



National Institute of Information and Communications Technology

第201回 AC・Net例会
(2013-7-5 14:00-18:00)

ナレッジキャピタル タワーC 9階 カンファレンスルーム「**Room C07**」

テラヘルツ帯電磁波を用いた超高速・大容量 無線通信技術の研究開発への期待

情報通信研究機構 未来ICT研究所
寶迫 巖(ほうさこ いわお)

平成20年度 テラヘルツ技術動向調査委員会（NICT）

平成21-22年度 総務省近畿総合通信局
「テラヘルツ波帯の情報通信利用に関する調査」

平成24年度 電子情報通信学会 マイクロ波・ミリ波フォトンクス研究会 および
テラヘルツ応用システム研究会 合同ロードマップ委員会

平成24年度 テラヘルツ技術動向調査委員会（SCAT）

以上の施策に、研究員、委員として参加した際の成果を一部、利用しております。
各々の施策において、ご尽力いただきました皆様にあらためて感謝いたします。

情報通信研究機構 未来ICT研究所 超高周波ICT研究室
光ネットワーク研究所 光通信基盤研究室

イントロダクション

研究開発動向（欧米、日本）

デバイス技術の進展
（III-V、CMOS、真空管素子、他）

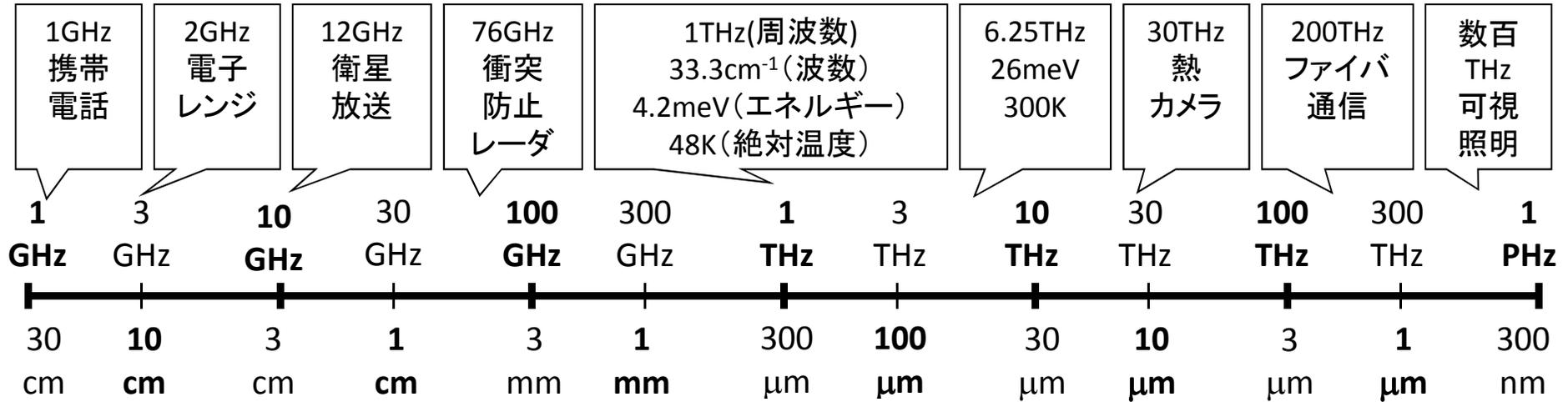
周波数分配、干渉、他
（ITU-R: 国際電気通信連合 無線通信部門）

テラヘルツ無線通信導入シナリオ
（IEEE802.15 IGTHzでの議論）

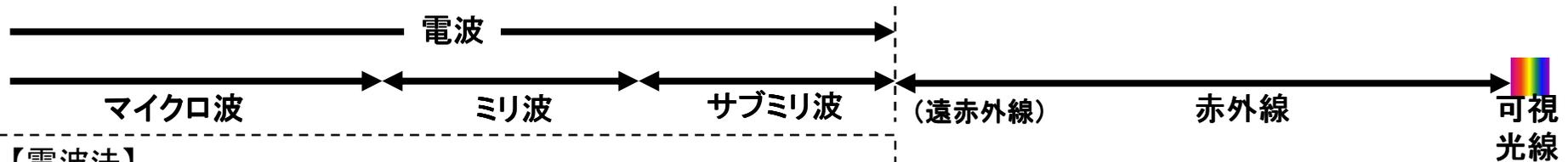
電力標準、周波数標準

まとめ

テラヘルツ波とは？



← テラヘルツ波 →



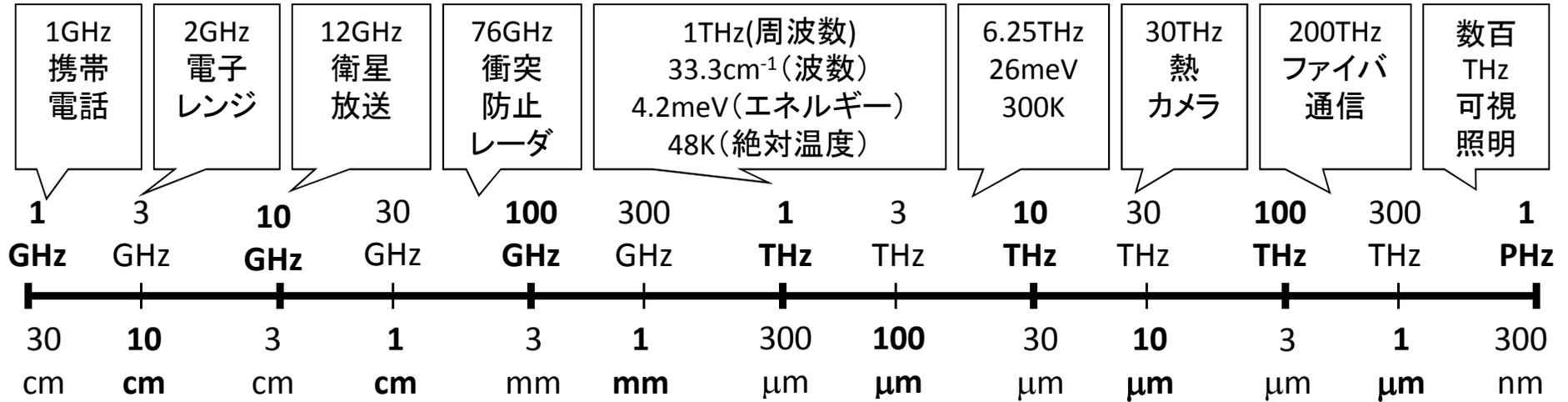
【電波法】
 第二条 この法律及びこの法律に基づく命令の規定の解釈に関しては、次の定義に従うものとする。
 一 「電波」とは、三百万メガヘルツ以下の周波数の電磁波をいう。

無線、レーダ

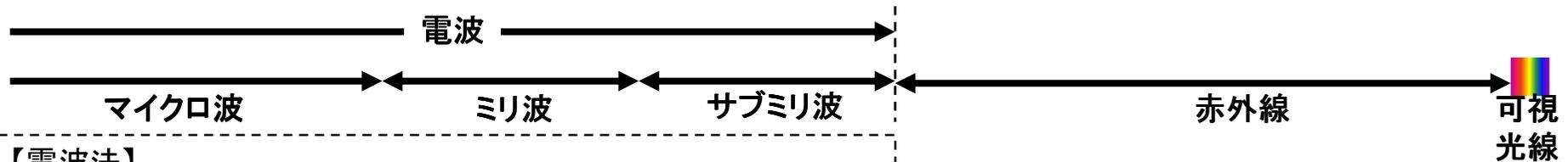
非破壊検査、分光分析

「テラヘルツ波」
 波長: 30μm ~ 3mm (周波数: 100GHz ~ 10THz) の領域を指し示すことが多い。

テラヘルツ波とは？



← テラヘルツ波 →



【電波法】
 第二条 この法律及びこの法律に基づく命令の規定の解釈に関しては、次の定義に従うものとする。
 一 「電波」とは、三百万メガヘルツ以下の周波数の電磁波をいう。

電子デバイス・回路

レーザ、フォトニクス、カメラ

「テラヘルツ波」
 波長: 30mm ~ 3mm (周波数: 100GHz ~ 10THz) の領域を指し示すことが多い。

○電磁環境／無線機器計測



Vector Network Analyzer Extension Modules



Your Source For Terahertz and mm-Wave Products
Design and Manufacture of Millimeter Wave and Terahertz Devices, Components, and Systems

VDI's VNA Extenders provide high performance frequency extension of vector network analyzers into the THz range. Models are currently available for coverage from **50GHz to 1,100GHz**, with additional bands under development.

<http://vadiodes.com/>

○センシング／イメージング分野

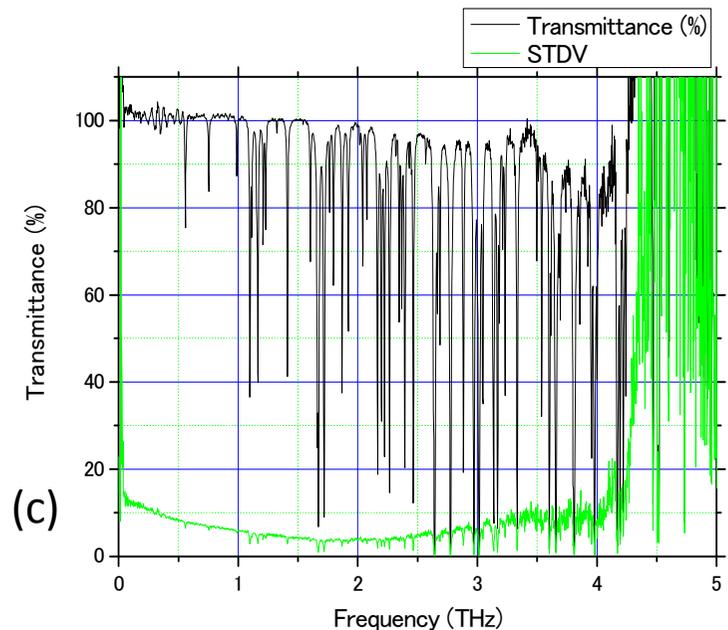
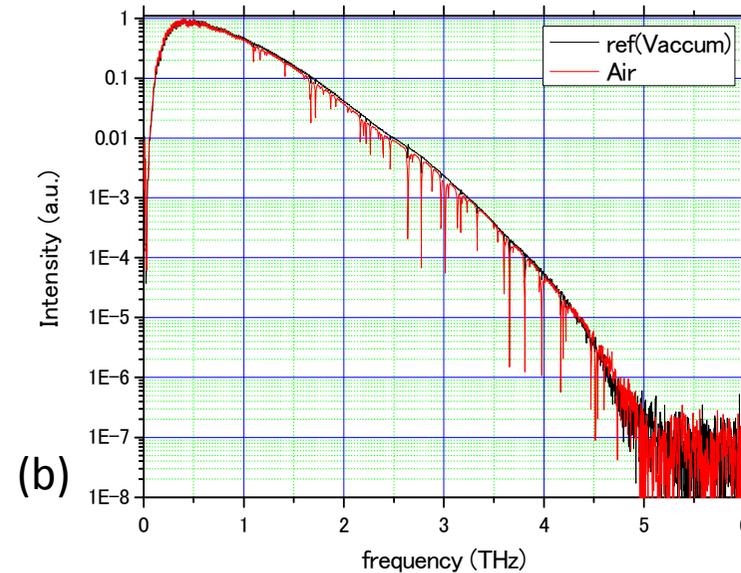
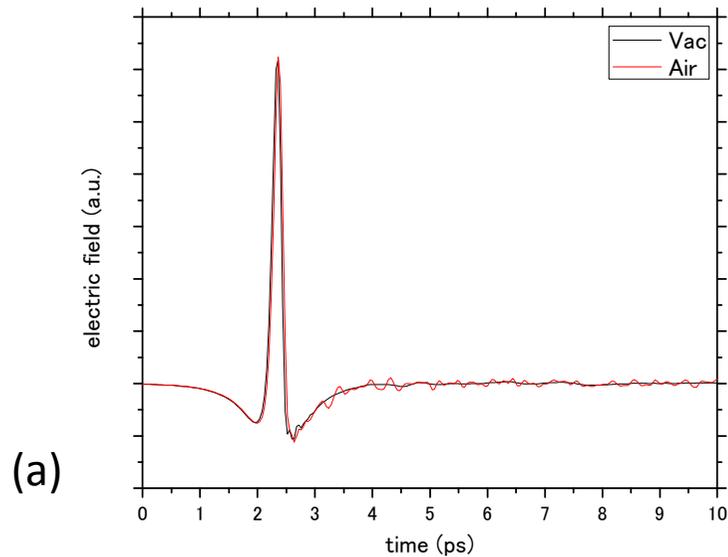


TAS7500シリーズ
テラヘルツ分光・イメージング・システム
(THz-TDS, ~5THz)

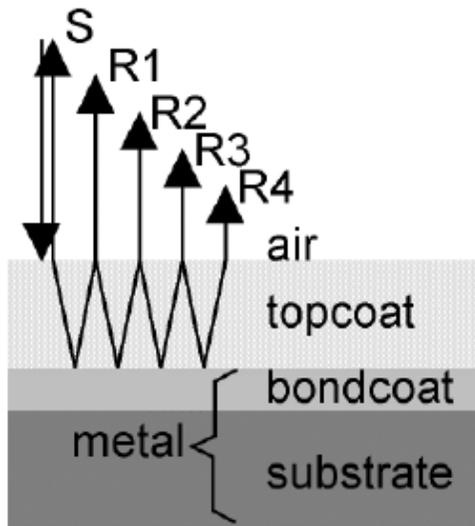
<http://www.advantest.co.jp/products/3DIAS/TAS7500/index.shtml>



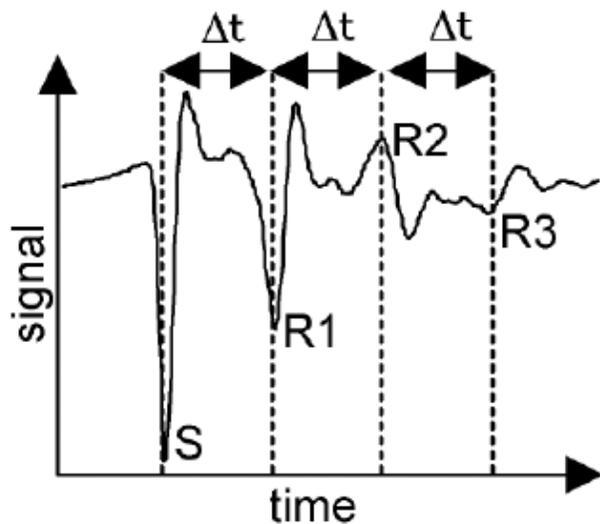
Palm-top size THz camera
IRV-T0831 (1-7 THz)



THz-TDSによる大気透過率(300K、1気圧、相対湿度50%、長さ=50mm、周波数分解能3.3GHz)の測定例。(a)は時間波形。赤が大気、黒は参照用の真空の透過率。赤線の細かい振動は全て大気吸収線の影響を示す。(b)は(a)時間波形のフーリエ変換。赤線に大気吸収線が多数あることがわかる。信号のダイナミックレンジは6桁程度ある。(c)は大気透過率=(b)の(大気)/(真空)。緑線は複数回行った測定の標準偏差。

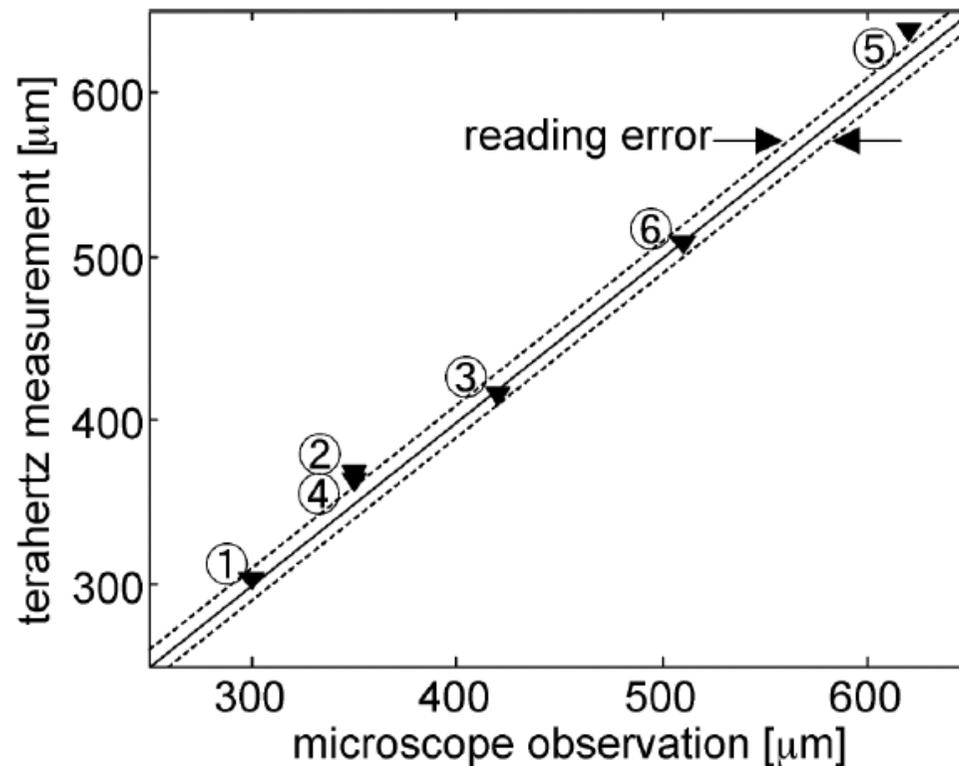


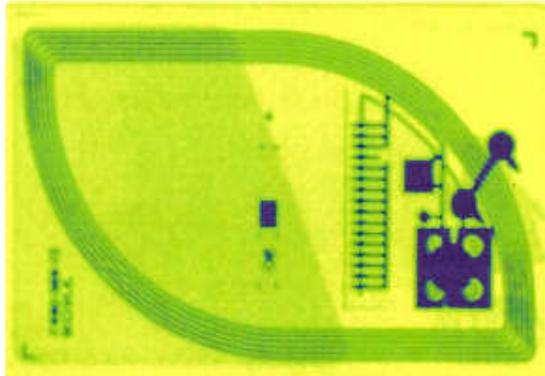
(a) schematic diagram



(b) typical waveform

Thickness of thermal barrier coating **non-destructively measured by THz waves** is in good agreement with that observed by microscope after sampling.

