

ミリ波・テラヘルツ波無線通信用 InP HEMT技術

高橋 剛^{1,2}、牧山剛三^{1,2}、遠藤 聡¹、佐藤 優^{1,2}、
中舎安宏^{1,2}、川野陽一^{1,2}、芝 祥一^{1,2}、原 直紀^{1,2}
¹富士通研究所、²富士通

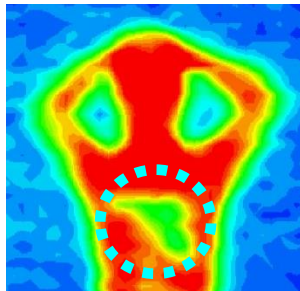
- 背景
- HEMTの概要
 - HEMTの基本
 - InP HEMT
- InP HEMT技術
 - デバイス構造
 - RF & 雑音特性
 - 低温特性
 - IC特性
- 今後の展望
- まとめ

- 背景
- HEMTの概要
 - HEMTの基本
 - InP HEMT
- InP HEMT技術
 - デバイス構造
 - RF & 雑音特性
 - 低温特性
 - IC特性
- 今後の展望
- まとめ

■ ミリ波・テラヘルツ波の応用

- イメージセンサ
- スペクトル・アナライザ
- 大容量無線通信システム

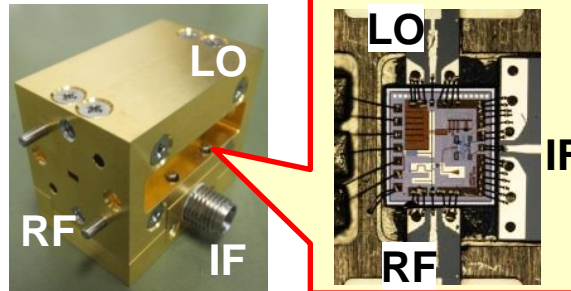
94 GHz



**LNAs and detectors
for Imaging**

M. Sato et.al., APMC2007.

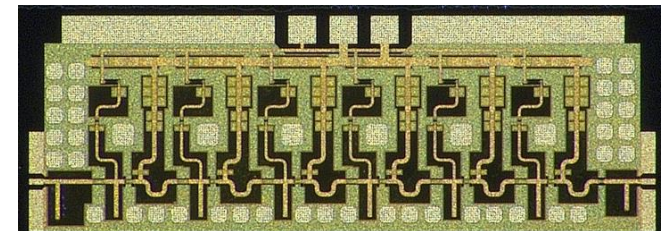
110-140 GHz



**Mixers for spectrum
analyzers**

S. Shiba et.al., IMaRC2014.

240-260 GHz



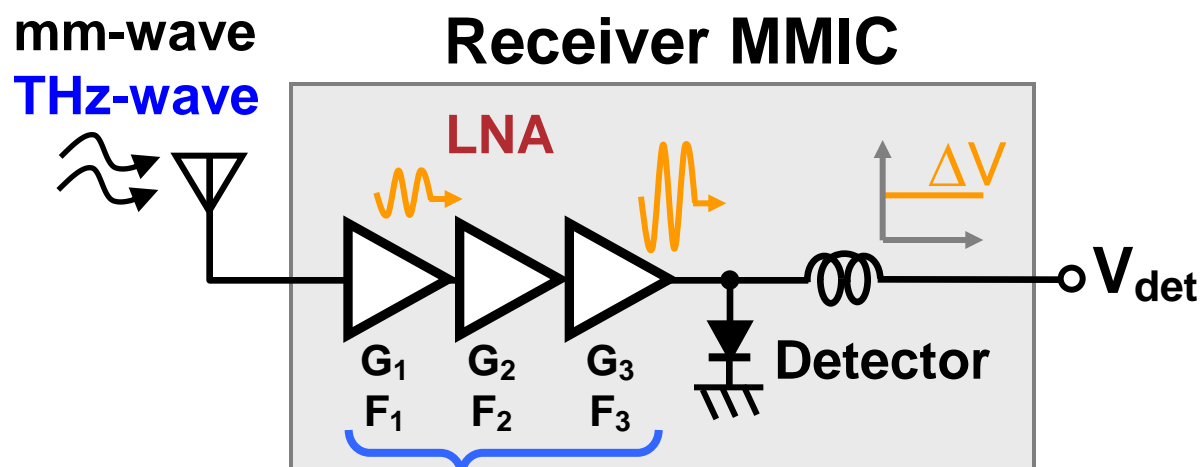
**LNAs and detectors
for receiver MMICs**

Y.Kawano et.al., CSICS 2013.



InP HEMT技術

■ 受信用ICの構成



G_n : 利得

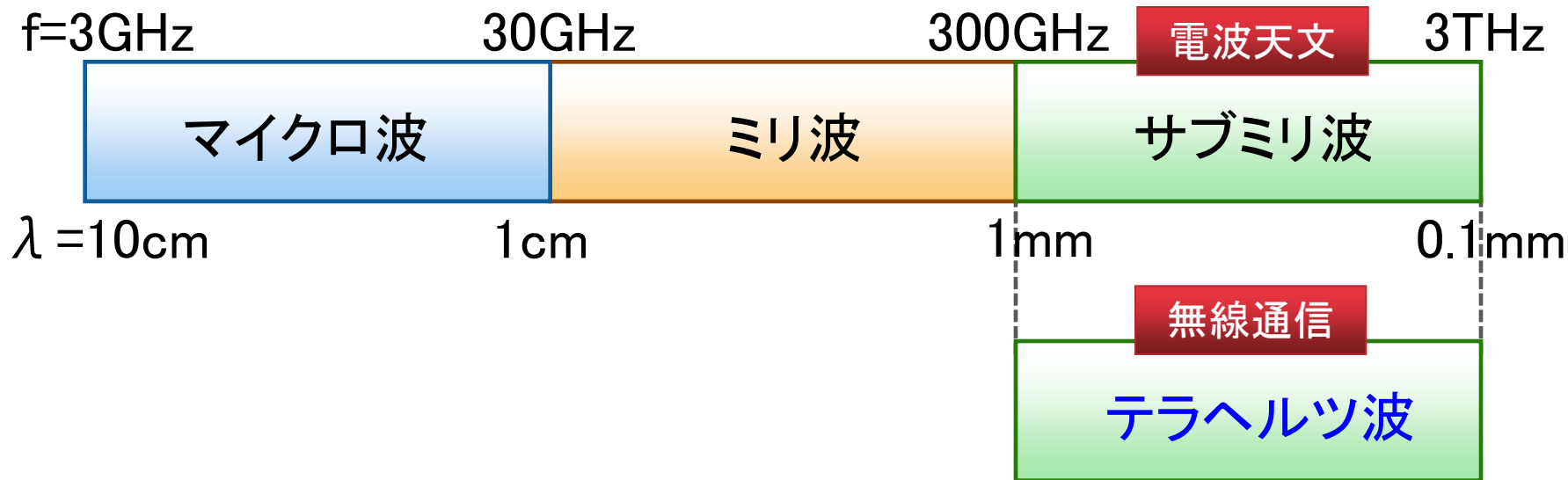
F_n : 雑音指数

InP HEMT

- 高速
- 低雑音

$$\left\{ \begin{array}{l} G_{\text{tot}} = G_1 \cdot G_2 \cdot G_3 \\ F_{\text{tot}} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} \end{array} \right.$$

周波数について



別の定義も混在

- 100 GHz ~ 10 THz
- 1 THz ~ 10 THz

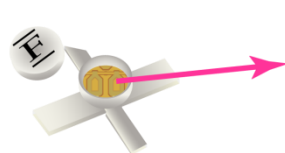


電波天文の「サブミリ波」と無線通信の「テラヘルツ波」は同じ領域

- 電波法では3THzまでが電波として定義
- 275GHzより高い周波数が未分配

- 背景
- HEMTの概要
 - HEMTの基本
 - InP HEMT
- InP HEMT技術
 - デバイス構造
 - RF & 雑音特性
 - 低温特性
 - IC特性
- 今後の展望
- まとめ

- 1979年に富士通研究所(三村 博士)が発明
 - GaAs HEMT
- 最初の応用は電波天文用途(1985年～)
 - 22~24GHz, NF~1dB (25K)、 C_6H の発見
- 衛星放送が普及(1987年～、1989年ベルリンの壁崩壊の原因)
- GPS受信機、車載レーダ、携帯電話基地局等への応用拡大
- GaAs HEMTからInP HEMT, GaN HEMTへ発展



HEMT



電波天文



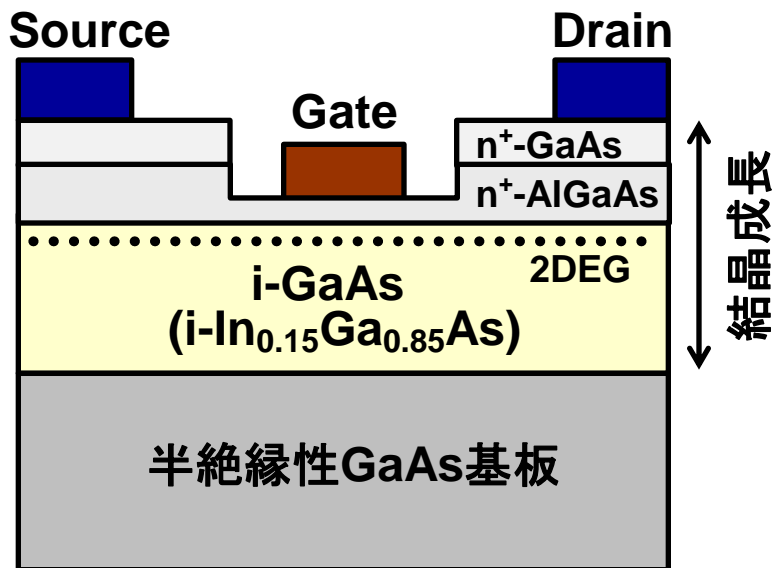
衛星放送



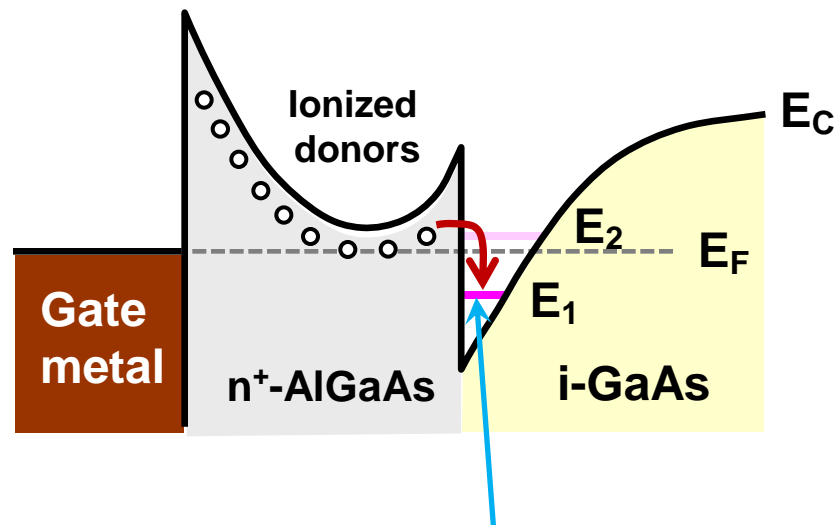
車載レーダ

HEMTの構造

- High Electron Mobility Transistor (HEMT)
- 高電子移動度トランジスタ



GaAs HEMT
(pHEMT)
↑
pseudomorphic
 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x=0.1\sim 0.2$)



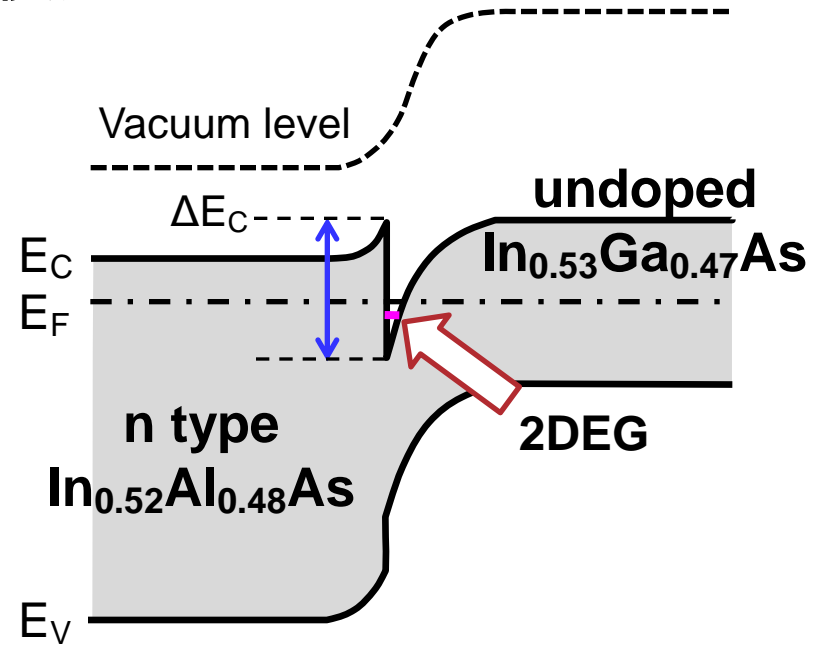
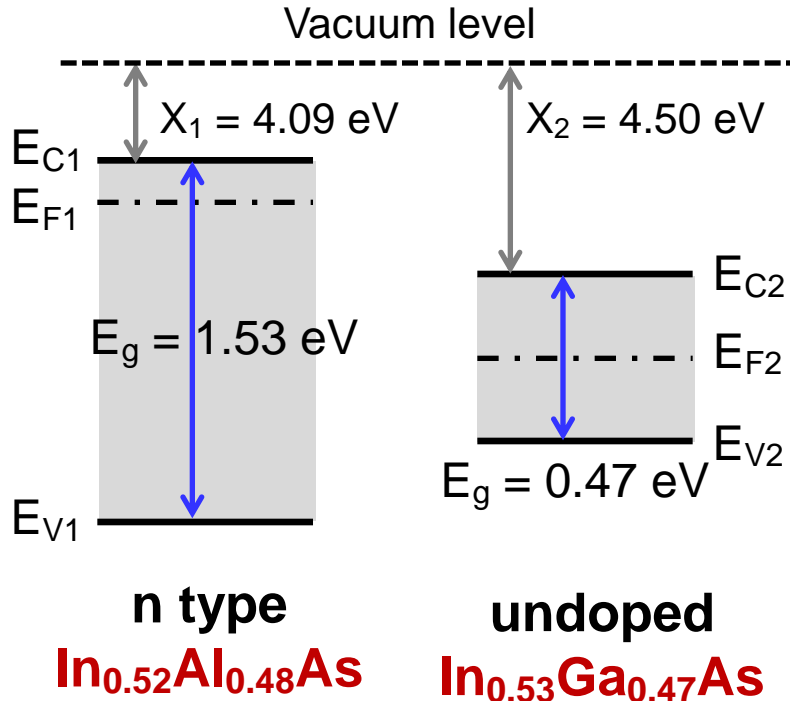
2 Dimensional Electron Gas
(2DEG)

