

## 4-2 テラヘルツ無線を可能にする要素技術の動向と課題

ここでは、テラヘルツ無線を実現する上で、重要な要素技術として、デバイス及びアンテナ技術についての現状と今後の可能性について、各分野の第1人者にヒアリングを実施するとともに、テラヘルツ無線の利用シーンを実現するための技術課題と研究開発戦略をとりまとめた。

### 4-2-1 デバイス・アンテナ技術の動向

(テーマ) デバイス・アンテナ技術の動向

(講師) 日本電信電話株式会社

マイクロシステムインテグレーション研究所 ソン・ホジン研究員

#### 講演概要

- テラヘルツ波を用いた超高速無線通信の実現に向けて必要とされるであろうデバイスとアンテナ目標とするパラメータを試算した。試算した結果を基にSi CMOS, SiGeデバイス、化合物半導体デバイスなど多岐にわたるデバイス技術について最新の動向を述べられた。これらデバイスを用いた回路での増幅、発振についても動向が報告された。アンテナ技術に関しては主にオンチップアンテナ、オフチップアンテナという観点で比較した動向が報告され、メタマテリアルの可能性についても触れられている。
- テラヘルツ無線通信の実現に向けて、ASK変調方式で通信距離を5mと仮定した場合に、転送速度100Gbpsを達成するためには出力1mW、アンテナ利得は25dBiが必要であると試算。この結果を基本に、現状のデバイス、アンテナ技術の動向と照らし合わせて、テラヘルツ無線の実現性を検討した。今回いくつかパラメータを仮定したが、NF(Noise Figure)が15dB等の目標値の妥当性と実現可能性については今後の精査が必要である。
- III-V族化合物半導体でのHBTではTeledyneにより商業ベースで遮断周波数( $f_T$ )660GHz、最大発振周波数( $f_{max}$ )392GHzという特性を示している(エミッターベース接合幅500nm)。研究段階のものでは接合幅を256nmにすることで $f_T$ ,  $f_{max}$ はそれぞれ660GHz、780GHzにまで高速化が実現されており、さらに接合幅を64nmまで狭くすることで $f_T=1\text{THz}$ ,  $f_{max}=1.5\text{THz}$ という1THzを超える動作周波数を目指している。
- III-V族HEMTでは、InP系材料を中心に $f_T$ ,  $f_{max}$ ともに300GHzを超えるものが出ており、研究ベースでは $f_{max}$ が1THzを超えており、300GHzのLNAとしての動作確認もなされている。これらの進展はゲート長を小さくすることによるが、寄生抵抗・寄生容量の影響を除去することがより重要となってくる。
- SiCMOSはコスト、信頼性、他機能との集積化に対しては有利ではあるが、NF、利得、出力の点では不利な材料と言える。とは言え400GHzに迫る特性が出されており、近い将来には600GHzのものが出てくると思われる。
- 上記の高周波デバイスを活用した回路による増幅器、発振器、ミキサなどの報告も数多く出されている。増幅器では300GHzを超えるものが出ており、発振器では700GHzに迫るものも報告されている。また、CMOSを用いた300GHz MMICも数年のうちには登場するものと期待されるが、いずれも利得と出力の向上のために高効率化を図ることが重要な課

題である。

- アンテナについてはオンチップアンテナとオフチップアンテナの比較が述べられた。それぞれ一長一短があるが、いずれも利得は15dB以下であり300GHz通信に必要とする25dBには遠く及ばない。オフチップアンテナの中ではメタマテリアルの可能性も指摘された。周波数が高くなるにつれて表皮抵抗が無視できなくなる中でメタルを用いない導波路形成という点でフォトニック結晶のような構造による導波にも期待される。テラヘルツ帯デバイスの開発において、アンテナ特性の改善がかなり重要なものとなっている。

#### **質疑応答**

- テラヘルツ無線の実現に向けて、シリコン系デバイスと化合物半導体デバイスは、どのような位置付けとなるか。
  - 現時点での高周波デバイスとしては特性に優れた化合物半導体デバイスとコスト面で有利と思われるシリコン系デバイスと言った構図になっているが、ミリ波の開発の流れと同様に化合物デバイスが開発の先導をしていきながら、やがてシリコン系デバイスに置き換わるという流れが想定される。ただし、特性の面で優位性のある化合物半導体デバイスの将来性がないわけではない。
- コストの観点から、テラヘルツ波無線を実現するために重要な要素は何か。
  - 60GHz無線の動向と同じように、材料価格、生産設備能力の点で言えばやはりシリコン系デバイスが有利である。しかし、ミリ波やテラヘルツ波の分野ではアンテナなどのコンポーネントの集積化、実装技術が大きなコスト要因であると思われる。特にアンテナに関してはミリ波においてもシリコンの上に集積化できていない。そういった点からもシリコンか化合物かと言う基板の比較だけでなく、同じ基板上に実装・集積化できるかどうかを検討することが重要である。生産技術の点からは、コストを下げようとする実装技術へのウェイトが高くなり、コストと特性の両面からのアンテナ特性の改善がテラヘルツ波無線通信の実現に向けて非常に重要な要素である。
- 座長より、今回の講演で紹介されたデバイス技術のほとんどが欧米のグループによる成果であることは、日本としては憂慮すべきとのコメントがあった。

# Review on Device, Circuit and Antenna Technologies

## for Terahertz Communication System

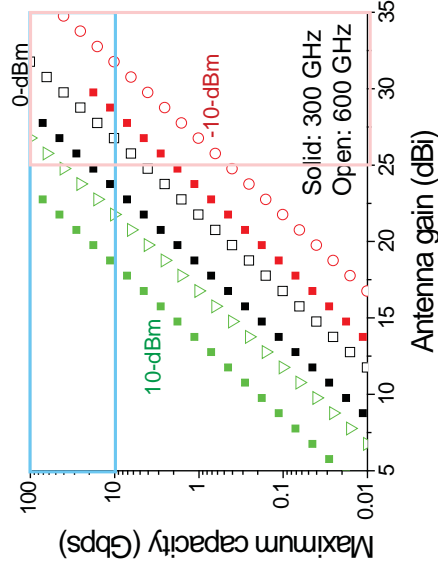
Ho-Jin Song

NTT Microsystem Integraion Labs.,

2010. 2. 2.

### テラヘルツ波のリンクバジェット

Frequency (GHz)	300 / 600
Loss in Air (dB/Km)	10 / 100
Distance (m)	5
Spectral efficiency (bit/Hz)	1 (ASK)
<b>Radiated power (dBm)</b>	<b>0</b>
Noise level (dBm/Hz)	-174
<b>Noise figure (dB)</b>	<b>15</b>
System margin (dB)	10



- 100 Gbpsまでの可能性を有する(以下の条件)  
Upto 100 Gbps is available. But at least,
  - approximately 1-mW output power
  - More than 25 dBi antenna gain

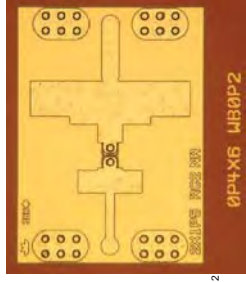
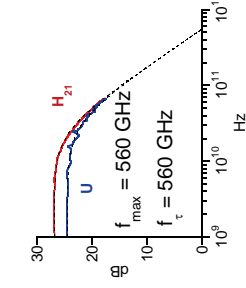
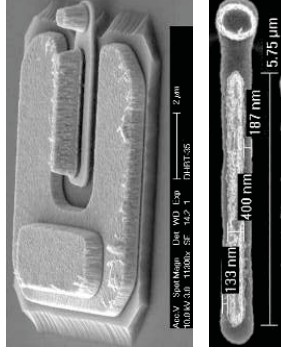
## イントロダクション

### 条件の詳細

- **1-mW Output power in Tx**
  - Tx output stage with 2-V / 5-mA DC, 10-% PAE
  - But, maybe poorer efficiency of around a couple of % in THz region.
  - Maybe come from huge loss even in ICs (conductive loss, dielectric loss)
- **15-dB Noise figure of Rx**
  - Loss in front of LNA (eg. antenna feeding line ) may cause problem in NF of Rx
- **25-dBi Antenna**
  - Approximately, 1-cm long horn antenna provides 25-dBi gain
  - In case of arrayed antenna, more than 100 units of 5-dB patch are necessary
  - Beamsteering to overcome LOS operation
- **Operating frequency**
  - For 300-GHz amplifier, 400~600-GHz  $f_T/f_{MAX}$  devices are necessary.

### III-V HBT

- R&D HBT, Rodwell Group, UCSB, USA
  - In 2008, HBT with 500-nm emitter-base junction width was commercialized by Teledyne ( $f_T = 405$  GHz,  $f_{MAX} = 392$  GHz)
  - 256-nm lab.-version device shows maximum  $f_T$  and  $f_{MAX}$  of 660 GHz and 780 GHz, respectively and  $\sim 3$ -V of  $BV_{CE}$ .
  - Applied to 300-GHz band amplifier (details later)
  - Aiming to 64-nm HBT with 1-THz  $f_T$  and 1.5-THz  $f_{MAX}$



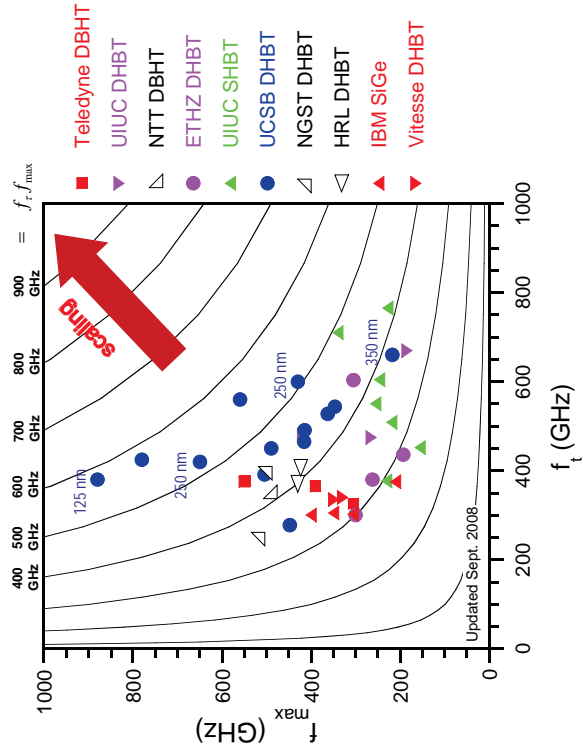
5

M. Rodwell, et al., CSIC 2008

6

## デバイス

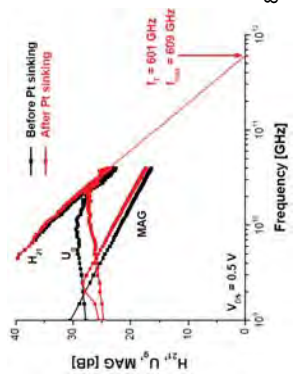
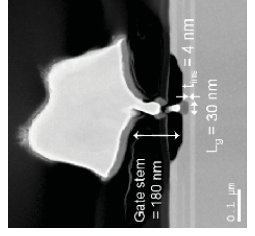
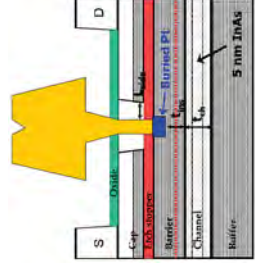
### III-V R&D HBTsのトレンド (~2008)



7

### III-V HEMT

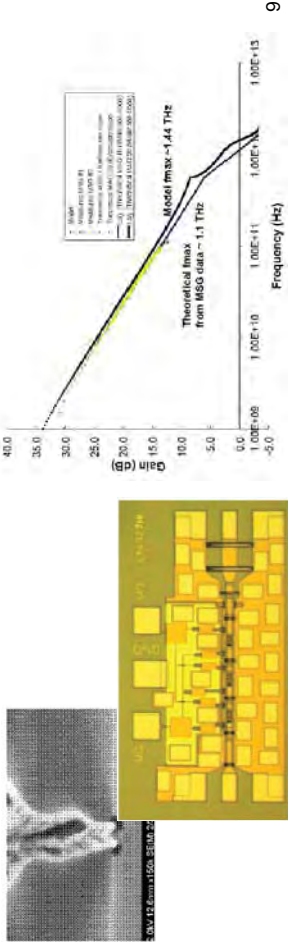
- R&D pHEMT, J. A. de Alamo Group, MIT, USA
  - Best record holder at 2009
  - 30-nm InAs/InP-HEMT:  $f_T / f_{MAX} = 601 / 609$  GHz (IEDM2008)
  - 30-nm InAs/InP-HEMT:  $f_T / f_{MAX} = 628 / 331$  GHz (EDL2008)
  - 50-nm InAs/InP-HEMT:  $f_T / f_{MAX} = 557 / 718$  GHz (EDL2008)
- But, main target of the development is for digital VLSI applications such as next generation microprocessor



8

## III-V HEMT

- R&D pHEMT, Northrop Grumman, USA
  - Former TRW, one of the major company for military and space system
  - Conducting 'Terahertz Electronics' program supported by DARPA
    - Started at April 2009
    - Development of transistor for MMICs operating at 670 GHz
  - InP HEMT with  $f_{max}$  greater than 1 THz (IEDM2007)
    - $f_T = 385$  GHz,  $f_{MAX} > 1$  THz
    - Successfully applied to 300-GHz LNA



9

## III-V HEMT

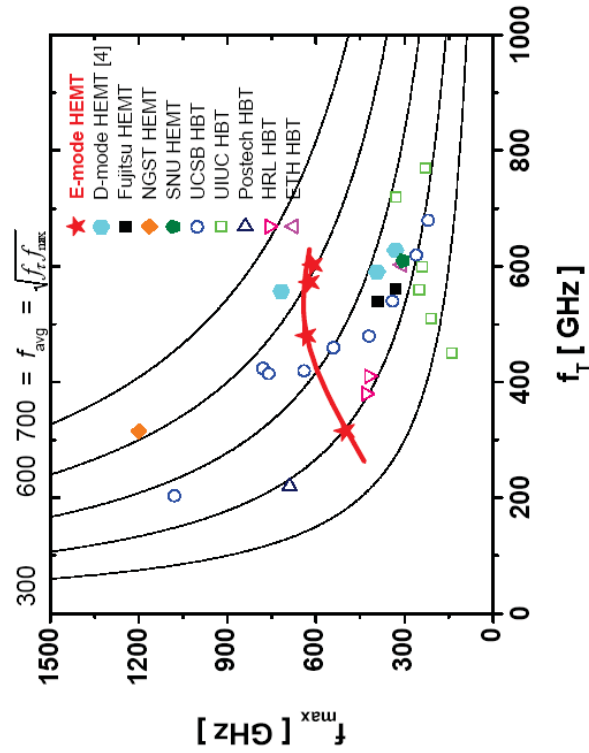
- Foundry service of III-V HEMT
  - OMMIC, France
    - 70-nm MHEMT ( $f_T / f_{MAX}$ : 300 / 350-GHz)
  - Northrop Grumman, USA
    - 100nm InP HEMT ( $f_T / f_{MAX}$ : 180 / 350-GHz)
  - UMS (France)
    - 150-nm GaAs pHEMT (110-GHz cut-off)
    - Schottky diode (3-THz cut-off)