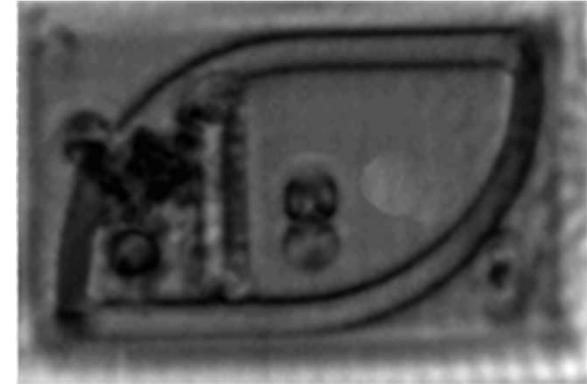




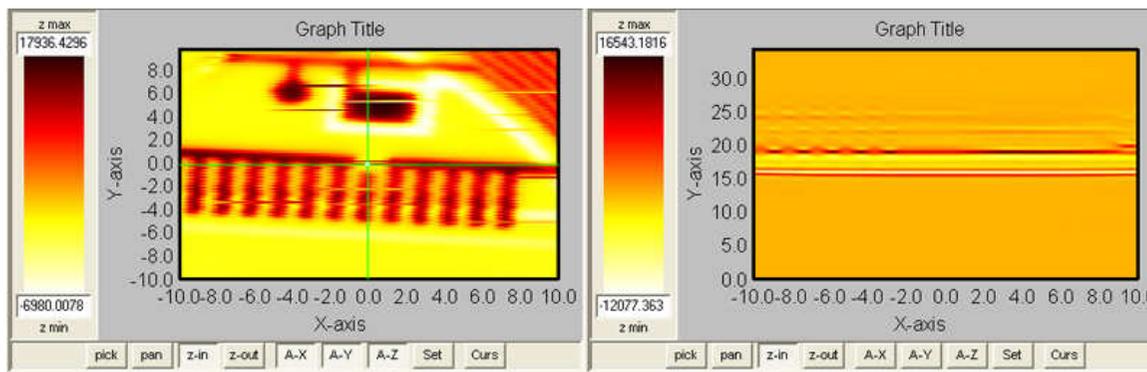
RIKEN
(THz-TDS, transmission)
K. Kawase, Optics and
Photonics News, 2004.



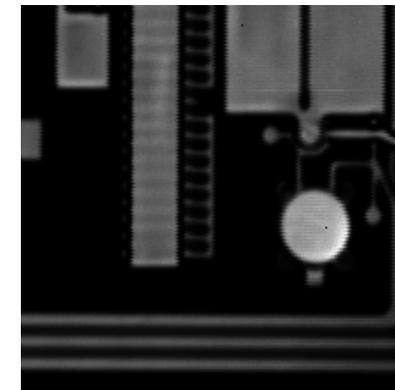
ENEA
(FEL, 0.15 THz reflection)



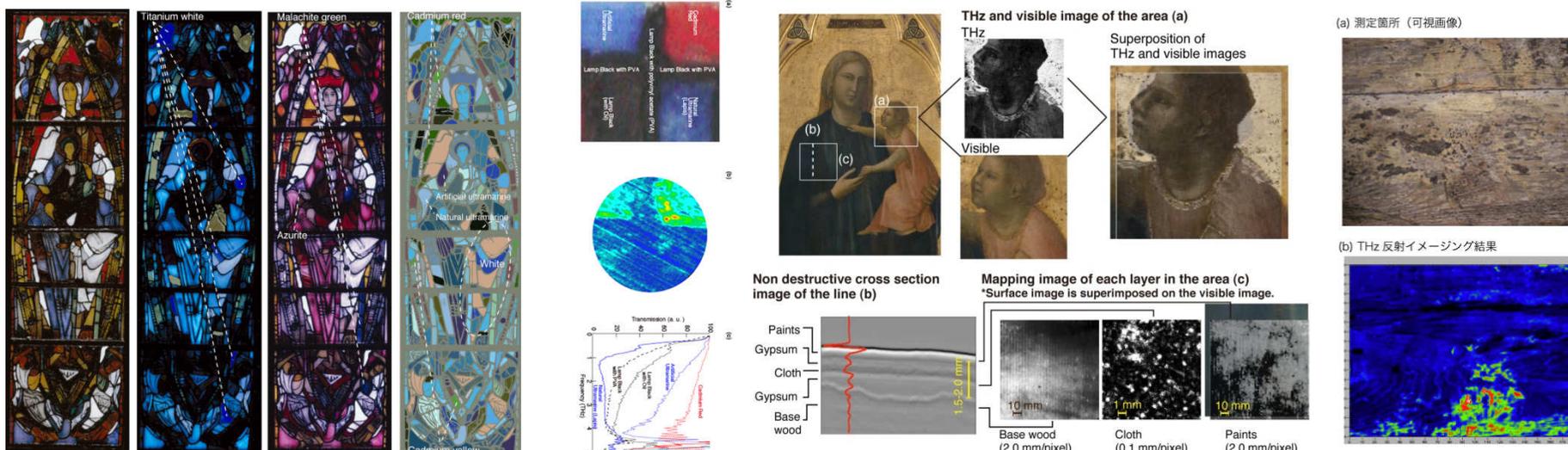
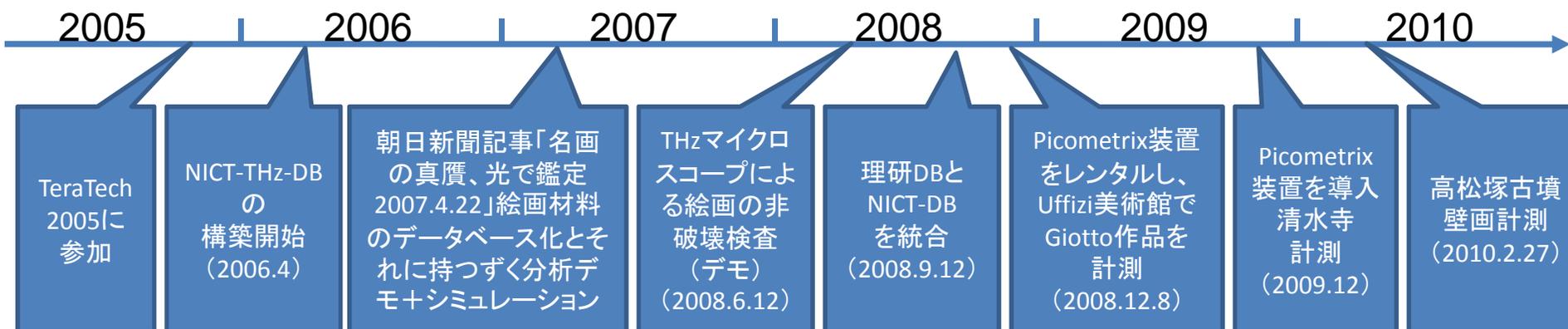
NICT
(NWA 67 GHz, reflection)



Teraview (THz-TDS-3D, reflection)



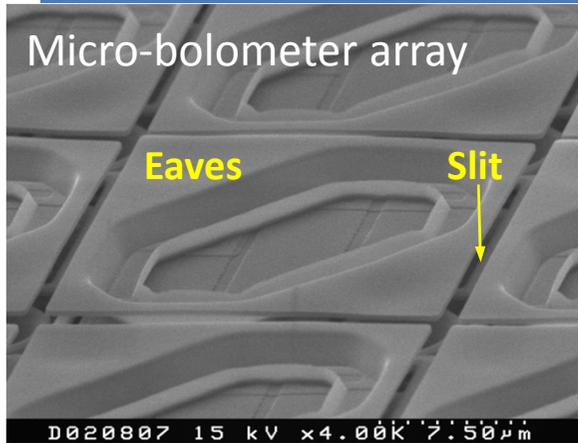
Picometrix (THz-TDS,
reflection), with 3D info



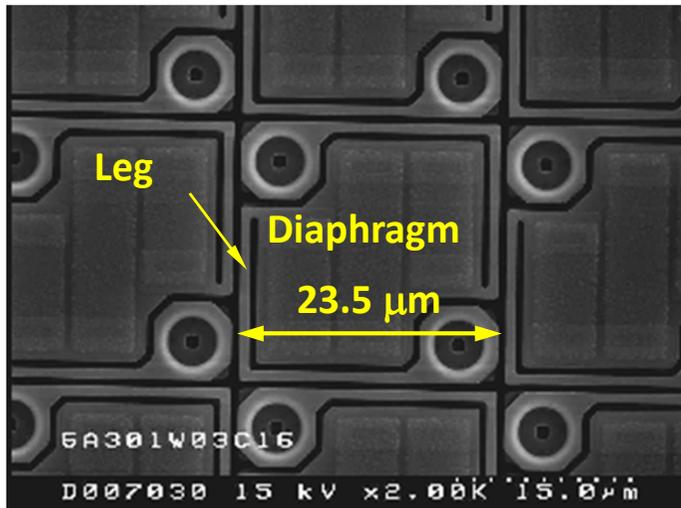
※狙い: 既存技術を用い、THz技術の判り易いデモを示し、その有用性を証明すること
 ☆示したいこと: 手法の持つ有効性の証明と他分野への展開の可能性
 ☆題材選びが勝負: 誰でもわかる対象であること
 (誰もが知っている絵画を対象とする。最終的には国宝級(高松塚で実現)を狙う。)

波及効果: 各国の著名な美術館(ルーブル、ブリティッシュ、メトロポリタン、、、)が手法の有効性を認め、装置の導入。

THz-FPA, Optics, and Camera System



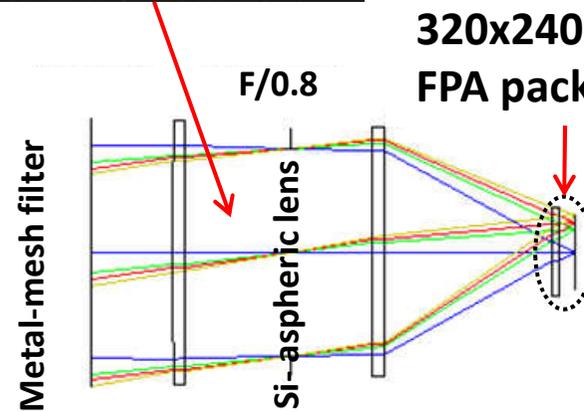
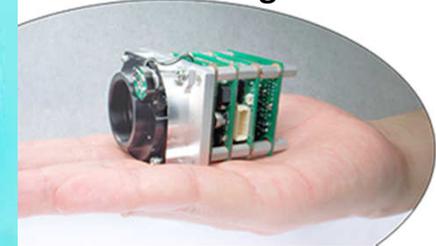
2nd floor (Fill factor : 90%)



1st floor (Fill factor : 60%)

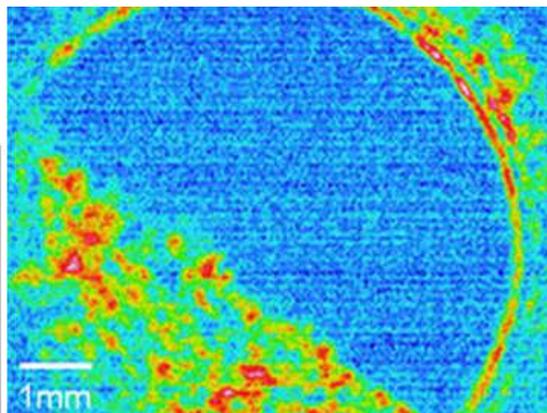


Si-window with AR coating

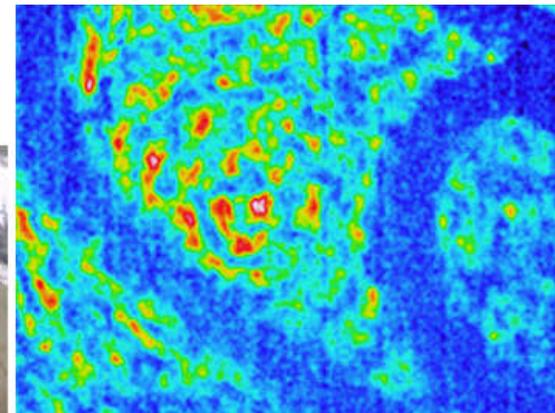


THz-FPA	320x240, pixel pitch 23.5µm
Field of view (FOV)	15.5° x 11.5°
Focal length and F number	28.2 mm : F/0.8
Instantaneous field of view (IFOV)	0.83 mrad
Fraunhofer diffraction limit (1.2λ/D) The number of pixels corresponding to IFOV	1.36 mrad @40 µm 1.6 x 1.6 pixels

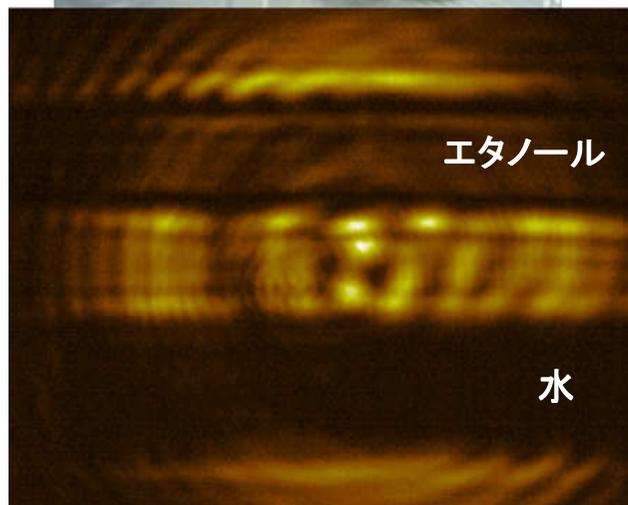
封筒内の錠剤



小麦粉中のクリップ



濾紙にエタノールと水を注入(東京大学)

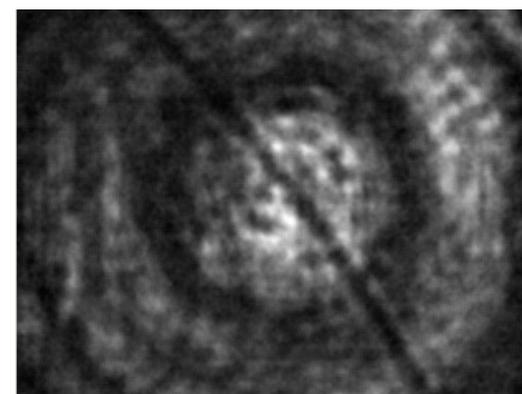


紙の下の頭髪(70um径)



Real-time image(30Hz)

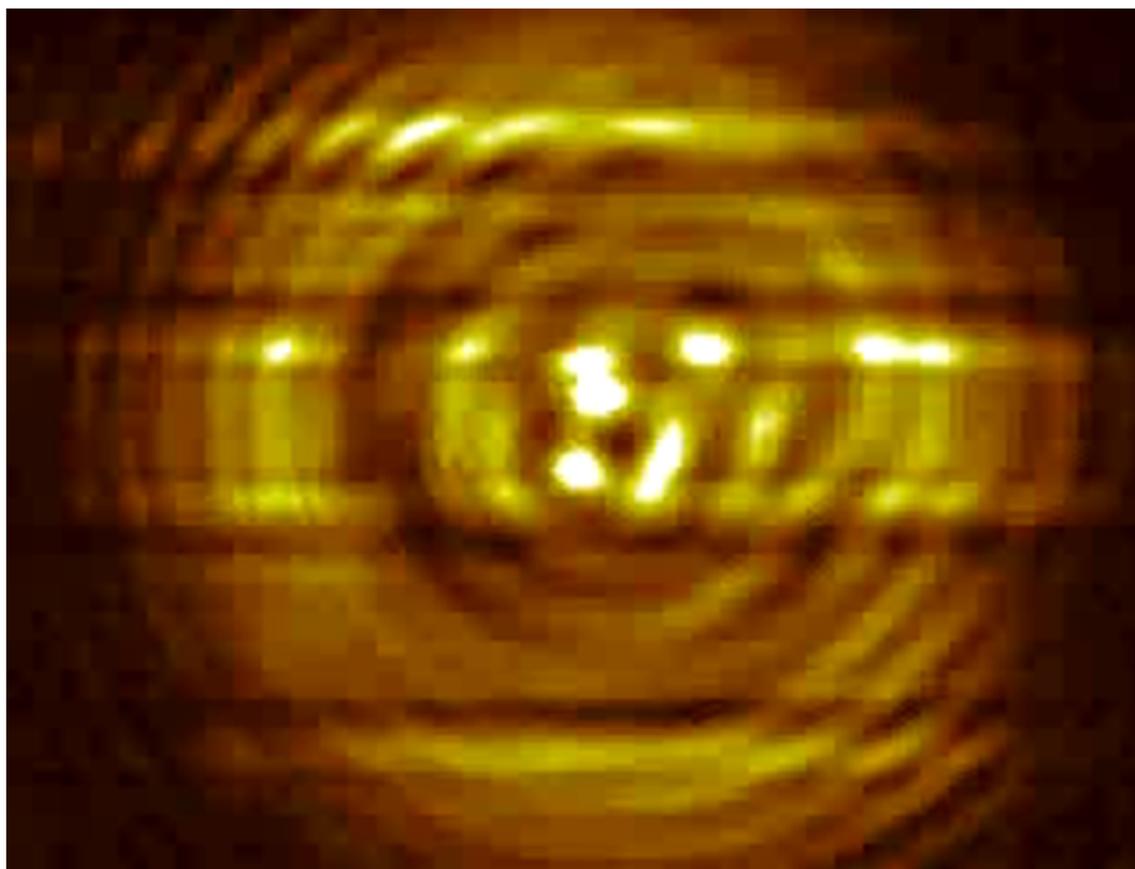
Lock-in: なし
フレーム積分: なし
Spatial filter: なし
SNR~3.4