ヘテロ接合界面に2DEGが発生
電子移動度が高い

- 背景
- HEMTの概要
 - HEMTの基本
 - InP HEMT
- InP HEMT技術
 - デバイス構造
 - RF & 雑音特性
 - 低温特性
 - IC特性
- 今後の展望
- まとめ

InP HEMTとは？

- 結晶層の基板がInP
- トランジスタ動作にInPは不要
- チャネルにIn組成が高いInGaAsを使用



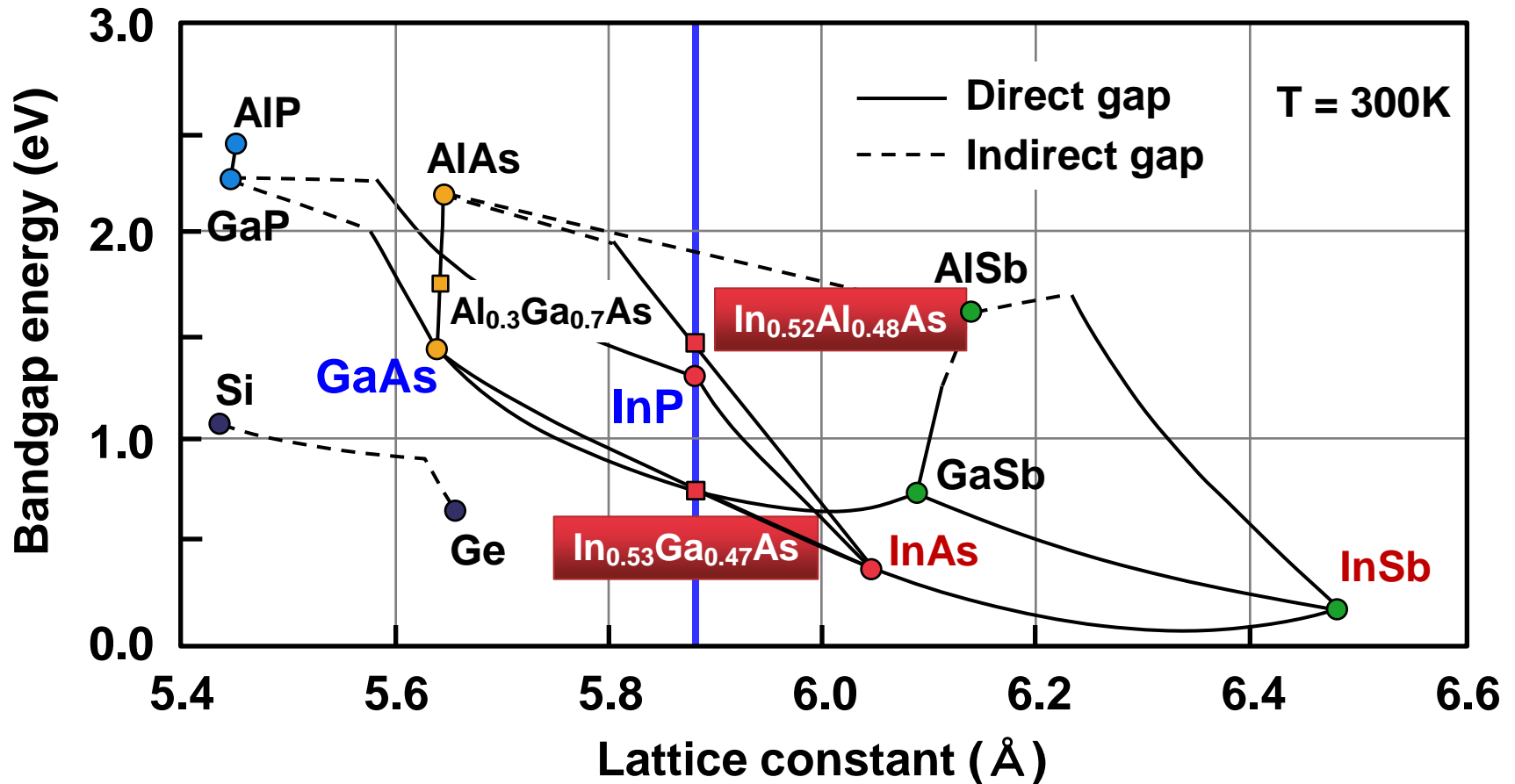
**InAlAs/InGaAsへテロ接合
界面に2DEGが発生**

III-V族化合物半導体の物性

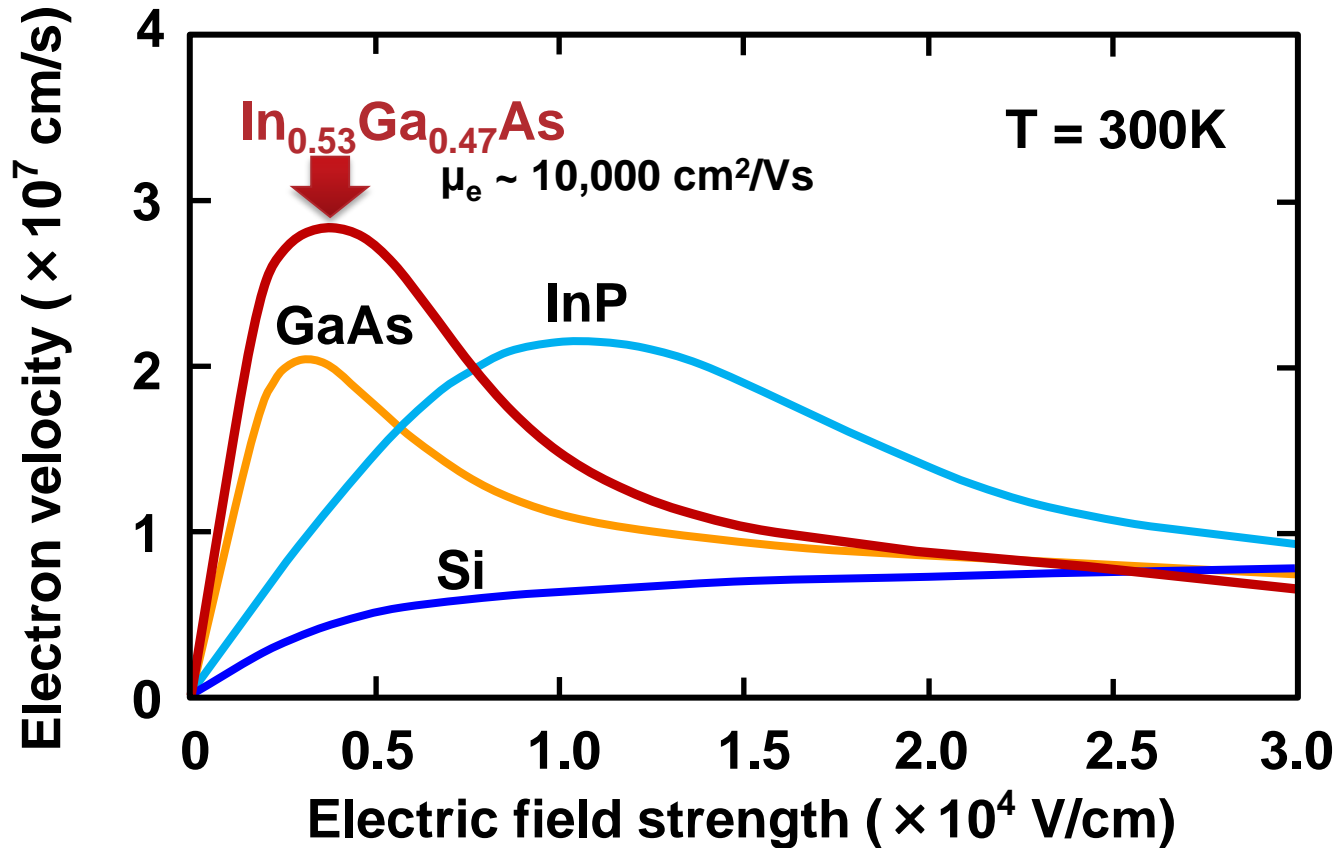
Material	Lattice Constant (Å)	Bandgap (eV)	Dielectric Constant	Electron Effective Mass	Hole Effective Mass	Electron Mobility (cm ² /Vs)	Hole Mobility (cm ² /Vs)
Si	5.43	1.12	11.9	0.19	0.16	1,450	500
GaAs	5.65	1.42	12.9	0.063	0.07	8,000	400
AlAs	5.66	2.36	10.1	0.11	0.22	180	-
InP	5.87	1.35	12.6	0.077	0.64	4,600	150
InAs	6.05	0.36	15.1	0.023	0.40	33,000	460
GaSb	6.01	0.72	15.7	0.042	0.40	5,000	850
InSb	6.48	0.17	16.8	0.015	0.40	80,000	1,250
GaN	3.19/5.18 ^c	3.44	8.9	0.20	0.8	1,200	200
AlN	3.11/4.98 ^c	6.1	8.5	0.40	3.53	300	14

InAs, InSbの移動度が高いが、安定な高抵抗基板が無い

バンドギャップと格子定数

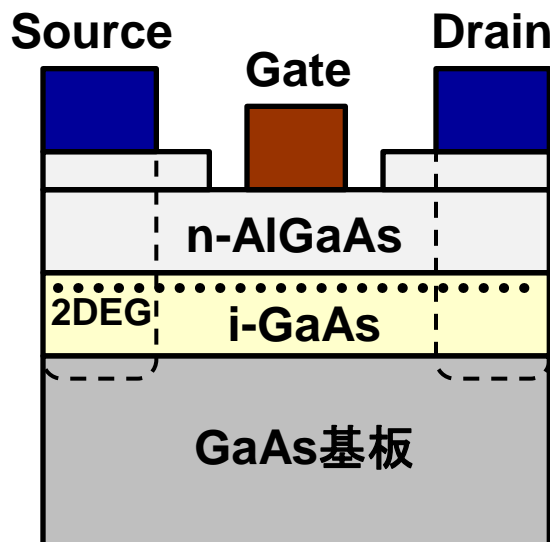


InP HEMT: InP基板に格子整合したInAlAs/InGaAsヘテロ接合



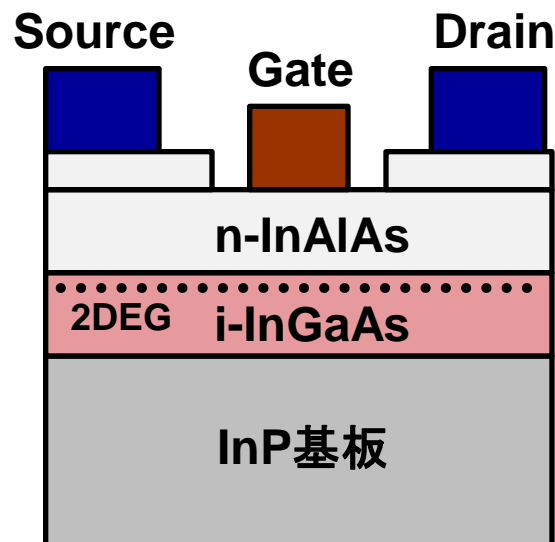
- チャンネルの電子飽和速度(移動度)が高い
- 高周波動作
- 低抵抗(低雑音)

HEMT基本構造の違い



GaAs HEMT
(pHEMT)

pseudomorphic
 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x=0.1\sim 0.2$)

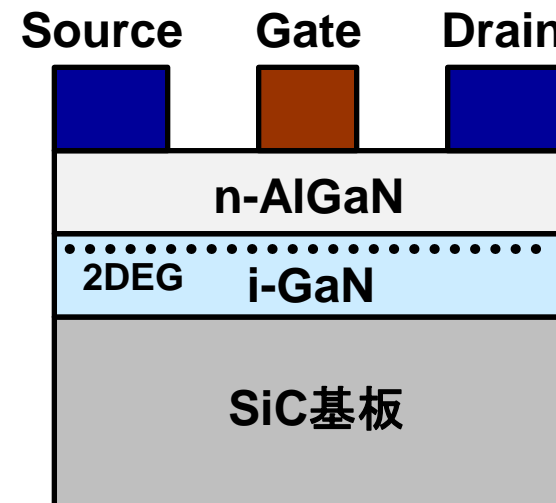


InP HEMT



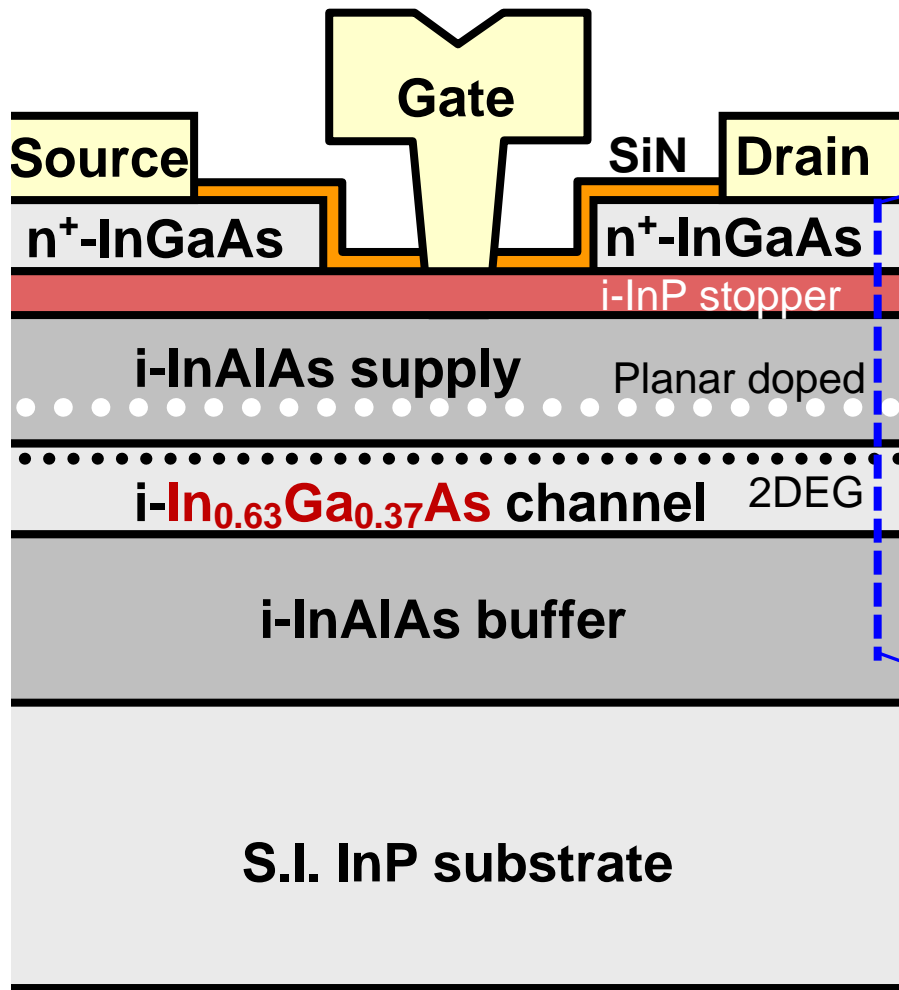
$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($0.53 \leq x$) チャンネル

