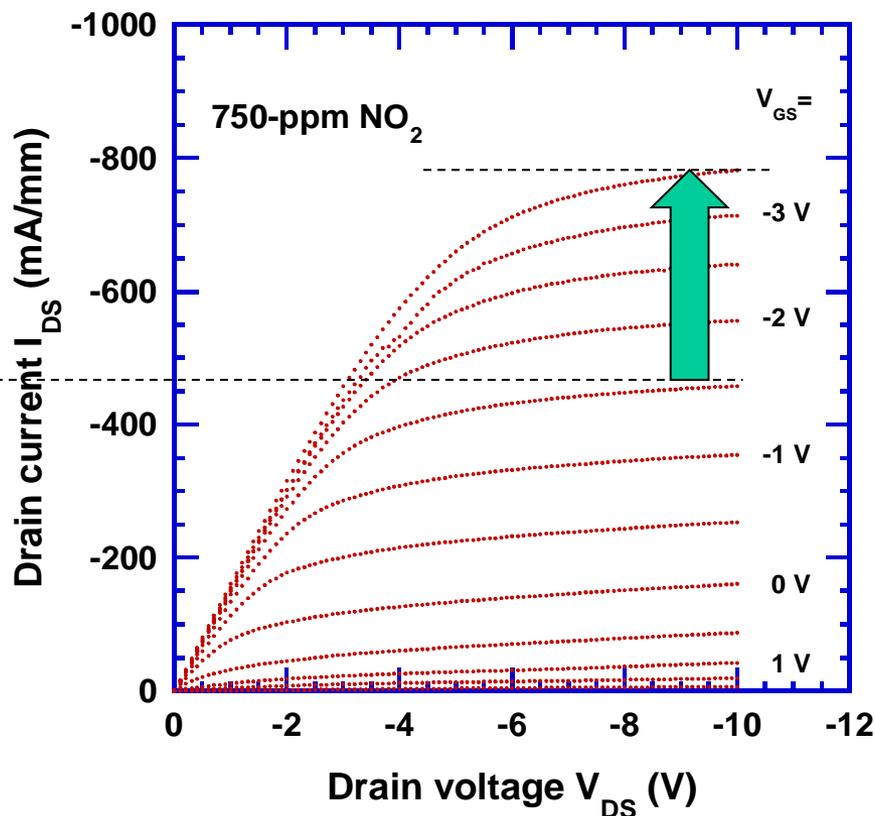
成果(1) NO₂ 吸着による水素終端FET特性向上

従来技術



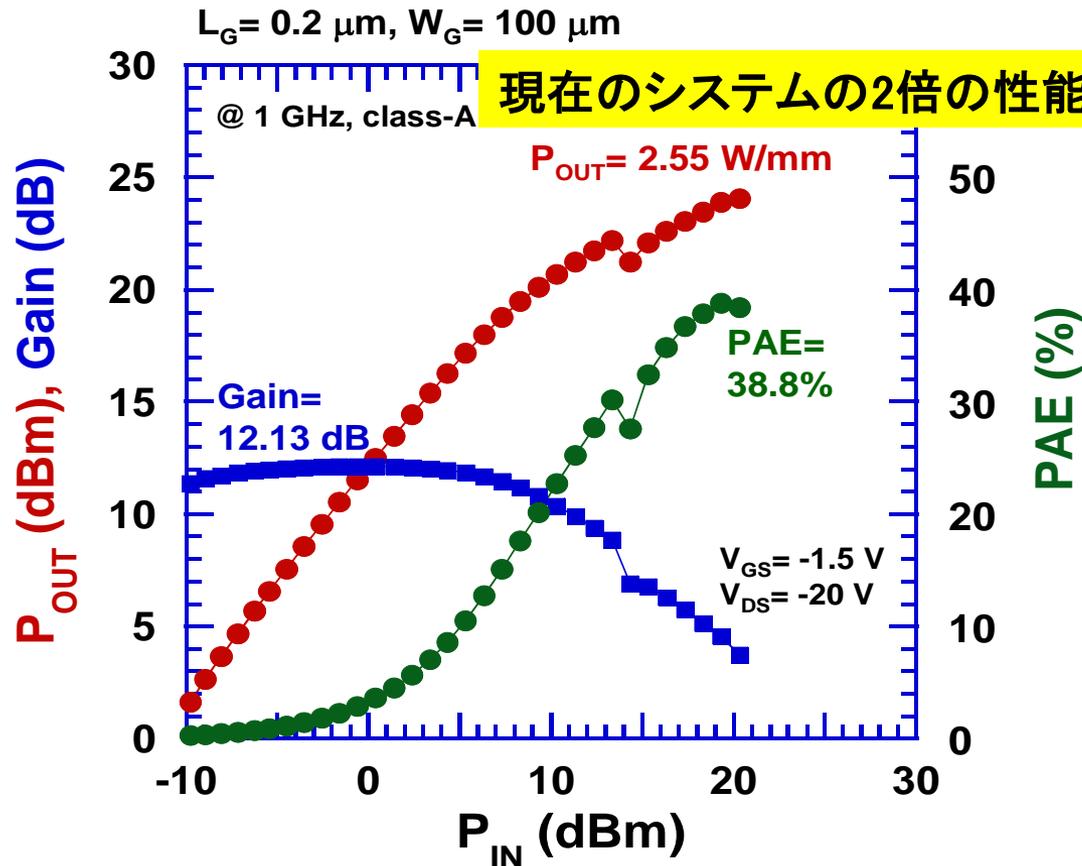
本技術

1.7倍の増加

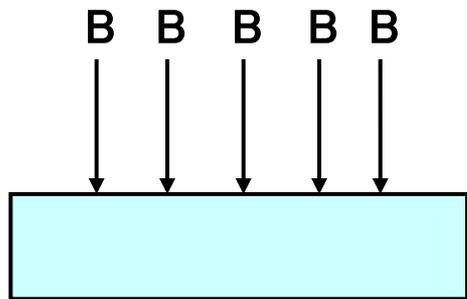


成果(1)ダイヤモンド高周波増幅器

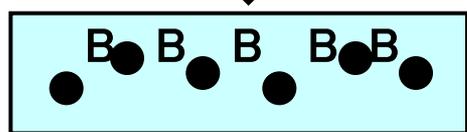
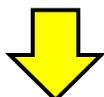
ダイヤモンド高周波電力増幅器を試作、無線周波数でシステムとして評価