Lock-in image

Lock-in周波数: 3.75Hz
フレーム積分: 16
Spatial filter: 3x3
SNR~47

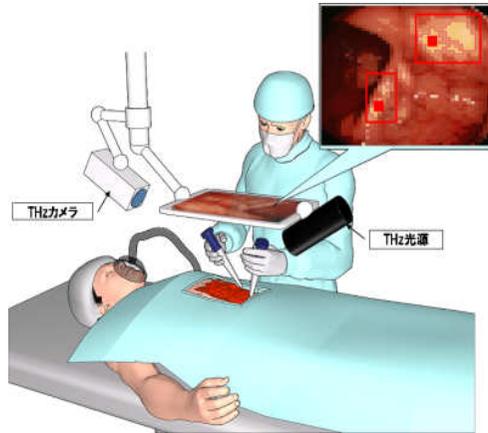
短冊状の濾紙にエタノールと水を注入(東京大学)



エタノール

水

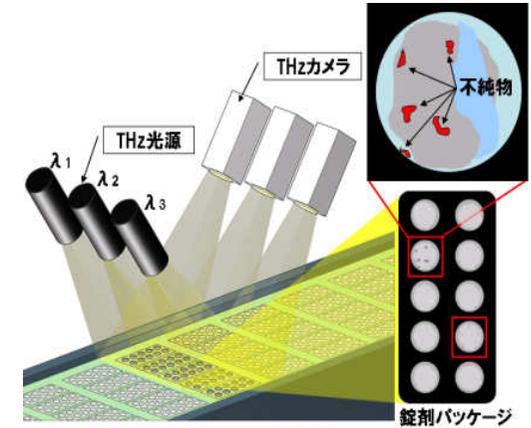
非破壊非接触センシング



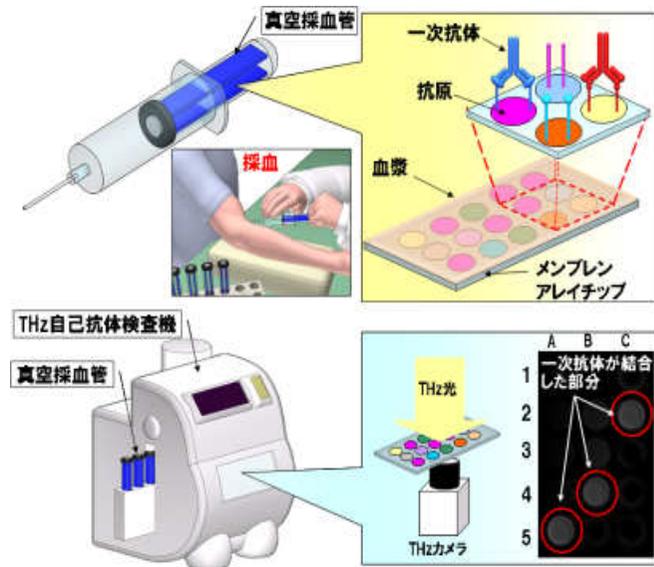
手術



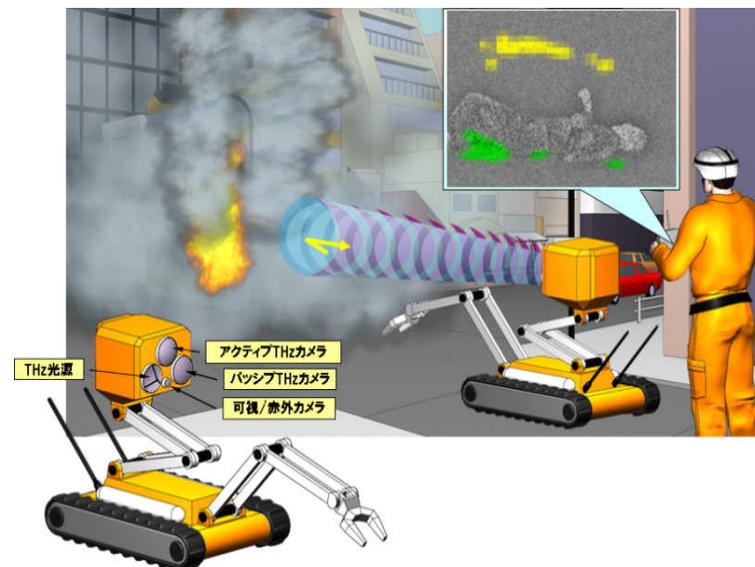
安全・安心



製造工程

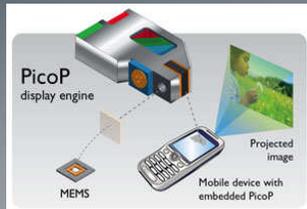


予防医療



災害現場での状況把握

☆HD → 4K → 16K
1.5G 6G 24Gbit/s
(Dual Green)
☆2D → 3D



Pico- Laser Projector

Proximity WL Comm
(KIOSK down-loading)

Wireless version of
-Display Port??
-Light Peak???

<http://www.microvision.com/>

Display : HD, 4K, 16,,,, 3D

Processing : multi-core GPU(Cell, NVDIZ,,,), 1 T Flops

Storage : SSD, 3D, Capacity :10-100TB, RW; few tenth of Gbit/s

Transferring : THz WL Comm. !!

KIOSK down-loading



Touch data exchanging



WL Interconnection



Intel

イントロダクション

研究開発動向（欧米、日本）

デバイス技術の進展
（III-V、CMOS、真空管素子、他）

周波数分配、干渉、他
（ITU-R: 国際電気通信連合 無線通信部門）

テラヘルツ無線通信導入シナリオ
（IEEE802.15 IGTHzでの議論）

電力標準、周波数標準

まとめ

- ①周波数のひっ迫（6GHz以下の周波数帯が混雑）
 - 60GHz帯の有効活用（最大9GHz幅の周波数を免許不要→マルチGbit/sを実現）
 - 60GHz帯無線通信方式(Wireless HD, WiGig, IEEE 802.11ad)が出揃う

- ②政府主導のミリ波/THz政策
 - ミリ波：列車無線@ 40GHz、
超高精細映像の無線伝送@ 120GHz、
P2P無線@80GHz、衛星通信@20GHz帯など
 - THz波：非破壊検査、バイオ・メディカル

- ③途上国でのインターネットの利用人口の爆発的増加・ネット環境整備、EU等におけるスマートフォン普及によるモバイルバックホール需要の高まり
 - 18-44GHz帯のP2P無線量産

- ④宇宙・防衛予算の堅調な伸び
 - レーダ
 - CBN(Chemical, Bio, Nuclear)のリモートセンシング
 - 20-40GHzの衛星通信

主催: IEEE MTT-S、日程: 17-22 JUNE 2012、場所: MONTRÉAL, QUÉBEC, CANADA

THz技術に関しては、Plenary、パネル討論、Workshop の他、セッションも多数。大変盛んであり特に今回から力を入れ始めた。

- 1) Plenary Talk (RFID) **Terahertz Electronics: The Last Frontier**,
Thomas H. Lee (Director of the Microsystems Technology Office at DARPA)
- 2) Workshop:
WFC Emerging Technology of Terahertz Imaging Systems, Devices, and Algorithms
- 3) Panel Session: **THz Integrated Circuits**:
Do Future Markets Support Highly Integrated Silicon-Based IC Development?
- 4) Focus Session TU4D: Terahertz Imaging
- 5) Focus Session WE3F: Advances in Silicon-based Millimeter-wave and **Terahertz Integrated Circuits** and Systems
- 6) Technical Session WE4A: **Terahertz Communication Technology**
- 7) Technical Session TH1F: Biomedical Imaging (乳ガンのTHz イメージングなど)
- 8) Technical Session RMO3D: Terahertz Technology

会場で米国のTHzデバイスへの取り組みが紹介され(会議のプログラムには記載無)、今後5年以上かけて、アメリカがDARPA, Air Force, NSF の予算を大規模に投資してTHzデバイス開発を行うとのこと。THzの定義はサブミリ波(300GHz超)で、ミリ波とは明確に区別するとのこと。Plenary Talk によるとDARPAデバイスの目標は1THzで10W 以上、アメリカの技術力をアピールするそうである。



WORKSHOP (2) Towards THz Communications Systems and Applications

Chairs: Peter Siegel, *Caltech, USA* and Karl Varian, *Raytheon, USA*

Speakers

Is THz a Communication Wasteland or a Vibrant Frontier?

Frank Chang, *University of California at Los Angeles, USA*

Enabling Technologies for THz communications: Electronics vs. Photonics

Tadao Nagatsuma, *Osaka University, Japan*

Opportunities for THz Communication Links in the Atmosphere

Dan Grischkowsky, *Oklahoma State University, USA*

Multi-Gigabit Transmission Based on All-active 200-280 GHz MMIC Chip Set

Ingmar Kallfass, *Fraunhofer Institute for Applied Solid State Physics, Freiburg, Germany*

SiGe and CMOS Integration for >100 GHz Applications

Gabriel Rebeiz, *University of California at San Diego, USA*

Silicon RF front end components for THz/sub-THz communication systems

Ullrich Pfeiffer and Neelanjan Sarmah, *University of Wuppertal, Germany*



DARPA

http://www.darpa.mil/Our_Work/MTO/Programs/THz_Electronics.aspx

THz Electronics

The objective of the Terahertz (THz) Electronics program is to develop the critical device and integration technologies necessary to realize compact, high-performance electronic circuits that operate at **center frequencies exceeding 1.0 THz**. The program will focus on the developments of two critical THz technical areas.

Terahertz Transistor Electronics. The program will aggressively **develop multi-THz InP HBT and InP HEMT transistor technologies to enable TMICs**. In addition, THz low-loss inter-element interconnect and integration technologies will also be developed to build compact THz transmitter and receiver modules.

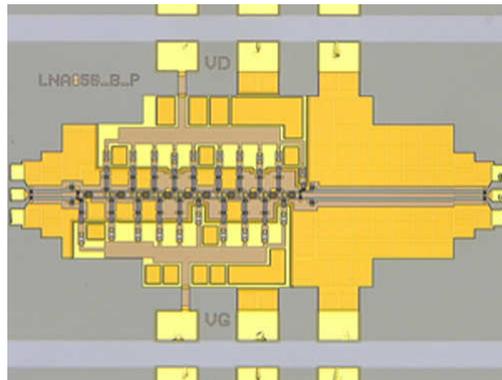
Terahertz High Power Amplifier Modules. **Compact, micromachined vacuum electronics devices** will be developed to produce a **significant increase of output power at frequencies beyond 1.0 THz** and to radiate this energy at an antenna.

The success of the THz Electronics program will lead to revolutionary applications by enabling coherent THz processing techniques such as **THz imaging systems, sub-MMW, ultra-wideband, ultra-high-capacity communication links and sub-MMW, single-chip widely-tunable synthesizers for explosive detection spectroscopy**.



DARPA's Video Synthetic Aperture Radar (ViSAR) program seeks to develop and demonstrate an Extremely High Frequency (EHF) targeting sensor which operates through clouds as effectively as today's infrared (IR) sensors operate in clear weather.

<http://www.darpa.mil/NewsEvents/Releases/2012/05/01.aspx>



DARPA researchers have created the world's first solid state receiver to demonstrate gain at 0.85 terahertz (THz). This is the latest breakthrough in the DARPA [THz Electronics program](#) in its quest for transistor-based electronics that will enable electronic capabilities at THz frequencies. This represents progress toward the second major technical milestone on the way to 1.03 THz integrated circuits. Previous milestones included demonstrations at 0.67 THz. Operating at these high frequencies enables a host of DoD electronics capabilities such as advanced communication and sensor systems.

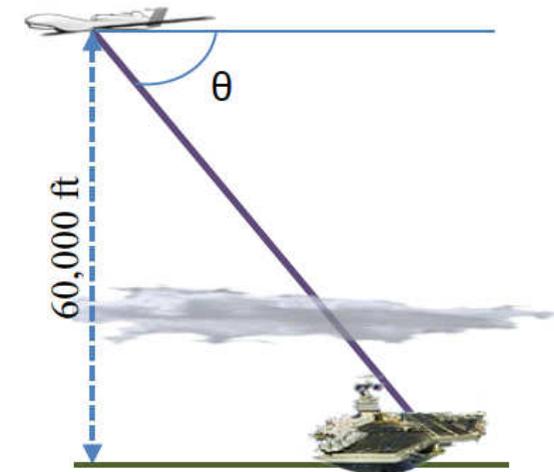
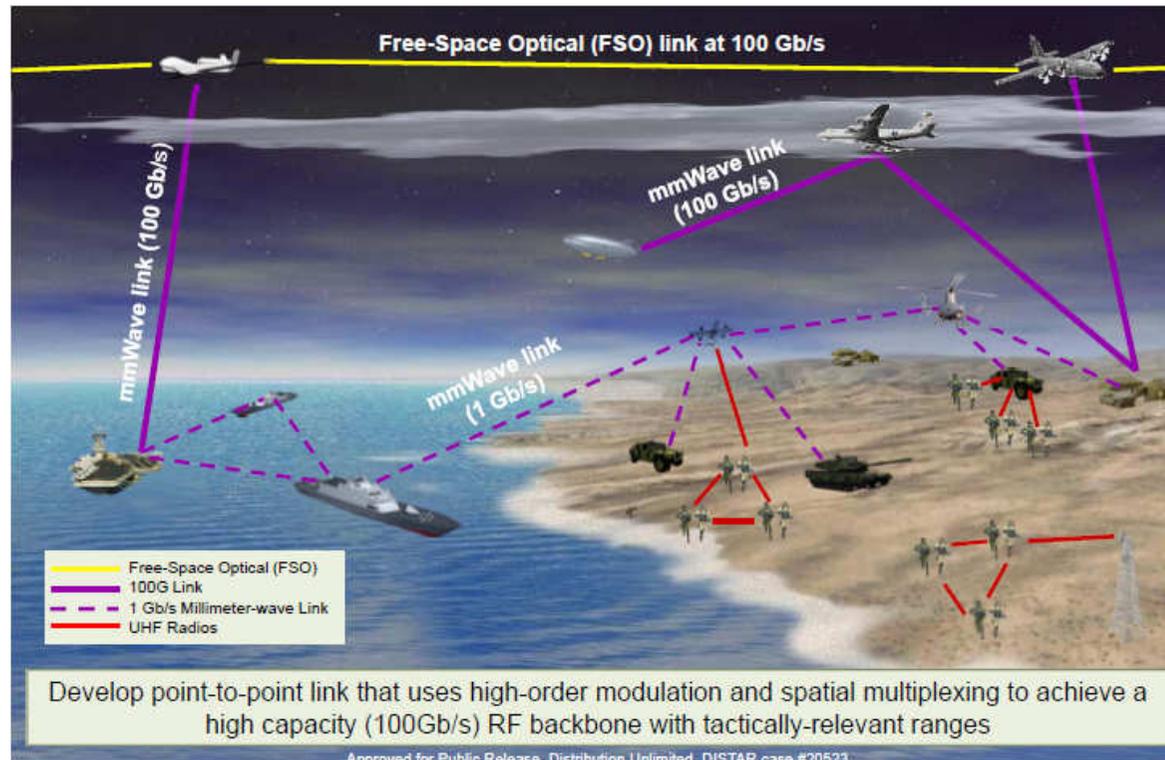
<http://www.darpa.mil/NewsEvents/Releases/2012/07/31.aspx>

【ArsTechnica, 2012/12/17】

無線通信技術は進化したが、その通信速度はまだ光ファイバを使う有線通信には遠く及ばない。とはいえ、戦場では随時光ファイバを敷設できるわけもないので、国防総省国防高等研究計画局 (DARPA) は、光ファイバ・バックボーンと同等、**100Gbps程度の通信速度を持つ無線バックボーン技術**を開発するプログラムを立ち上げ。この難問解決に挑む。

この**100Gbps無線バックボーン**は、戦場や航空機が利用可能で、**通信距離は200km**に及ぶことを想定しているが、この目標は航空機のセンサが収集する膨大なデータ量を基に設定されたもの。これらのデータは、現在の無線通信では一部しか司令部に送信できないため、米軍は専用航空機AWACSでデータの処理・分析を行なっているが、AWACSの運用には多額の費用が必要。さらに、無人機の利用が増えることで、今後はさらにデータ量の増加が予想されるため、全てのデータをAWACSや遠く離れた地上司令部に送信するための新たな手段が必要とされている。

このため、データ収集に使う技術をデータリンクにも用いることが追求されており、高機能レーダー AESAをレーダー、データリンクの両方に利用するための技術開発も進められているが、DARPAは**超高周波 (EHF) 無線技術の進化でデータスループットがさらに飛躍的に増加すると期待している。**



Broad Agency Announcement, "100 Gb/s RF Backbone (100G)," DARPA-BAA-13-15, Jan. 2013. より

DARPA: 100 Gb/s RF Backbone (100G) Proposers' Day Briefing資料より抜粋

光ファイバ通信同等の地上・艦船～航空機間の超高速データ転送

快晴時: 自由空間通信(FSO)にてリンク可能

雨天・曇天時: ミリ波無線が必要

- 2013年1月～3月にプロポーザル×切
 - 2013年中盤よりプロジェクト開始
- 他DARPA関連無線プロジェクト
- MANETs(モバイルアドホックNW)

総計\$18.3M
(FY2013-2017)



AFOSR

community.apan.org/afosr/w/researchareas/7671.ghz-thz-electronics.aspx

GHz-THz Electronics

This program seeks scientific breakthroughs in solid-state materials and device that are vital for game-changing capabilities in sub-millimeter-wave radar, ultra-wideband communications, chemical/biological/nuclear remote sensing, and ultra-high-speed on-board and front-end data processing.