- 移動度が高い
- InP基板上に結晶成長

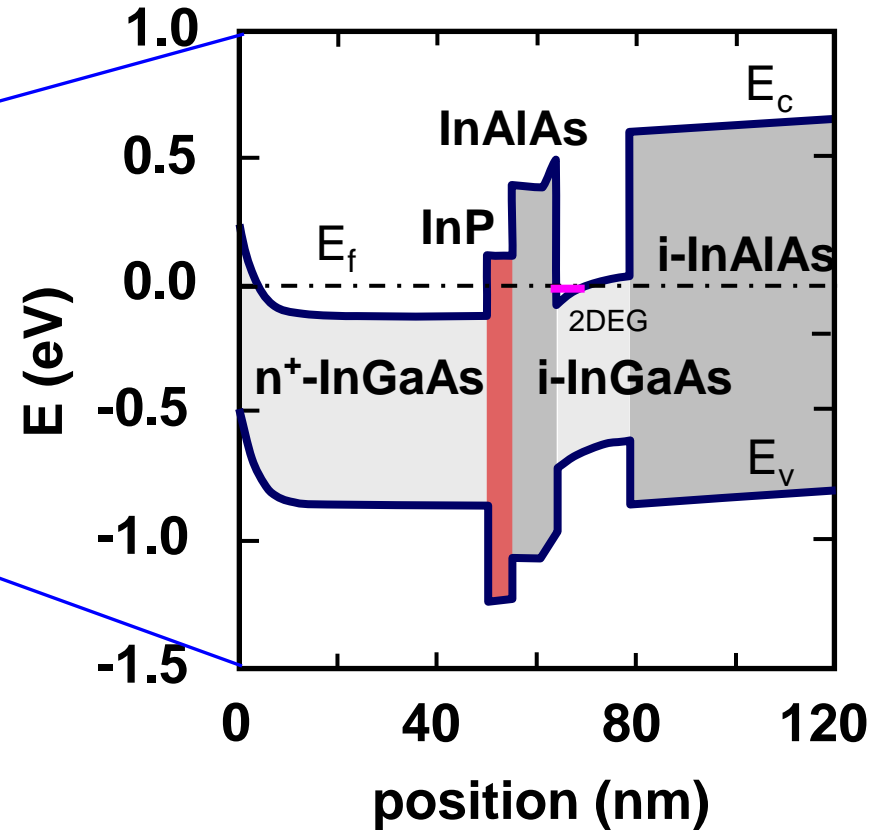


GaN HEMT

- 背景
- HEMTの概要
 - HEMTの基本
 - InP HEMT
- InP HEMT技術
 - デバイス構造
 - RF & 雑音特性
 - 低温特性
 - IC特性
- 今後の展望
- まとめ



断面構造



エネルギーバンド構造

■ 雑音指数

$$F_{\min} = 1 + 2\pi K \left(\frac{f}{f_T} \right) \sqrt{g_m^{\text{int}} (R_s + R_g)}$$