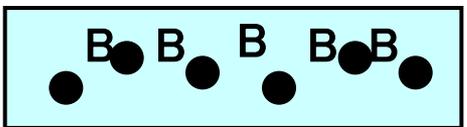
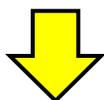
成果(2)イオン注入ダイヤモンド高効率化の着想



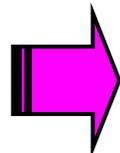
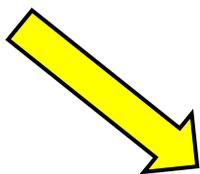
ダイヤモンドへのイオン注入



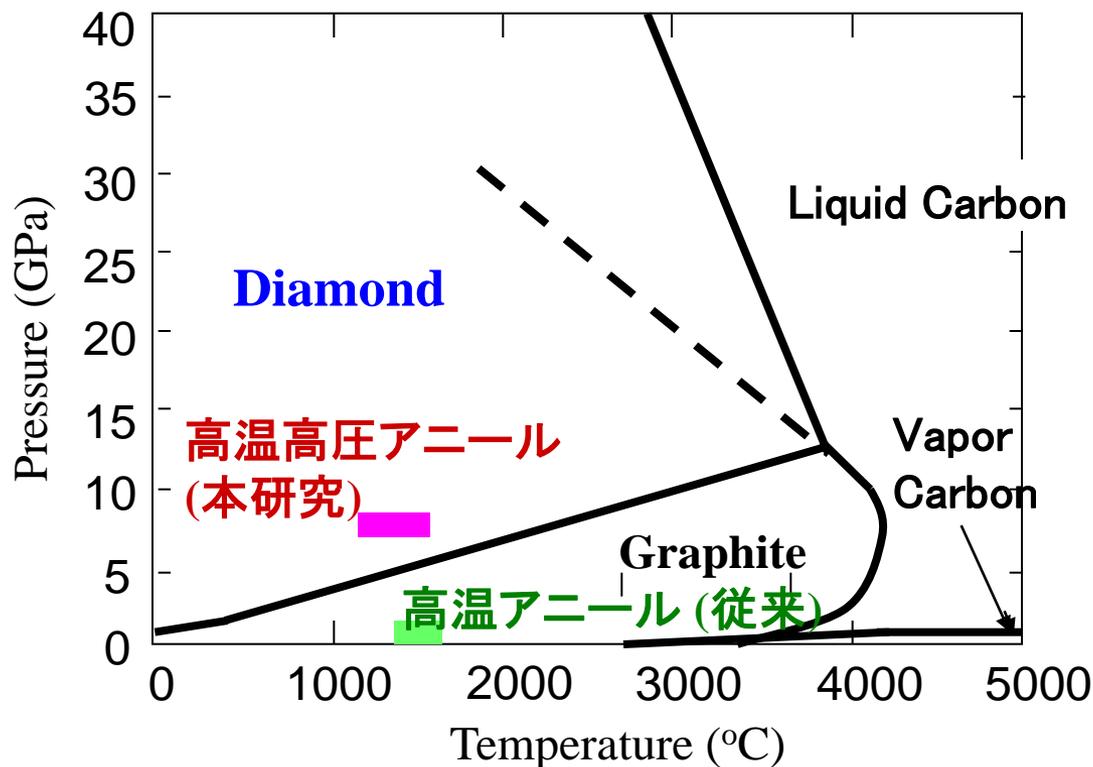
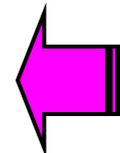
欠陥(グラファイト相)が導入される