National Science Foundation
WHERE DISCOVERIES BEGIN

www.nsf.gov/funding/pgm_summ.jsp?pims_id=13381

CCSS: Communications, Circuits, and Sensing-Systems

CCSS also supports integration technologies at both intra-and inter-chip levels, new and advanced radio frequency (RF), millimeter wave and optical wireless and hybrid communications systems architectures, and sensing and imaging at terahertz (THz) frequencies.

3D Terahertz Synthetic Imaging and Reflection Spectroscopy

http://www.nsf.gov/awardsearch/showAward.do?AwardNumber=1231783&WT.z_pims_id=13381

Integrated CMOS terahertz spectroscopy of biomolecules

http://www.nsf.gov/awardsearch/showAward.do?AwardNumber=1202488&WT.z_pims_id=13381

Wireless Chip-to-Chip Communication: Terahertz Short Range

http://www.nsf.gov/awardsearch/showAward.do?AwardNumber=1201755&WT.z_pims_id=13381

EU FP-7 PROJECTS

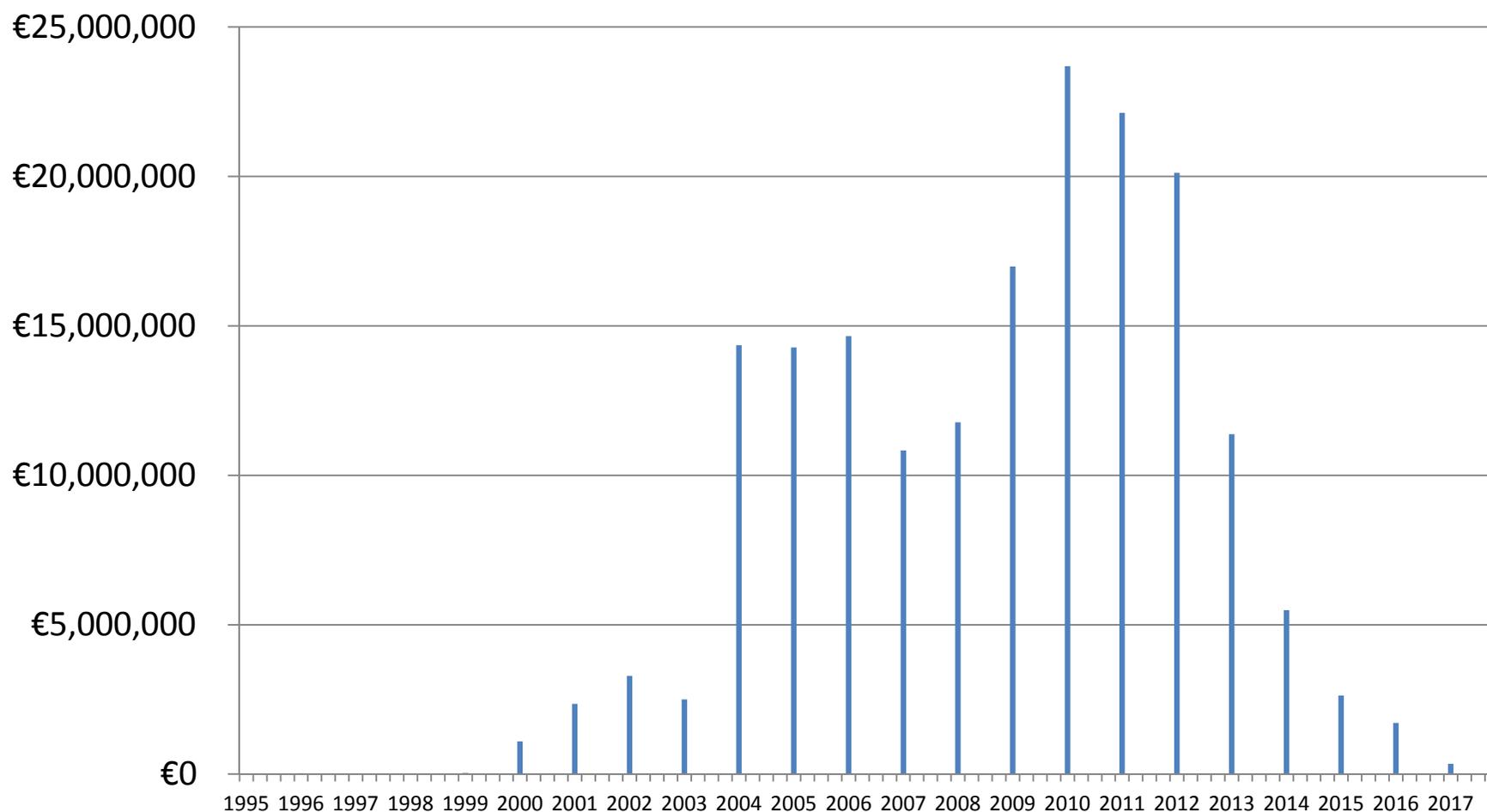
http://cordis.europa.eu/projects/home_en.html



TERATOP	Terahertz Photonic Imager on Chip	2011/10/1	2014/9/30	36	€ 3,154,060	€ 1,051,353
NINFA	Nanostructure Injected Lasers for Ultra-High Frequency Applications	2011/10/1	2014/9/30	36	€ 239,221	€ 79,740
AAATSI	Advanced Antenna Architecture for THz Sensing Instruments	2011/11/1	2016/10/31	60	€ 1,499,487	€ 299,897
THZ RADIATION	Controlling terahertz radiation using layered superconductors	2011/11/20	2013/11/19	24	€ 179,603	€ 89,802
COSIT	Compact High Brilliance Single Frequency Terahertz Source	2012/1/1	2013/12/31	24	€ 1,279,982	€ 639,991
MONTES	Molecular Networks with precision Terahertz Spectroscopy	2012/1/1	2016/12/31	60	€ 1,471,200	€ 294,240
TERAGAN	GaN Quantum Devices for T-Ray Sources	2012/1/1	2016/12/31	60	€ 1,627,236	€ 325,447
PERTPROTONDYN	Aqueous Proton Mobility near Ions and in Nano-Confined Geometries	2012/3/1	2014/2/28	24	€ 191,675	€ 95,838
POLATER	Polaritonic TeraHertz Devices	2012/3/1	2015/6/30	40	€ 374,300	€ 112,290
TERA	Novel Compact Terahertz source based on Dual Wavelength Lasers and Photomixers	2012/3/1	2016/2/29	48	€ 1,104,208	€ 276,052
ULTRAPHASE	Ultrafast Quantum Physics in Amplitude and Phase	2012/4/1	2017/3/31	60	€ 2,490,000	€ 498,000
TERACOMB	Quantum Cascade Lasers Based TERAhertz Frequency COMB	2012/6/1	2015/5/31	36	€ 2,867,584	€ 955,861



http://cordis.europa.eu/projects/home_en.html





- European commission Framework Program 6/7の一環
- IPHOBAC (2006-2009): 11M€
- IPHOS(2010-2013): 4.48M€ [IPHOBAC後継]

- 光技術を用いた60GHz無線(IPHOBAC)、およびミリ波(70GHz~)無線(IPHOS)のプロジェクト
- 光ファイバによる低損失信号伝送
- 広帯域光・電気信号変換による光・無線直接変換

- 目的
- 非圧縮ハイビジョン伝送
- ミリ波アクセス(航空機等へのメディア伝送)



<http://www.iphos-project.eu/> より

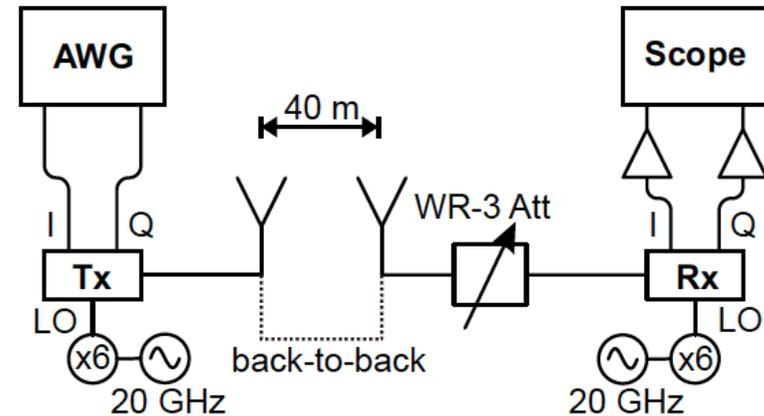
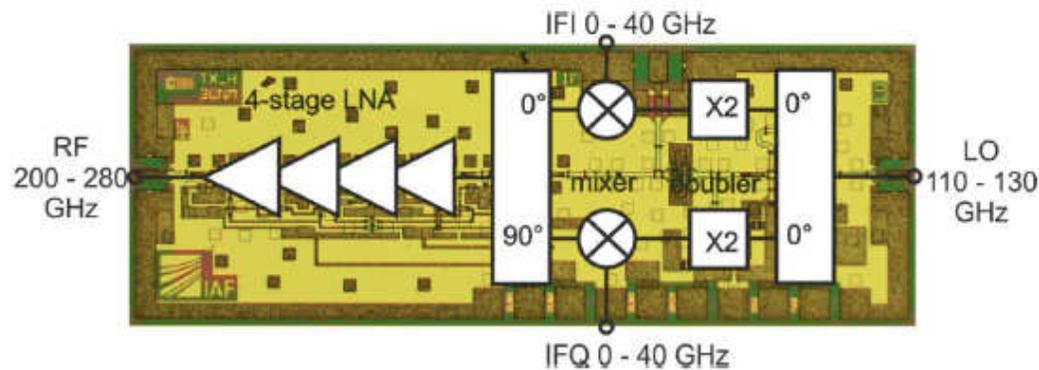


- ドイツ連邦教育研究省(BMBF)による「Next-generation broadband access networks」委託研究の一環
- 総計2M€～2.4億円（2008年3月～2013年2月）
- 参画
 - Fraunhofer IAF
 - Karlsruher Institute of Technology
- パートナー
 - Siemens AG
 - Kathrein KG
 - Radiometer Physics GmbH
- 220～280GHzミリ波を用いた超高速無線伝送技術の開発



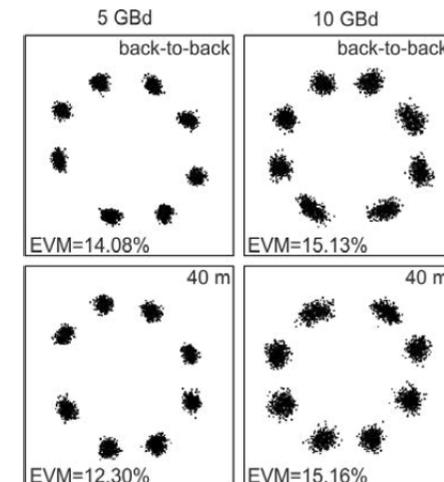
KIT Press Release 062/2013より

研究機関: フ라운ホーファー研究機構(IAF)、カールスルーエ工科大(KIT)

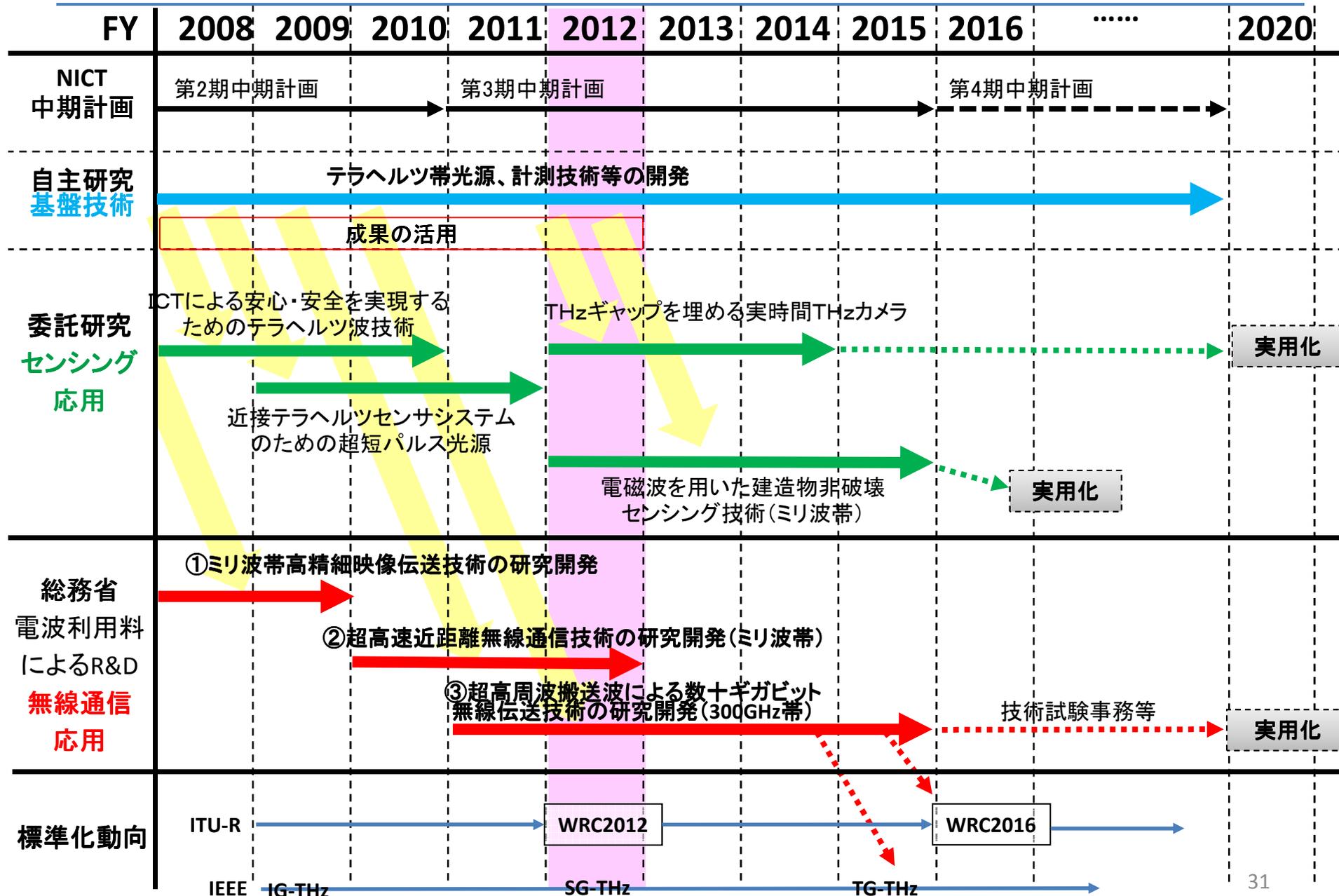


"Transmission of an 8-PSK Modulated 30 Gbit/s Signal Using an MMIC-Based 240 GHz Wireless Link," IEEE MTT-S IMS 2013. より

- InP MMICによるTx、Rx試作・伝送実験
- 集積IQ変調器・復調器 (IF帯域 20GHz)
- 多値変調にも対応
- 10Gbaud 8PSK (30Gb/s相当)の伝送実証