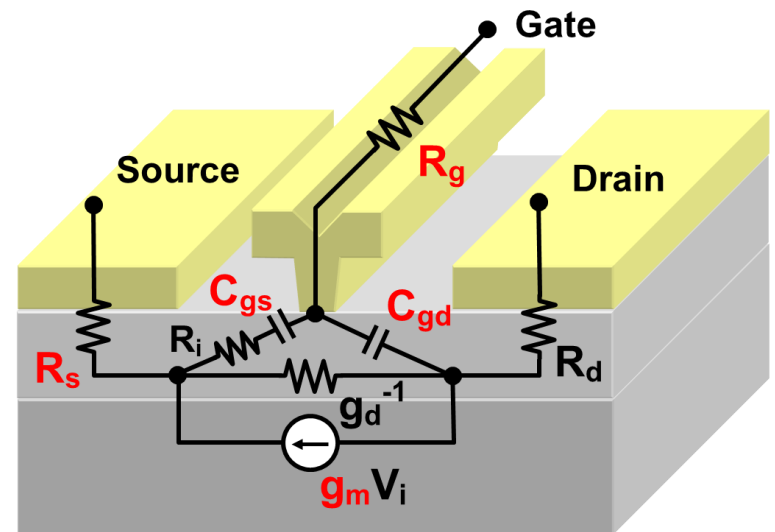


Cutoff frequency

$$f_T = \frac{g_m^{\text{int}}}{2\pi (C_{gs} + C_{gd})}$$



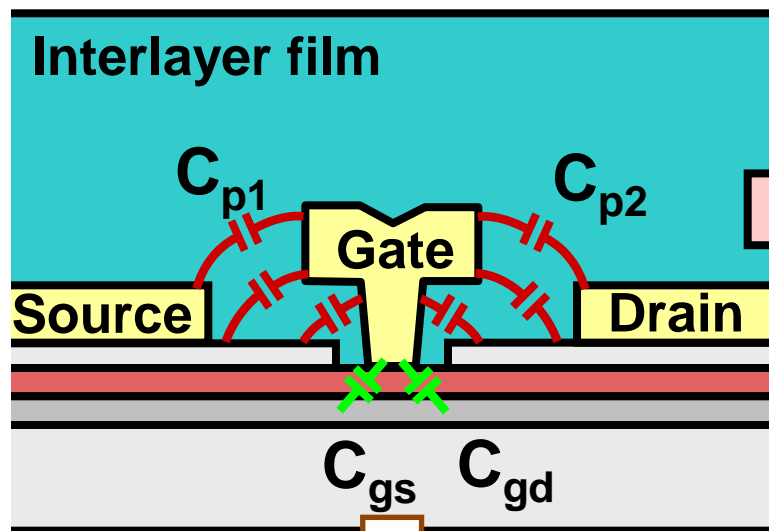
ゲート容量の低減



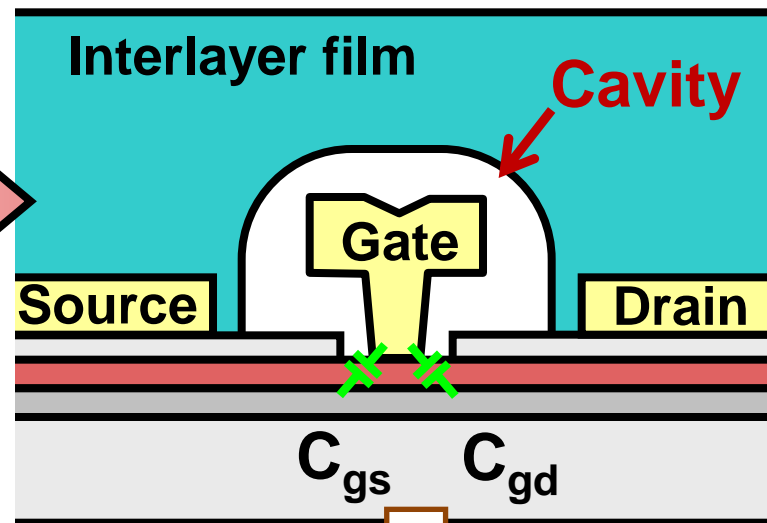
多層配線後の特性劣化改善が課題

$$f_T = \frac{g_m^{int}}{2\pi (C_{gs} + C_{gd} + C_{p1} + C_{p2})}$$

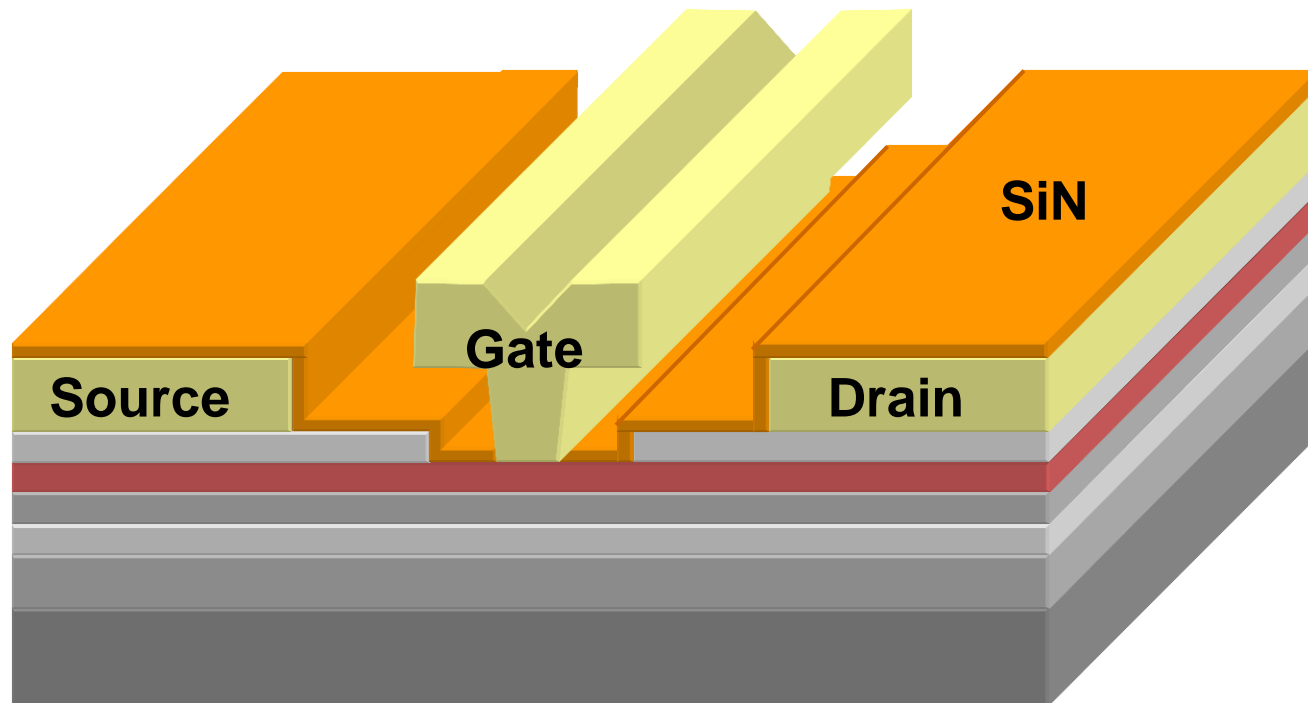
空洞構造の適用

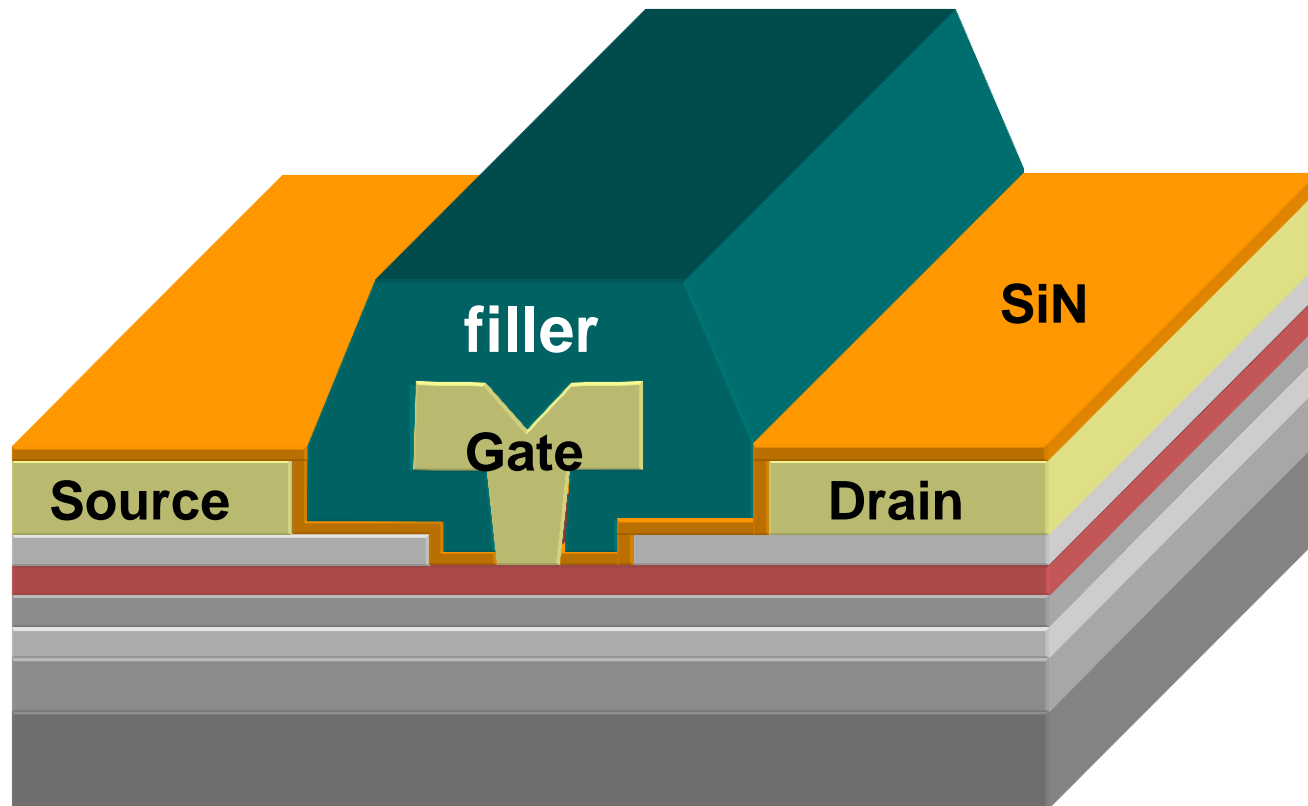


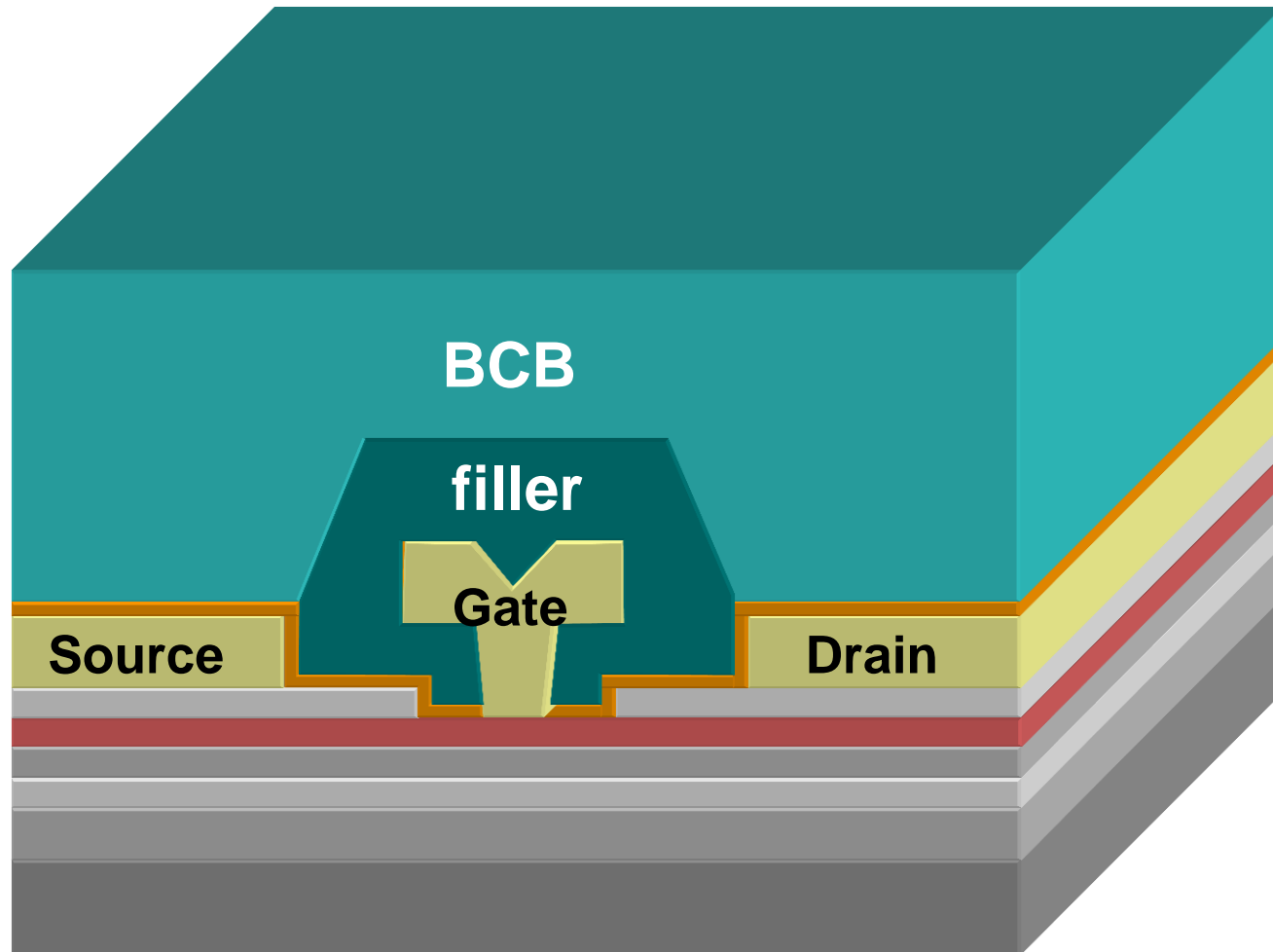
f_T の低下

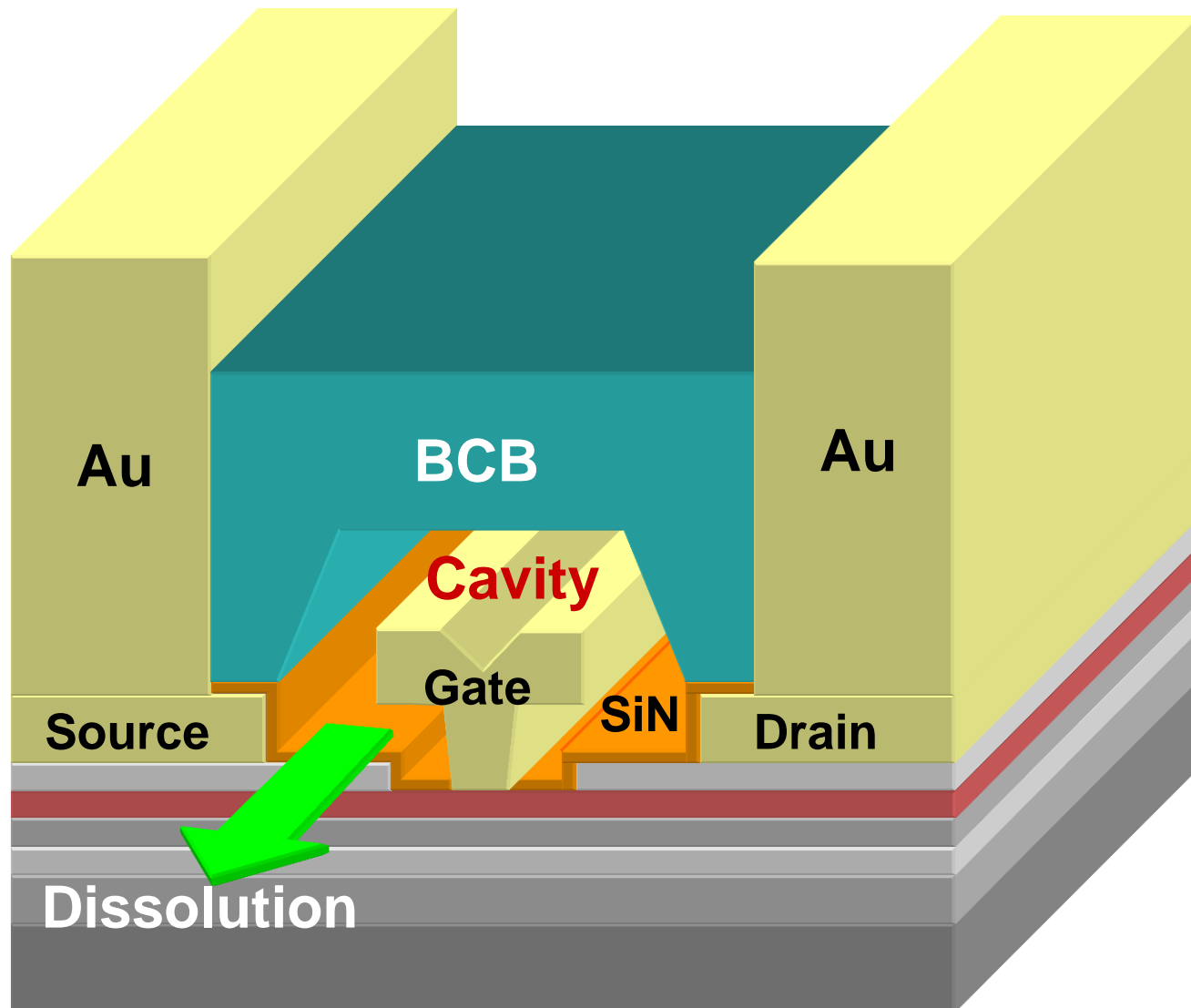


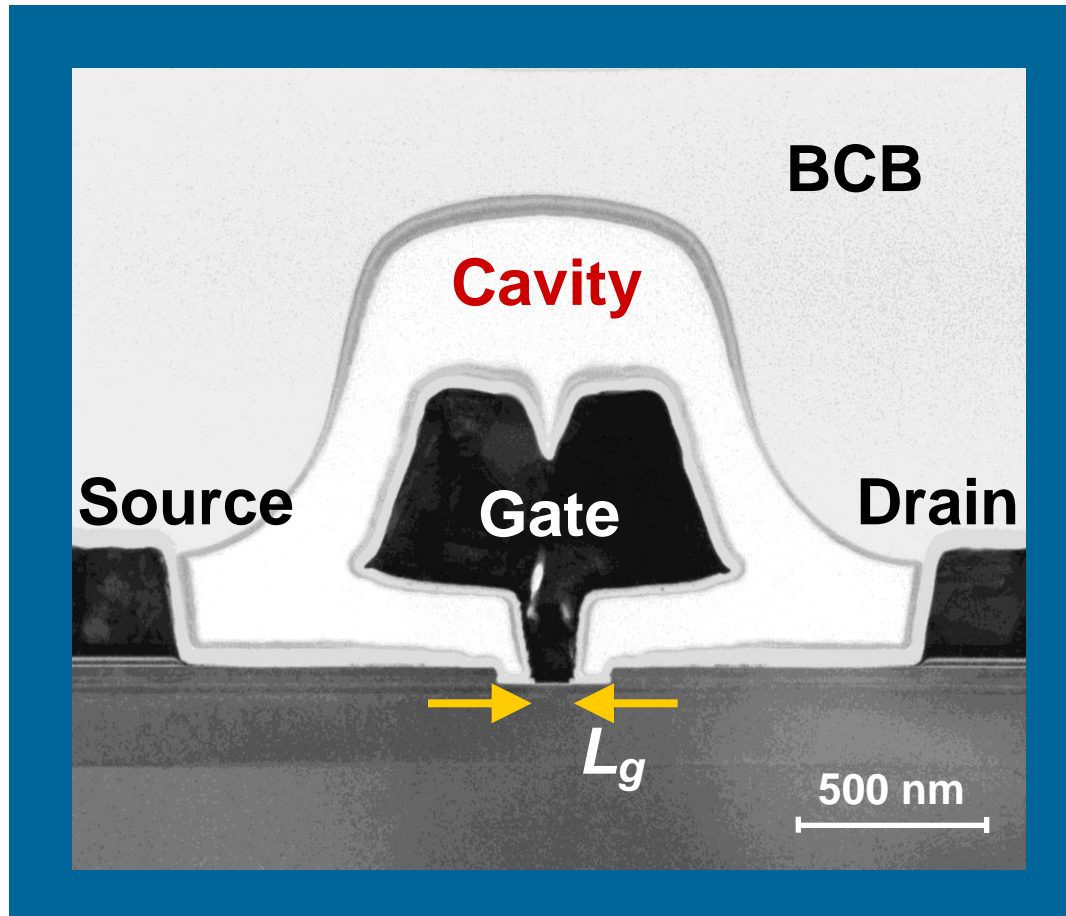
ゲート寄生容量の低減





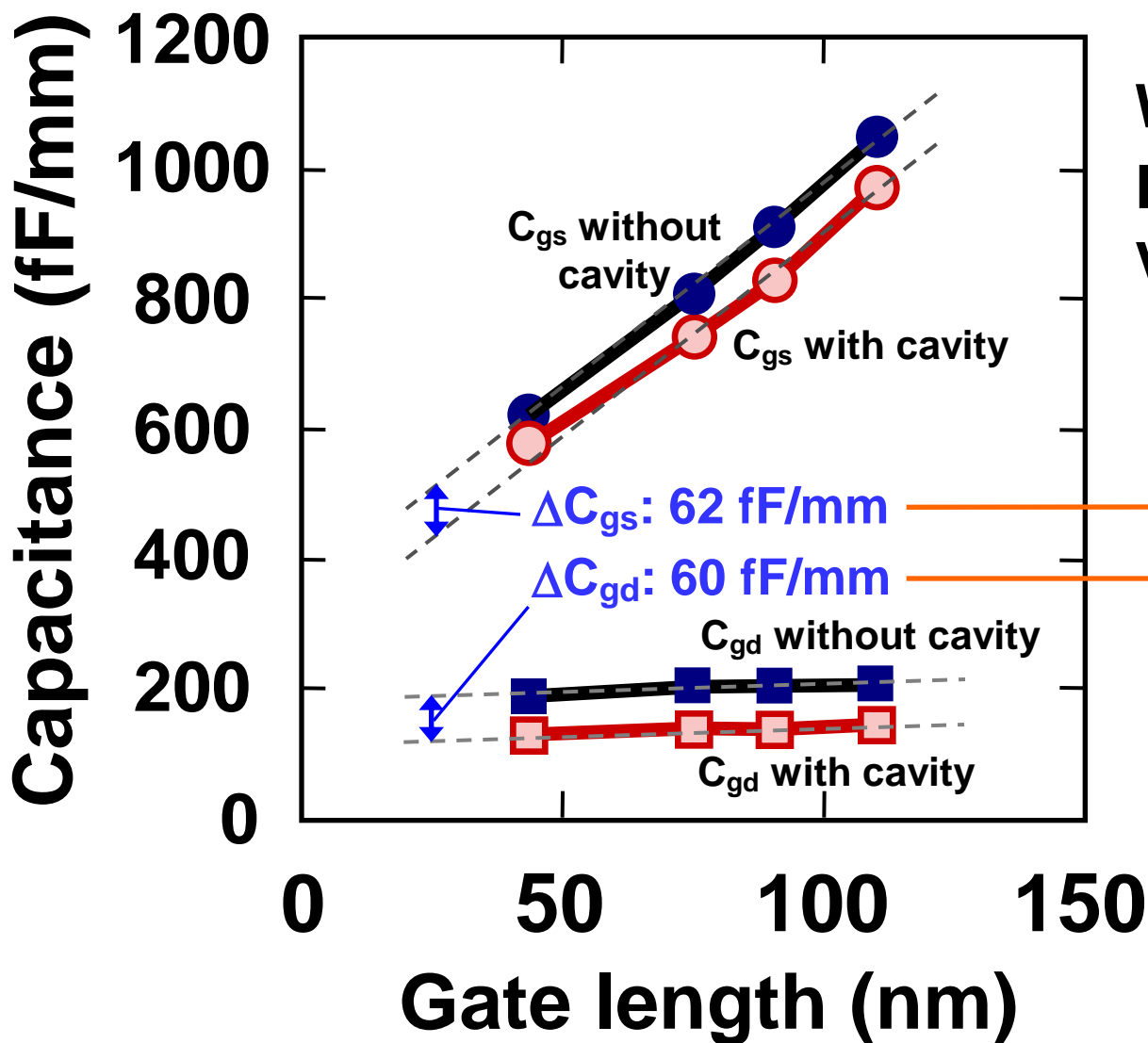




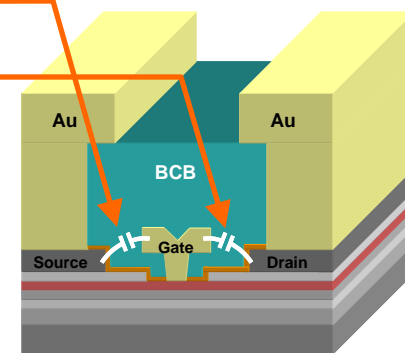