高温アニール



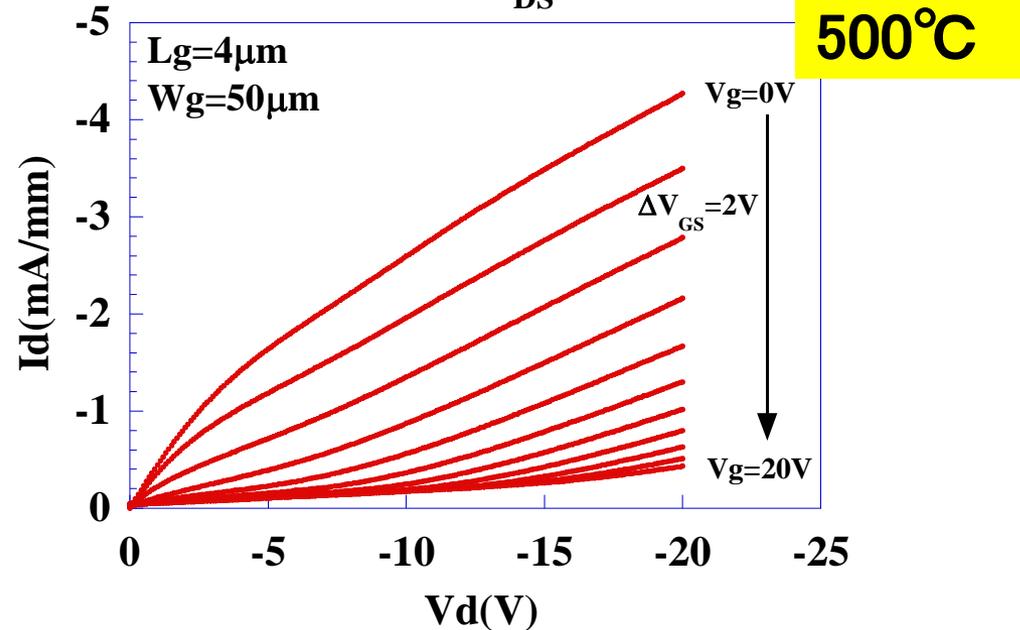
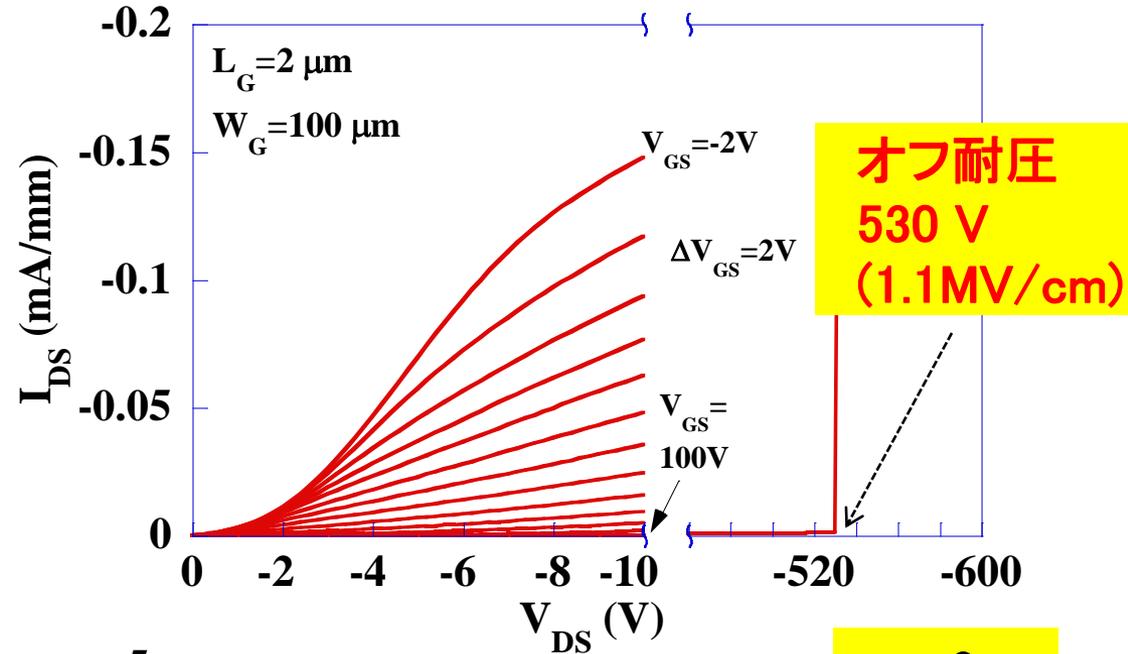
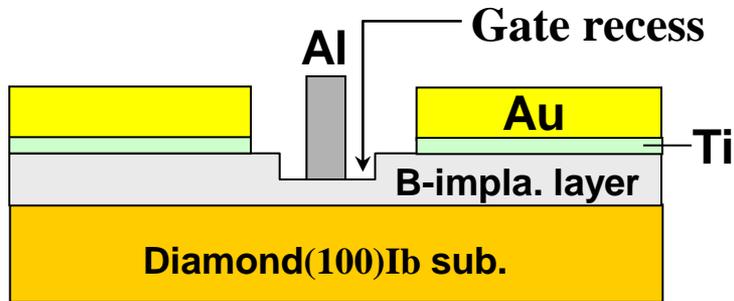
高温高圧アニール



イオン注入ダイヤモンドFETの高耐圧、高温動作

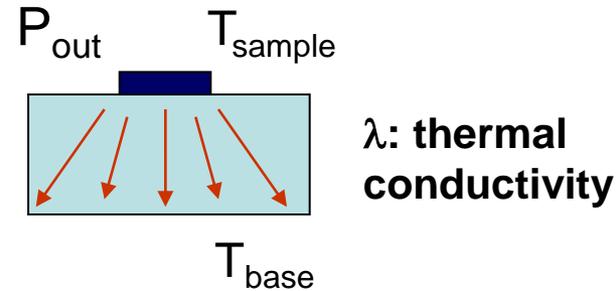
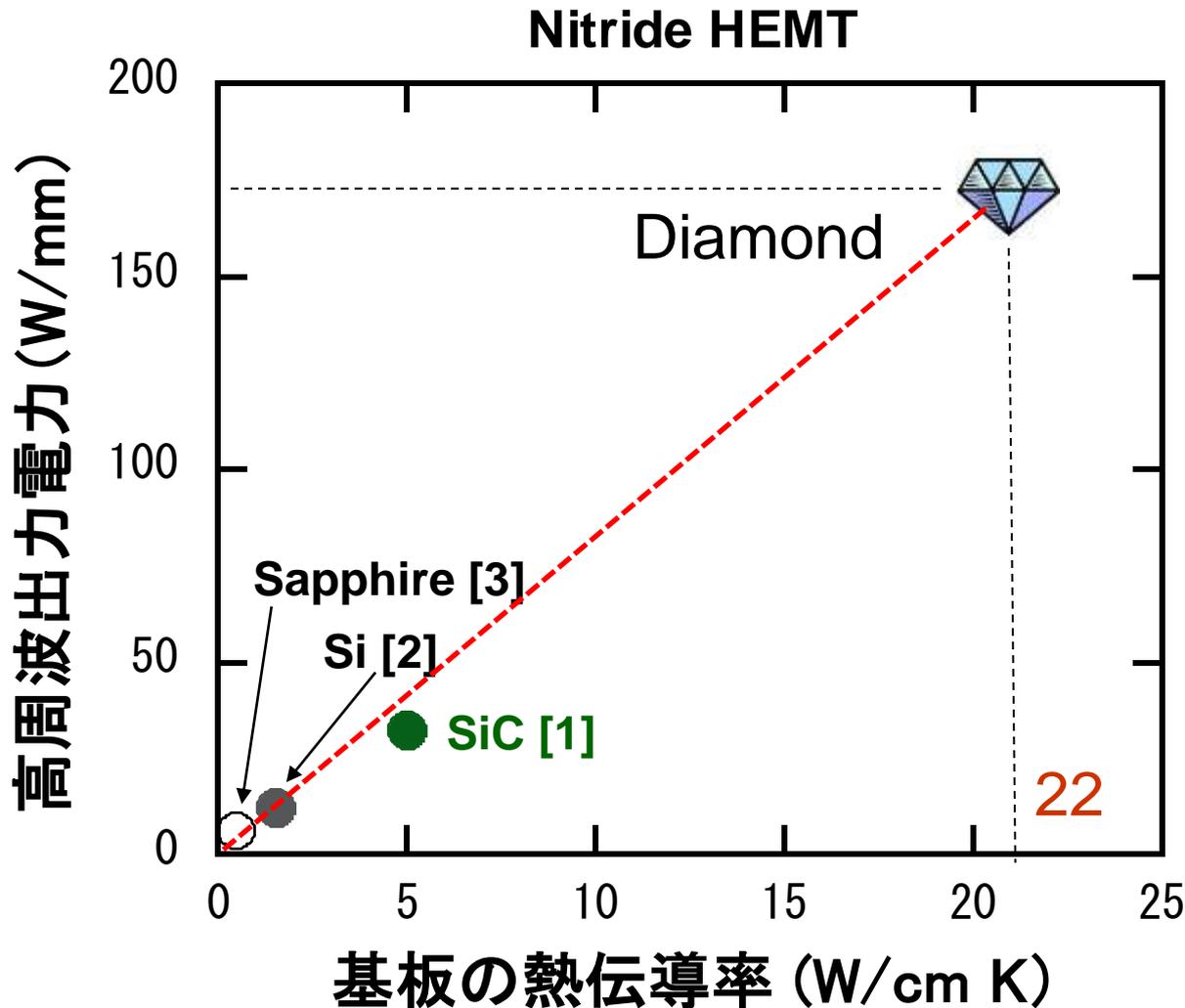
ドーピング効率、1桁増加