Process	EDGEH (pHEMT)	BOTH (pHEMT)	BOTH (pHEMT)	BOTH (pHEMT)	Source (pHEMT)	Source (pHEMT)
Gate length (nm)	0.18 / 0.15	0.13	0.13	0.07	1.5	
$f_T$ (GHz)	0.18 / 0.15	100	150	300	180	
$f_{max}$ (GHz)	0.18 / 0.15	180	250	360	200	
Gate (V)	0.05	0.12	0.10	0.05	0.05	
Gate (V)	0.05	0.12	0.10	0.05	0.05	
Gate (V)	0.05	0.12	0.10	0.05	0.05	
Gate (V)	0.05	0.12	0.10	0.05	0.05	
Gate (V)	0.05	0.12	0.10	0.05	0.05	
Gate (V)	0.05	0.12	0.10	0.05	0.05	
Gate (V)	0.05	0.12	0.10	0.05	0.05	

Parameter / Technology	Lum. HBT	Gate HBT	0.8 um Digital InP HBT	Lum. HBT	0.15 um Gate HEMT	0.10 um Gate HEMT	0.10 um InP HEMT
$f_T$ (peak)	140 GHz	140 GHz	140 GHz	180 GHz	120 GHz	120 GHz	160 GHz
$f_{max}$ (peak)	70 GHz	150 GHz	150 GHz	200 GHz	250 GHz	250 GHz	250 GHz
Gate / On	400	50	25	550	550	900	900
Breakdown	>13V	>13V	>13V	13V	7.5V	2.5V	2.5V
Water Thickness	100 um	75 um	75 um	50 & 100 um	50 & 100 um	75 um	75 um
Autobonded Metal	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes

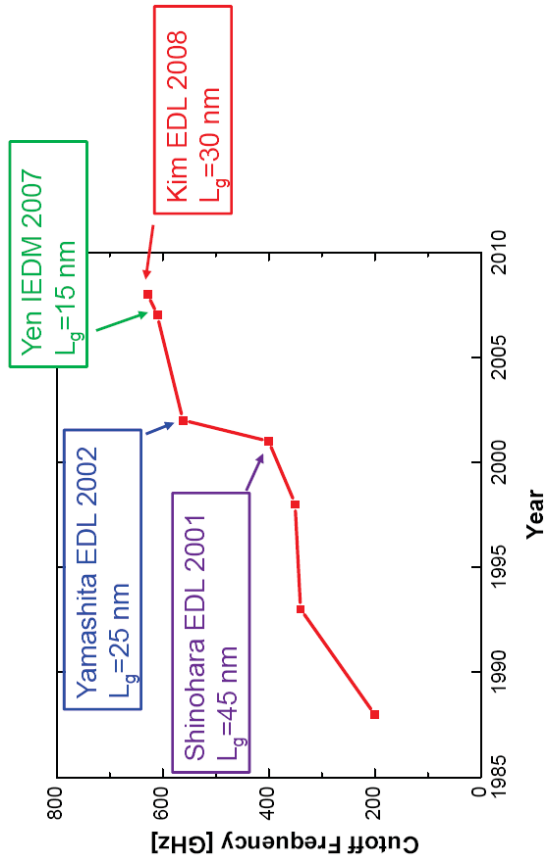
10

## R&D III-V HEMTのトレンド



11

## R&D III-V HEMTのトレンド



- 寄生抵抗・容量の影響を除去することがゲート長を小さくすることより重要  
At this moment, eliminating parasitic effects is the key to improve device performance, not gate-length

12

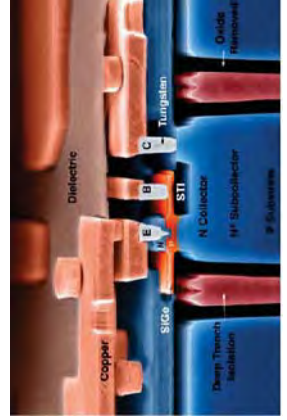
## Si-CMOS

- Large potential on cost, reliability and integration with other function blocks such as a DSP and RAM
- Limitation for THz-applications
  - high substrate loss → high signal loss and noise figure
  - low Gm → low gain
  - low breakdown voltage → low output power
- 65-nm bulk Si-CMOS was successfully applied to several ICs operating in 100~200 GHz bands.
  - Expected  $f_T/f_{\text{MAX}}$  of 65-nm bulk Si-CMOS: 170/200 GHz
- R&D CMOS, IBM, USA (IEDM2007)
  - $f_T$  of 485 GHz and 345 GHz for N-FET and P-FET in a 45-nm SOI CMOS process

13

## SiGe HBT

- Lower cost than III-V device, compatible with Si-CMOS
- Comparing to CMOS, SiGe HBT has several merits such as higher Gm, larger Zout, easier matching and smaller 1/f noise.
  - But, extra cost is required for SiGe processes on baseline CMOS fab.
- TMTT2004, SiGe HBT, IBM, USA
  - Up to 9HP processes ( $0.13\text{-}\mu\text{m}$ ,  $f_T / f_{\text{MAX}} = 350 / 300\text{-GHz}$ ) are developed
  - IBM serves the 8HP ( $0.13\text{-}\mu\text{m}$ ,  $f_T / f_{\text{MAX}} = 210 / 285\text{-GHz}$ ) process as a foundry service.
  - Successfully applied to 100-GHz bands ICs. (details later)



	5HP	6HP	7HP	8HP	9HP
$f_T$ [GHz]	47	120	210	210	350
$f_{\text{max}}$ [GHz]	85	150	285	285	300
$J_{\text{C,B}}$ [mA/ $\mu\text{m}^2$ ]	-1.5	-8	-12	-12	-19
$BV_{\text{CEO}}$ [V]	3.4	1.8	1.7	1.7	1.7
$BV_{\text{CBO}}$ [V]	10.5	6.5	5.5	5.5	5.6
Beta	100	300	300	300	650

15

## Si-NMOS (CMOS)

Year of Production	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
DRAM $f_T$ Pitch (nm) (contracted)	65	57	50	45	40	35	32	28	25
Performance RF-Analog [1]									
Supply voltage (V) [2]	1.2	1.1	1.1	1	1	1	1	0.95	0.85
$T_{\text{ox}}$ (nm) [2]	2	1.9	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.2
Gate Length (nm) [2]	53	45	37	32	28	25	22	20	18
$g_m/g_{\text{ds}}$ at $5 I_{\text{bias}}/g_{\text{m1}}$ [3]	32	30	30	30	30	30	30	30	30
1/f-noise ( $\mu\text{V}^2/\mu\text{m}^2/\text{Hz}$ ) [4]	160	140	100	90	80	70	60	50	60
$\sigma V_{\text{th}}$ matching (mV/ $\mu\text{m}$ ) [5]	6	6	5	5	5	5	5	5	5
$I_{\text{on}}$ (nA/ $\mu\text{m}$ ) [6]	13	11	9	8	7	6	6	6	4
Peak $f_T$ (GHz) [7]	170	200	240	280	320	360	400	440	490
Peak $f_{\text{max}}$ (GHz) [8]	200	240	290	340	390	440	510	560	630
NF <sub>min</sub> (dB) [9]	0.25	0.22	0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2

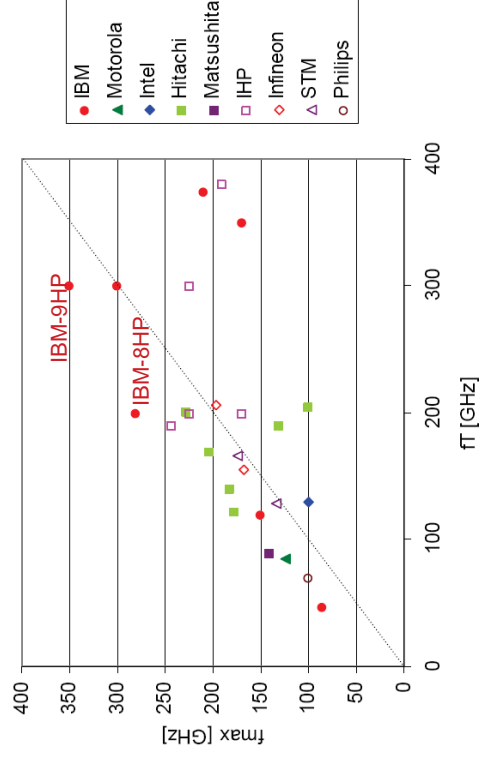
Year of Production	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
DRAM $f_T$ Pitch (nm) (contracted)	22	20	18	16	14	13	11
Performance RF-Analog [1]							
Supply voltage (V) [2]	0.8	0.8	0.8	0.8	0.75	0.75	0.7
$T_{\text{ox}}$ (nm) [2]	1.1	1.1	1	1	0.9	0.9	0.8
Gate Length (nm) [2]	16	14	13	12	11	10	10
$g_m/g_{\text{ds}}$ at $5 I_{\text{bias}}/g_{\text{m1}}$ [3]	30	30	30	30	30	30	30
1/f-noise ( $\mu\text{V}^2/\mu\text{m}^2/\text{Hz}$ ) [4]	50	50	40	40	30	30	30
$\sigma V_{\text{th}}$ matching (mV/ $\mu\text{m}$ ) [5]	4	4	4	4	3	4	5
$I_{\text{on}}$ (nA/ $\mu\text{m}$ ) [6]	4	3	3	3	2	2	2
Peak $f_T$ (GHz) [7]	550	630	670	730	790	870	870
Peak $f_{\text{max}}$ (GHz) [8]	710	820	880	960	1050	1160	1160
NF <sub>min</sub> (dB) [9]	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2

<http://www.itrs.net/>

14

## SiGe HBTのトレンド

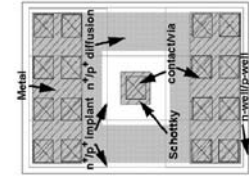
- 速度増加は面積と厚さを小さくすることで達成され、走行時間や寄生抵抗・容量の減少をもたらした。  
The speed enhancement was primarily achieved through vertical and lateral scaling, resulting in the reduction of transit time and parasitic resistance and capacitance.



16

# Schottky Barrier Diode

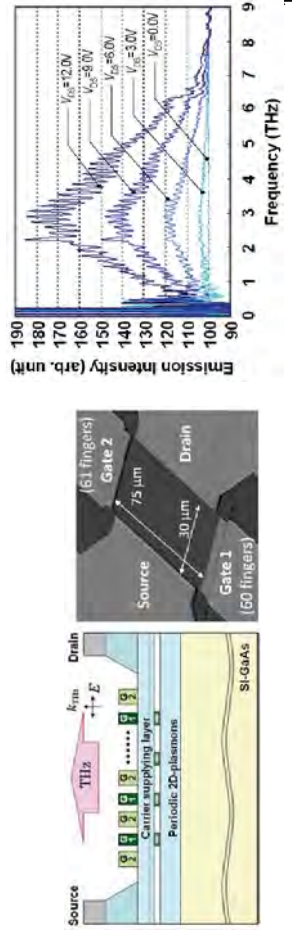
- SBDs working over 1 THz are available with almost all materials
  - CMOS
  - Florida Univ. reports CoSi2-Si SBD working **over 1.7 THz with bulk-Si 130-nm CMOS process**
  - Resistance and capacitance of > 10 Ω and 8 fF, respectively
- GaAs
  - Virginia Diode Inc.: > 3 THz, discrete and full-customized foundry
  - Teledyne SI.: > 2 THz, discrete
  - UMS: >3-THz, full-customized foundry



17

# Plasmonic Devices

- Plasmon resonance of two-dimensional electron system which would exist in HEMT structure
  - Resonance frequency is function of a gate length in HEMT structure
  - Sub-micro HEMT can be utilized as a emitter or detector of THz waves
- Otsuji Group, Tohoku Univ. Japan
  - InGaP/InGaAs/GaAs HEMT structure with interdigitated dual-gates
  - THz radiation in 0.5~3 THz with ~uW power



19

# UTC-PDs

- High speed and high output power by uni-carrier operation
- Speed performance mainly relies on the junction size of the device
- NTT, Japan
  - 500 uW@350 GHz, 11 uW@1.1 THz (Fig. 1~3) with resonant type devices (IRMMW-TH2008)
  - 2.3 uW @ 1.0 THz (Fig. 4) with wideband type devices integrated with a log-periodic antenna (JLT2005)

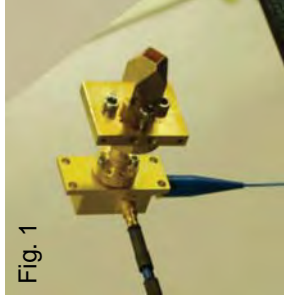


Fig. 1

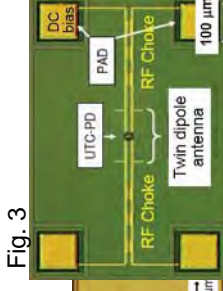


Fig. 3

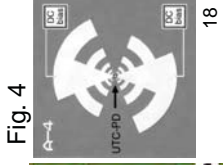
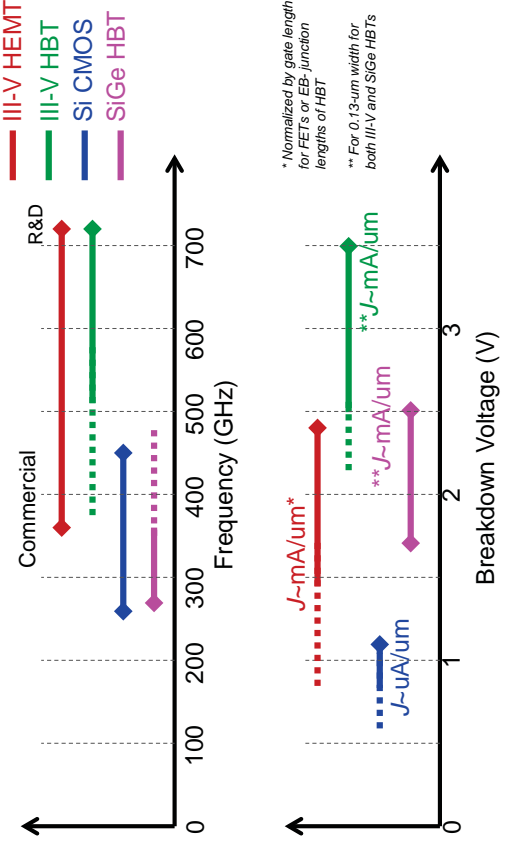


Fig. 4

# デバイスの現状

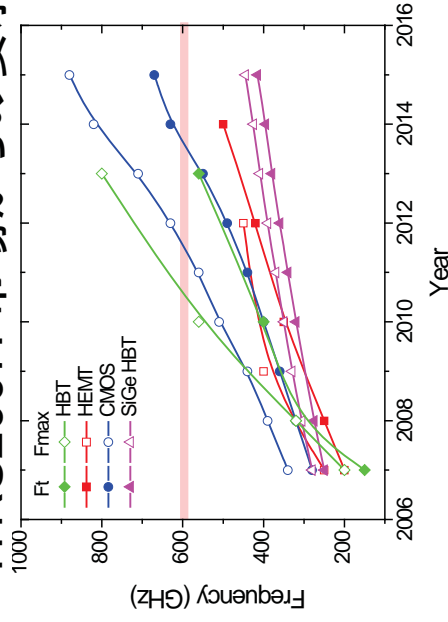
- III-V デバイスはスピードと出力に関する優れた性能を示す。 III-V devices show superior performance in speed and power.