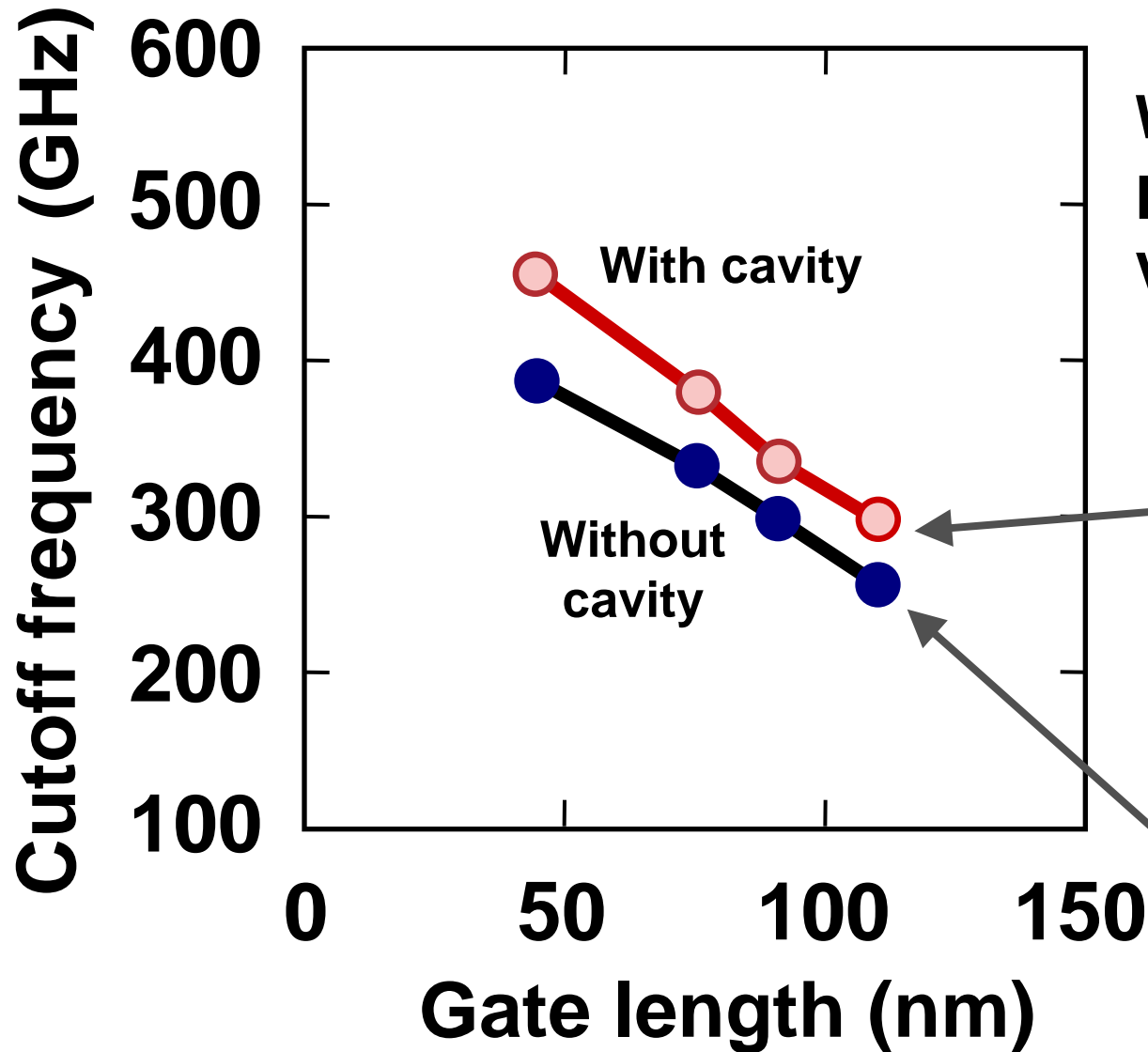
Takahashi et al., *IEEE Trans. Electron Devices*,
vol. 59, no. 8, pp. 2136–2141, 2012.

- 背景
- HEMTの概要
 - HEMTの基本
 - InP HEMT
- InP HEMT技術
 - デバイス構造
 - RF & 雑音特性
 - 低温特性
 - IC特性
- 今後の展望
- まとめ

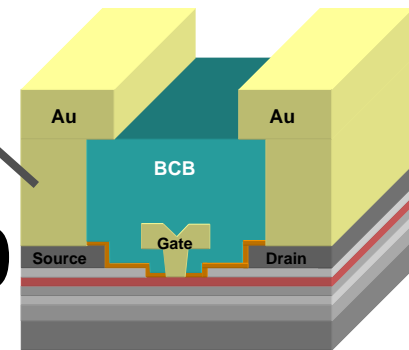
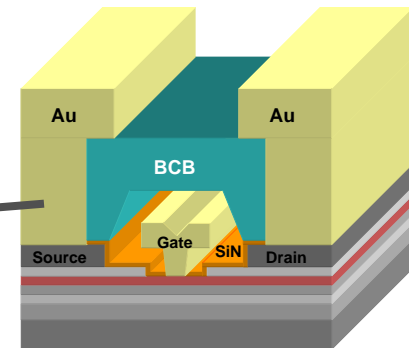


$W_g = 80 \mu\text{m}$
 $L_r = 120 \text{ nm}$
 $V_{ds} = 1.0 \text{ V}$

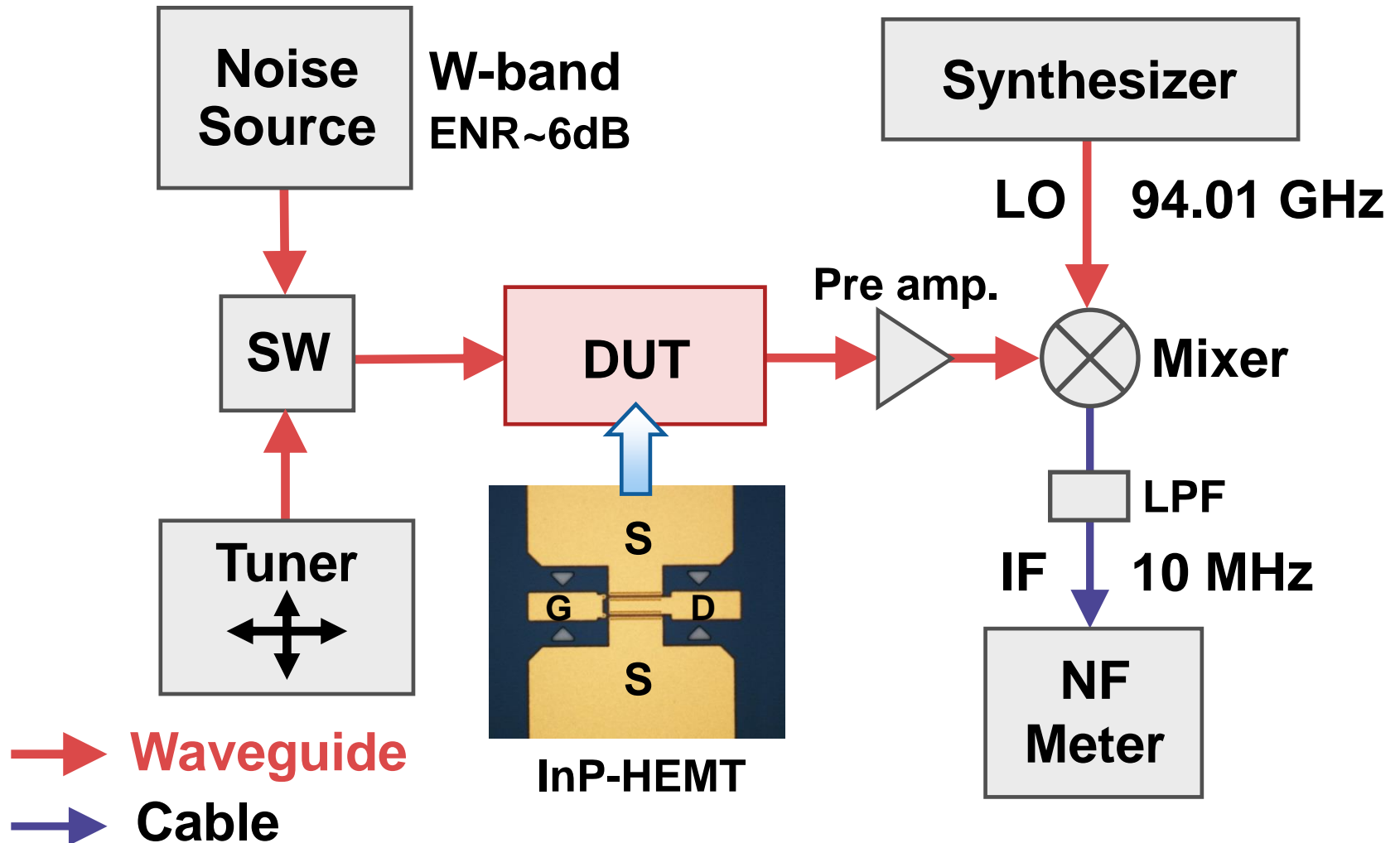


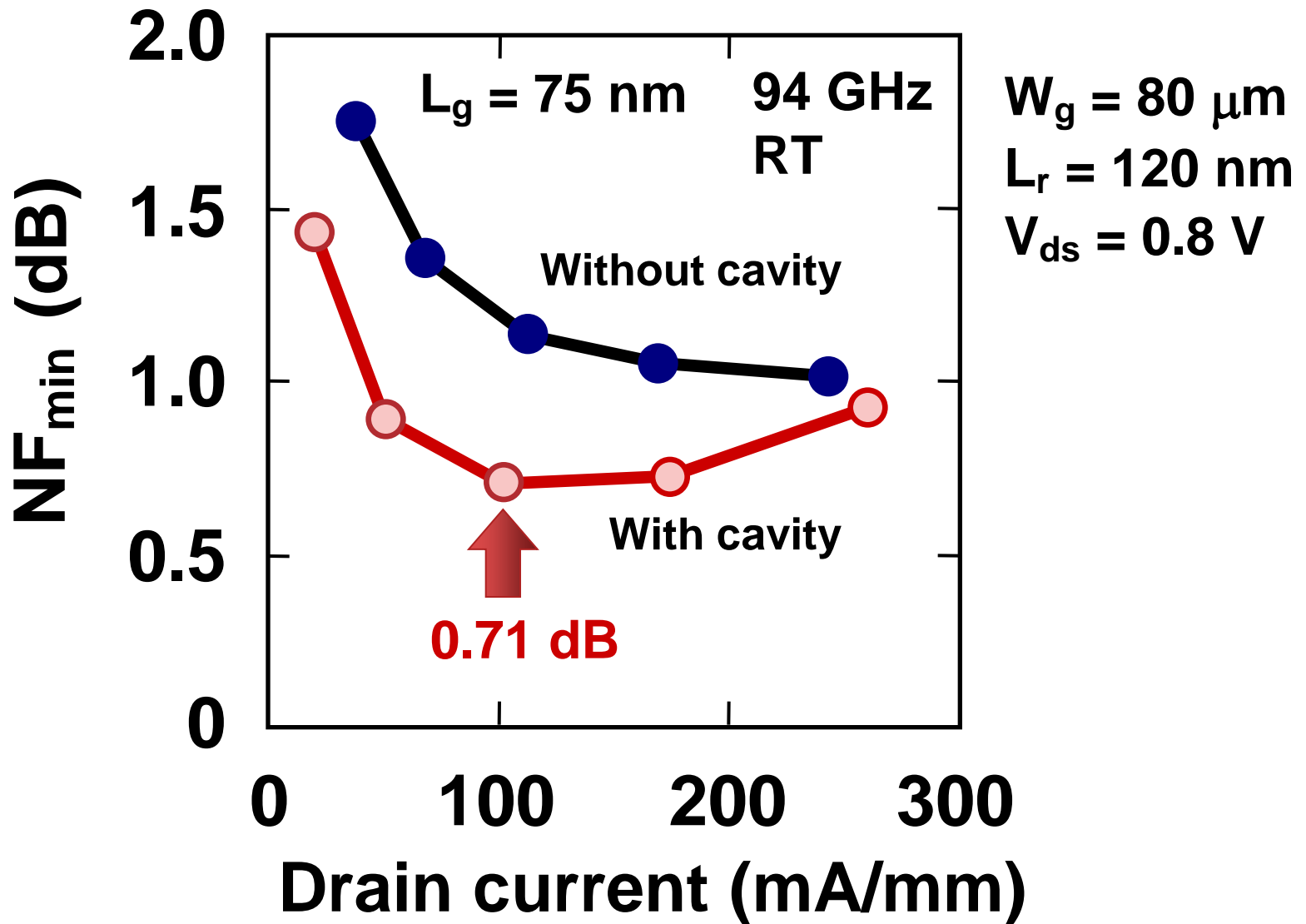


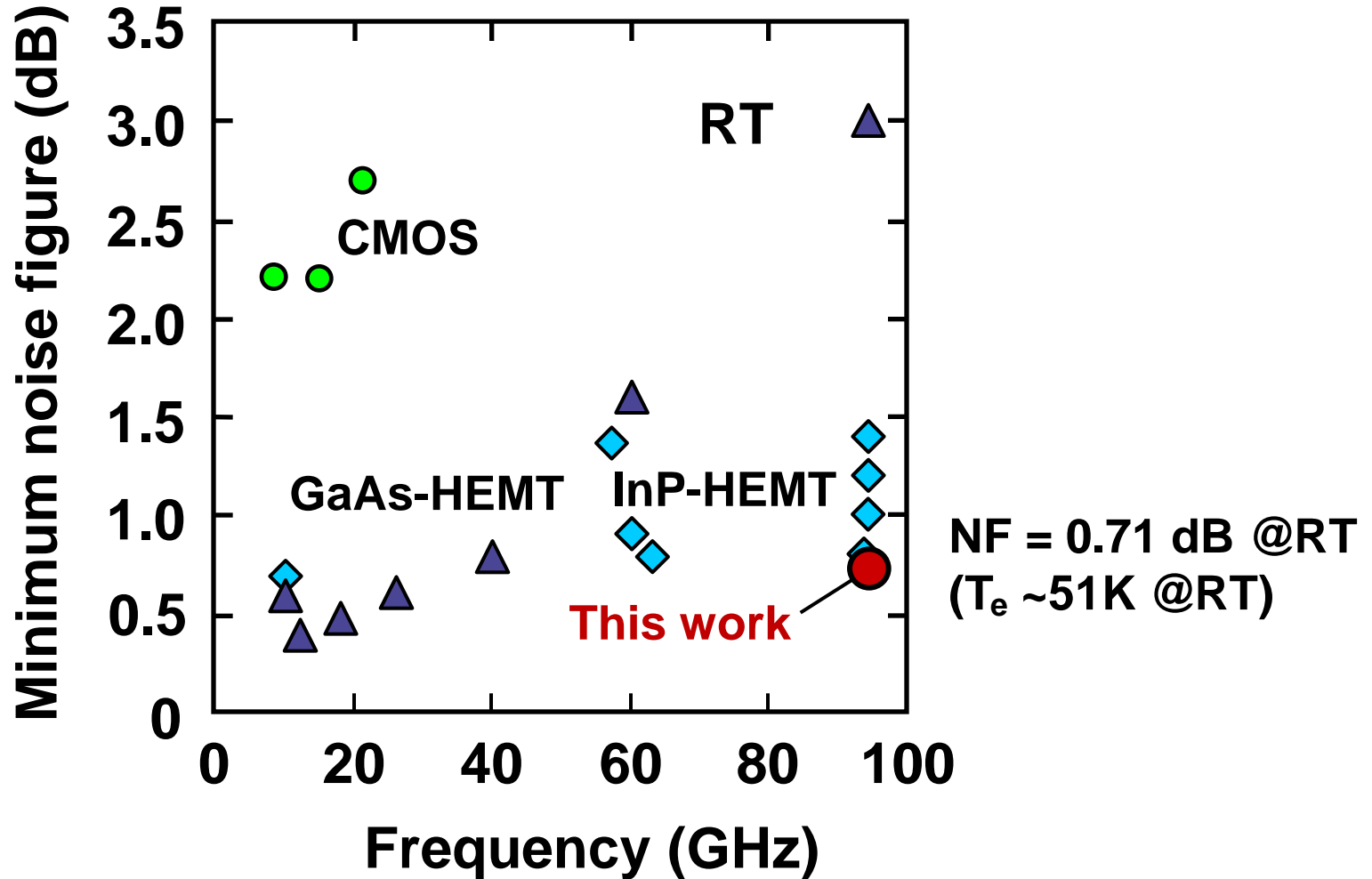
$W_g = 80 \mu\text{m}$
 $L_r = 120 \text{ nm}$
 $V_{ds} = 1.0 \text{ V}$