総務省・NICTにおける超高周波技術の研究開発推進体制



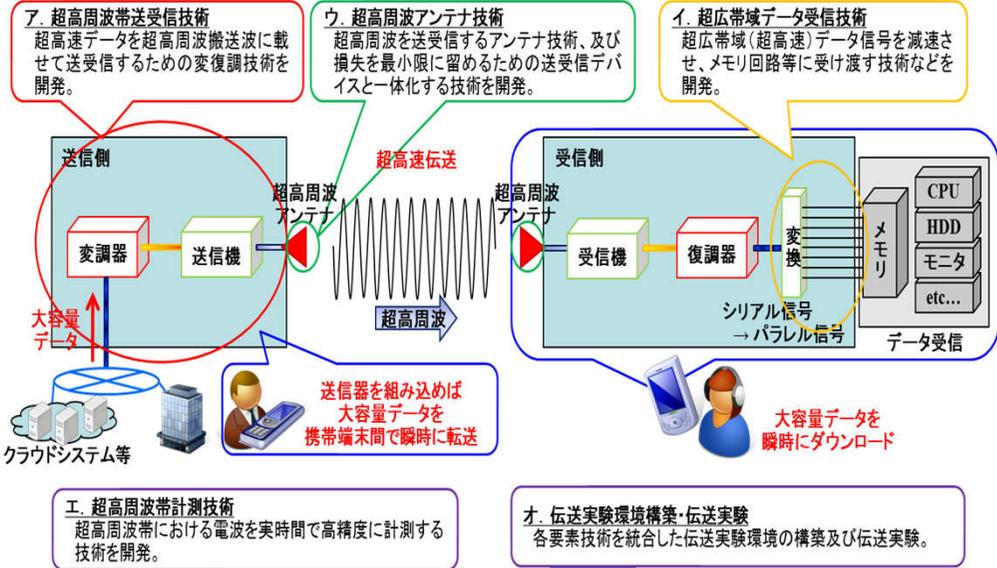
超高周波搬送波による数十ギガビット無線伝送技術の研究開発(総務省)



世界的に周波数分配が行われていない275~370GHzのテラヘルツ帯を用いて、毎秒数十ギガビット(数十Gbps)級の超高速伝送を可能とする無線通信基盤技術を確立する。本技術により新たな電波資源を開拓することで、既存業務を高い周波数への移行させる等周波数の有効利用を促進する。

情報伝送需要の急増や電波利用の拡大により、既存の無線通信に割り当てられている周波数帯では急速に伝送容量が逼迫することが予想されており、**ネットワークの高速化と通信容量を確保することは喫緊の課題**

275~370GHzの超高周波搬送波を用いて、1m程度の距離をミリ波帯より10倍程度高速な20~40Gbpsで伝送する無線通信システムを実現するための基盤技術を確立し、システム試作を実施する。本技術により新たな電波資源を開拓することで、**ネットワークの高速化を実現するとともに既存業務を高い周波数への移行させる等周波数の有効利用を促進し、国際標準化を通じて無線通信分野における我が国の国際競争力の強化を図る。**



目標	275~370GHzの超高周波搬送波を用いて、1m程度の距離を20~40Gbpsで伝送する無線通信システムを実現するための基盤技術を平成27年度までに確立し、平成32年度までに技術基準策定を目指す
対象周波数帯	275~370GHz帯
実施期間	平成23~27年度 (5カ年)



イントロダクション

研究開発動向（欧米、日本）

デバイス技術の進展
（III-V、CMOS、真空管素子、他）

周波数分配、干渉、他
（ITU-R: 国際電気通信連合 無線通信部門）

テラヘルツ無線通信導入シナリオ
（IEEE802.15 IGTHzでの議論）

電力標準、周波数標準

まとめ

670 GHz動作10段低雑音増幅器(LNA)

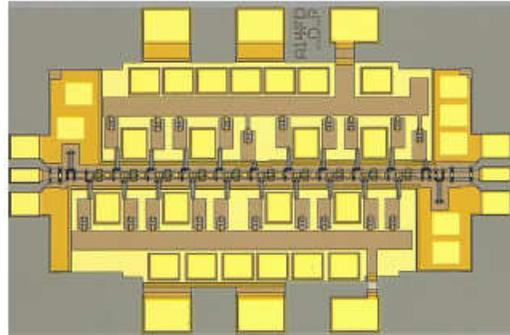


Fig. 3 Microphotograph of 10-Stage 670 GHz low noise amplifier.

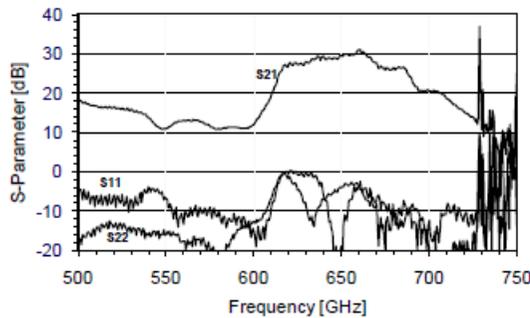


Fig. 4 Measured on-wafer S-Parameters of 10-stage LNA.

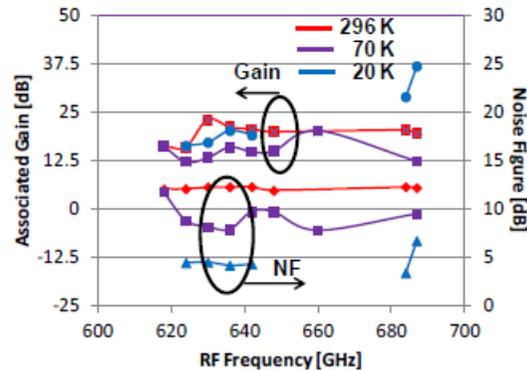


Fig. 5 Measured noise performance as a function of temperature for packaged low noise amplifier

650 GHz動作高出力増幅器(PA)

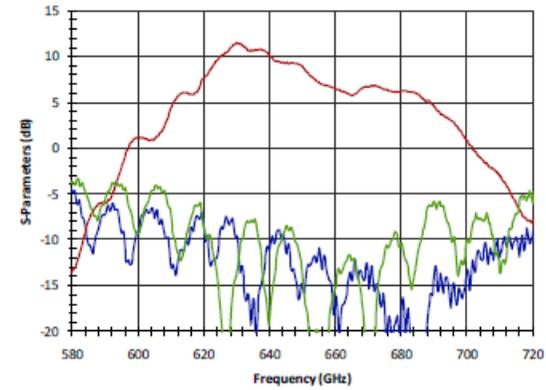


Fig. 7 Measured S-Parameters of PA module

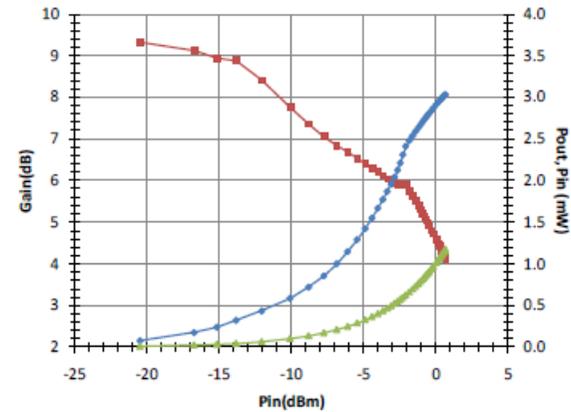


Fig. 3 Measured power and power gain of amplifier module at 650 GHz.

620 GHz受信器

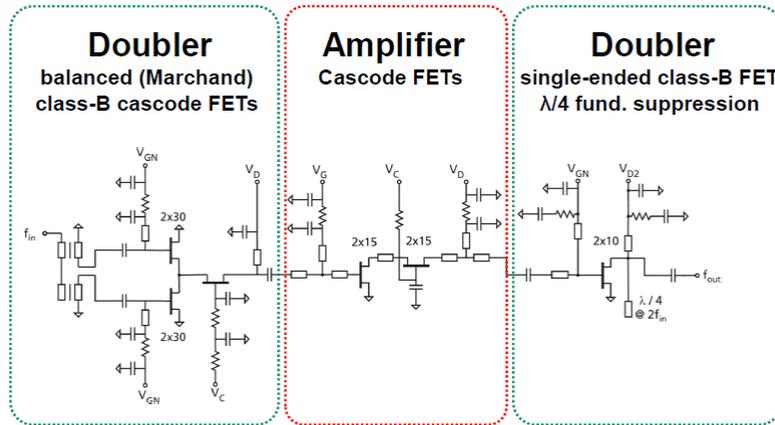


Fig. 4 Microphotograph of integrated receiver chip. RF input is to the dipole on left to electromagnetically couple to the integrated circuit.

July 2012

doc.: IEEE 802.15 DCN 15-12-0323-00-0thz

480 GHz Frequency Quadrupler



Submission

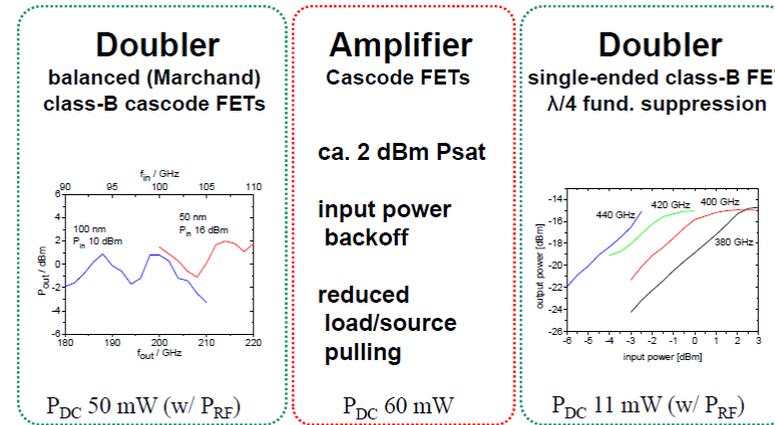
Slide 20

Ingmar Kallfass, Fraunhofer IAF

July 2012

doc.: IEEE 802.15 DCN 15-12-0323-00-0thz

480 GHz Frequency Quadrupler



Submission

Slide 21

Ingmar Kallfass, Fraunhofer IAF

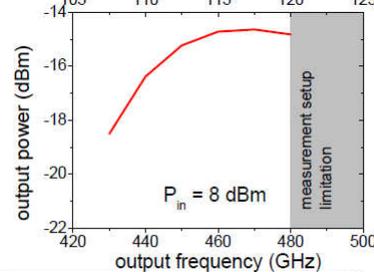
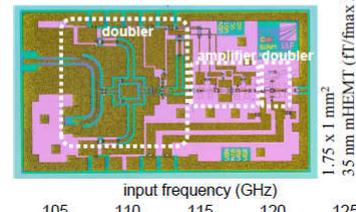
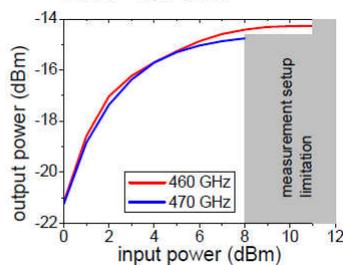
July 2012

doc.: IEEE 802.15 DCN 15-12-0323-00-0thz

480 GHz Frequency Quadrupler

Output power:
-14.3 dBm

Bandwidth:
>45 GHz
435...>480 GHz



Submission

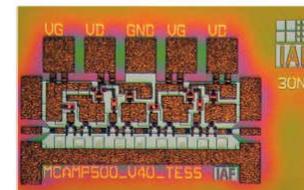
Slide 22

Ingmar Kallfass, Fraunhofer IAF

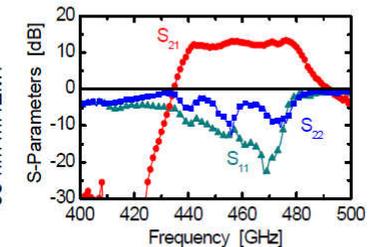
July 2012

doc.: IEEE 802.15 DCN 15-12-0323-00-0thz

Four-Stage 480 GHz Amplifier S-MMIC



0.61 x 0.37 mm²
35 nm mHEMT



- reactively matched common source stages
- gate width: 2 x 5 μm

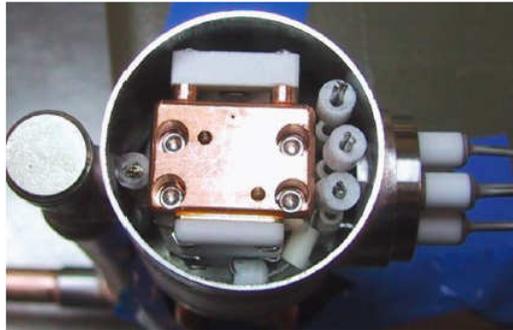
- 13.4 dB @ 476 GHz
- >10.5 dB @ 440...481 GHz
- 32 mW (Vd = 1.2 V, Id = 27 mA)
- simulated NF = 9.9 dB @ 480 GHz

Submission

Slide 23

Ingmar Kallfass, Fraunhofer IAF

- 後進波発振器(BWO)、進行波管増幅器(TWTA)など



Top view of 650GHz BWO:
[CalCreek] R. Lawrence Ives et al., IEEE TST 4, 230 (2011).

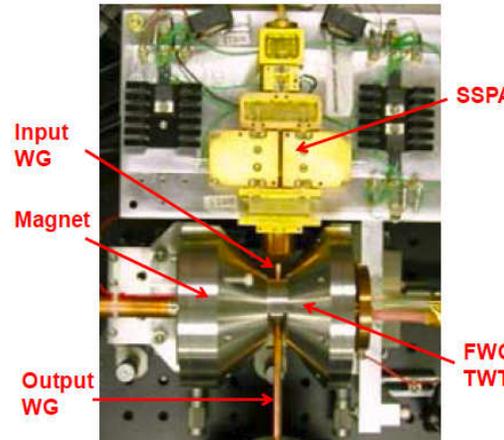
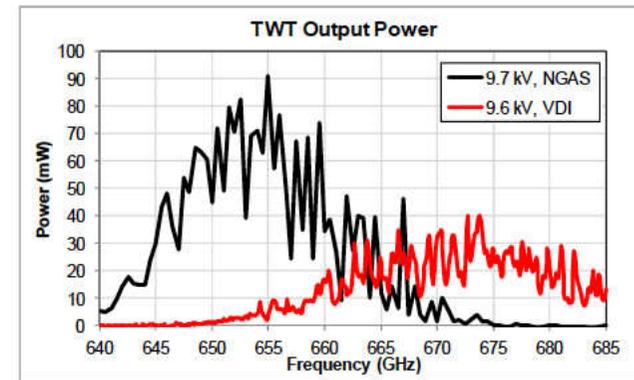
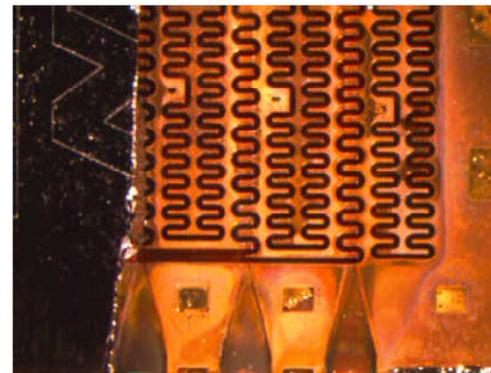
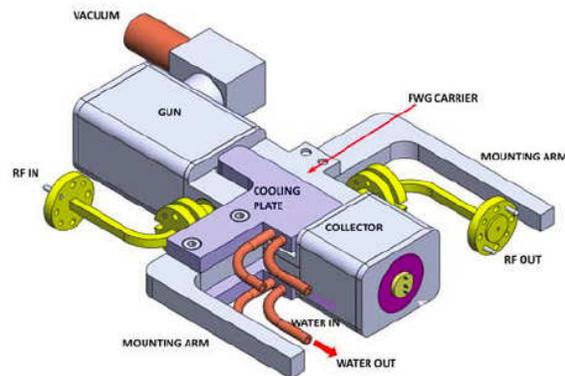


Figure 1. THz Power Module breadboard test.



670GHz 100mW Oscillator based on VE-PA and SS-PA: [NGC] J. C. Tucek et al., IVEC2012, 31 (2012).