(B: 60 keV, $3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$)



K. Ueda, M. Kasu,
 Physica Status Solidi (c) 5 (2008) 3175.
 Jpn. J. Appl. Phys. 49 (2010).04DF16.

成果(3)ダイヤモンド上・窒化物HEMT



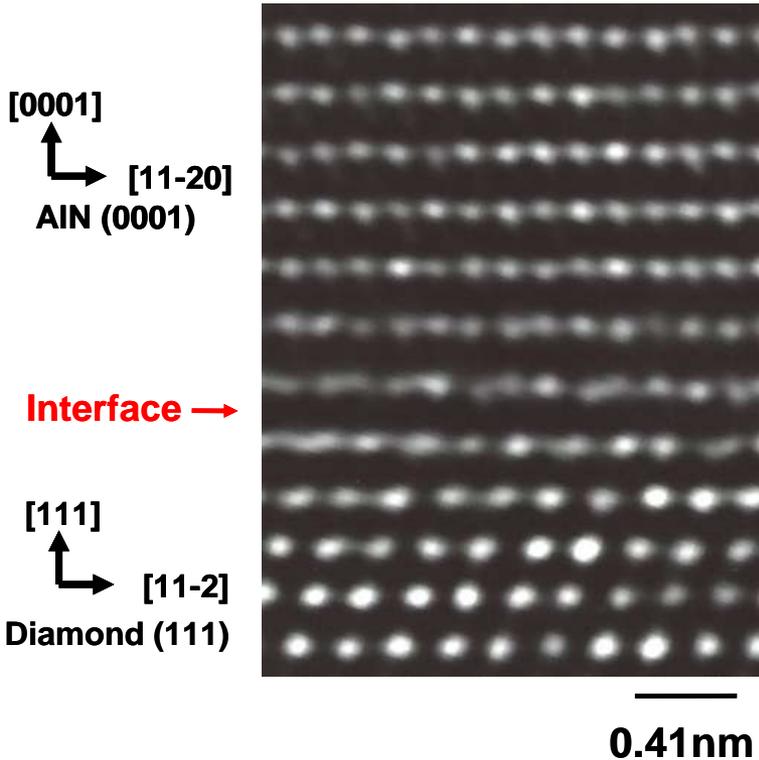
$$P_{OUT} = (T_{sample} - T_{base})\lambda$$

- [1] Y.-F. Wu et al., IEEE Electron Device Lett. 25 (2004) 117.
- [2] J.W. Johnson et al. IEEE Electron Device Lett. 25 (2004) 459.
- [3] A. Chini et al. IEEE Electron Device Lett. 25 (2004) 55.

NOD (Nitride On Diamond)のヘテロ成長

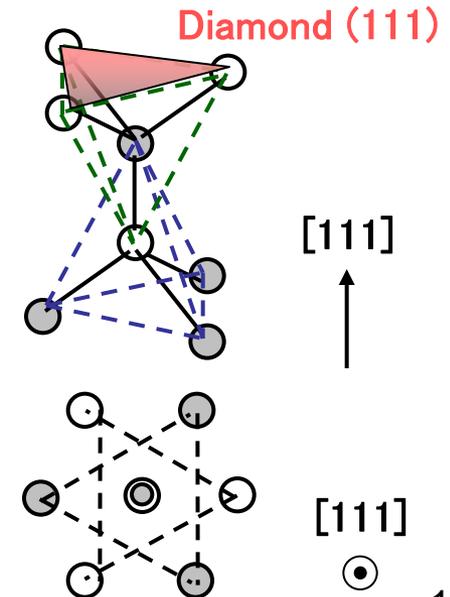
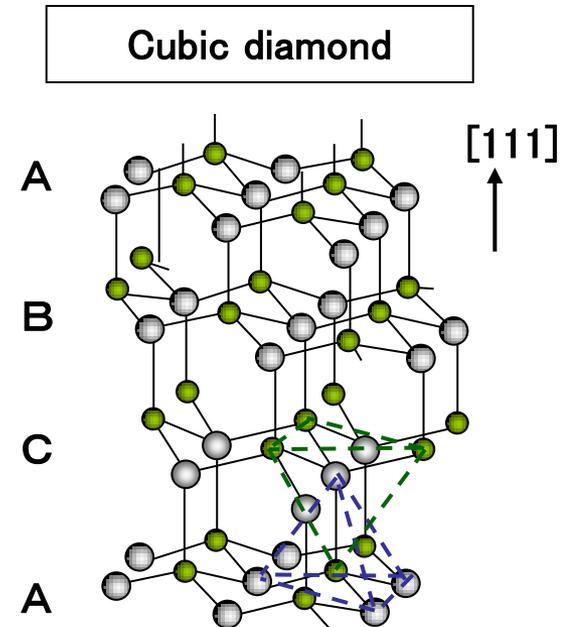
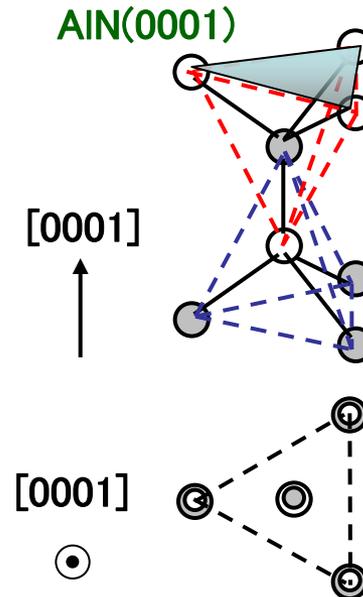
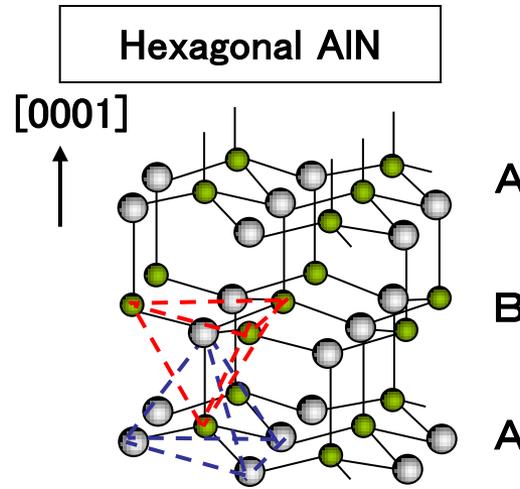
ダイヤ(111)面方位
を用いる