\* Normalized by gate length for FETs or EB<sub>z</sub> junction lengths of HBT

\*\* For 0.13-um width for both III-V and SiGe HBTs

## ITRS2007: 市場からの要求



- Commercial CMOS will reach to 600-GHz in a few years based on advanced fabrication technology (lithography, chemical, etc..).
- For HBT, margin on scaling (256-nm → 64-nm)
- For HEMT, gate length reach to near physical limitation.
  - But 1-THz device would be available by reducing parasitic effect. (TWHM2009, del Alamo, MIT, )

82

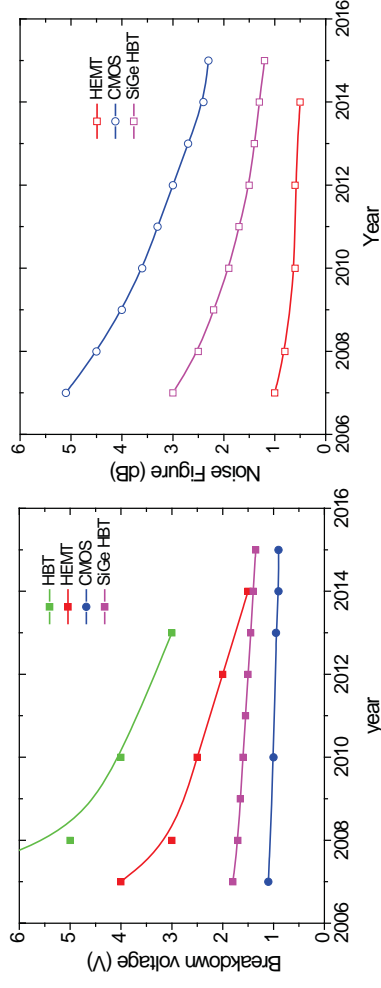
21

## まとめ: デバイス

- 研究用途としては 700-GHz HEMT/HBTs, 480-GHz Si-MOSS が報告されている。
- For R&D device, 700-GHz HEMT/HBTs and 480-GHz Si-MOSS are available at this time.
  - Scaling was main issue. But further improvement will be on how to suppress parasitic component for all of devices.
- 商用のファウンドリサービスとしては、200~300 GHz の III-V and Si デバイスでの可能性がある。
- For commercial foundry services, 200~300 GHz devices are available with both of III-V and Si devices.
  - According to ITRS roadmap (RF/AMS Technologies section), progress of Si-devices would be much faster than III-V devices, probably due to market issue.
- ショットキーはTHz周波数応答を持つ。
- Schottky diode for THz operation is available.

23

## ITRS2007: ミリ波から要求



- But, CMOS may offer limited performance in output power and noise
  - On the other hand, III-V devices have still merits in performance

22

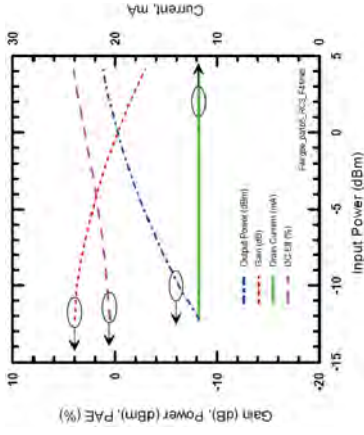
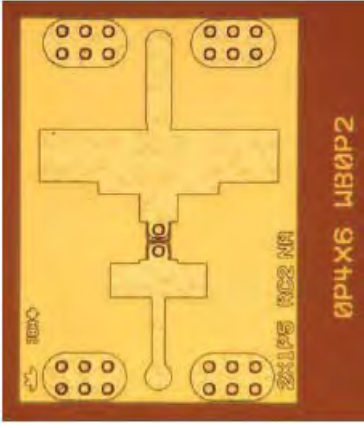
## 回路

## HBT/HEMT/CMOS/SiGeHBTの利用

24

## HBT: 324-GHz Amplifier

- IMS2008, Teledyne+UCSB, USA
  - 250-nm InP HBT ( $f_T/f_{max} > 373/550$  GHz)
  - Single stage amplifier
    - 4.8-dB Gain @ 324 GHz
    - ~1.3-mW Psat @ 324 GHz (PAE of < 2-%)
  - Microstrip line transmission line ( $h_{BCB} = 10$  um)

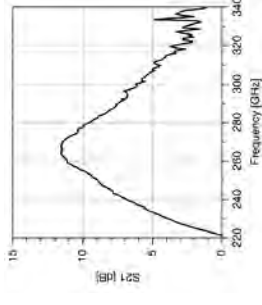
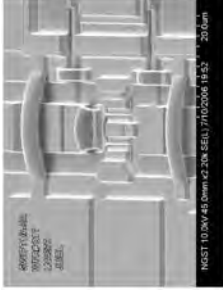
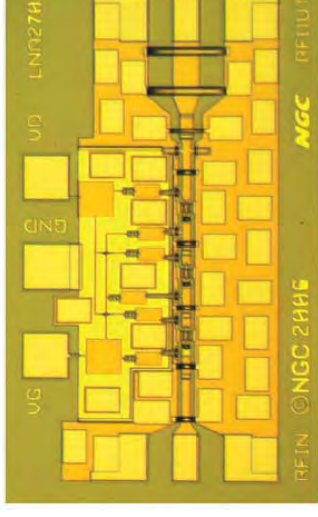


25

83

## HEMT: 270-GHz Amp.

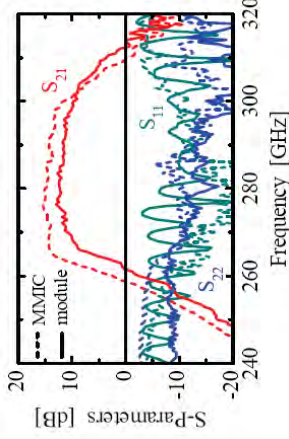
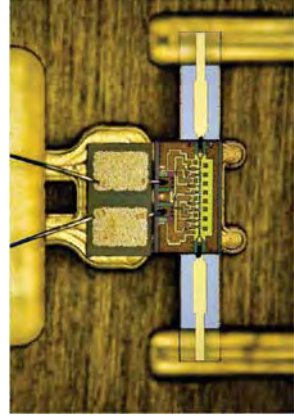
- MWCL2007, Northrop Grumman, USA
  - 3-stage amplifier with 35-nm InP pHEMT
    - 11.6-dB Gain @ 270-GHz
    - 7.5-dB NF @ 270-GHz
  - DC power: 0.8-V / 13.8 mA (~11 mW<sub>DC</sub>)
  - GCPW transmission line ( $h_{CPW} = 620$ um)



26

## HEMT: 300-GHz Amplifier module

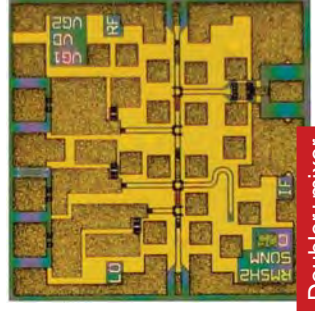
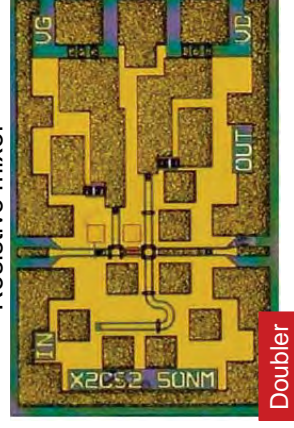
- IPRM2009, Fraunhofer Institute (IAF), Germany
  - 35-nm InAlAs/InGaAs mHEMT ( $f_T/f_{max} = 515/700$  GHz)
  - GCPW transmission line with VIA process ( $g_{CPW} = 14$  um,  $h_{SUB} = 50$  um)
  - Single stage amplifier.
    - > 5-dB gain in 258~308 GHz
  - 4-stage amplifier
    - 12~13-dB gain in 264~300 GHz
  - H-band waveguide transition with probe-type transition on quartz



27

## HEMT: 300-GHz Freq. doubler + Mixer

- EuMIC2009, Fraunhofer Institute (IAF), Germany
  - 50-nm InAlAs/InGaAs mHEMT ( $f_T/f_{max} = 400/420$  GHz)
  - Frequency doubler
    - > 10% conversion efficiency
    - -6.4-dBm Psat @ 310 GHz
    - -9.5-dBm Pavg in 250~310 GHz
  - Doubler + Mixer
    - 20-dB conversion loss in 246~300 GHz
    - Resistive mixer



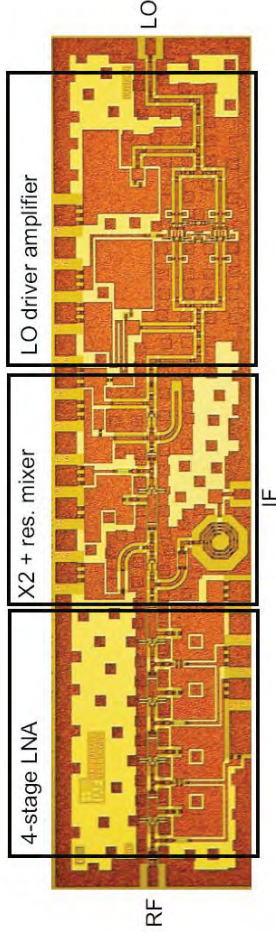
Doubler

Doubler+mixer

28

## HEMT: 200-GHz Active Receiver

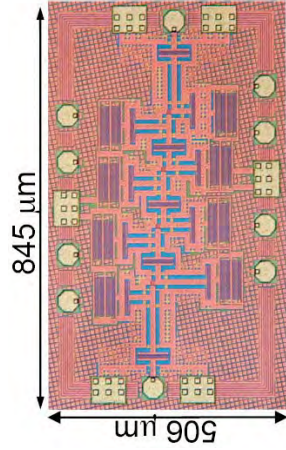
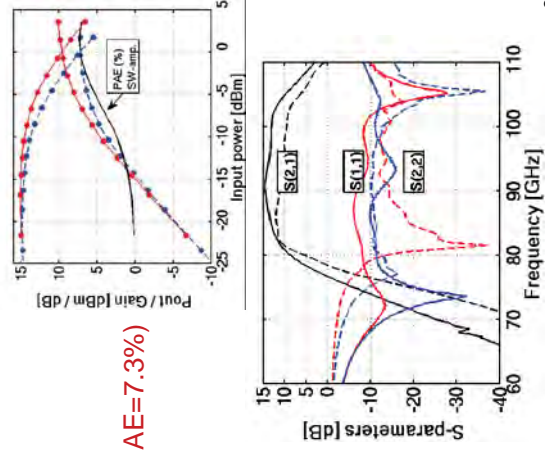
- EuMIC2009, Fraunhofer Institute (IAf), Germany
  - 100-nm InAlAs/InGaAs mHEMT ( $f_T/f_{max} = 220/300$  GHz)
  - **LNA + HEMT Mixer + LO-freq. doubler + LO driving amplifier**
  - 7-dB Conversion gain @ 200-GHz, -13 dBm LO driving
  - Chip: 1x4 mm<sup>2</sup>



29

## CMOS: W-band Amp.

- ISSCC2009, Sandstorm, et al., TKK-HUT, Finland
  - 65-nm Si-MOS
  - 4-stage common source
  - **80 ~ 100 GHz**
  - **$G_{peak} = 13$  dB,  $P_{sat} = 10.0$  dBm (PAE=7.3%)**
  - **NF = 8.5~7.5 dB**

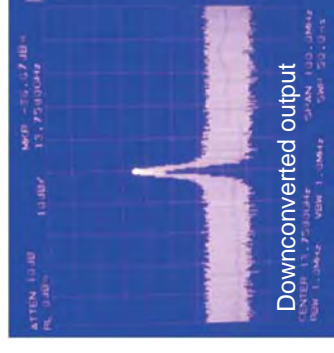
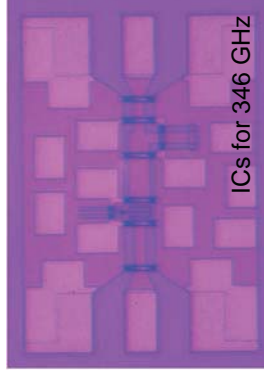


31

## HEMT: 346-GHz Oscillator

- MWCL2007, Northrop Grumman, USA
  - 35-nm InGaAs/InP HEMT ( $f_T/f_{max} = ?? / 600$ GHz)
  - Common gate for conditional stable
  - GCPW transmission line ( $\eta_{CPW} \sim 630$  um)

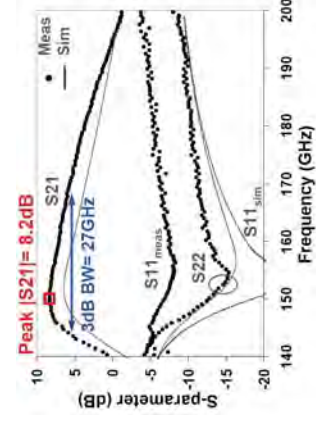
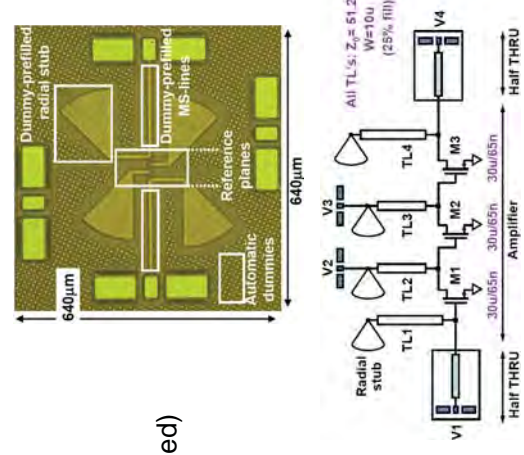
Frequency of Oscillation (GHz)	Vds (V)	I <sub>ds</sub> (mA)	Measured Output Power (μW)	DC to RF Efficiency (%)
254	1.3	9	158	1.35
314	1.2	6	46	0.64
346	1.3	9	25	0.21



30

## CMOS: 150 GHz Amp.

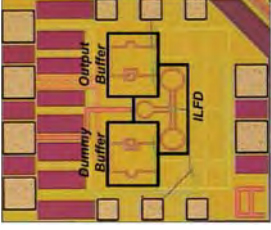
- ISSCC2009, M. Rodwell group, UCSB, USA
  - 65-nm digital Si-CMOS
  - 3-stage common source
  - **150 GHz ( $f_{-3dB} = 27$  GHz)**
  - **$G_{peak} = 8.2$  dB,  $P_{sat} = 6.3$  dBm**  
(Pads were deembedded)



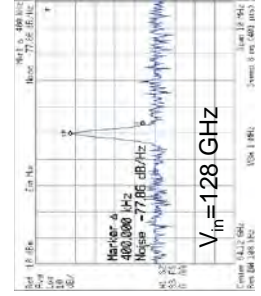
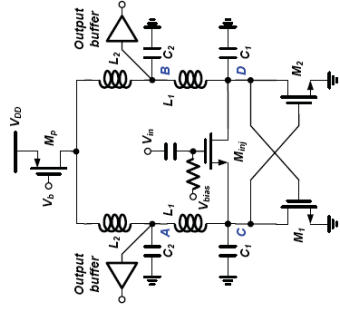
32

# CMOS: 128-137GHz frequency divider

- ISSCC2009, Liu Group, National Taiwan U., Taiwan



- 65-nm Si-MOS
- Injection Locking type
- 128~137 GHz locking range
- Output power < -24 dBm
- < 1-% conversion efficiency