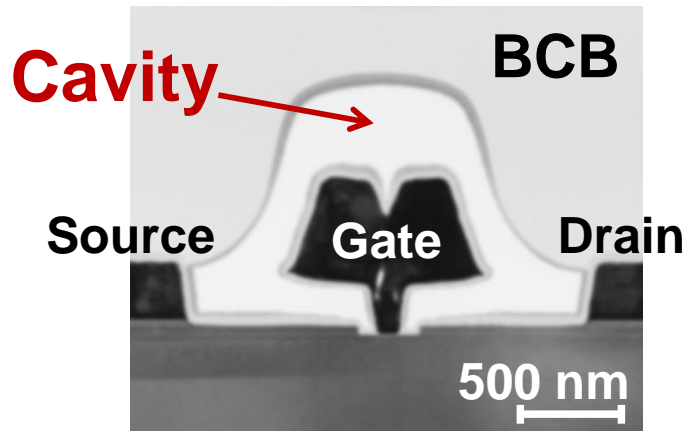
■ Cold-In法 (Cold-Source法)



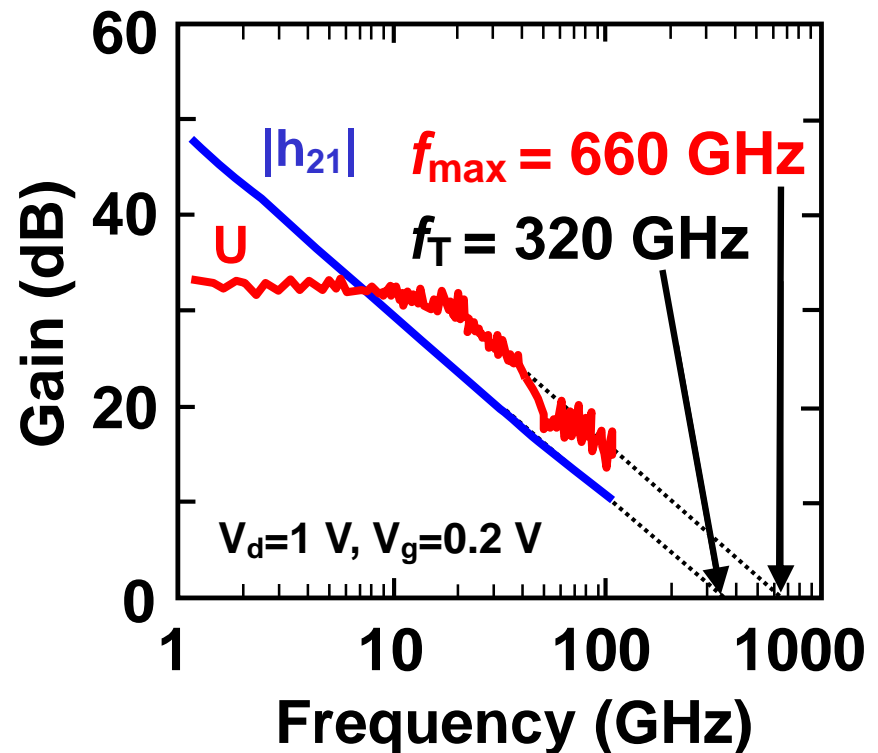




- L_g : 75 nm
- Cavity structure
- f_T / f_{max} : 320 GHz / 660 GHz
- NF_{min} : 0.71 dB @94 GHz, 300K

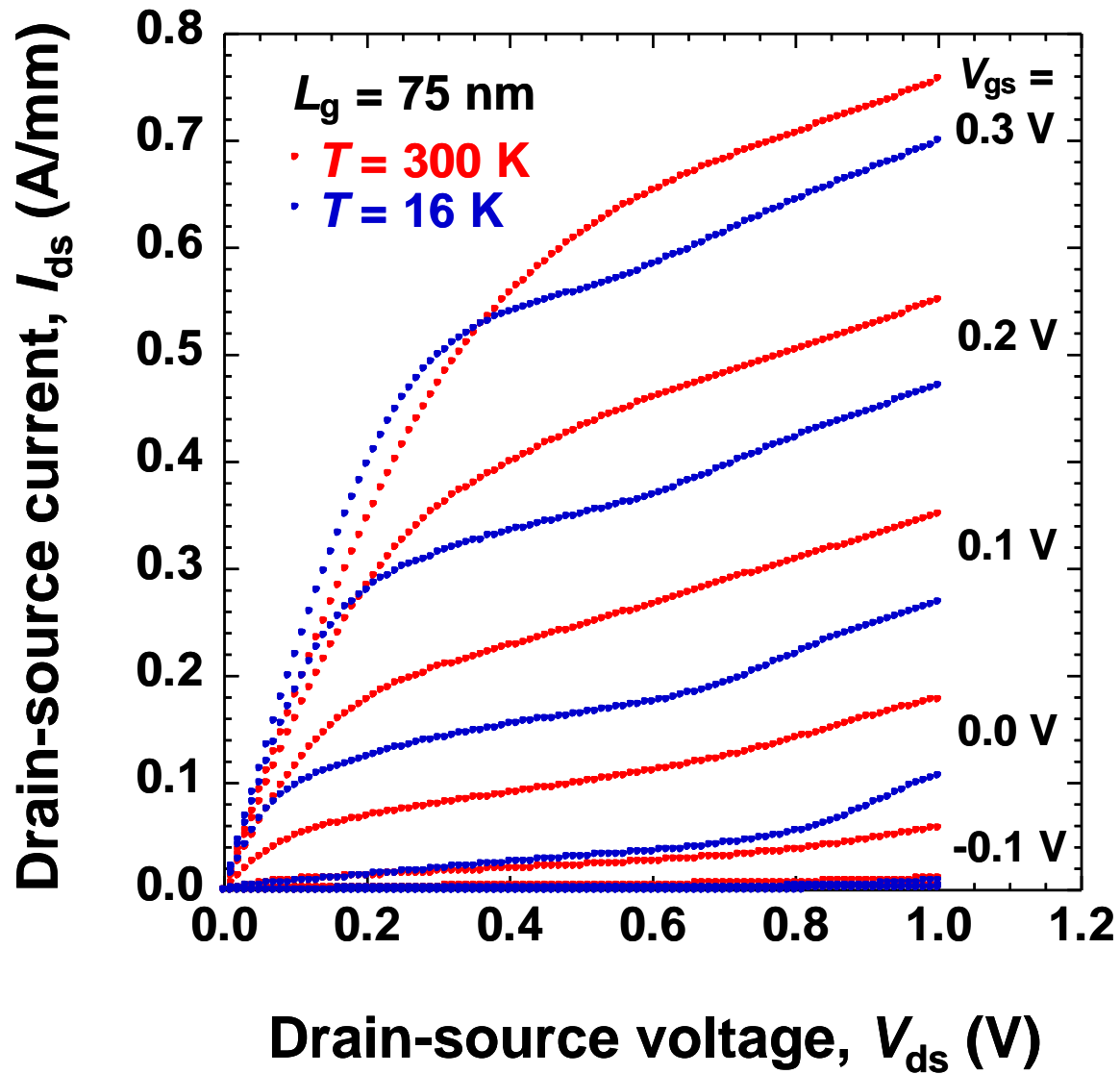


T. Takahashi *et al.*, IEEE ED 2012.

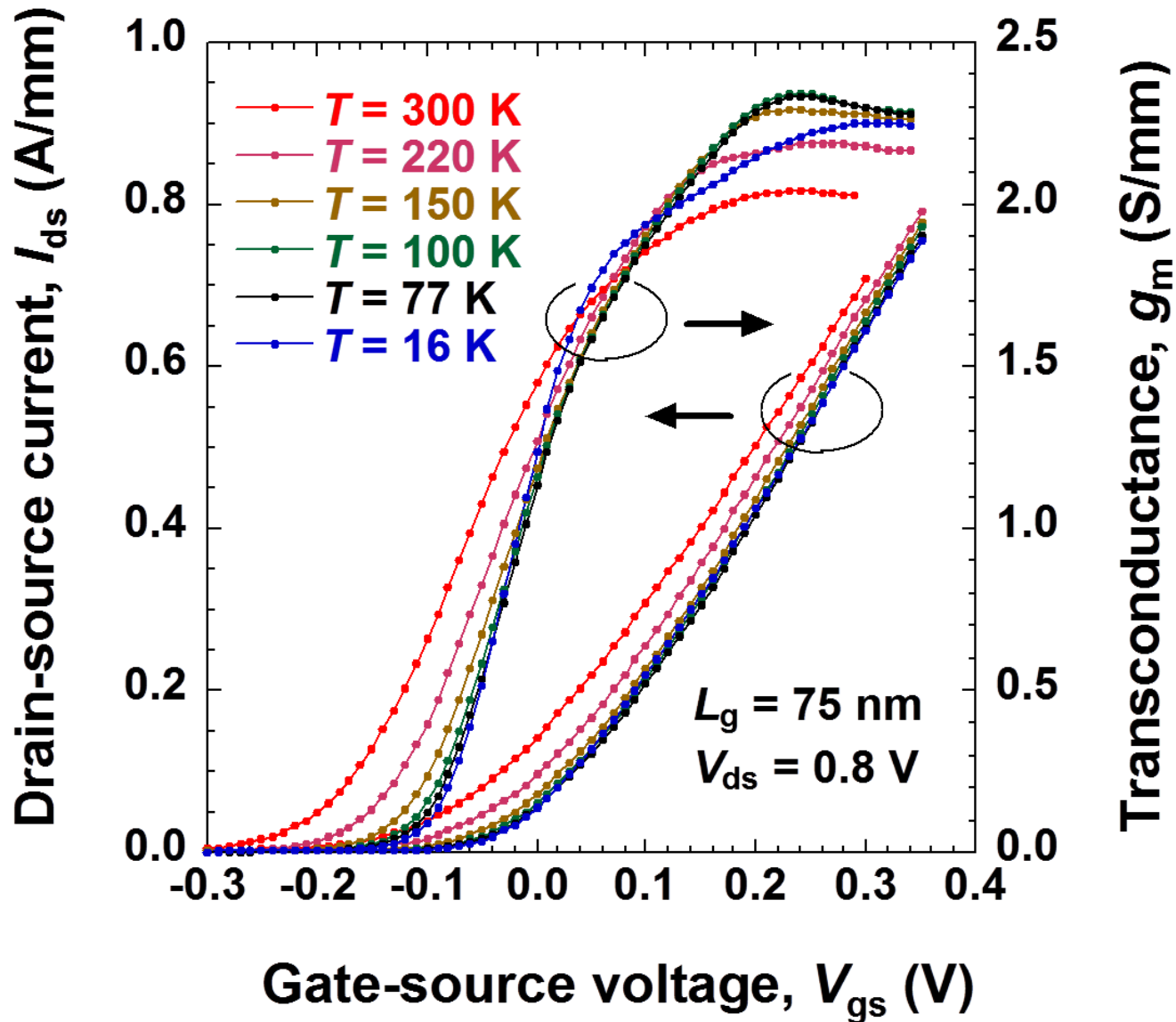


- 背景
- HEMTの概要
 - HEMTの基本
 - InP HEMT
- InP HEMT技術
 - デバイス構造
 - RF&雑音特性
 - 低温特性
 - IC特性
- 今後の展望
- まとめ

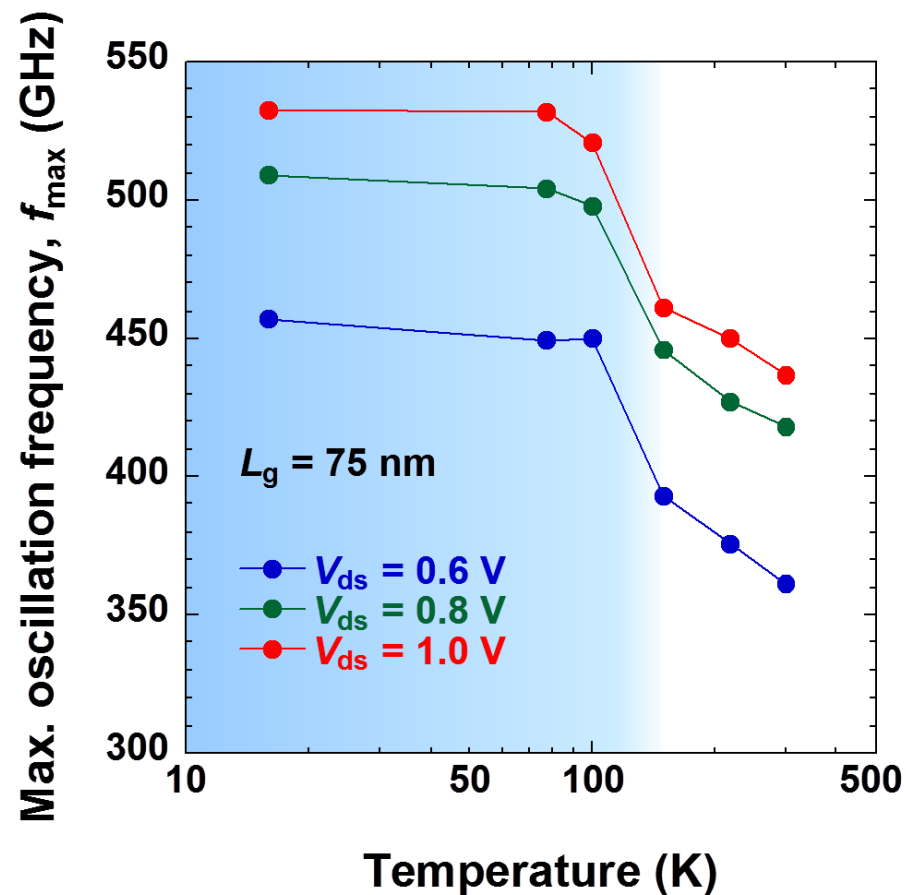
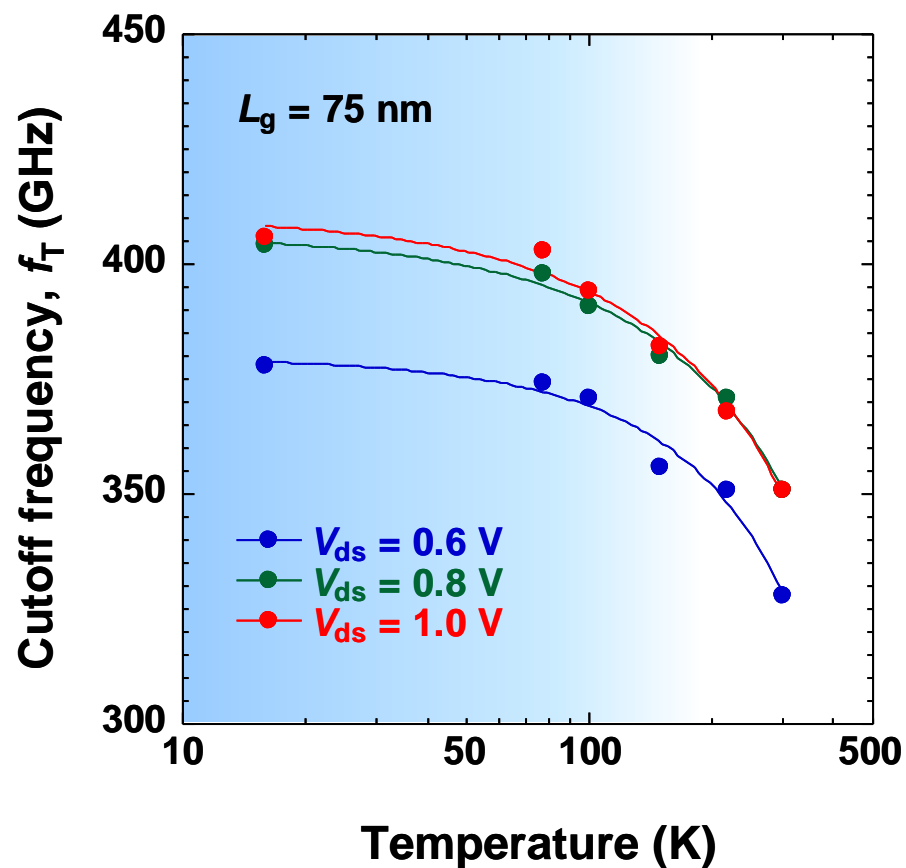
InP HEMTの低温特性 (I_d - V_d)