TEM原子像

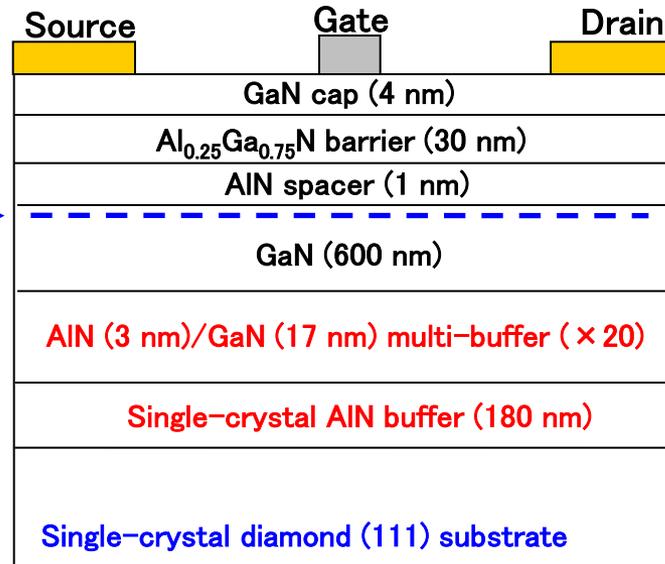


• 原子尺度で平坦な界面

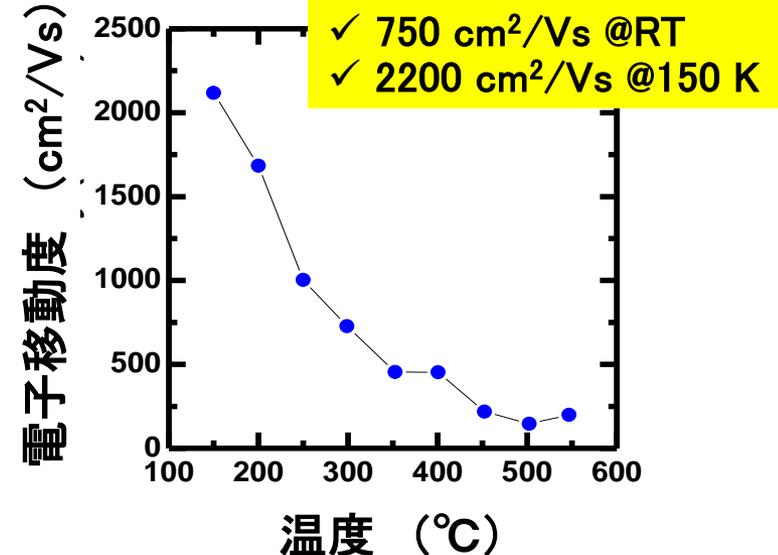
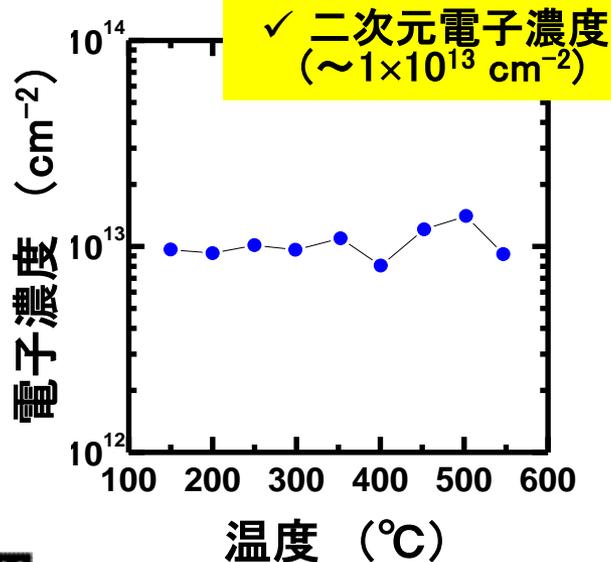
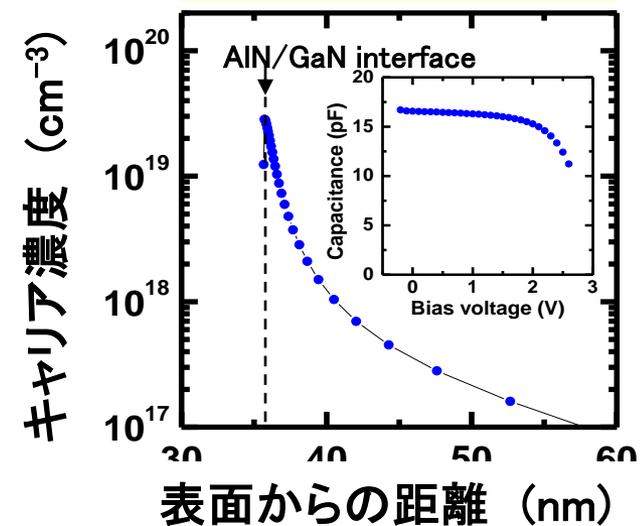
Y. Taniyasu and M. Kasu,
J. Crystal Growth 311(2009) 2825.