220 GHz TWT amplifier with output **>30 W**: [NGC] J. C. Tucek et al., IVEC2012, 553 (2012)



XII IEEE International Vacuum Electronics Conference

IVEC-2011, February 21 - 24, 2011

JN Tata Auditorium, National Science Seminar Complex, IISc Campus, C V Raman Avenue
Bangalore, India

Hosted by Microwave Tube Research & Development Centre (MTRDC), Bangalore, India



Plenary Talk: Dr. John Booske (Univ. Wisconsin-Madison, USA)
"Vacuum Electronics Sources for High Power Terahertz-Regime Radiation"

Programs in USA

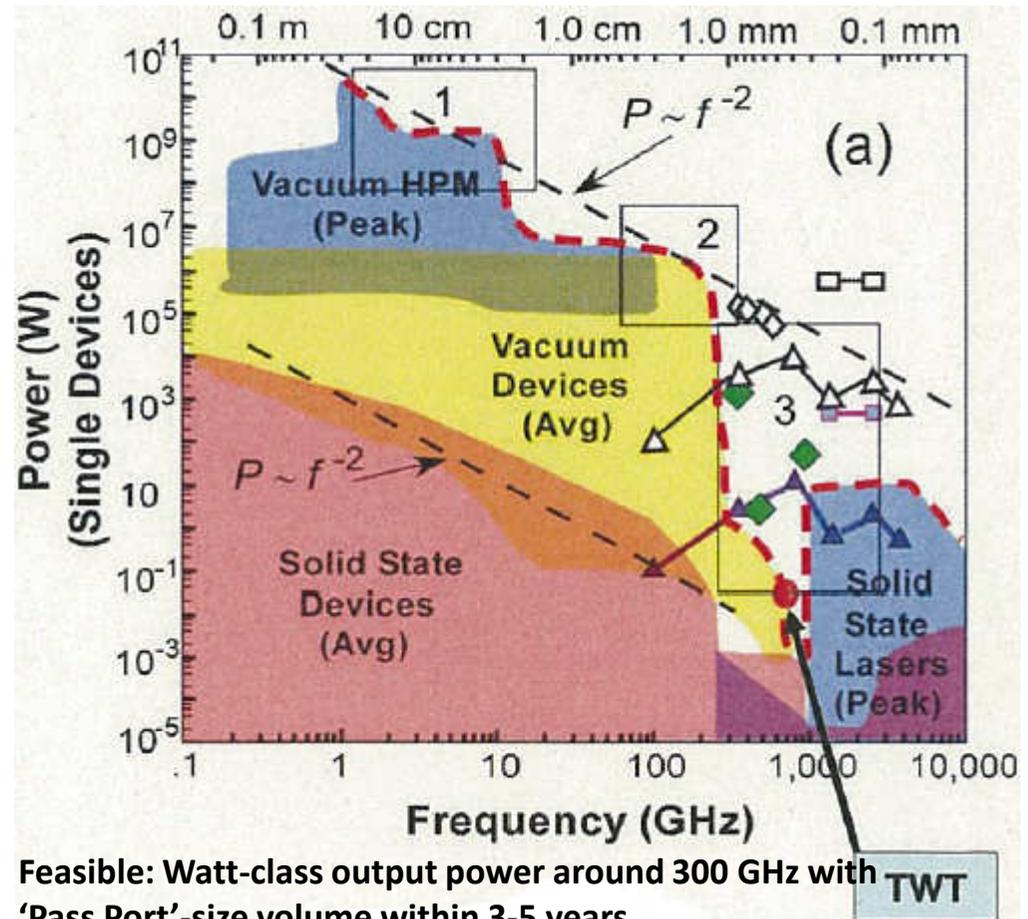
+ Darpa: HiFIVE (EIK, BWO, TWT, Gyrotron, FEL)

Elemental Technologies

+ MEMS
X-ray LIGA, UV-LIGA, DRIE, EDM, Laser Ablation
+ High Current Density Cathode
Dispenser, Reservoir, CNT, Spindt FEA,

Contributed talks

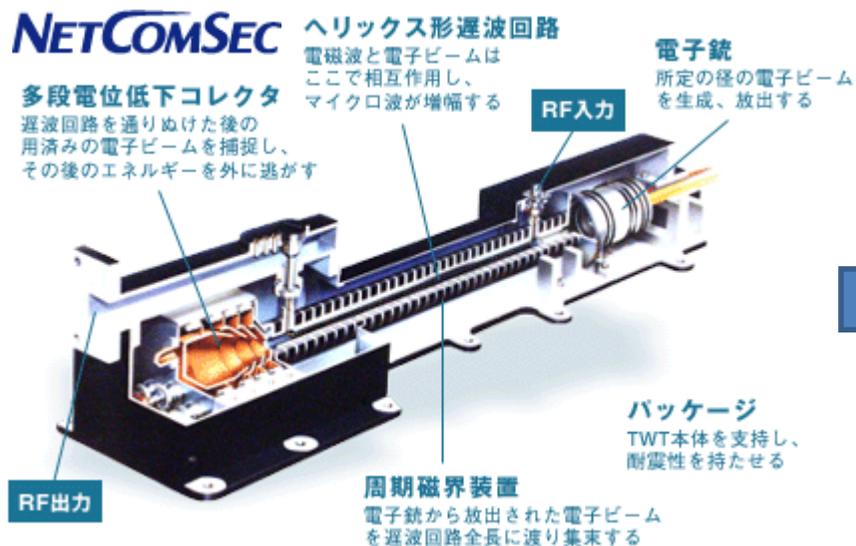
- TWT AMP @220 GHz (NRL, USA)
- TWT AMP @220 GHz (UCD, USA)
- BWO @700 GHz(Istok, Russia)
- THz AMP@0.3-2THz (FP7 OPTHER)
(Gain 10-20dB, Output: 10dBm)



Feasible: Watt-class output power around 300 GHz with 'Pass Port'-size volume within 3-5 years

->>> Good for WLAN application!

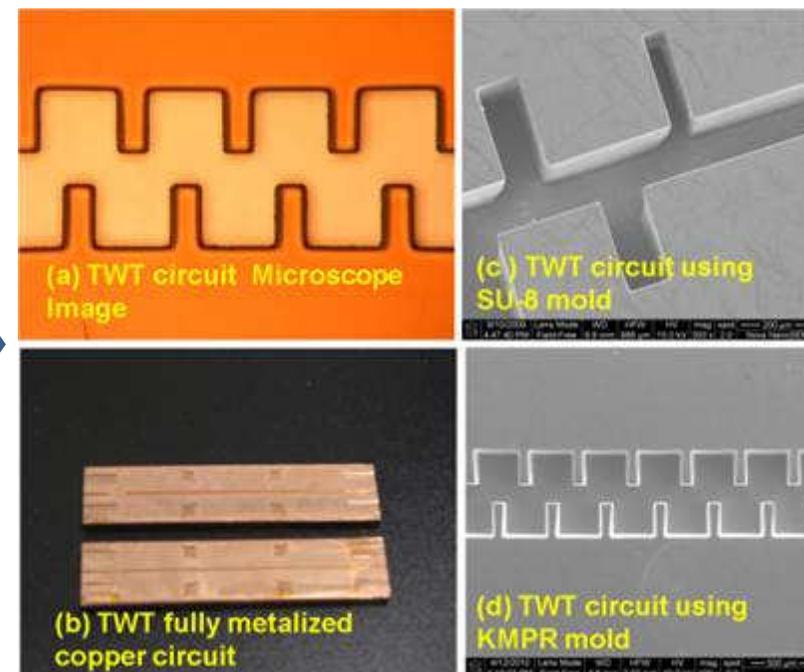
電子管(進行波管)の高周波化: マイクロマシン技術の適用



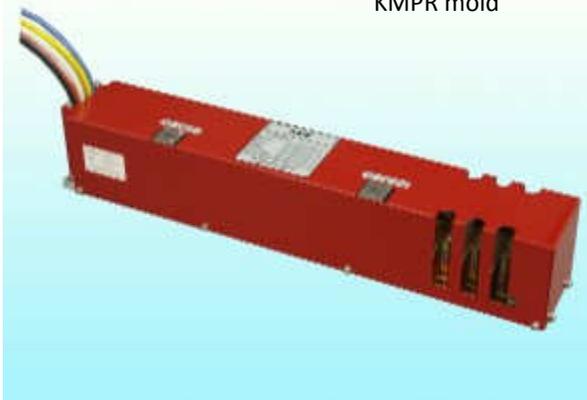
<http://www.netcomsec.co.jp/product/twt/index.html>

周波数範囲	27.5-30.0GHz	
定格出力	120W/150W/175W	
利得	52dB	
AM-PM 変換係数 (定格出力時)	5degrees/dB	
3次混変調 (2波合成出力15W時)	-30dBc	
効率	40%	
冷却方法	伝導冷却	
電子ビーム集束方法	周期磁界	
RF 結合部	入力側	導波管
	出力側	導波管
重量	3.5kg	
寸法	400X70X70mm	

<http://www.netcomsec.co.jp/product/twt/ld7280.html>



UCD LIGA fabricated 220 GHz TWTA circuit in a single layer ~ 400 μm process (a) Microscope image (b) Fully metalized copper circuit (c) TWT circuit using SU-8 mold (d) TWT metalized circuit using KMPR mold
<http://tempest.das.ucdavis.edu/vacuum/>



Si-CMOSの遮断周波数上昇予測(ITRS2012より)

	2012	2013	2015	2018	2021
プロセスルール	32nm	27nm	21nm	15nm	10.6nm
平面バルク	396 GHz	445 GHz	578 GHz		
UTB FD		447 GHz	614 GHz	889 GHz	
マルチゲート			620 GHz	890 GHz	1281GHz

ISSCC 2013 Trendsより

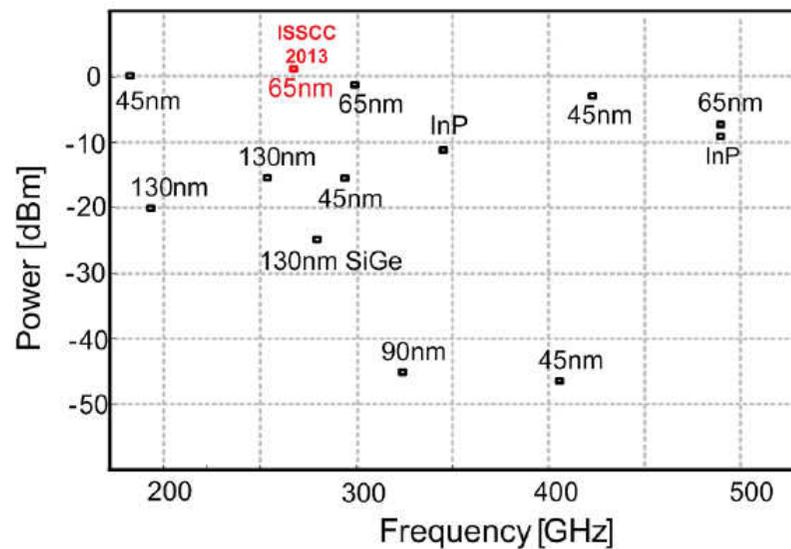
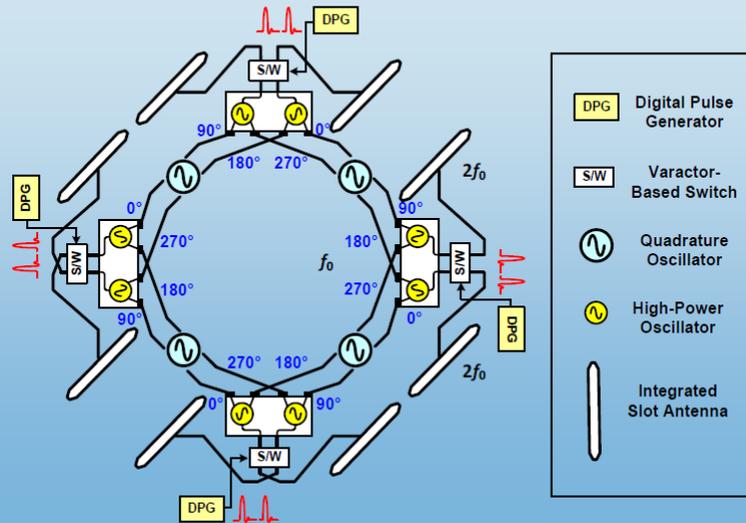


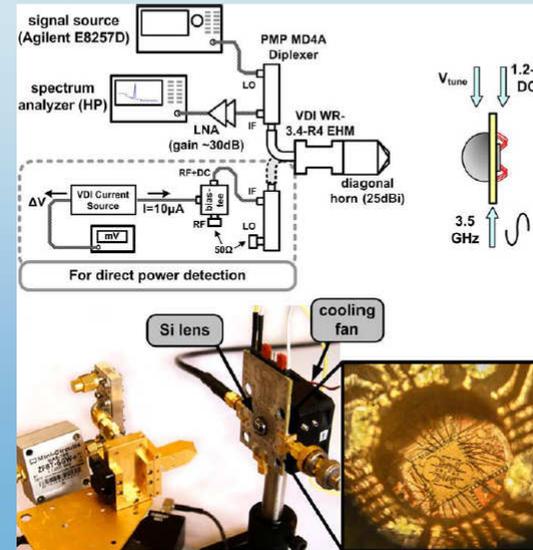
Figure 2: Output power versus frequency for mm-wave and sub-mm-wave sources.

2020年には300GHzのCMOSチップが出荷される可能性も！

260-GHz Broadband Array

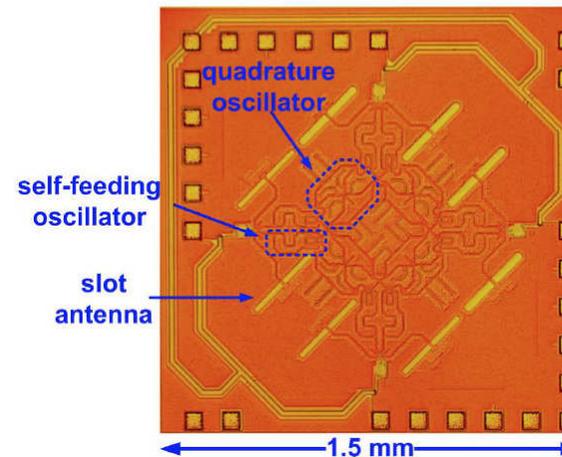
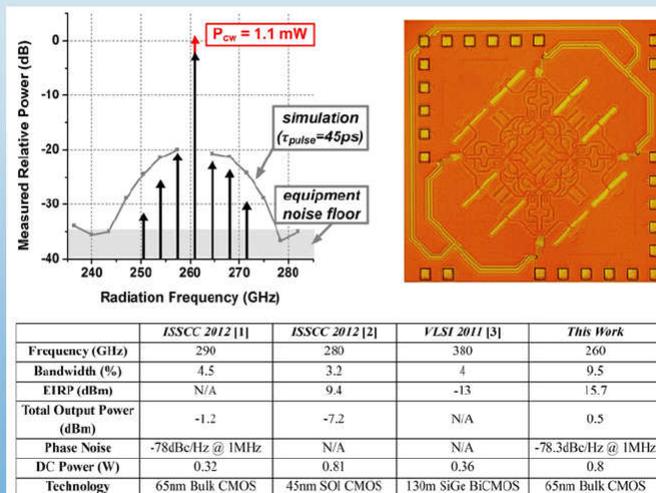


260-GHz Broadband Array

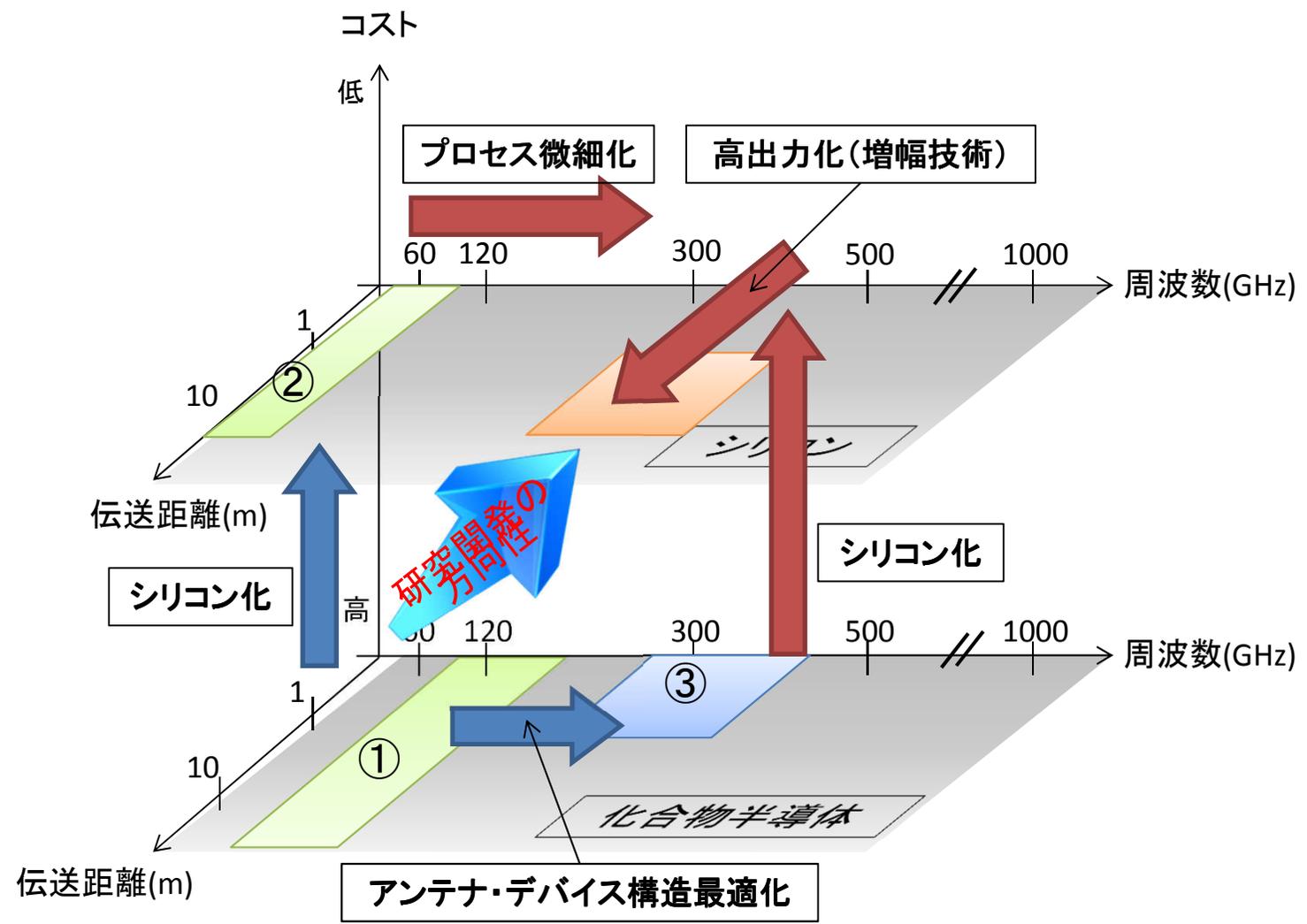


65-nm CMOS 260GHz 0.5mW source

260-GHz Broadband Array



[Cornel Univ.] ISSCC2013, paper 8.2



- ①ミリ波帯高精細映像伝送技術の研究開発(H18~H21) ミリ波帯)
- ②超高速近距離無線通信技術の研究開発(H22~H24) ミリ波帯)
- ③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(H23~H27) 300GHz帯)

Design and Fabrication of Double-Layer Waveguide Slot Array Antennas using Diffusion Bonding of Laminated Thin Plate for 350 GHz-band