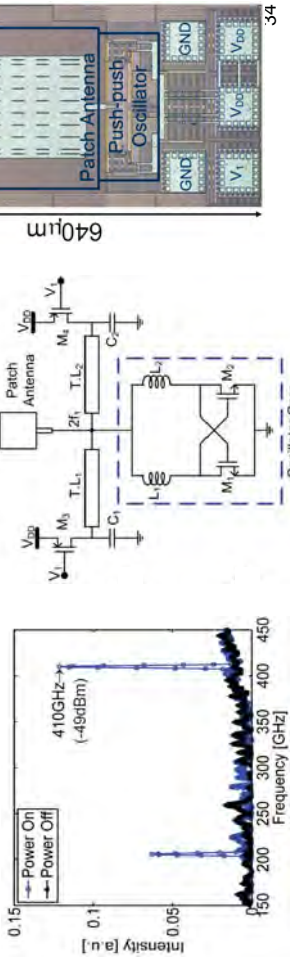


85

# CMOS: 410-GHz oscillator

- ISSCC2008, K.K.O Group, Florida U., USA

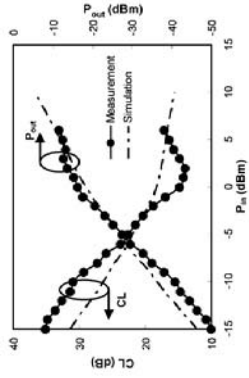
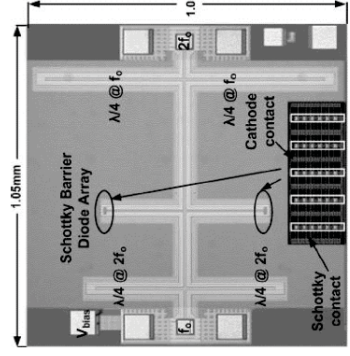
- 45-nm low-leakage Si-MOS
- Push-Push 2<sup>nd</sup> harmonic oscillator
- Integrated patch antenna
- 49-dBm @ 410 GHz
- No gain from 200-GHz output buffer
- Very low efficiency of antenna (< 20%, 7dB loss)
- Antenna mismatching loss (~2dB)
- Loss in substrate and low-Q passive component



# CMOS: SBD frequency doubler

- MWCL2009, K.K.O Group, Florida U., USA

- 130-nm UMC CMOS process
- SBD: 3-um<sup>2</sup> effective area,
  - 14-Ω R<sub>s</sub>, 15-fF C<sub>J</sub> → ~750-GHz cutoff
  - 500-uA bias current
- 128~134 GHz 3-dB BW
- 14-dB conversion loss @ 134 GHz
- 11 dBm output power
- 14-dB fund. rejection @ output

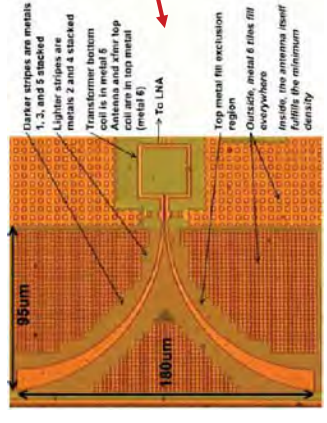
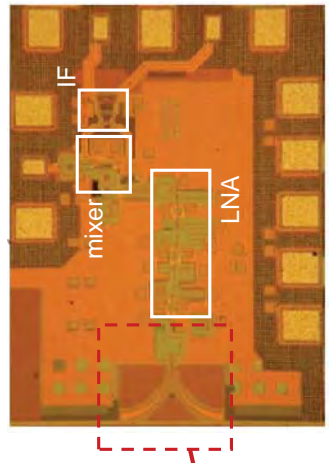


35

# CMOS: 140-GHz receiver

- RFICS2008, Nicolson et al., U. of Toronto, Canada

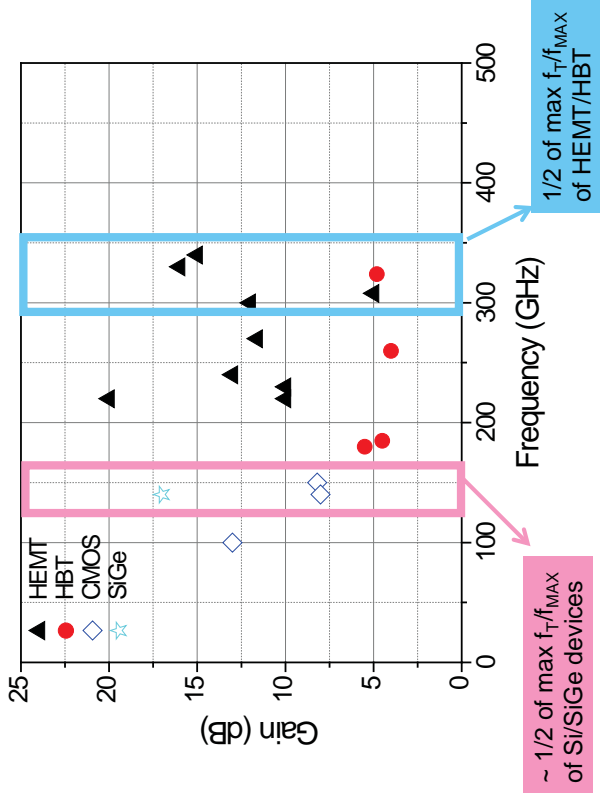
- 65-nm STMicroelectronics GP CMOS (f<sub>T</sub>/f<sub>max</sub>=170/240 GHz)
- Tapered antenna + LNA + downconverter + IF amp.
  - Total CL: 15-19 dB in 100-140 GHz
  - Antenna loss ~ 25 dB !!
- LNA: 8-dB gain, -1.8-dBm P<sub>sat</sub>
- Mixer: 5-dB CL, 22-dB NF



36



## アンプのトレンド



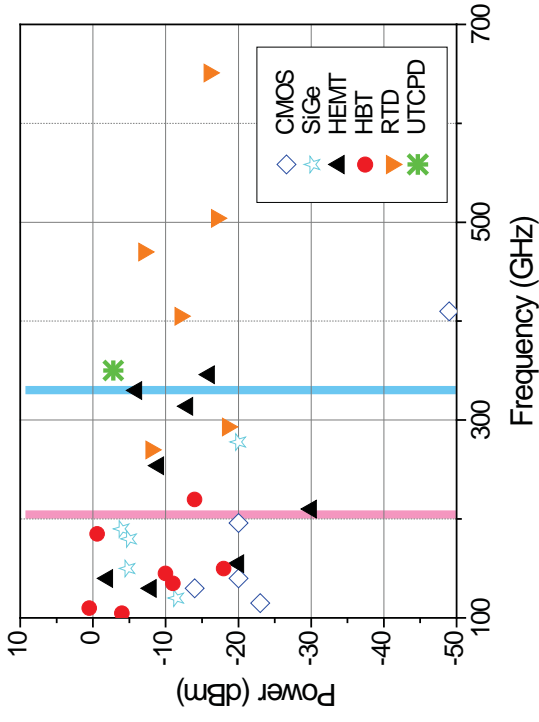
41

## まとめ: 回路

- **III-V HBT**
  - Amplifiers upto 300 GHz
  - No recent activity in MMICs
- **III-V HEMT**
  - 300~400 GHz circuits with 50~30-nm HEMTs ( $f_T$  of ~500 GHz)
  - Amp., mixer, freq multiplier, oscillator are available
- **Si-CMOS**
  - Upto 150-GHz operation is available with 90~65-nm CMOS process ( $f_T$  of ~270 GHz)
  - Amp., mixer, freq multiplier, oscillator are available
- **SiGe HBT**
  - Not so many reports (maybe due to less foundry company?)
  - Upto 200-GHz operation would be OK with 130-nm process

43

## オシレータのトレンド



42

## 回路の今後

- CMOS を使った300-GHz MMICは数年以内に実現  
300-GHz MMICs with CMOS in a few year
  - MMICs works upto around half of cut-off frequencies of transistors
  - Cut-off frequency of Si-CMOS will exceed 600-GHz in a few years
- 利得と出力向上のための効率化  
**Better efficiency for better gain and output power**
  - Very poor efficiency of 1 % or less was presented in current works
  - 1 %→ 10 % efficiency improvement cause 10-dB improvement
  - Reducing dielectric and conductive losses in ICs.

44

# On/Off-Chip Antennaの特徴

- On-chip antenna
  - ☺ No interconnection loss between chip and antenna
  - ☺ Expectable matching performance between chip and antenna based on 3D-EM simulation and stable fabrication
  - ☹ Difficult to enhance radiation efficiency due to fixed substrate. Eg. Si-CMOS
  - ☹ Higher modes in high-dielectric constant substrate (Si, InP, GaAs)
  - ☹ Limited chip area ? (but, no-big problem in THz region)

- Off-chip antenna

- ☺ Possible to select optimum material for antenna
- ☺ External cavity (but, too small to fabricate at 300 GHz.  $\lambda_{air}/4 \sim 250 \mu\text{m}$ )
- ☹ Interconnection/transition loss should be minimized between chip and antenna
- ☹ Maybe bulky due to waveguide-based structure

45

46

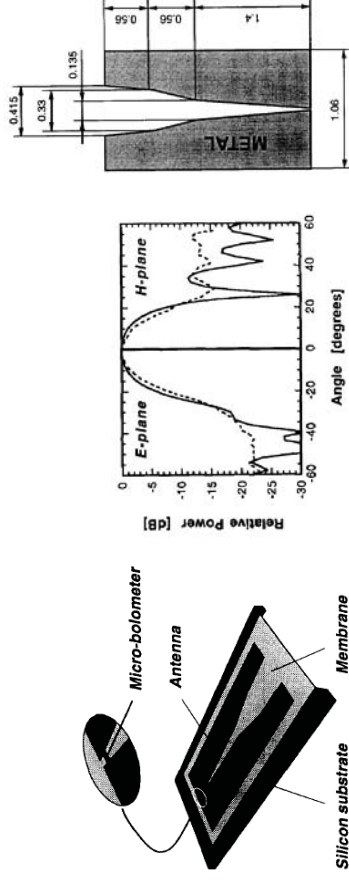
# プリントアンテナの特徴

- Radiation efficiency
  - Dielectric loss of substrate suffer the efficiency directly
  - Dielectric constant of substrate  $\uparrow \rightarrow$  higher substrate mode  $\uparrow \rightarrow$  efficiency  $\downarrow$
- Gain
  - Extra cavity or reflector enhance the bandwidth and gain
  - Arrayed antenna
    - Improving antenna directivity
    - Additional gain vs. Additional loss from feeding network
- Feeding line
  - Multi-level substrate is difficult to implement in THz region due to large inductance of VIA structure
  - Need to suppress higher modes in feeding line

88

# On Chip: Tapered Slot Antenna

- TMTT1993, Chalmers Univ. & NASA, USA
  - Tapered slot antenna on dielectric membrane for 802 GHz
    - 1.7- $\mu\text{m}$  SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> dielectric film
    - Dry-etching of Si-substrate
  - 13-dB and 50-% of directivity and radiation efficiency
  - -10-dB beamwidth  $\sim 40^\circ$
  - Longer antenna shows narrower beam  $\sim 4^\circ$  of 3-dB beamwidth



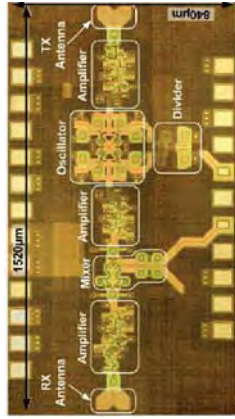
47

48

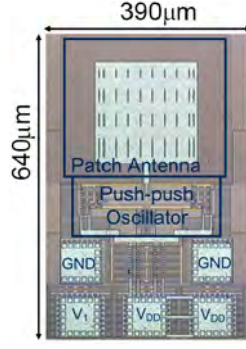


## On Chip: Antennas on Si-ICs

- RFICS2008, Laskin et al.,
  - Dipole (tapered slot ??) antenna with SiGe process
  - **21-dB loss from antenna**
- ISSCCC2008, K.K.O Group
  - Patch antenna for 410-GHz
  - **20% radiation efficiency + material loss + mismatching, etc...**



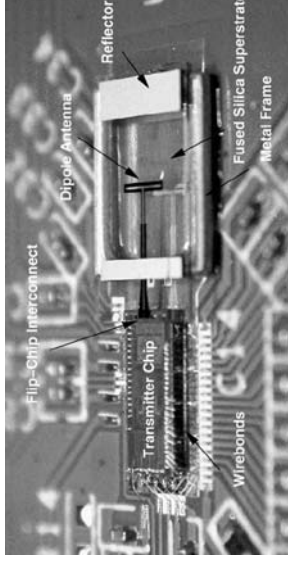
RFICS2008, Laskin et al.,



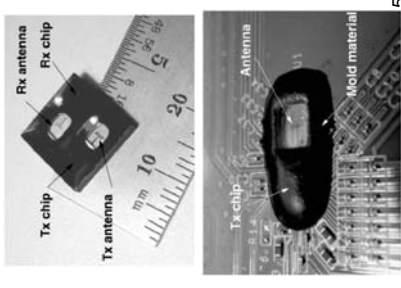
ISSCCC2008, K.K.O Group

## Off Chip: Cavity-Backed Slot Antenna

- TMTT2006, IBM, USA
  - Chip scale packaging for 60-GHz radio
  - Slot antenna on Quartz with optimized backed-cavity
    - Kovar alloy for cavity-wall, which works as an antenna support
    - Over **90% radiation efficiency**
    - **8-dBi antenna gain, ~10% gain-bandwidth**
    - **Suppressed surface modes with cavity**
  - Flip-chip bonding



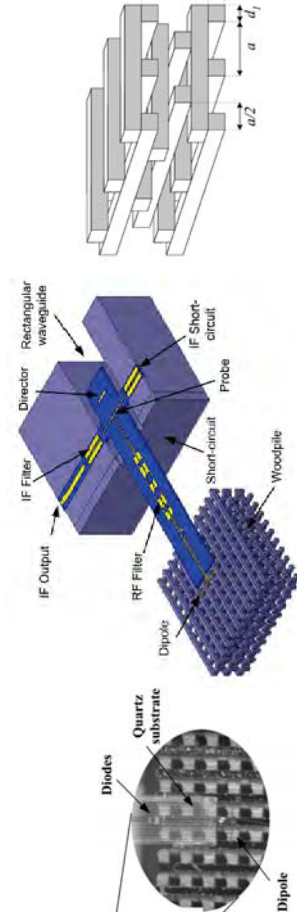
53



54

## Off Chip: Metamaterials

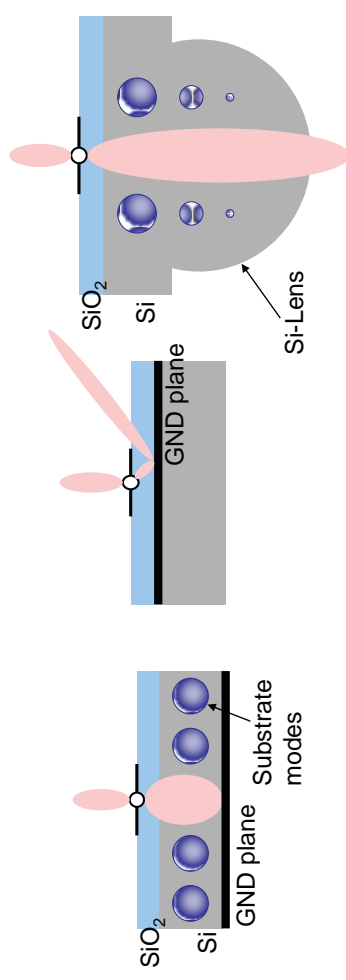
- TAP2007, Universidad Pública de Navarra, Spain
  - Dipole antenna on metamaterial
    - Dipole on Quartz + Si-metamaterials
    - Work as a back-reflector → high directivity
    - **Suppress parasitic surface waves**
    - $a=0.36$  mm,  $d_1=d_2=0.155$  mm
    - Silicon woodpile: 5 periods in vertical, 15-periods on lateral plan