ダイヤ上・窒化物HEMTの二次元電子特性



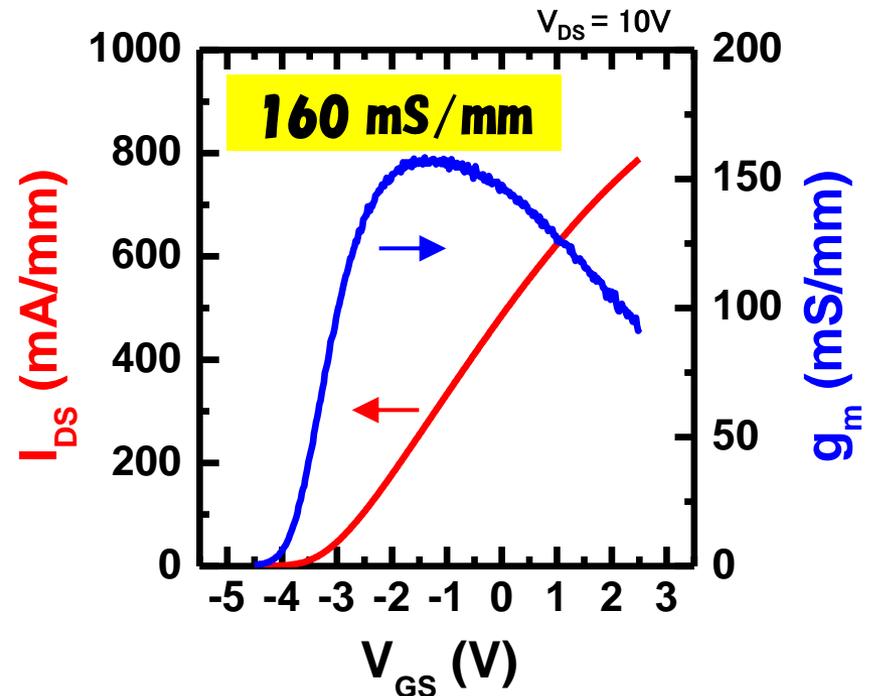
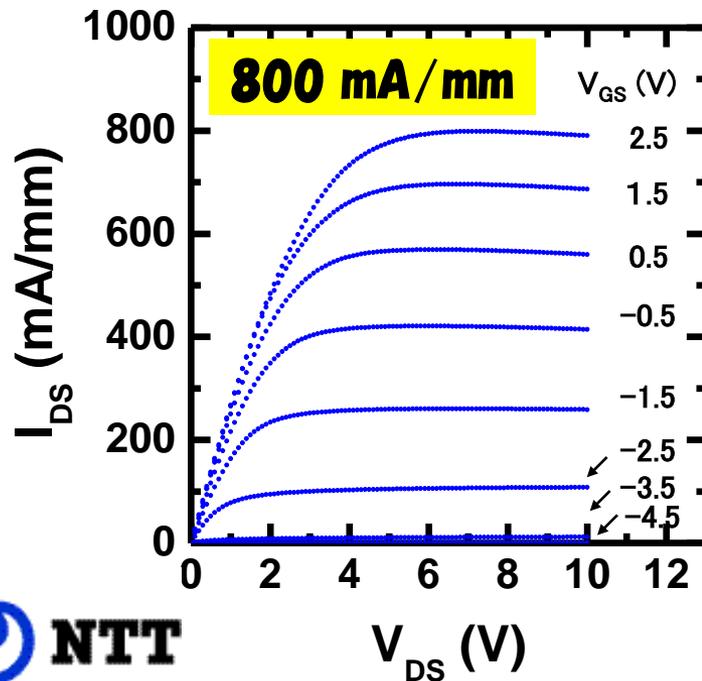
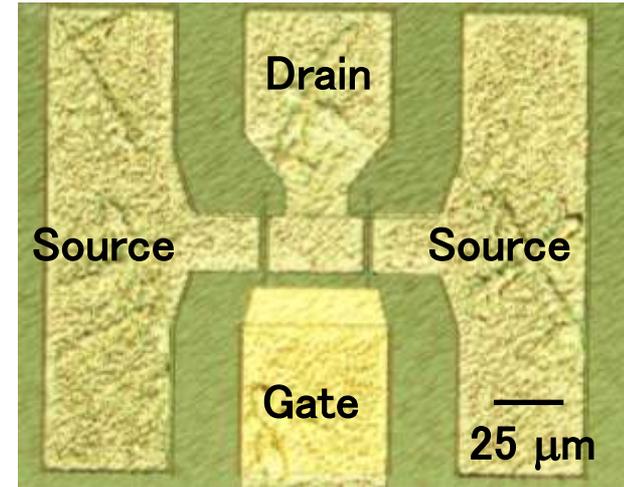
✓ 二次元電子の蓄積