Microwave Conference Proceedings (APMC), 2011 Asia-Pacific

東京工業大学, 大阪大学

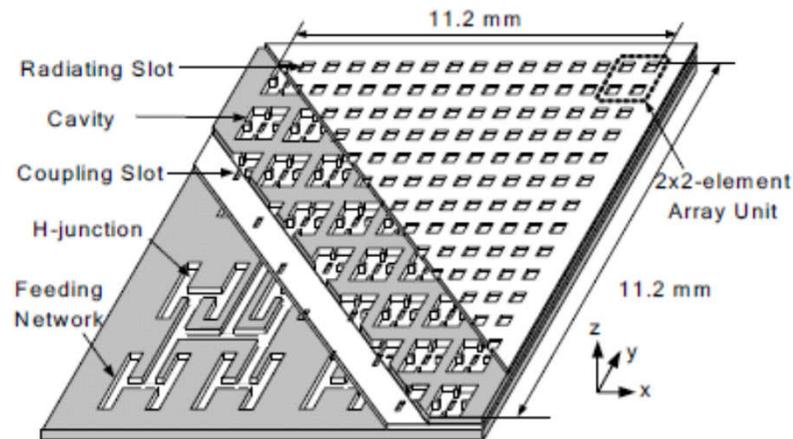


Fig. 1 Antenna Configuration

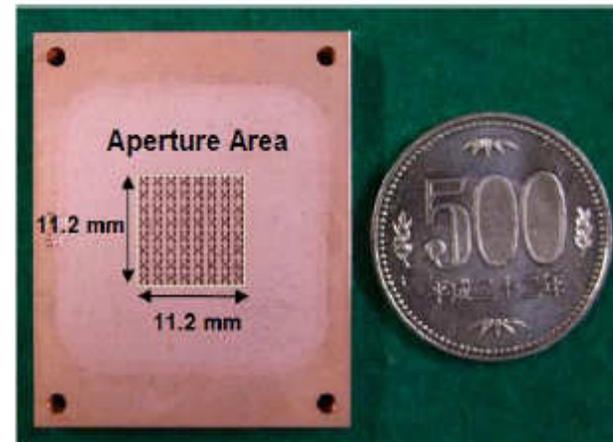


Fig. 3 Picture of the Fabricated Antenna

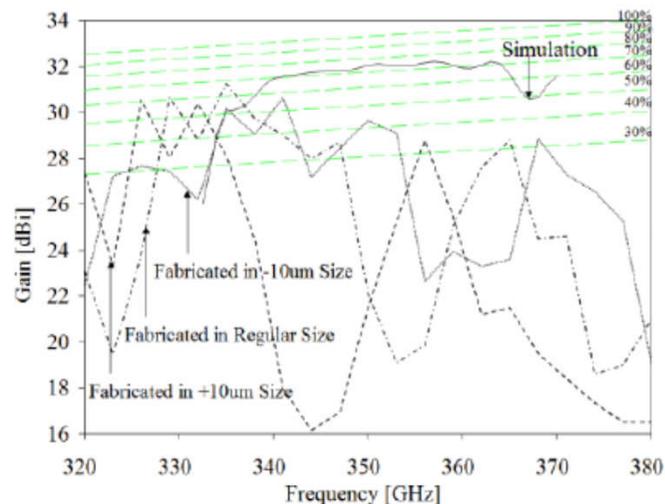


Fig. 4 Gain and Efficiency of Antenna

Antenna efficiency:
 Simulation: 70% (340-365GHz)
 Experiment: 50% (330GHz)

July 2012

doc.: IEEE 802.15-15-12-0351-00-0thz

IEEE P1785.1™/D3

Table 1—Waveguide sizes and frequency ranges

Name	Width (μm)	Height (μm)	Cut-off frequency (GHz)	Suggested minimum frequency (GHz)	Suggested maximum frequency (GHz)
WM-2540	2540	1270	59.014	75	110
WM-2032	2032	1016	73.768	90	140
WM-1651	1651	825.5	90.791	110	170
WM-1295	1295	647.5	115.75	140	220
WM-1092	1092	546	137.27	170	260
WM-864	864	432	173.49	220	330
WM-710	710	355	211.12	260	400
WM-570	570	285	262.98	330	500
WM-470	470	235	318.93	400	600
WM-380	380	190	394.46	500	750
WM-310	310	155	483.54	600	900
WM-250	250	125	599.58	750	1100

Submission

Slide 31

J.L. Hesler, Virginia Diodes

July 2012

doc.: IEEE 802.15-15-12-0351-00-0thz

Part 2: IEEE P1785.2

- P1785.2: Define one or more THz waveguide interfaces for use in the standard
- Key Design Criteria
 - Backward compatibility with existing interfaces and waveguides
 - Ease of machining.
 - Asexual, to avoid the need for male and female flanges.
 - Anticocking
 - Repeatable operation to >1 THz with low reflection

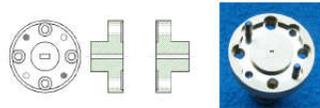
July 2012

doc.: IEEE 802.15-15-12-0351-00-0thz

Candidate THz Waveguide Interfaces - Examples

Hesler et al. modified UG-387 type

- Anti-cocking version of UG-387 with tighter tolerances
- Used for ALMA project, VDI Components



Hesler et al. Proc. ISSIT, 2007.

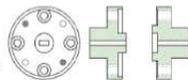
Modified UG-387 with Inner Dowels

- Commonly used in industry



Lau & Denning boss and socket interface

- Potentially has the most precise alignment
- Sexed interfaces
- New unpublished variant is stated to be compatible with UG-387 (no RF testing)



Lau et al, 69th ARFTG, 2007.

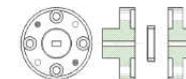
July 2012

doc.: IEEE 802.15-15-12-0351-00-0thz

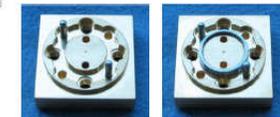
Candidate THz Waveguide Interfaces

Kerr et al. Ring-Centered Interface

- Compatible with UG-387



Kerr, Proc. ISSIT, 2009



Horibe et al. modified Oshima type

- Similar to ring flange, but alignment using outer ring



Horibe, 79th ARFTG, Montreal, 2012

イントロダクション

研究開発動向（欧米、日本）

デバイス技術の進展
（III-V、CMOS、真空管素子、他）

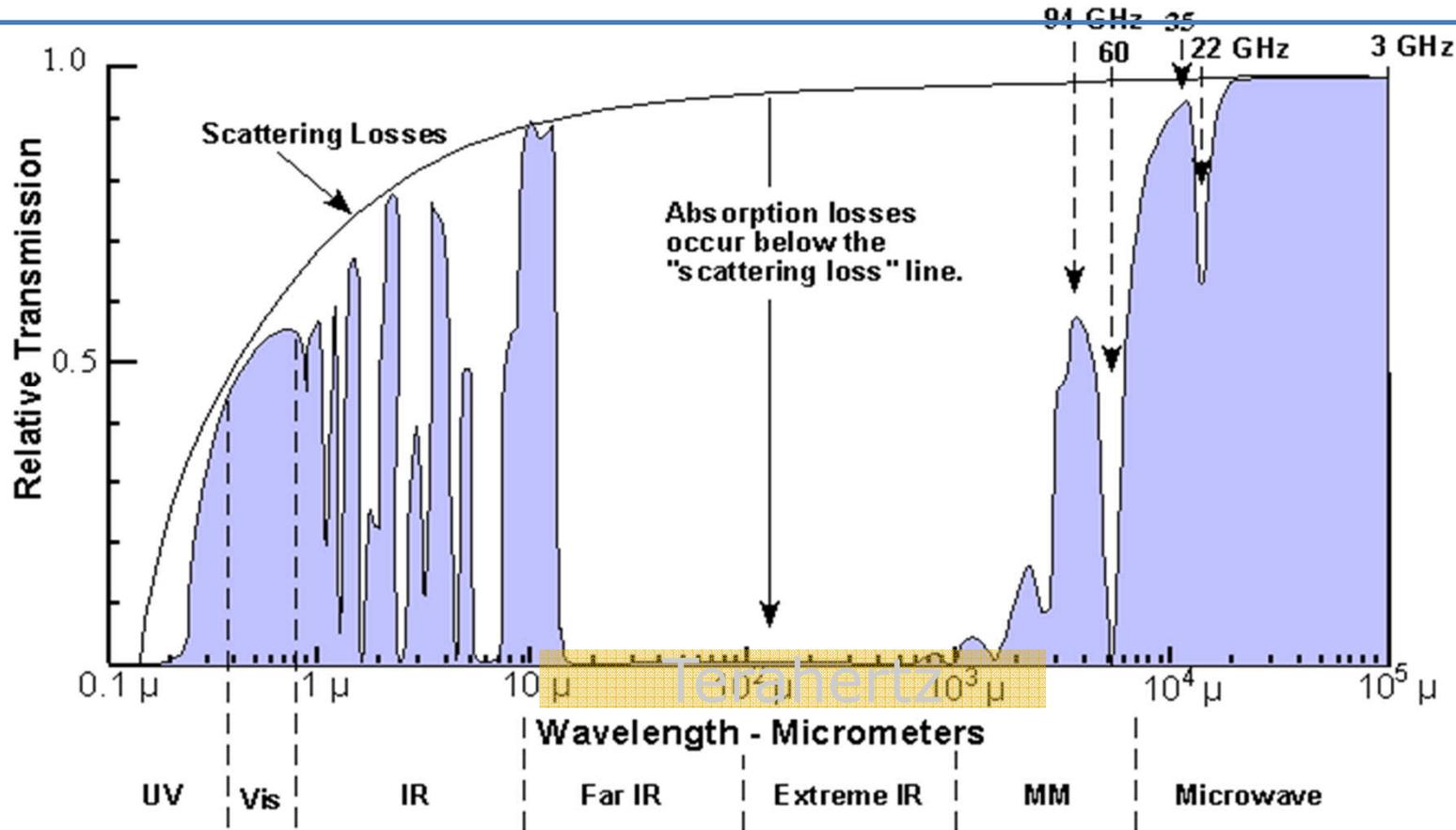
周波数分配、干渉、他
（ITU-R: 国際電気通信連合 無線通信部門）

テラヘルツ無線通信導入シナリオ
（IEEE802.15 IGTHzでの議論）

電力標準、周波数標準

まとめ

The Absorption Chasm Between The Optical And Radio Electromagnetic Spectra



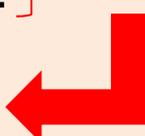
- ・短レンジ・見通し(～10m)、超小型(10mm 角以内)、超広帯域(～100Gbit/s)の超高速アクセス系無線を実現できる可能性
- ・テラヘルツ帯電磁波は従来の電波や光波と根本的に異なる性質をもち、伝搬損失が大気吸収で定まり、大気吸収が非常に大きい。
- ・干渉を回避し易く、広い帯域を使うことで簡単な変調方式でデバイスコストを下げられる利点がある。
- ・順次低い周波数帯から行ってきた研究開発とは根本的に異なるパラダイムシフトとして、従来周波数帯の技術確立を待たずに並行して研究開発取り組むべき周波数帯

テラヘルツ帯の考え方

- 短レンジ
 - 見通し動作
 - 超広帯域
- 干渉？
- 



電波法の考え方

- 長レンジ
 - 回り込み動作
 - 狭帯域
- 干渉！
- 

【問題点】

受動業務側の提案(従来の電波法の考え方)では、

帯域を細切れにされてしまい、
テラヘルツ帯の特徴を活かした能動業務が事実上実施できなくなる可能性がある。

【案】

大気吸収のため、観測業務と能動業務は、空間的にすみ分ける共用が可能。



World Radiocommunication Conference 2012
(WRC-12)
(Geneva, Switzerland, 23 January-17 February 2012)



5.565

275-1000GHz の周波数範囲のうち、以下の周波数帯は、受動業務のアプリケーションのために主管庁により使用が特定されている。

— 電波天文業務: 275-323GHz、327-371GHz、388-424GHz、426-442GHz、453-510GHz、623-711GHz、795-909GHz及び926-945GHz

— 地球探査衛星業務(受動)及び宇宙研究業務(受動): 275-286GHz、296-306GHz、313-356GHz、361-365GHz、369-392GHz、397-399GHz、409-411GHz、416-434GHz、439-467GHz、477-502GHz、523-527GHz、538-581GHz、611-630GHz、634-654GHz、657-692GHz、713-718GHz、729-733GHz、750-754GHz、771-776GHz、823-846GHz、850-854GHz、857-862GHz、866-882GHz、905-928GHz、951-956GHz、968-973GHz 及び985-990GHz

受動業務による275-1000GHz の周波数帯の使用は、能動業務によるこの周波数帯の使用を妨げてはならない。

275-1000GHz の周波数範囲を能動業務のために利用しようとする主管庁は、275-1000GHz の周波数範囲の分配表が規定される日まで、これらの受動業務を有害な混信から保護するため、実行可能な全ての措置を執ることを要請される。1000-3000GHz の周波数範囲における全ての周波数は、能動業務及び受動業務の双方に使用することができる。

改訂前: 275-1000GHz の周波数帯は、主管庁による様々な能動業務及び受動業務の実験及び開発に使用可能である。

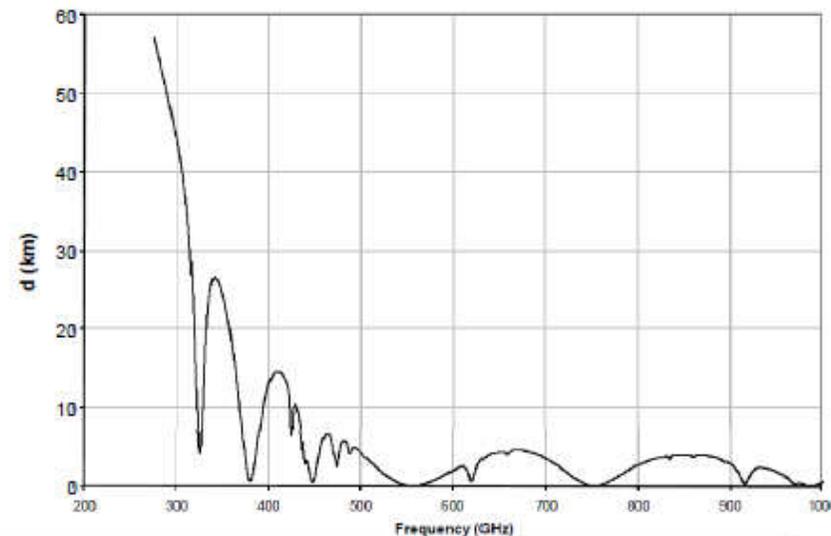
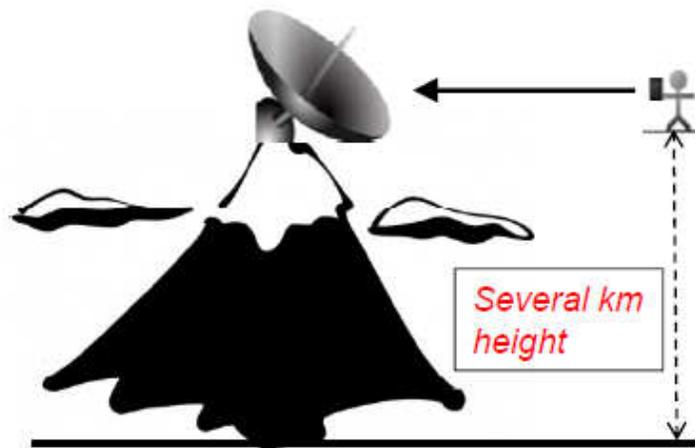
Spectrum available for active services without sharing with passive services



Frequency Bands	Total available Bandwidth	Maximum Attenuation within the Band at 10 m	Frequency Bands	Total available Bandwidth	Maximum Attenuation within the Band at 10 m
286-294 GHz*	8 GHz	101,8 dB	692-713 GHz	21 GHz/ 19 GHz	110,1 dB
307-313 GHz	6 GHz	102,4 dB	718-729 GHz	11 GHz	111,1 dB
356-361 GHz	5 GHz	103,7 dB	733-750 GHz	17 GHz	> 145 dB
366-369 GHz	3 GHz	103,9 dB	755-771 GHz	16 GHz	> 145 dB
392-397 GHz	5 GHz	104,5 dB	776-823 GHz	47 GHz/ 28 GHz	111,9 dB
399-409 GHz	10 GHz	104,8 dB	846-850 GHz	4 GHz	111,4 dB
411-416 GHz	5 GHz	104,9 dB	854-857 GHz	3 GHz	111,5 dB
434-439 GHz	5 GHz	105,8 dB	862-866 GHz	4 GHz	111,6 dB
467-477 GHz	10 GHz	106,5 dB	882-905 GHz	13 GHz	112,2 dB
502-523 GHz	21 GHz	107,7 dB	928-951 GHz	23 GHz	112,9 dB
527-538 GHz	11 GHz	109,9 dB	956-968 GHz	12 GHz	115,6 dB
581-611 GHz	30 GHz	110,0 dB	973-985 GHz	12 GHz	123,3 dB
629-634 GHz	5 GHz	108,9 dB	990-1000 GHz	10 GHz	141,8 dB

Interference with Radio Astronomy

- Studies available by the National Science Foundation
- Distance of THz transmitter from telescope for interference-free conditions in accordance with ITU protection criteria RA.769:
 - *Worst case*: TX pointed directly in direction of telescope at same altitude