55

## Hemisphere Silicon Lens

- ☺ Suppress the amount of unwanted substrate modes
- ☺ Collimating EM-wave → enhancing directivity of antenna



- ☹ Spatial alignment is critical in performance
- ☹ Difficulty in bonding process
- ☹ No broadband AR coating for Si-lens

## まとめ: アンテナ

- オンチップアンテナの利得は10~14-dB 程度  
Around 10~14-dB antenna gain from on-chip antennas
  - Using micromachining, arrayed configuration
  - Radiation efficiency is issue as well, especially on silicon substrate
- オフチップ(平面型)の利得は10-dB程度  
off-chip antenna offers around 10-dB gain, too
  - But, better efficiency and wider bandwidth due to optimized substrate and structure
- 300-GHz 通信に必要な25-dBには現状では及ばない  
Far away from 25-dB gain for 300-GHz communication
  - Extra lens or cavity to improve gain
  - Share of gain load with Tx (output power) and Rx (noise figure)

57

91

## まとめ

### 最後に

- III-V デバイスは 300-GHz ICを提供可能  
Current state of art III-V devices provide 300-GHz ICs
  - 1-THz III-V devices is technically feasible.
  - But, difficult to access these technology due to few provider
- CMOS は近い将来 600-GHz を超える  
CMOS will reach over 600-GHz in near future
  - Easy to access
  - But, limited performance of RF-power and noise figure
- アンテナの改善は必須  
Further improvement on antenna is necessary
  - Note that antenna has very long research history even in Terahertz region → technical limitation?
  - Share of system budget load with T/Rx
- 1-mW Output power in Tx
  - HBTs offer more than 1-mW output power at 324 GHz
  - It is still challenging work for many other devices (200~500-uW)
  - Faster devices → lower breakdown → lower output power
  - But, 1-mW looks not so far, if we can improve the efficiency just a little
- 15-dB Noise figure of Rx
  - HEMT amplifier with 7.5-dB NF at 270 GHz
  - Faster devices → higher gain at 300 GHz → lower NF
  - 5-dB or less NF is achievable ?!
- 25-dBi Antenna
  - Approximately 10~14-dB antenna gain with planar on-chip antenna.
  - It looks upper boundary, and even we need complicated technologies such as a micromachining or arrayed antenna
  - Packaging issue: horn-antenna, lens, and cavity
- シグナルのロスの除去がテラヘルツデバイスではキーポイント!!!

59

60

58

## Dielectric Loss in Substrate

Substrate	$\epsilon_r$	Tangential Loss
Silicon	12.0~12.7	0.02 @ 10 GHz
GaAs	13.0	0.0016 @ 10 GHz
Alumina	9.6~9.9	0.0003 @ 10 GHz
Fused Silica (Glass)	3.8	0.0002 @ 10 GHz
Fused Quartz	3.8	0.0001 @ 10 GHz

#### 4-2-2 ミリ波帯のアダプティブアレイアンテナシステムの動向

(テーマ) ミリ波帯のアダプティブアレイアンテナシステムの動向

(講師) 独立行政法人 情報通信研究機構

新世代ワイヤレス研究センター 李 可人 主任研究員

##### 講演概要

- ミリ波帯やテラヘルツ波帯では、アンテナと送受信半導体素子との間での導波損が大きくなるため、アンテナ、送受信半導体素子、パッケージは一体として考える必要がある。また、波長が短く直進性が強い見通し (LOS: Line of Sight) での通信となることや、大きな大気吸収があることから、アンテナからのビームはほとんどの場合、絞ることとなる。このような状況に適したアンテナは、アダプティブ・アレイ・アンテナ (AAA: Adaptive Array Antenna) である。AAAの主な機能は、ビームフォーミング、ビームスキャン、干渉回避である。ビームフォーミングでは、目標を発見し目標にビームを集中させ空間伝搬ロスを軽減し、また空間分解能を上げて多重干渉を防ぐ機能がある。ビームスキャンでは、目標を発見し遮蔽問題に対応する機能がある。
- ミリ波帯やテラヘルツ波帯では、電波の直進性が強く空間伝搬ロスが大きいため遮蔽に弱い、アンテナのアダプティブ化・アレイ化によって問題を解決できる可能性がある。さらに弱点として、デバイスの出力が小さく雑音も大きい点や回路・実装上の問題として回路上の伝搬ロスも大きい点が挙げられるが、これらもアンテナと回路の一体化・集積化、ベースバンドとの一体化によって解決できる可能性が大きい。
- AAAの基本構成にはRF phase shifter array、IF phase shifter array、Digital beamforming等がある。それぞれに特徴があり、どれを選択するかはデバイス技術や応用目的次第である。
- 高利得のAAAを構成するには、アレイ数を大きくする必要がある。ミリ波帯 (60GHz) においては、SiBeam社のWirelessHDの装置に52素子アレイが使われている例があるが、AAAチップは2cm×2cm程度の大きさがあり、携帯機器に実装するには大き過ぎる。もし300GHz帯で同じ機能を実現できるとしたら、AAAチップは周波数比 (波長比) だけ小さくできるため、約4mm×4mm程度の大きさでできるであろう。このような小型化が可能な点は、ミリ波帯に対してテラヘルツ波帯が有利な点と言ってよい。
- ミリ波帯やテラヘルツ波帯を用いた超高速無線通信システムは大きな可能性を秘めており今後期待できるものであると考えられているが、超高速無線通信システムを実現する上でAAAは必須のデバイスである。SiCMOSの超高速化が新たなAAA技術に可能性をもたらしてくれると考えられるが、多くの課題 (構成、プロセス、デバイス作成、モジュール化、パッケージング、ベースバンドとの一体化など) がまだ残っている。

##### 質疑応答

- アンテナロスの問題は、そのままテラヘルツにもっていくのはまだしばらく距離があるように感じた。SiBEAMのアンテナは基本構成の中で最もシンプルなものだと思うが、これはあまり公表されていないのではないか。

→写真を見たことがあるが、確かにオーソドックスな構成だと思う。実際の中身を見たことがないので断言はできないがオーソドックスなもので、逆にそれでもできたのはすばらしいと思う。

○それがシリコンテクノロジーでできているということか。

→そのとおり。ベースバンドの方も、実際にはまだインテグレーションしてないが、ボードにさして使えるようになっていて、手をかざしても映像が遮断されない。

○テラヘルツになるとミリ波よりアンテナロスが大きくなると思う。360度有効なフェーズシフターを作ろうとすると、今のミリ波でも10dbのロスがあるのが問題だとおっしゃったが、もう少し詳しく説明してほしい。

→60GHzに対してフェイズシフトすると、ロスは大きい。ただし、アダプティブアンテナの基本的構成の段階ですべて60GHzで構成する必要はない。例えばIFやローカルで構成すれば、必ずしも難しくはないだろう。

→フェーズシフターの話でいうと、導波路をどのような構成にするかというのが重要なポイント。誘電体導波路やフォトニックバンドギャップの導波路等の可能性が見えてくる。



## アダプティブアンテナの機能

5

- アダプティブアンテナの主要機能
  - 1. ビームフォーミング (Beam-forming) 機能  
⇒ 目標発見、目標に集中、空間分解能を増加
  - 2. ビームスキャン (Beam-steering) 機能  
⇒ 目標発見、機械回転、位相制御の両方で可能
  - 3. 干渉を回避する (Null-point形成) 機能

## About Millimeter Wave

7

- ミリ波及び
- 近年のミリ波無線システム

## ミリ波アダプティブアンテナ

6

- 本日の講演テーマ：
  - ミリ波アダプティブアンテナ
  - ミリ波無線通信への応用をメインに --
- ミリ波アダプティブアンテナの主要機能
  - 1. ビームフォーミング (Beam-forming) 機能
  - 2. ビームスキャン (Beam-steering) 機能
- ミリ波無線通信システムにおける
  - ミリ波アダプティブアンテナの役割
  - 1. ビームフォーミング (Beam-forming) 機能  
⇒ 空間伝搬ロスを軽減、多重干渉を防ぐ
  - 2. ビームスキャン (Beam-steering) 機能  
⇒ ミリ波遮蔽問題への対応、ユーザ探知

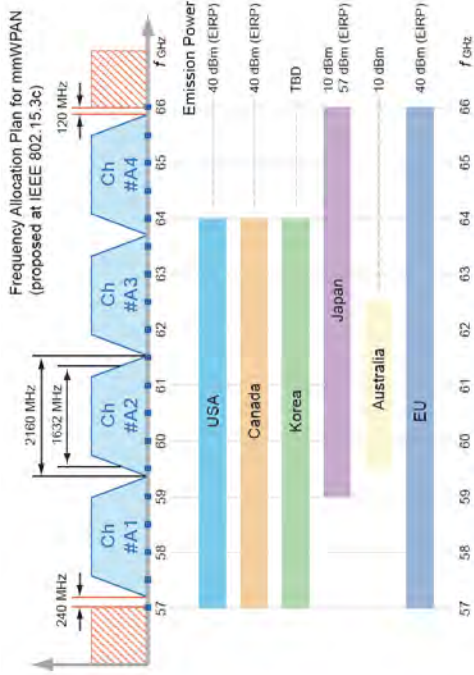
## What's Millimeter-wave ?

8

ミリ波・サブミリ波の定義

- ミリ波 = Millimeter Wave (MMW)
- 波長 = 10mmから1mm (0.1mm)  
(ミリ波の名前の由来, 0.1mm以下の波はサブミリ波と呼ぶ)
- 周波数 = 30GHzから3000GHz
- 比較に、普通の携帯電話に使用されている電波は：  
周波数 = 0.7GHzから2GHz





■ mmWPAN: Millimeter-wave Wireless Personal Network  
 ■ IEEE Standard Working Group for mmWPAN: 802.15.3c  
<http://www.ieee802.org/15/pub/TG3c.html>

60GHz帯ミリ波がついに宅内民生市場へ パナソニックがWirelessHD対応テレビを発売 (2009/02/04)

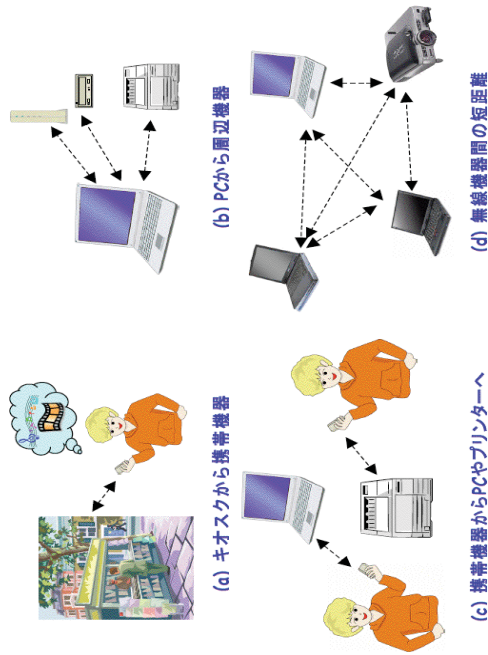
ミリ波は長い間電波の「ホープ」であり、「夢」であった。1999年に発刊された学術書「新ミリ波技術」の巻末がその一文である。これまで、軍事や自動車、産業といった限られた分野にのみ使われてきたミリ波が、いよいよ宅内の民生機器で使われる。パナソニックが60GHz帯のミリ波を使う無線通信規格「WirelessHD」に対応したテレビを発売する(発表資料)。

60GHz帯は、7GHzと近い周波数帯域を使うという大きな特徴がある。この周波数帯域を活用すれば、1080pの高品位(HD)映像を非圧縮で伝送可能だ。ただしこれまでは、(1)部品コストが高い、(2)電磁波の直進性が強いという課題があった(参考記事)。部品コストが高ければ、民生機器には受け入れられない。直進性が強いと、宅内のリビング・ルームなど障害物が多い場所では使いにくい。

(1)については、60GHzに対応した半導体チップをCMOS技術で製造できることになったこと、(2)については電波の指向性を自動的に調整するドーム・スタッキング技術を導入したこと(参考記事)が原因だった(参考記事)。2009年3月のテストセンター設立を持って、WirelessHD規格の認証プログラムを認定する(同社の説明員)という、WirelessHD規格の認証プログラムを要するの、同社が初になる予定だ。



2009年2月に発表されたチューナー外付け型薄型テレビのオプションに、ワイヤレス・ユニットを使用した。ワイヤレス・ユニットは、テレビの下部に設置する。チューナーやBlu-Ray Discプレーヤなどが手で扱えることや、テレビ・ディスプレイの設置自由度が高まることを訴求していた。



ミリ波アダプティブアンテナ

その最近動向

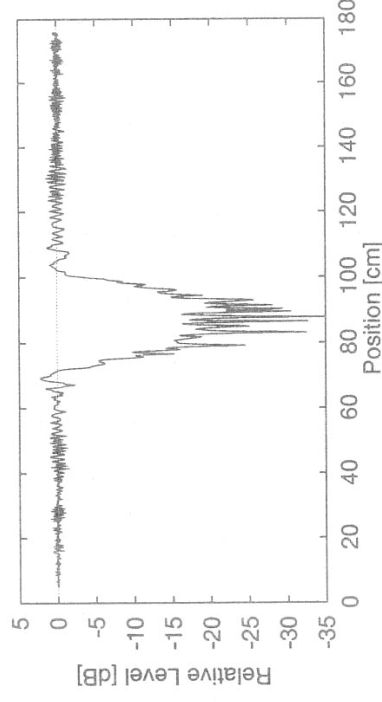
- ミリ波の弱点をメインに
  - 可能な解決法
- 直進性が強く、空間伝搬ロスが大きい  
⇒ 遮蔽に弱い。アンテナ利得なしで、空間伝搬ロス：68dB@1m(60GHz)
  - アンテナの  
アレイ化  
アダプティブ化
- デバイス性能の制限  
⇒ 出力パワーが低い。雑音が多い。
  - アンテナと  
回路との  
一体化  
集積化  
+ ベースバンド
- 回路・実装技術の制限  
⇒ 回路による伝搬ロスも大きく、また、実装による影響を強く受ける。

# 近年のミリ波アダプティブアンテナ

- 近年のミリ波 Si CMOSのめざましい進展により
  - ⇒ Si CMOSがミリ波帯域での動作が可能に
  - ⇒ ベースバンドとの一体化も視野に
- システムと一体化したミリ波アダプティブアンテナのモジュール化・チップ化が可能に
  1. ビームフォーミング (Beam-forming) 機能
  2. ビームスキャン (Beam-steering) 機能

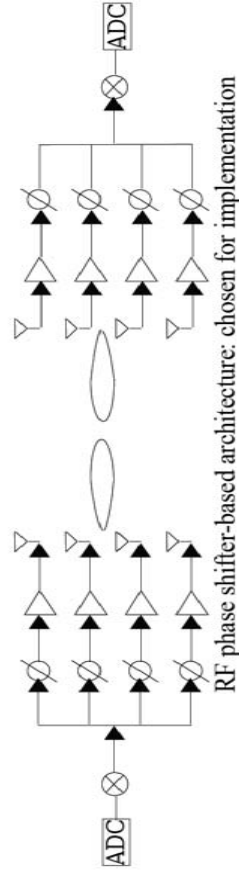
# 一例：人体による遮蔽

- 人体による直接波遮蔽の影響は大きく20dB程度の受信レベル低下が生じる(NICTデータ)