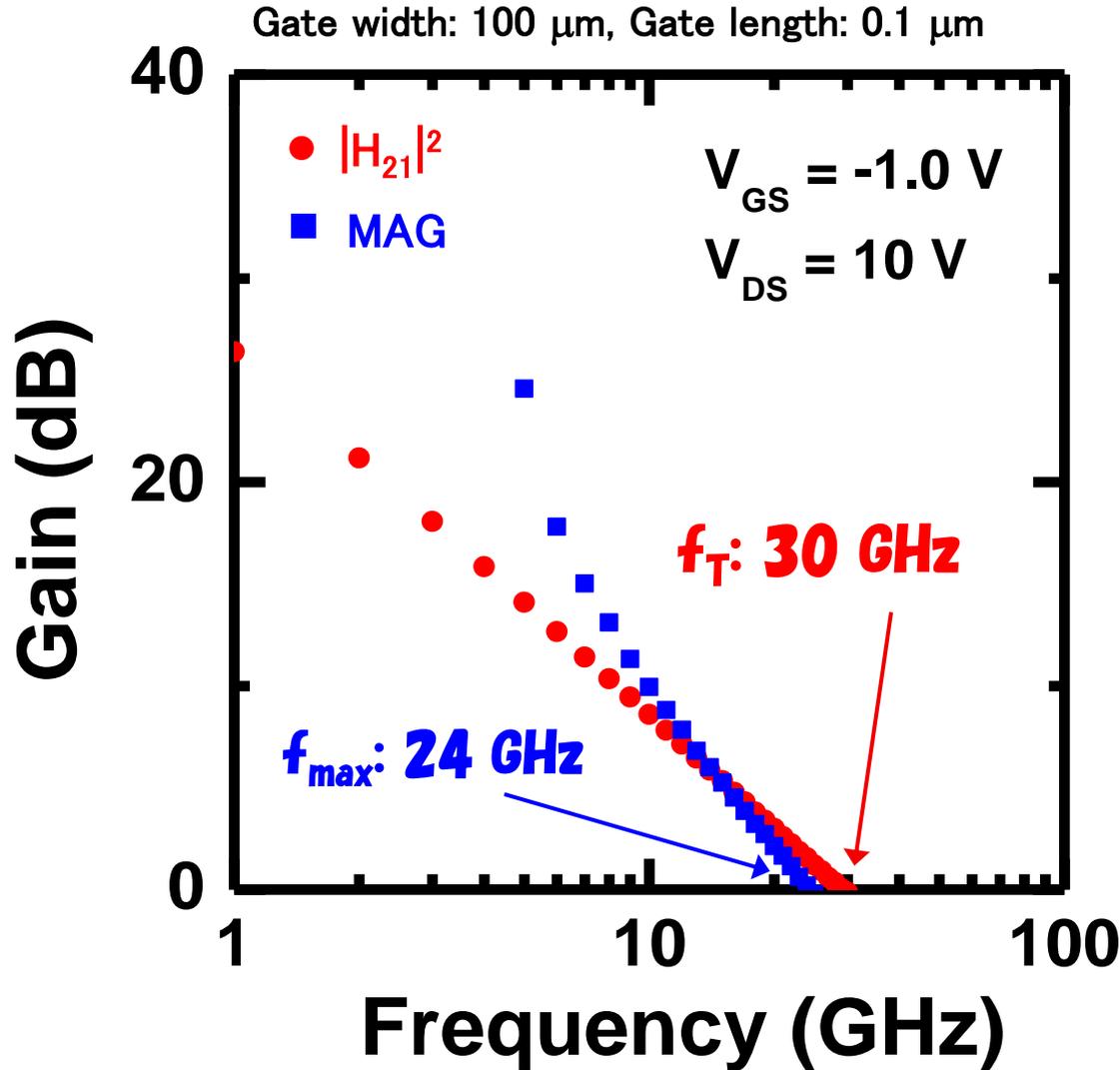
ダイヤモンド・窒化物HEMTの直流特性

Source	Gate	Drain
GaN cap (1 nm)		
i-AlGaN (10 nm), Al:0.25		
n-AlGaN (12 nm), Al:0.25, [Si]: $1E18\text{ cm}^{-3}$		
i-AlGaN (2 nm), Al:0.25		
GaN (600 nm)		
[AlN(4 nm)/GaN(21 nm)] ₂₀ multi-buffer		
AlN buffer (180 nm)		
Diamond (111) substrate		

Gate width: 50 μm , Gate length: 0.4 μm



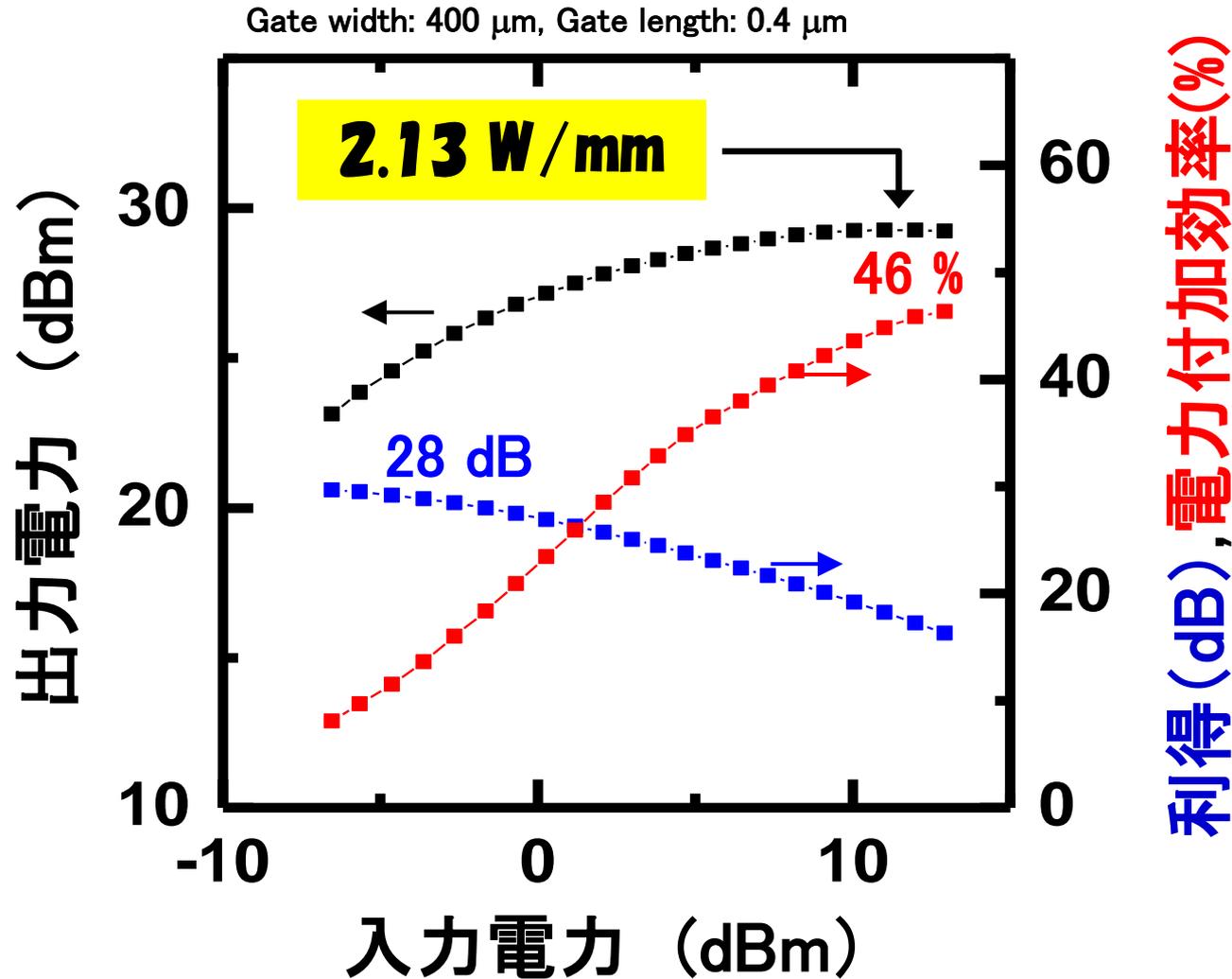
ダイヤ上・窒化物HEMTの高周波小信号特性



f_T : 遷移周波数 (電流利得の遮断周波数)