InP HEMTの低温特性 (g_m)

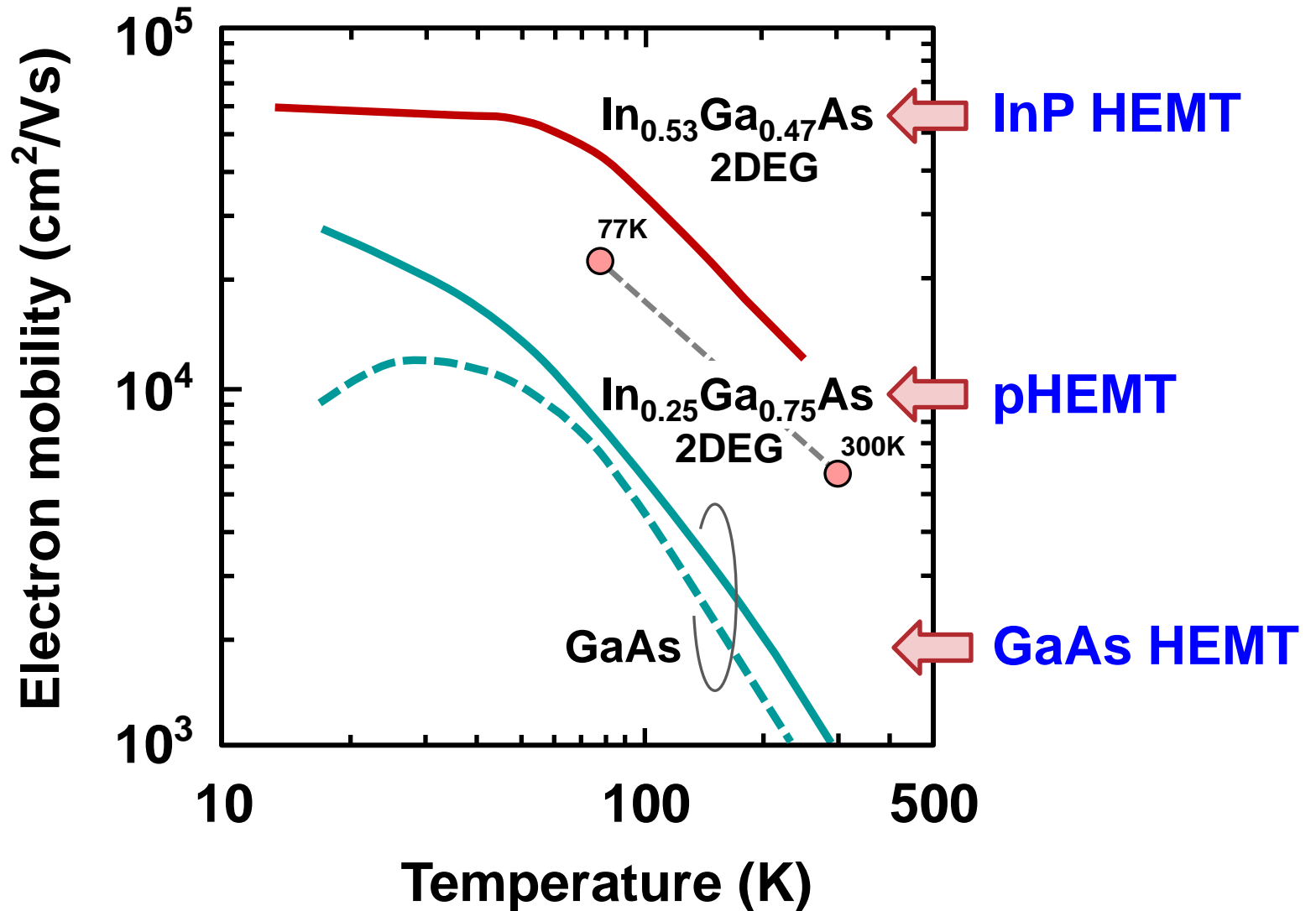


InP HEMTの低温特性 (f_T , f_{max})



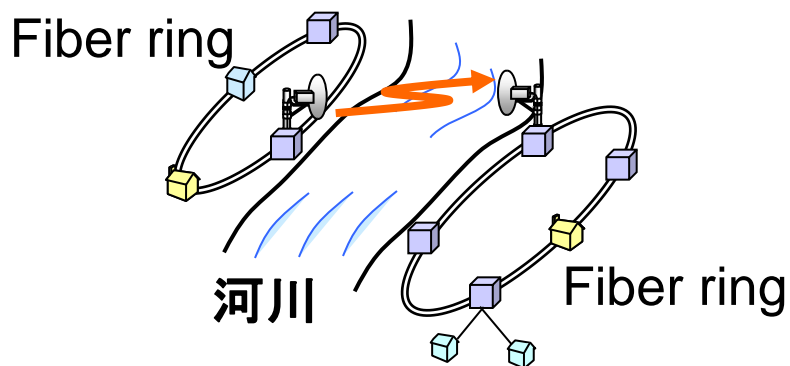
100K以下では特性が飽和傾向

InP HEMTの低温特性(電子移動度)

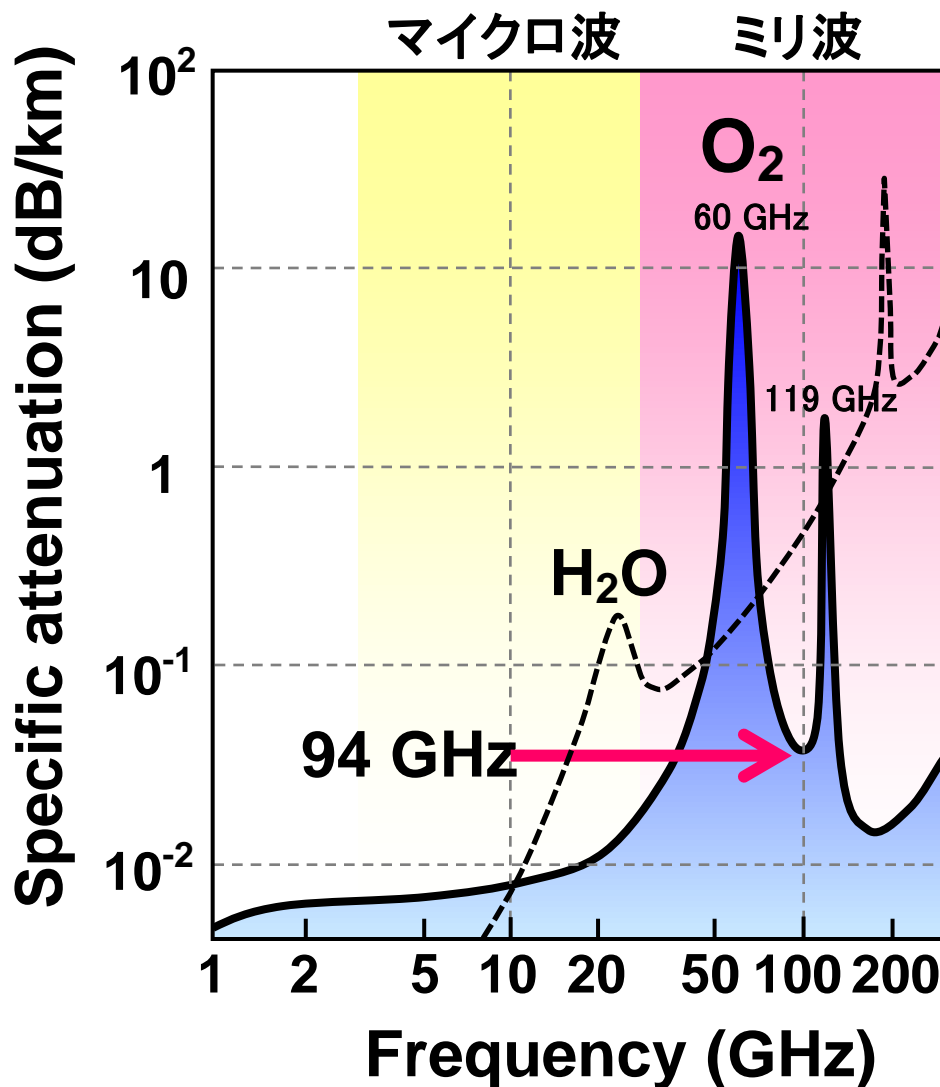
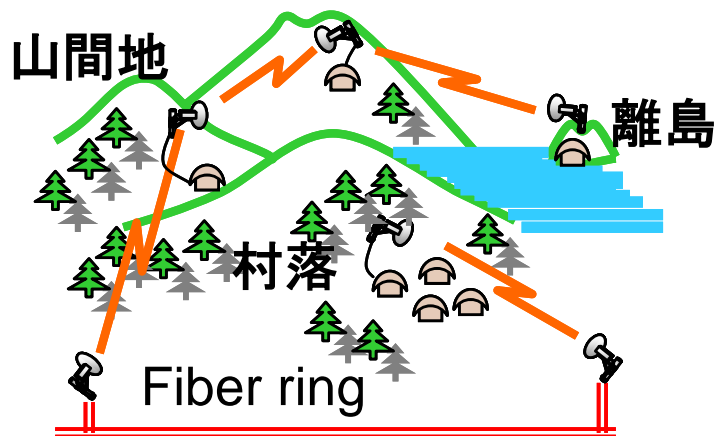


- 背景
- HEMTの概要
 - HEMTの基本
 - InP HEMT
- InP HEMT技術
 - デバイス構造
 - RF & 雑音特性
 - 低温特性
 - IC特性
- 今後の展望
- まとめ

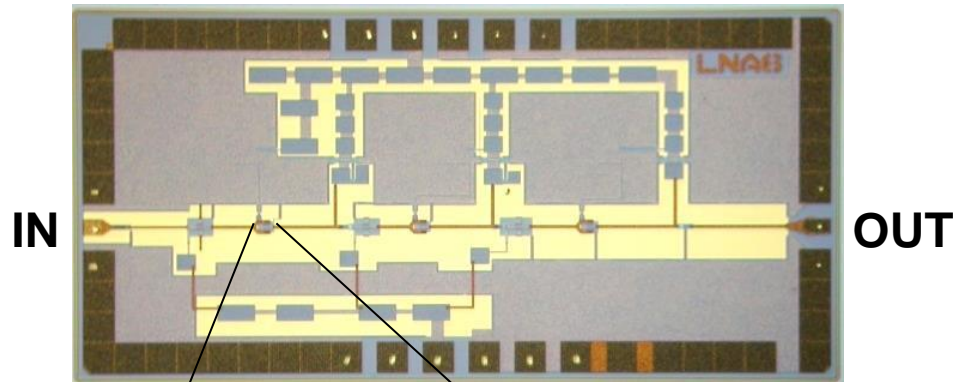
光ファイバ網の拡張



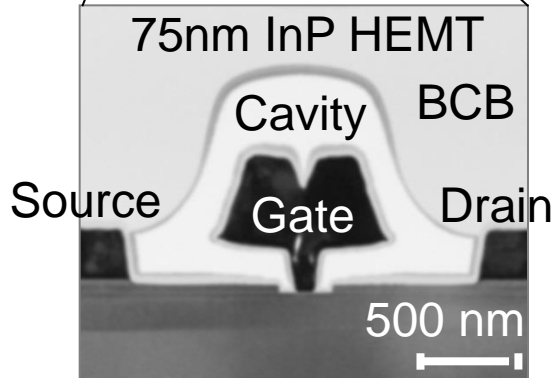
光ファイバ網の補完



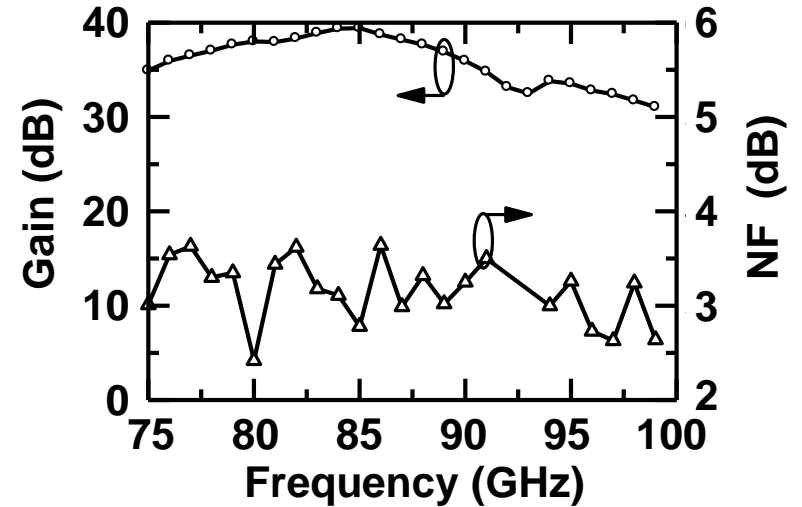
94GHz帶LNA



2.5 × 1.2 mm²



RT

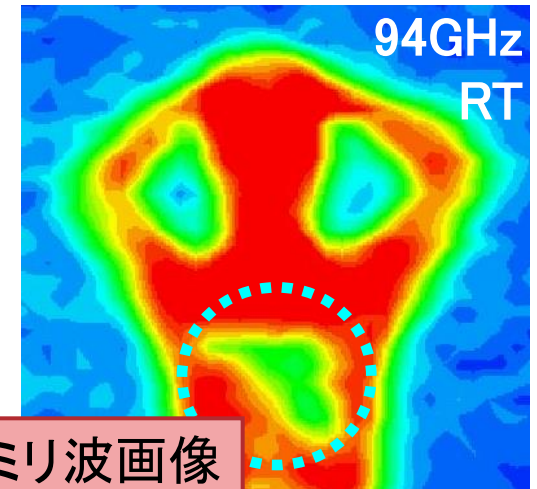
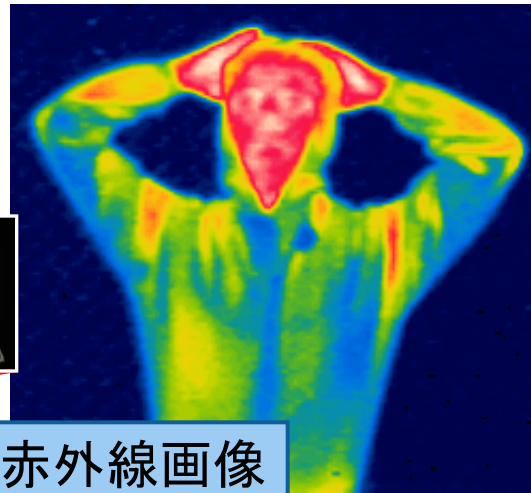