# アダプティブアンテナの基本構成

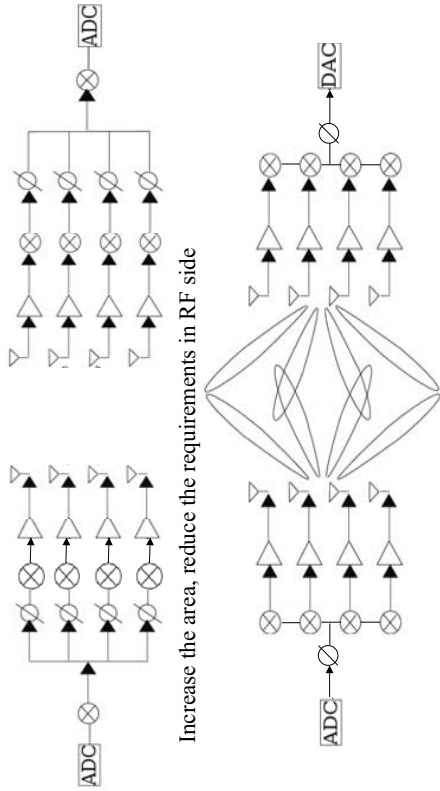
- RF phase shifter array



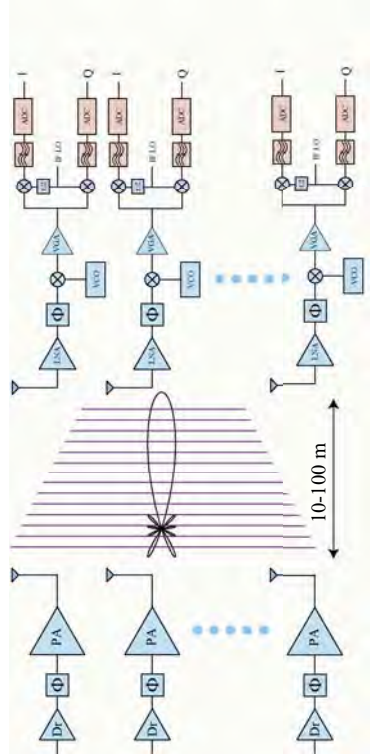
**Advantage:** less power consumption,

**Disadvantages:** full-angle switchable phase shifter with small delay and loss in 60GHz is not available in the market, what's more, quite big challenging to implement.

IF phase shifter array

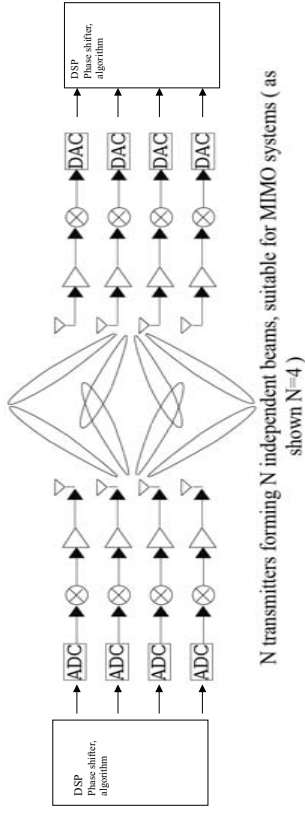


Using phase shifter to reduce the phase shifter loss in the signal path



出典: Berkeley Wireless Research Center

Digital beamforming



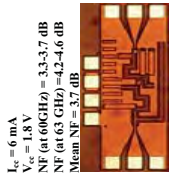
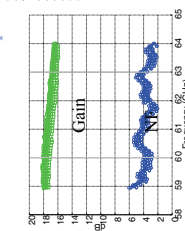
Advantage:

Less complexity in the RF front end trade of by high power consumption

1. Coordinator auto-discovers what devices are in WVAN
2. Device capabilities exchanged
3. Coordinator allocates time for communications between Stations
4. Continuous monitoring of WVAN and stations within or joining/leaving WVAN

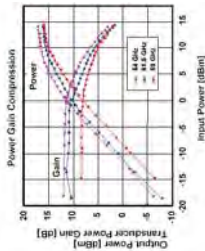


## Low Noise Amplifier

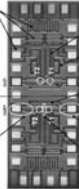


$I_{DC} = 6 \text{ mA}$   
 $V_{DC} = 1.8 \text{ V}$   
 NF @ 60GHz = 3.3-3.7 dB  
 NF @ 63 GHz = 4.2-4.6 dB  
 Mean NF = 3.7 dB

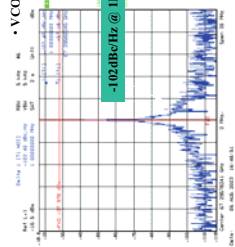
## Power Amplifier



•Gain = 10.8 dB  
 •PT dB = 11.2 dBm  
 •Psat = 16.2 dBm  
 •130 mA at 2.5V



## Voltage Controlled Oscillator



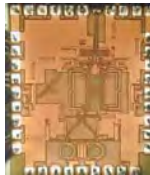
• VCO Meas'd performance  
 • -102 dBc/Hz @ 1MHz  
 • 8mW at 3V  
 •  $f_{osc} = 11 \text{ dBm}$



## Direct Conversion Mixer

• First Gilbert-cell mixers at 60 GHz.  
 • Highest integration level for  $60\text{GHz}$  technology at 60 GHz.  
 • 80 transistors  
 • 43 transmission lines or inductors

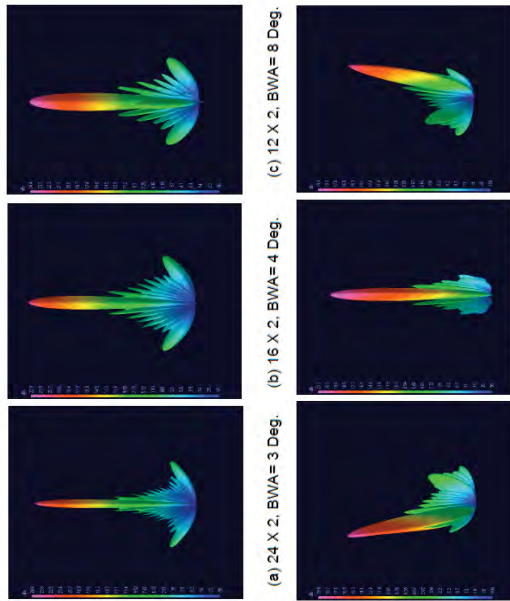
• Meas'd performance comparable or exceeding GaAs  
 • NF (< 15 dB)  
 • conversion gain (> 16 dB)  
 •  $V_{DC} = 2.7\text{V}$   
 • power (150 mW "core")



Output Spectrum / Phase Noise

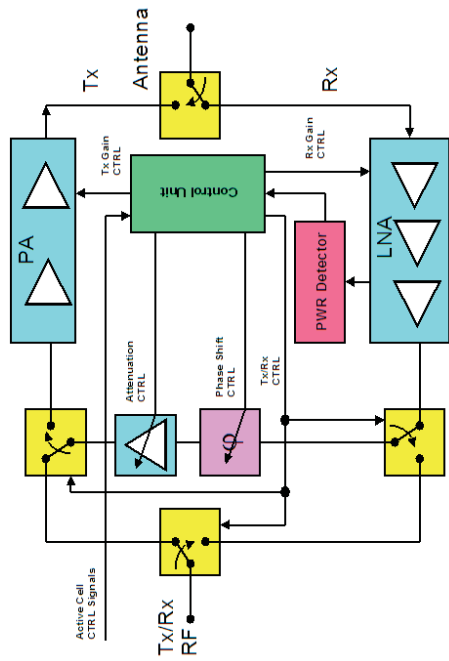
ISSCC 2004

# ビーム形成・スキャン例



F = 60 GHz, BW = 4 deg., SA = +/- 19 deg.

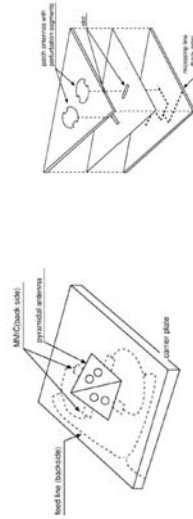
# アダプティブアンテナ構成例



F. Mohamadi, "Water Scale Integration," RF Design, February 2005, pp.48-62

出典: IEEE802.15-05/125r0: 15-05-0124-00-003c-mm-wave-beamforming

# Multi-section Selection Circuits

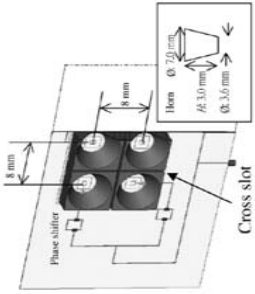


(a) 3-D view (b) each paired-element patch antenna on an isosectes-triangular plate.

- Proposed by Toshiba Co., to cover the 360° of Azimuth plane in 1998
- the minimum gain of 5.4dBi and less than 2.5dB axial ratio at frequency 59 – 60GHz. 2dB gain difference between simulation and fabrication.
- Loss caused by MS is 0.3dB ( substrate PTFE,  $\epsilon_r=2.2$ ,  $h=0.127\text{mm}$ , element space 0.55l @ 59.5GHz)
- switch is realized by on and off status of amplifier

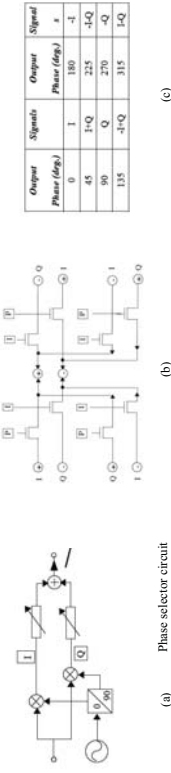
P. F. M. Snijders, M. H. A. J. Herben, J. George, "Application of five-sector beam antenna for 60GHz wireless LAN," <http://www.dreamlabresearch.com/>  
 Y. Murakami, T. Kijima, H. Iwasaki, T. Ihara, T. Manabe and K. Ligusa, "A switchable multi-sector antenna for indoor wireless LAN systems in the 60GHz Band", IEEE Trans. Micro. Theory, Tech., 1998, MTT-46, pp. 841-843.

K. C. Huang and Z. C. Wang, "Millimeter-wave circular polarized beam-steering antenna array for Gigabit wireless communications," *IEEE Trans. Antennas & Propag.*, vol. 54, no. 2, Feb. 2006, pp. 743-746



- 4 element beam steering antenna with right-handed circular polarization at 61GHz is realized with the 14dB directivity, 7dB gain and -10 to 10 degree steering range.
- ceramic substrate with  $\epsilon_r=10$
- the four patches with truncated-corners are designed for the RHCP
- the 90 phase shifter is made by two SPDT switches and two microstrip-lines.
- The radiation of the phase shifters and microstrip lines is shielded by a metallic cover to avoid mutual couplings.
- It was also reported that the horn could increase 8dB gain in the main beam direction and the transmission loss of gold microstrip line on ceramics was 0.57dB/cm at 61GHz
- the 61GHz switches from Northrop Grumman Space Technology with wire bonding measured loss was 3dB.
- the SDH126 is 55-62GHz SPDT switch found from Northrop Grumman.

# Block Based Antenna

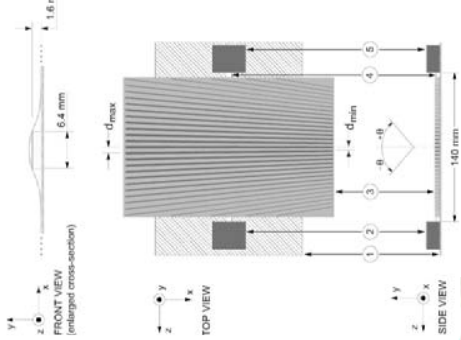


Phase shifter part was designed and integrated in CMOS chip  
Phase shifter was realized by vector modulation method to fulfill 8 phases 45° one step

S. H. Ahn, "A 60GHz Adaptive Antenna Array in CMOS", Ph.D thesis

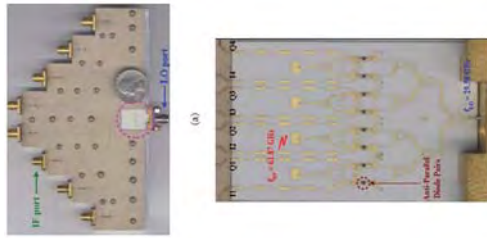
The slow-wave supported grating antenna could be the candidate for the low-cost millimeter-wave beam-steering antenna with changing the space of each grating space.

A  $\pm 50^\circ$  beam steering at 40GHz was realized by changing the slot space with physically rolling up and down of part c. It was indicated in the paper that this method could be extended to 120GHz millimeter wave application. The measured gain could be reached to 18dBi in considered band 35-40GHz. However, it is not implemented by electronic controlling



C. T. Redenbeck, M. Li and K. Chang, "Design and analysis of a reconfigurable dual-beam grating antenna for low-cost millimeter-wave beam steering", *IEEE Trans. on Antennas & Propag.*, vol. 52, no. 4, pp. 999-1006, April 2004

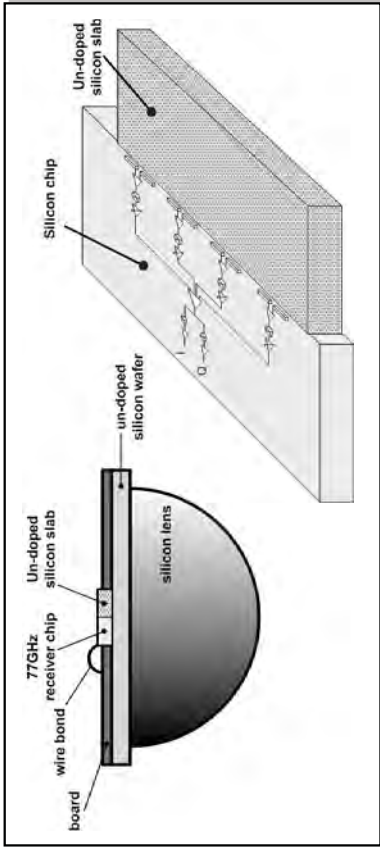
# Digital Beam Forming



- A 60GHz integrated four-element planar antenna array with digital forming
- The system is realized by 60GHz four planar patches with second harmonic of I/Q mixers @ 29.65GHz, combining with the IF mixer and amplifier, A/D and digital beamforming processing.
- The system transmission loss in RF lines and components is less than 16dB.
- Sub-mixer came from GaAs beam lead schottky barrier (HSCH-925)
- Patch antennas are fabricated on Duroid 5880  $\epsilon_r=9.8$ ,  $h=0.127$ mm, 1.7GHz frequency bandwidth
- RF front end conversion loss is from 10-16dB
- IF conversion loss is around 10,6dB
- The group also did some extension work for sub-band sampling to realize 500Mbps/s system using 20MHz sampling rate DSP

I. Park, Y. Wang, T. Inoh, "A 60GHz integrated antenna array for high-speed digital beamforming applications," <http://www.Mwlab.ee.nctu.edu.tw>

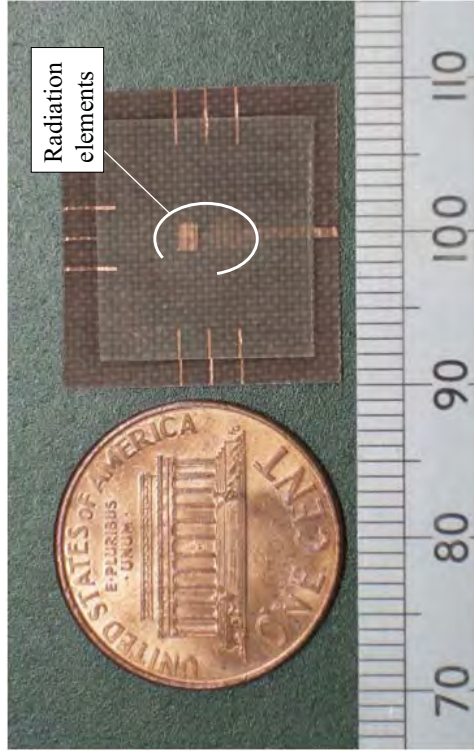




- Silicon chip is thinned down to 100 $\mu$ m, floor plan issues lead to edge antennas
- A 500 $\mu$ m silicon wafer for mechanical stability
- Low frequency signals using wire-bond and board traces

A. Babakhani, X. Guang, A. Komijimai, A. Natarajan and A. Hojimi, "A 77-GHz Phase-array transceiver with on-chip Antenna in silicon: receiver and antenna", IEEE J. Solid State, no.141, no. 12, Dec. 2006

# Photo of Developed Antenna



Karen Li, Tomoaki Sato, and Naoki Kajitani, "Wideband Planar Antennas for Millimeter-Wave Wireless Communications", 2008 IEEE AP-S International Symposium on Antennas and Propagation and 2008 USNC/URSI National Radio Science Meeting, Session: Wideband Microstrip Patch Antennas, no. 505-2, San Diego, California, USA, July 5-12, 2008.