f_{max} : 最大発振周波数 (電力利得の遮断周波数)

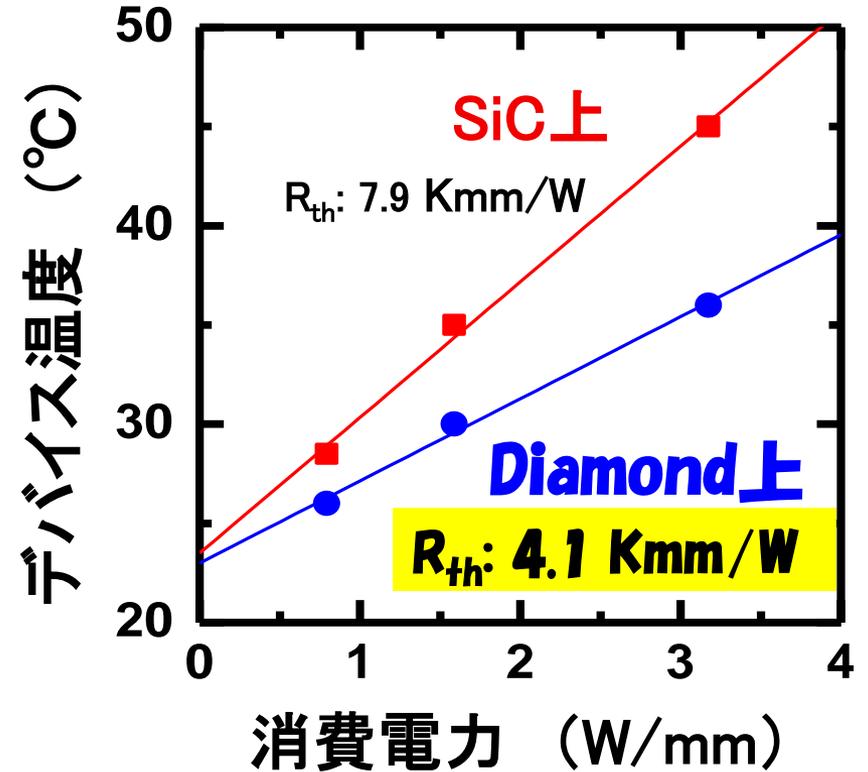
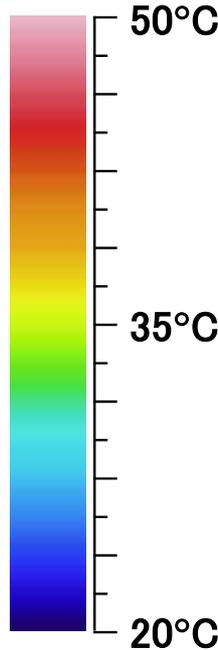
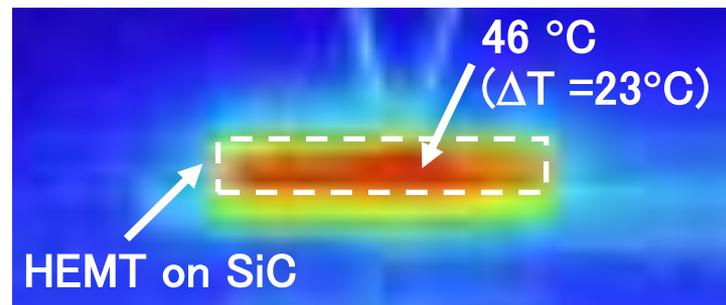
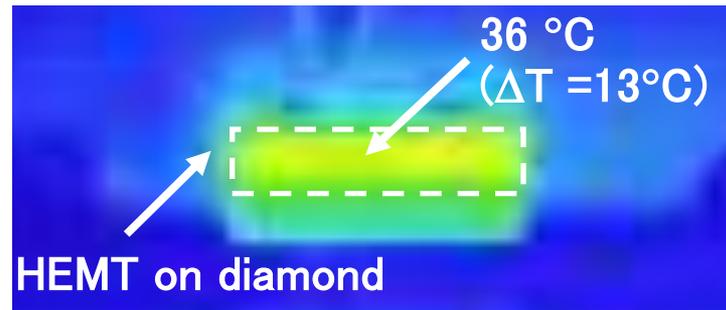
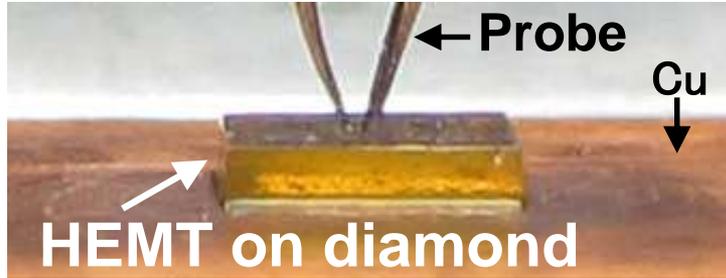
高周波大信号(電力)特性@1GHz



PAE: Power Added Efficiency =
$$\frac{P_{\text{out(RF)}} - P_{\text{in(RF)}}}{P_{\text{out(DC)}}$$

窒化物HEMTの温度特性：基板材料の比較

消費電力： 2 W



K. Hirama, Y. Tanisyasu and M. Kasu,
Appl. Phys. Lett. 98 (2011) 162112.

従来の窒化物HEMTの約半分の温度上昇

まとめ

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。