■ **Gain: 40 dB @85 GHz**

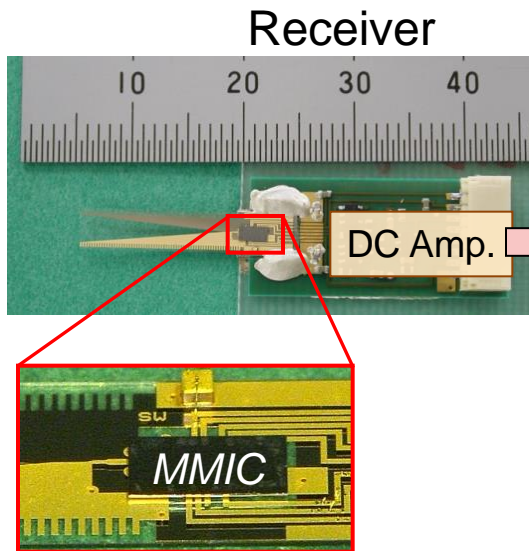
■ **NF: 3 dB**

Sato et al., *IEICE Trans. Electron.*, 2009.

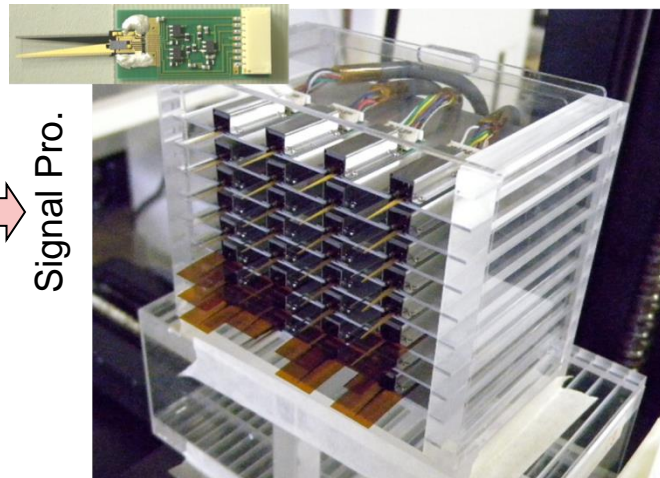
ミリ波イメージング(パッシブ)の例



APMC2007, Sato et al.



InP HEMT MMICをFlip chip



32素子受信器アレイ

ミリ波：
物体を透過

隠匿物の検知



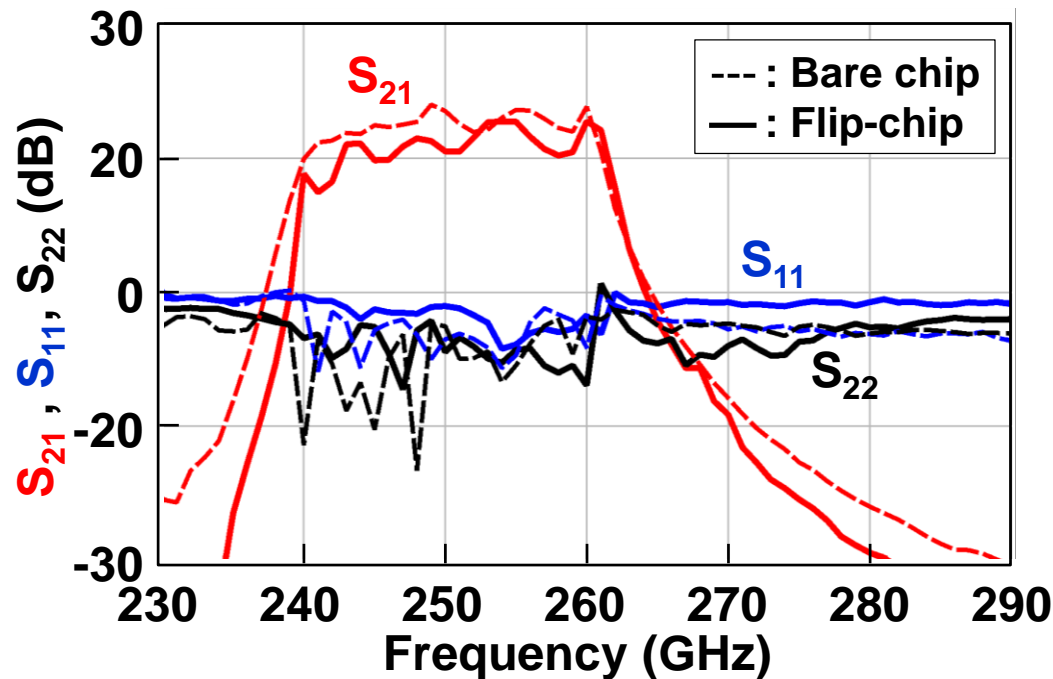
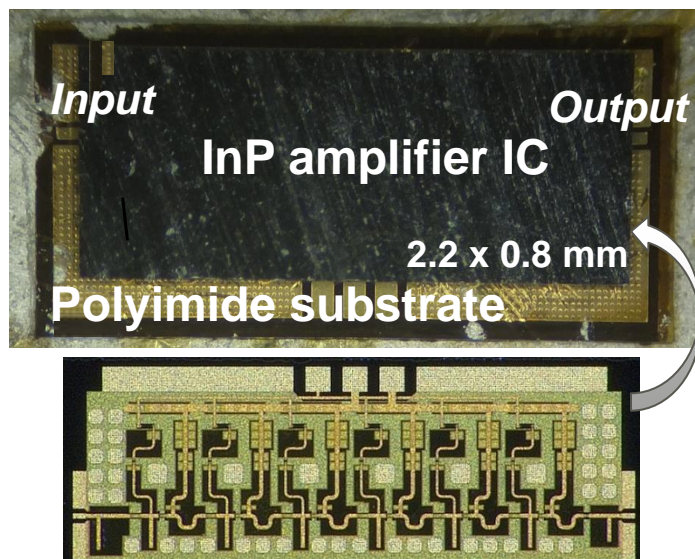
セキュリティ用途

フリップチップ実装InP HEMT増幅器

- The first demonstration beyond 200 GHz
- Only 2-dB decrease before/after flip-chip mounting

(Top view) (Cross view)

40 μ m



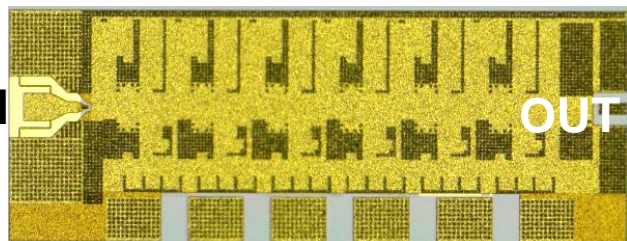
Y. Kawano *et al.* IMS 2014

300GHz帯増幅器

■ Gain: >20 dB

■ BW: 80 GHz

ゲート接地6段増幅器



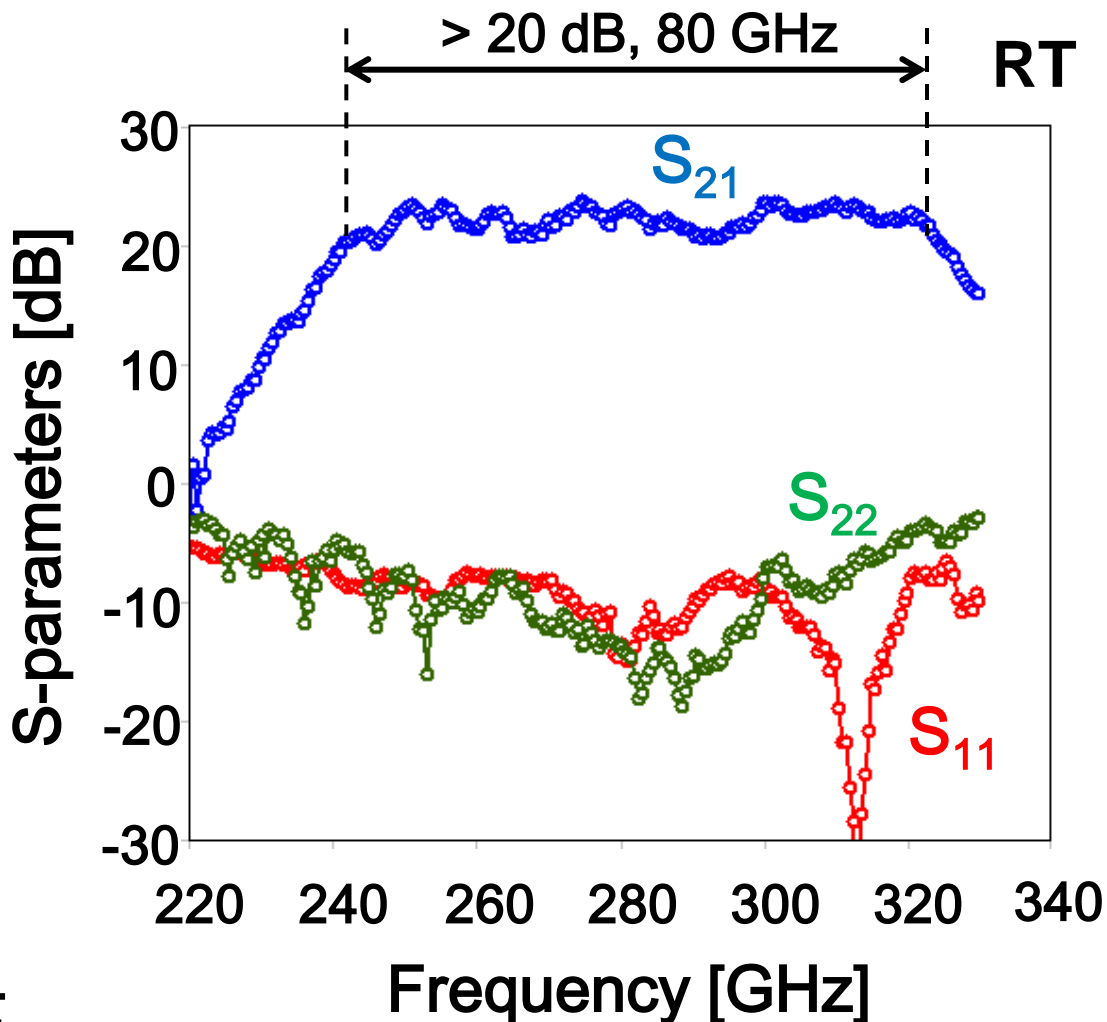
1.1 x 0.4 μm^2

Y. Kawano et al., TWHM2015.



テラヘルツ通信

(非接触瞬時ダウンロード)



- 背景
- HEMTの概要
 - HEMTの基本
 - InP HEMT
- InP HEMT技術
 - デバイス構造
 - RF&雑音特性
 - 低温特性
 - IC特性
- 今後の展望
- まとめ

■ 動作周波数向上

- f_{\max} 向上

- 500~600GHz帯 増幅器の可能性

■ 低雑音化

- MMIC初段のゲート長短縮 75nm→30nm級

■ 高感度化

- 検波器の集積化

■ 用途

- テラヘルツ帯大容量無線通信(データの瞬時転送)

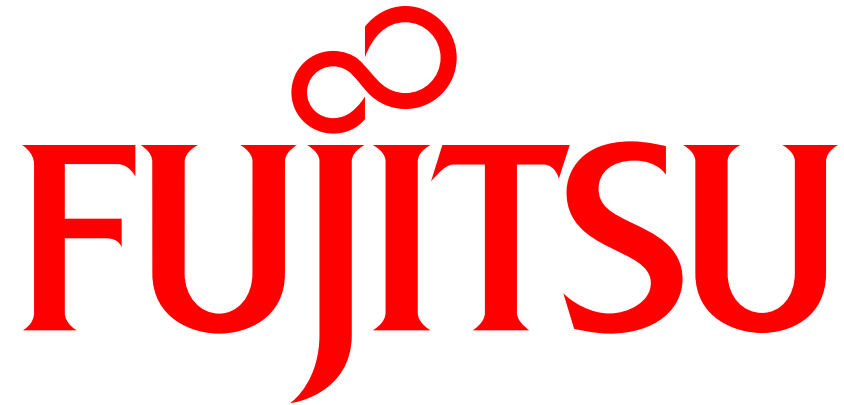
- イメージセンサ(高解像度)

- 電波天文(ミリ波帯マルチビーム化)

- InP HEMTに空洞構造を適用することで、RF特性およびミリ波帯の雑音特性を改善した。
- InP HEMTは低温においてRF特性が向上するため、NFのさらなる改善が期待できる。
- 空洞構造を適用したInP HEMTを用いて300GHz帯のテラヘルツICを実現した。

謝辞

本研究の一部は、総務省委託研究「超高周波搬送波による数十ギガビット無線伝送技術の研究開発」の一環として実施した。



shaping tomorrow with you