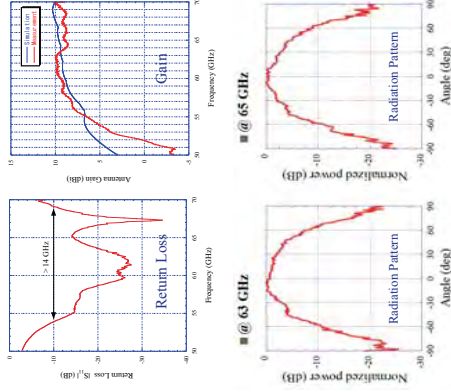
# ミリ波WPAN用広帯域平面アンテナ



写真：ミリ波広帯域アンテナ試作品(NICT)

- アンテナの主な特性と特徴
  - 14GHz以上の広帯域
  - 日米欧で割当てられているライセンス不要のミリ波周波数帯 (日本: 59-66GHz, 米国: 57-64GHz, 欧州: 57-66GHz)のすべてを1つのアンテナでカバー可能
  - 小型・軽量・薄型 (厚さ: 0.5mm)
  - 高い放射効率及び比較的大きなアンテナ利得 (9dBi以上)
  - 平面構造であり、半導体素子や他の回路への組み込み・集積が可能

■ アンテナの実測例  
Measured Performances



# まとめ

- ミリ波を使った高速無線通信システムは、高速・大容量の可能性をひめている。
- ミリ波アダプティブアレイアンテナは、ミリ波高速無線システムを実現する上での重要なデバイスである。
- ミリ波Siデバイス及びその集積化技術がミリ波アダプティブアレイアンテナに新たな可能性をもたらしている。
- 新しいミリ波アダプティブアレイアンテナ (構成・プロセス・デバイス作成・モジュール化・パッケージング・ベースバンドとの一体化など) の課題がまだ沢山残っている。

## Special Thanks to

**Dr. Jing Gao, Dr. Hiroshi Harada, NiCT**

ご静聴、ありがとうございました。

独立行政法人 情報通信研究機構  
新世代ワイヤレス研究センター  
主任研究員 李 可人 [keren@nict.go.jp](mailto:keren@nict.go.jp)

#### 4-2-3 要素技術の課題

<p>(テーマ) テラヘルツ無線の利用シーンを実現するための技術課題と研究開発戦略  (講師) 大阪大学  レーザーエネルギー学研究センター 斗内 政吉 教授</p>
---

#### 講演概要

テラヘルツ無線の利用シーンを実現するためには、今後、要素技術ごとにどのような技術課題を克服していく必要があるのか、表4-2-3に示すような整理を行った。

要素技術	技術課題	備考
発生器	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) フォトミキサー:UTC-PDの最適化。光導波路一体型</li> <li>2) 波長可変LDとの融合・集積一体型。</li> <li>3) 全電気回路:InP系発信器→Si CMOSへの展開。</li> <li>4) その他:RTDの高出力化、THz-QCLの低周波数/室温/低閾値動作</li> </ol>	短距離通信では、フォトミキシング技術による先行が重要
検出器	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) ショットキーダイオードの高性能化(エアブリッジ、ナノコンタクト、材料探索など)。国産技術の育成。</li> <li>2) 新規検出器の開発:RTD、QCL、UTC-PDの利用検討。検波手法の最適化。室温単電子デバイスなど。</li> <li>3) 新検出手法の探索。光の利用など。</li> </ol>	現状では、GaAsショットキーダイオードのみが利用可能。海外の製品が先行
アンテナ・ビーム制御技術	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) アンテナのスケールリングと表面インピーダンス等の非線形の検討。</li> <li>2) MEMSの利用。超小型立体アンテナ</li> <li>3) メタマテリアルとの融合:増幅効果など。</li> <li>4) アンテナのアレー化</li> <li>5) 超小型立体アンテナ 他</li> </ol>	電力供給もアンテナで行うと用途が拡大
フィルタ・変調器	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) フィルター開発:メタルメッシュフィルター。誘電体フィルター。SPPを利用したフィルター・パス制御。</li> <li>2) 変調器:誘電体変調器。材料開発。メタマテリアル利用。</li> <li>3) 反射板等:材料開発。メタマテリアルの応用。</li> </ol>	
周辺回路技術	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 高速光変調器の開発。</li> <li>2) 超高速・大容量メモリ の開発(バスの高速化)。</li> <li>3) アンテナ一体型集積回路の開発。</li> <li>4) 低損失THz波伝送ファイバの開発</li> </ol>	
方式検討(周波数有効利用)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) OFDM技術の利用。20G×10バンド(200Gbps)など</li> <li>2) 多値変調技術の導入。</li> </ol>	周波数割当に影響
計測・標準	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 研究開発のための測定機器開発。</li> <li>2) 光コムの利用。(例)テラヘルツシンセサイザ</li> <li>3) EMCデータベース整備。</li> </ol>	公的機関の研究強化が必要
その他	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 新規テラヘルツ電子材料/デバイスの開発。(ブレークスルー技術の継続的な開発)</li> <li>2) 非接触電力供給技術の開発。</li> </ol>	1) は大学の役割として重要

表4-2-3 要素技術ごとの克服すべき技術課題

## 意見等

- 今日紹介いただいた中には、新しいデバイス技術が含まれている（MEMSやメタマテリアル等）。これまでテラヘルツとは関係なく出てきた技術が、テラヘルツと相性のよいモノになってきているという印象を受ける。テラヘルツを開拓するに当たって、それを支える新技術が出ているというのが、テラヘルツの応用を支えるだろうと予感させる。そうは言っても、どれくらいの性能が必要なのかということ、さらに深掘りしていきたい。そこまで検討すれば、その技術がより意義あるものになる。
- このような研究開発は産官学が進めていくべきものだと感じる。特にアロケーションをとっていない周波数（275GHz以上）を狙っていくときに、どのような役割分担で提案していくのか考える必要があると感じた。
- 今、ミリ波帯等の研究者の中で大きな課題となっているものに、標準器の問題がある。実は60GHzでも標準になっているモノはないと聞いている。それではトレーサビリティがとれないので、このあたりの高い周波数を使うためには計測器とともに標準器も検討していけないといけないと感じている。

### 4-3 テラヘルツ無線の研究開発事例

100GHz～500GHz帯の電波を無線通信に利用しようとする試みは、海外を眺めてもまだ多くの事例はなく、本格的な検討が始まったのは平成12年ごろからである。理論的な議論としては、Mannによる図4-3-1に示すような、60GHz無線と400GHz無線の伝送距離の比較が興味深い[1]（注釈を後述。以下同じ。）。両者の大気減衰は、25mm/hの降雨を想定した場合、26-27dB/kmと大差がなくなる。この条件において、60GHzの送信電力を100mW、400GHzの電力を4mWとし、両者のアンテナ開口を10cmx10cmとして、受信電力が1pWとなる伝送距離を計算してみると、電力が1/25であっても400GHzの方が遠くまで伝送できるという結果になる。これは、周波数とともにアンテナ利得が増加する、すなわち電波の指向性が増すために、単位断面積当たりの電力密度が高くなるため少ない送信電力でも実現可能だからである。電波ビームが「ペンシル」のように鋭いと位置決めを含めて使いにくくなる議論（実際は光波ほどの使いにくさはない）は別として、周波数とともに出力が減少するという宿命を持つ電子デバイスにとって重要な結果とも言える。

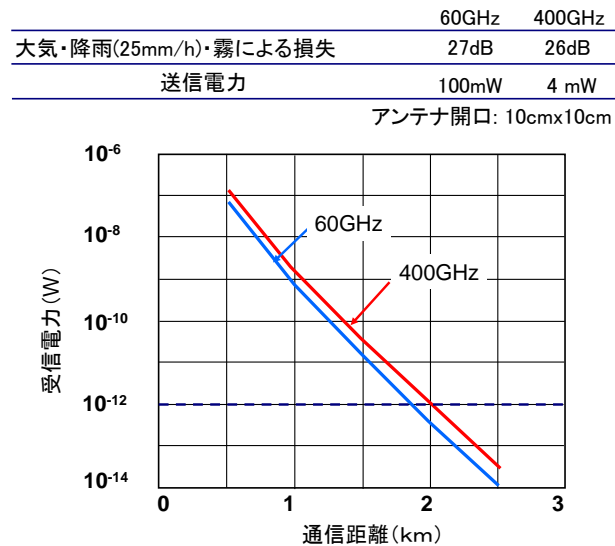


図4-3-1 60GHz無線と400GHz無線の伝送距離の比較（理論計算）[1]

100GHzを超える電波を高速無線通信に利用しようとする試みは、後述するNTTの研究事例が最初である[2～6]。300GHzを超える発振器やそれを検出するための電子デバイスは、それぞれGunn diodeやSchottky barrier diodeを用いれば、実はミリ波導波管を用いた有線通信の研究開発が興隆を極めた1970年代でも可能であった。高周波トランジスタ技術が未熟であった当時でも、ダイオードを用いれば、発振、増幅、検出を行うことができた。NTTの手法は、図4-3-2に示すように、送信機にフォトニクス技術を用いている点が特徴である。現在の光ファイバ通信に象徴されるように、光波の領域では、ギガはもちろんテラビットもの伝送容量をハンドリングすることが可能となっている。すなわち、同図に示すように、光の領域でテラヘルツ帯の信号（テラヘルツ周波数で強度変調された光信号）の発生と変調を行い、最後にフォトダイオードで光電変換して、電気（電波）信号として空間に放射するという考え方である。この手法によれば、テラヘルツ波を、きわめて広帯域で

安定に発生させることが可能であるばかりでなく、光領域で信号変調を行うため、100Gbpsを超える変調が可能となる。光電変換デバイスのみがボトルネックであり、そのほかの技術は、すでに光通信分野において開発済のものが利用できる。

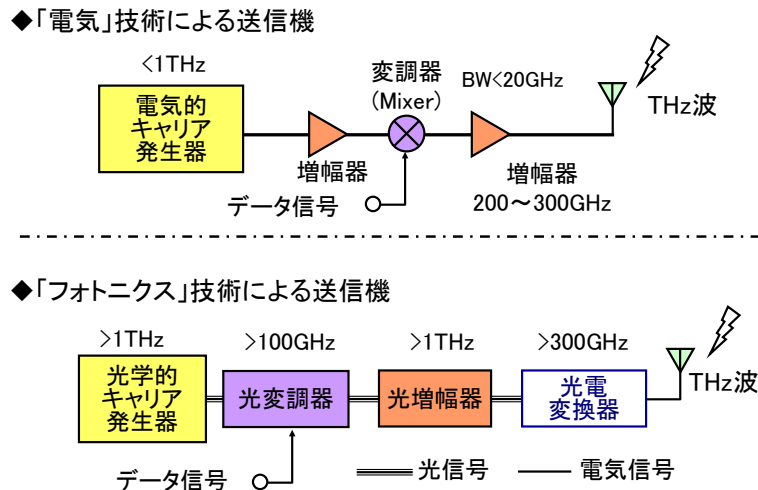


図4-3-2 電気技術による送信機とフォトニクス技術を用いた送信機の比較

NTTは、図4-3-3に示すようなフォトニクス技術を利用した送信機により、電波の窓（大気減衰が低い領域）であり、また電波天文の観測業務との干渉が避けられる125GHzを中心周波数とした120GHz帯の無線システムの開発を行い平成14年には無線としては当時最高の10Gbpsの伝送速度を達成した[4]。その後、フォトダイオードの後段にInP HEMTによる増幅器を付加するとともに受信機にも低雑音の前置増幅器を導入することで、出力10mWで1kmを超える伝送が可能な無線システムを開発した[5]。さらに平成16年には、送信機全部を電子デバイスで構成すること（図4-3-4）にも成功し、送受信機ともにInP HEMTによるMMICで構成できるようになった[6, 7]。また、送信機の電力増幅器の出力性能を上げるとともに、誤り訂正技術(FEC: Forward Error Correction)の開発によって、3kmを超える長距離通信にも成功している[8]。平成20年には、現場でのアンテナの取付け法や取扱いの容易性を考慮したシステムを開発し、同年8月の北京オリンピックにおいてフジテレビジョンと共同で放送中継に利用した[9]。そのほか、平成21年7月の大阪での皆既日食の中継や平成22年2月の札幌雪祭りなどでのフィールドトライアルで実績を積んでいる。

フォトニクス技術を送信機に利用したシステムは、米国Battele研究所においても採用され、94GHz帯での実験が進められている。同じフォトニクス技術を駆使し、BPSKやQPSKによる周波数利用効率の改善の検討も報告されている。また、韓国ETRIにおいても、同様にフォトニクス技術を用いた送信機の研究が行われている。

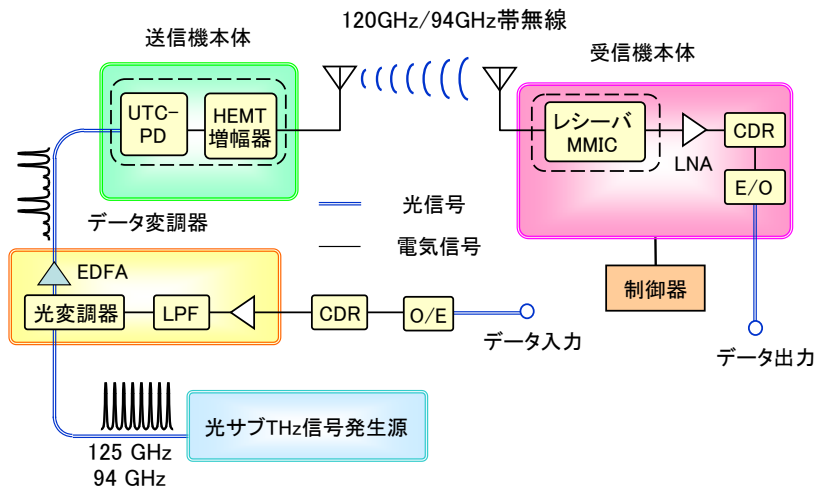


図4-3-3 フォトニクス技術を用いた送信機による無線システムの構成

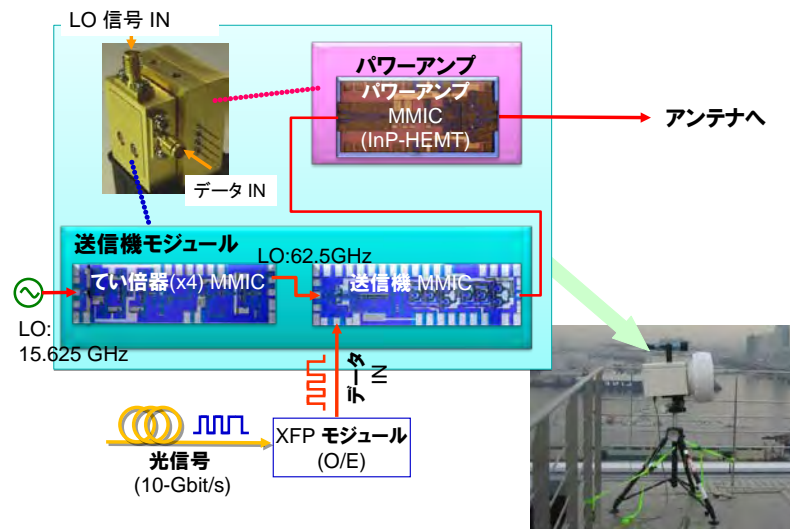


図4-3-4 全電気技術を用いた120GHz帯無線送信機

欧州でのテラヘルツ無線技術の研究は、ドイツのテラヘルツ通信研究所 (Technical University of Braunschweig) が先導している [10, 11]。主として、屋内での無線LANへの応用を目指して、300GHz帯での屋内伝搬特性や、テラヘルツ波を効率的に反射する壁紙の開発を行っている。実験的には、図4-3-5に示すように、市販の電子部品モジュールを組み合わせ、300GHz帯送受信機を構成し、伝送帯域などの基本特性を評価している。実際には300GHz帯でアナログビデオ信号(数Mbps)の伝送をデモンストレーションするに留まっている。

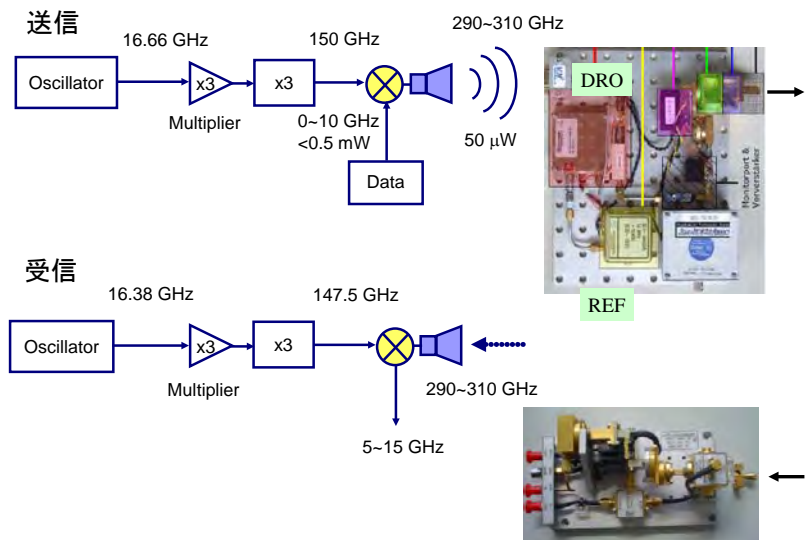


図4-3-5 テラヘルツ通信研究所（独）による送受信機の構成

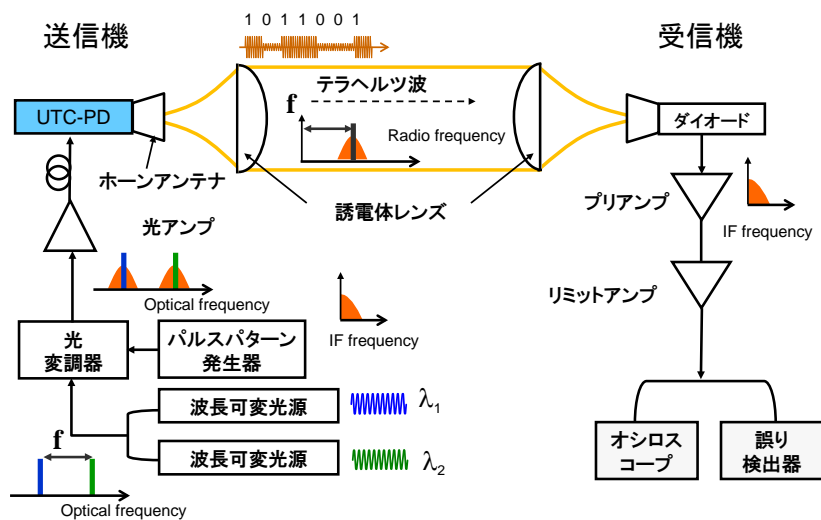


図4-3-6 フォトニクス技術を用いた送信機による300GHz帯無線システムの構成

大阪大学とNTTは、120GHz帯無線の開発当初と同様にフォトニクス技術を用いた送信機（図4-3-6）により300-400GHz帯でのギガビット無線伝送に成功している[12, 13]。

他にテラヘルツ無線に関する様々な議論が、IEEE802委員会（無線LAN/MANに関するIEEEの標準化組織）内に設置されたIEEE 802.15 WPAN Terahertz Interest Group (IGthz)で繰り返られている。詳しくは、ホームページ[14]からドキュメントがダウンロードできる。

- [1] C. M. Mann: "Towards terahertz communications systems," Terahertz Sources and Systems, ed. R. E. Miles et al. (Kluwer Academic, Dordrecht, 2001) pp. 261-267.
- [2] T. Nagatsuma, A. Hirata, Y. Royter, M. Shinagawa, T. Furuta, T. Ishibashi, and H. Ito, "A 120-GHz integrated photonic transmitter", Tech. Dig. Intern. Topical Meeting on Microwave Photonics 2000, pp. 70-73, 2000.
- [3] A. Hirata, M. Harada and T. Nagatsuma, "Multi-Gigabit/s wireless links using millimeter-wave photonic techniques," Tech. Dig. Intern. Topical Meeting on Microwave Photonics 2001, Tu-2.8, pp. 77-80, 2001.
- [4] T. Minotani, A. Hirata, and T. Nagatsuma, "A broadband 120-GHz. Schottky-diode receiver for 10-Gbit/s wireless links," IEICE Trans. Electron., vol.E86-C, no.8, pp.1501-1505, Aug. 2003.
- [5] A. Hirata, T. Kosugi, H. Takahashi, R. Yamaguchi, F. Nakajima, T. Furuta, H. Ito, H. Sugahara, Y. Sato, and T. Nagatsuma, "120-GHz-band millimeter-wave photonic wireless link for 10-Gb/s data transmission," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 54, no. 5, pp.1937-1944, May 2006.
- [6] A. Hirata, H. Takahashi, R. Yamaguchi, T. Kosugi, K. Murata, T. Nagatsuma, N. Kukutsu, and Y. Kado, "Transmission characteristics of 120-GHz-band wireless link using radio-on-fiber technologies," J. Lightwave Technol., vol. 26, no. 15, pp. 2338-2344, Aug. 2008.
- [7] T. Kosugi, M. Tokumitsu, K. Murata, T. Enoki, H. Takahashi, A. Hirata, and T. Nagatsuma, "120-GHz Tx/Rx waveguide modules for 10-Gbit/s wireless link system," in IEEE Compound Semiconduct. IC Symp. Dig., pp. 25-28, Nov. 2006.
- [8] A. Hirata, R. Yamaguchi, T. Kosugi, H. Takahashi, K. Murata, T. Nagatsuma, N. Kukutsu, Y. Kado, N. Iai, S. Okabe, S. Kimura, H. Ikegawa, H. Nishikawa, T. Nakayama, and T. Inada, "10-Gbit/s wireless link using InP HEMT MMICs for generating 120-GHz-band millimeter-wave signal," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 57, no. 5, pp.1102-1109, 2009.
- [9] Y. Kado and T. Nagatsuma, "Exploring sub-THz waves for communications, imaging, and gas sensing", PIERS Proceedings, Beijing, 42, pp. 42 - 47, 2009.
- [10] R. Piesiewicz, M. Jacob, M. Koch, J. Schoebel, and T. Kürner, "Performance analysis of future multigigabit wireless communication systems at THz frequencies with highly directive antennas in realistic indoor environments," IEEE Journal Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 14, no. 2, pp. 421-430, March/April 2008.
- [11] C. Jastrow, K. Münter, R. Piesiewicz, T. Kürner, M. Koch and T. Kleine-Ostmann, "300 GHz Channel Measurement and Transmission System", Tech. Dig. 2008 Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2008), M3A3.1342, September 2008.
- [12] T. Nagatsuma, H.-J. Song, Y. Fujimoto, K. Miyake, A. Hirata, K. Ajito, A. Wakatsuki, T. Furuta, N. Kukutsu, and Y. Kado, "Giga-bit wireless link using 300-400 GHz bands," Tech. Dig. IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics, Th.2.3, October 2009.
- [13] H.-J. Song, K. Ajito, A. Hirata, A. Wakatsuki, Y. Muramoto, T. Furuta, N. Kukutsu, T. Nagatsuma and Y. Kado, "8 Gbit/s wireless data transmission at 250 GHz," IEE Electron. Lett., vol. 45, no. 22, October 2009.
- [14] <http://www.ieee802.org/15/pub/IGthz.html>.

#### 4-4 電波行政上の諸課題

国際的な電波周波数の分配・割当ならびに標準化はITU-R（国際電気通信連合・無線通信部門）において行われている。ここで定められる無線通信規則は、有限な資源である無線周波数・静止衛星軌道の合理的・効率的かつ経済的な利用、遭難や安全通信の保護、有害な混信の防止を目的としている。周波数有効利用のための必要最低限の利用、他国との混信回避のための分配割当て、既に使用している人たちに有害な混信を与えない（早い者勝ちルール：ただし、後から使用する人たちを排除するのではなく、共用の精神。）、等が一般的な規則である。

3～4年に一度開催される世界無線通信会議（次回はWRC-12: World Radio Conference 2012、2012年（平成24年）1月23日～2月17日）では、周波数利用に関して様々な取決めがなされる。テラヘルツ帯周波数に関連するものでは、WRC-12の議題1.6（決議950）がある。以下に議題1.6（AI1.6）を引用する。

AI 1.6: "to review No. 5.565 of the Radio Regulations in order to update the spectrum use by the passive services between 275 GHz and 3 000 GHz, in accordance with Resolution 950 (Rev. WRC 07), and to consider possible procedures for free-space optical-links, taking into account the results of ITU R studies, in accordance with Resolution 955 [COM6/9] (WRC 07)"

現在の周波数分配の上限は275GHzである。電波法上、電波として定められている最大周波数は3,000GHzである。275GHz以上、3,000GHz以下の周波数帯の利用については、脚注5.565によって、受動業務（電波天文、地球観測衛星等）が利用する帯域が定められている。また能動業務の実験的利用が認められている。

275GHz～3,000GHzでの受動業務（天文観測、地球観測）に関しては、周波数分配は行われていないが、実際に観測等が進められていることを踏まえ、脚注5.565の内容を改定する議題1.6（決議950）の下、研究が行われている。ITU-RのSG7は科学業務を取扱う研究委員会であり、標準時（WP7A）、宇宙研究・宇宙運用・気象衛星等の宇宙無線システム（WP7B）、地球探査衛星業務（WP7C）、電波天文（WP7D）に関する研究を行っている。WP7Dでは電波天文上重要なスペクトル線リスト（1,000～3,000GHz）を含む新勧告草案が策定されつつあった。このリストは国際天文学連合総会（2009.8、リオデジャネイロ）において審議され、幾つかのスペクトル線を追加した後に承認された。これを受けたWP7D（2009.9）では新勧告草案の承認が行われ、引き続いて開催されたSG7会合では、新勧告案（Rec. ITU-R RA. [1-3THz]）が採択され、承認手続きが進んでいる。この勧告の成立は国際的な協力により進められているALMA（Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array）プロジェクトと関連性が深い。

一方、能動業務に関しては、2009年（平成21年）2月25日～3月4日にソウルにて開催されたITU-R WP1A会合（スペクトラム管理技術、共用に関する作業部会）において、日本より入力文書1A/118（275～3,000GHzにおける能動業務の技術動向（パルス光源による分光分析装置、短距離レーダー、無線）について、情報提供するもの）が入力された。この文書1A/118は我が国からの受動業務以外での使用可能性に関する情報提供文書であるが、更なる技術

情報が盛り込まれる予定であるため、WP5C, 7C, 7D等へのリエゾン文書の発出は見送った。本入力文書に関し、議長から具体的にどの周波数帯が使われるのかとの質問があり、我が国より用途により連続した周波数帯(100GHz-10THz)で使う場合と、特定周波数帯を使う場合があるとの応答を行っている。この先、更なる技術情報の入力を行い、次々回のWRC-16の議題として、WRC-12へ提案する等の活動を積極的に行っていく必要がある。

デファクトスタンダードのIEEEにおいては、WPANの802.15にTerahertz Interest Group (IGTHz)があり活動を行っている。第1回会合は2008年(平成20年)1月に台北にて開催された。2010年(平成22年)3月のOrlandoの会合から、ドイツのTHz Communication LabのDr. Thomas Kuernerが議長となった(副議長:AT&T Dr. David Britz)。現状の活動は、802.15が定める5つのクライテリアに関するテラヘルツ帯無線の可能性を示すドキュメント作りのため、多数のテラヘルツ技術関連情報を集めること(IGTHz会合での発表、他)を目標としている。ドキュメントが十分に揃えば、スタディーグループ(SG)へ昇格させることも考えられるが、現状ではまだその時期ではないというのが、IGTHzでの共通認識である。SGになる際には、テラヘルツ無線全体としてではなく、個別の応用毎にSGを構成して行くことになると考えられる。本調査検討会の活動を取りまとめた本報告書は、技術情報としても貴重であり、IGTHzへ当該情報を提供できれば、今後、IGTHzの活動にも貢献できるだろう。

IGTHzにおいてはITU-Rでの受動業務の周波数に関する議論に対しての関心が高い。能動業務と受動業務の共用を図るために、802.16(ITU-Rへのリエゾン)を通して、ITU-Rへ文書の入力を行い、ITU-Rにおいて共用に関する議論を行っていく必要がある。このためには各国の能動業務の関係者が協議し能動業務側の統一見解をまとめ、これにより受動側との共用に関する議論を行うことが肝要であると認識されている。この点に関しては、同じ組織内に受動側と能動側を持つ(独)情報通信研究機構(NICT)への期待が高い。NICT内での合意が、ITU-Rにおける受動側と能動側の合意形成のベースとなる可能性が大きく、IGTHzとNICTの連携が望まれている。