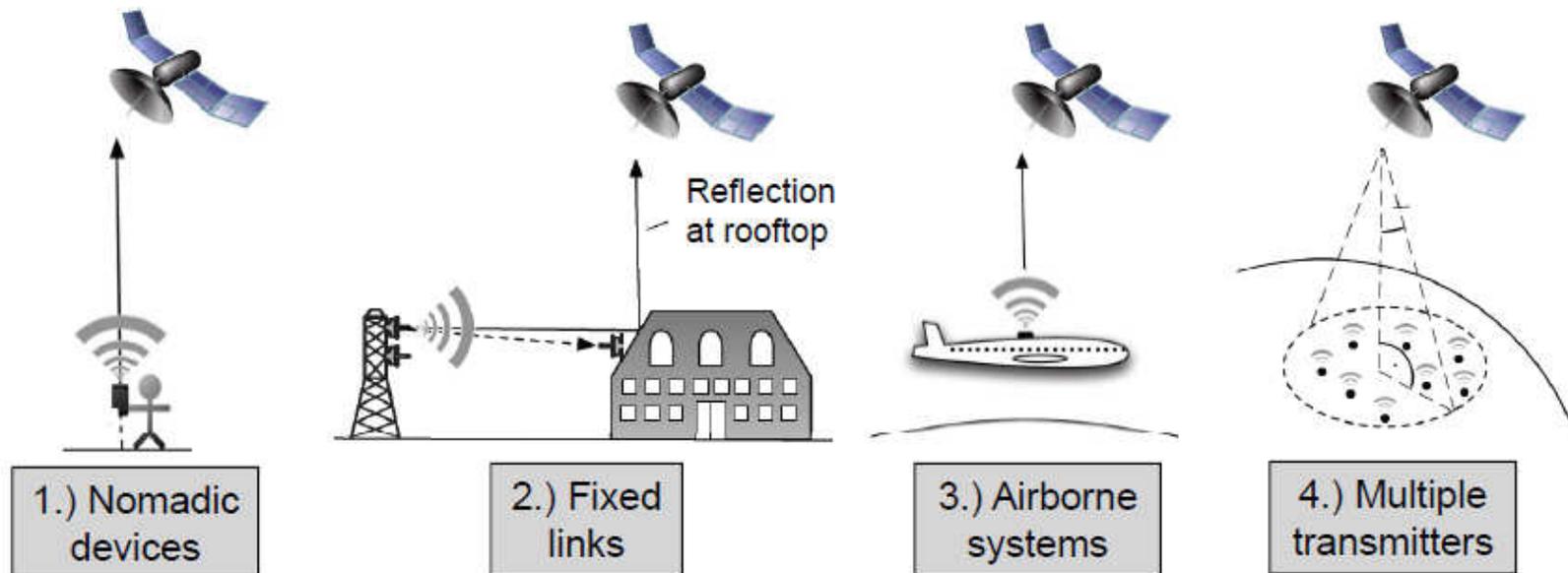


IEEE doc. 802.15-15-10-0829-00-0thz

→ **Interference in practice extremely unlikely** due high telescope locations on mountains

Interference with Earth Exploration (1)

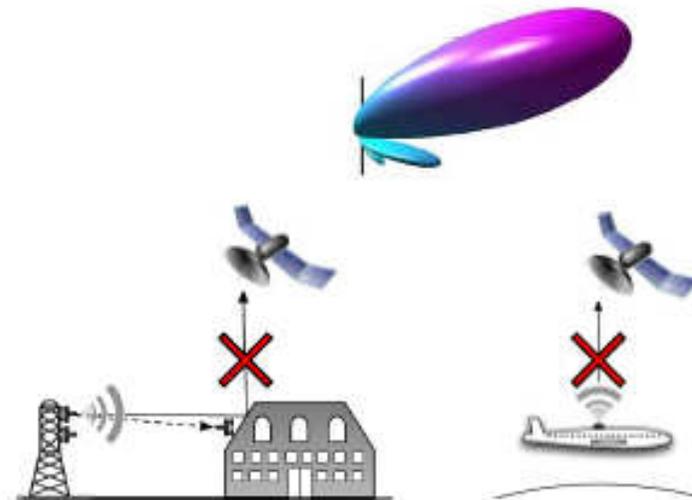
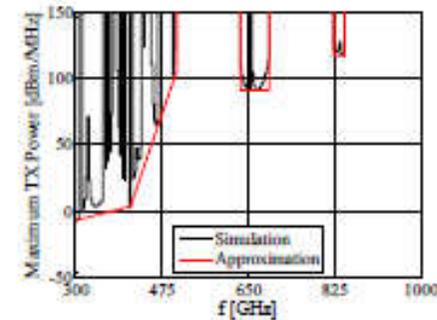
- THz transmitters operated outdoor may be pointed skyward:



- Which is the **maximum tolerable interference power**?
- How much power will be received by the satellite in the **worst case**?

Interference Mitigation Concepts

1. Transmit power masks
→ TX power control
2. Automatic shutdown in case of TX mispointing
→ Sensor data usage (e.g. orientation and position)
3. Electrically steerable antennas
→ Automatic precise beam pointing
4. Environment control
 - Fixed links
 - Airborne systems
 → Careful TX placement
→ Absorbing materials



→ **Avoidance of interference in any case** with interference mitigation

イントロダクション

研究開発動向（欧米、日本）

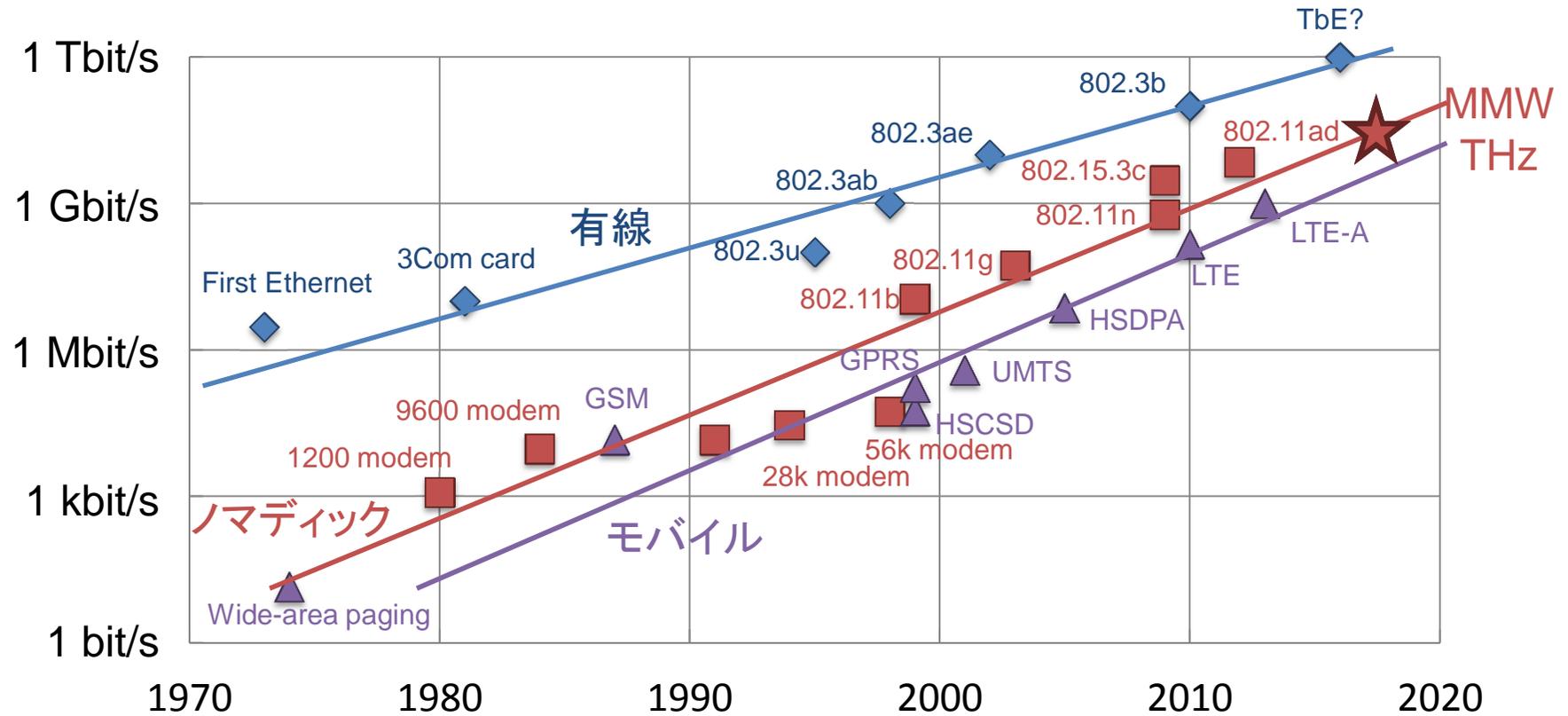
デバイス技術の進展
（III-V、CMOS、真空管素子、他）

周波数分配、干渉、他
（ITU-R: 国際電気通信連合 無線通信部門）

テラヘルツ無線通信導入シナリオ
（IEEE802.15 IGTHzでの議論）

電力標準、周波数標準

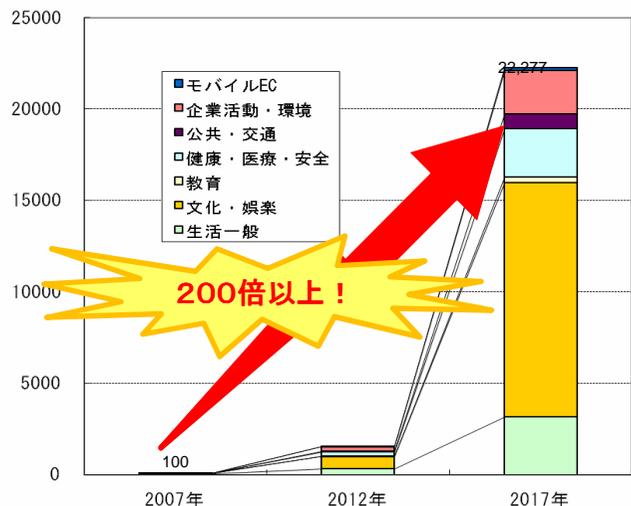
まとめ



- ミリ波 7Gb/s伝送は既に規格化 (IEEE802.11ad)
- 2020年には100Gb/s無線が出来る可能性

	マイクロ波	ミリ波(60GHz)	テラヘルツ	赤外光
伝送容量	0.2~1.5 Gb/s	1.5~7 Gb/s	10~100Gb/s	100Mb/s (Giga-IR 1Gb/s)
アンテナ サイズ	1~10mm	近距離応用で はmmオーダー	小(<0.5mm) レンズとの併用 も可	小(ほぼレンズ のサイズ)
ビーム 位置決め	不要(オムニア ンテナ)	容易(フェーズ ドアレイによる 電子走査)	比較的容易 (波長~ 0.3mm程度)	難しい
コスト	安価	Si-CMOS技術 導入で劇的に 安価になりつ つある	アンテナとの集 積により安価 の可能性	安価
最近の 応用事例	WiFi(無線LAN) TransferJet	WirelessHD WiGig IEEE802.11ad	デジタルシネマ 非圧縮伝送 KIOSKモデル	携帯端末間で のデータ転送

背景



モバイル分野のトラフィックの推計結果(2007年100とした場合)
 情報通信審議会 情報通信技術分科会(2008年12月)より

- 携帯電話や無線LANを利用したリッチコンテンツの流通や利用が増大
- 新たな電波利用システムの登場や電波利用分野の拡大
- 2020年までに電波利用の質・量が爆発的に拡大し、トラフィックは200倍以上に増大

さらなる周波数有効利用技術
 の開発・導入が必要

電波資源拡大のための研究開発等

1 周波数を効率的に利用する技術

現在割り当てられている無線システムに必要な周波数帯域を圧縮することにより、電波の効率的な利用を図る技術

2 周波数の共同利用を促進する技術

電波が稠密に使われている周波数帯において、既存無線システムに影響を及ぼすことなく、周波数の共用を可能とする技術

3 高い周波数への移行を促進する技術

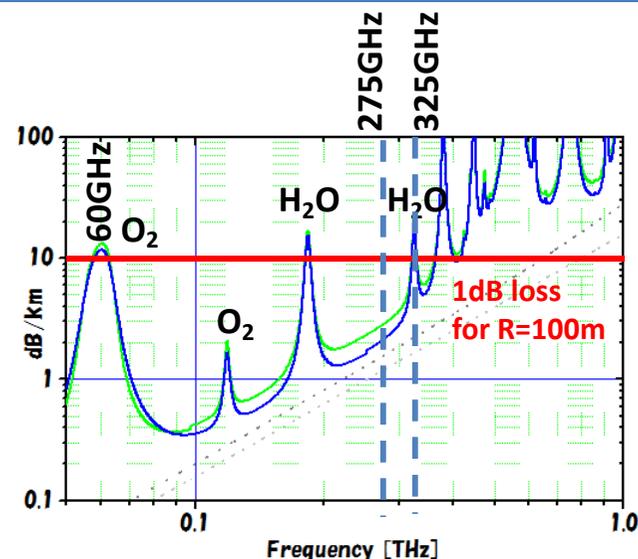
6GHz以下の周波数のひっ迫状況を低減するために、比較的ひっ迫の程度が低い高マイクロ波帯や未利用周波数帯(ミリ波帯)へ移行するための技術

予算額<電波資源拡大のための研究開発> (億円)

H22年度	H23年度	H24年度
72.4	73.6	78.8

**研究開発終了後、概ね5年以内の
 実用化を想定**

- 周波数資源の開拓
 - これまで実用化されていない275GHz以上の周波数帯域を無線用途に利用するための基盤技術
- ミリ波(60GHz)に対する優位性
 - 小型化
 - 簡易な変調方式で高速伝送可能
 - 大気減衰が小さい



周波数帯比較	利用可能な帯域幅	データレート			大気減衰	高ゲインアンテナの大きさ	携帯機器への搭載
		現在	5年以内	中長期			
ミリ波(60GHz帯)	7GHz	数Gbps	~20Gbps	20Gbps	10-13dB/km	25x25mm ²	×
300GHz帯	※50GHz		~20Gbps	100~1,000Gbps	3-10dB/km	数mmx数mm ²	◎

※275GHz以上の帯域に関して周波数割り当てはなされていない。

60GHz帯

ベースバンド処理LSI アレーアンテナ

25mm

ワイヤレスHD、
(SiBeam社、3.8 Gbit/s @60GHz)

300GHz帯

2~5mm

・携帯機器に搭載可能

・機器内接続に利用可能

小型化=高速化

Comparison with recent WLAN standards

	11n		11ac		11ad		THz
	mandatory	optional	mandatory	optional	mandatory	optional	
Band	2.4/5 GHz		5 GHz		60 GHz		Beyond 275GHz
Band Width	20 MHz	40 MHz	80 MHz	160 MHz	Max. 9 GHz		50 GHz
Data Rate	72.2 Mb/s	600 Mb/s	290 Mb/s	6.9 Gb/s	4.6 Gb/s	6.8 Gb/s	~100 Gb/s

How much data can be transferred in 1 sec?

Data Rate	Size of Data	Run time of 1080p24 video
10 Gb/s	1.25 GB	4 min
40 Gb/s	5.5 GB	17 min
100 Gb/s	12.5 GB	42 min
1,000 Gb/s	125 GB	420 min

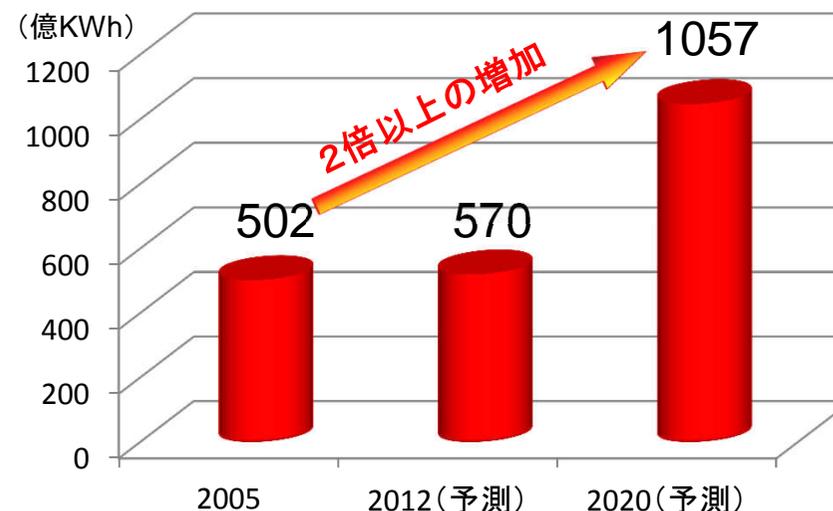
我が国における情報通信ネットワークの現状（総務省）



我が国のインターネットの通信量は大幅な伸びを続けており、今後も大幅な増加が予想されている。同時に、これまでの通信機器を単純に高速化した場合、伝送する情報量の増加に比例して通信機器の消費電力も大幅に増加することとなる。



我が国のインターネット通信量の推移(※1)



技術革新が無い場合の
通信分野における年間消費電力予測(※2)

・トラフィックの増大とともに2020年の消費電力は、**555億kWh増**の1057億kWh(予測)
⇒ **原子力発電所1基あたりの平均年間発電量の10.4基分^{※3}に相当する増加**

※1 総務省「我が国のインターネットにおけるトラフィックの集計・試算」(平成23年9月30日)

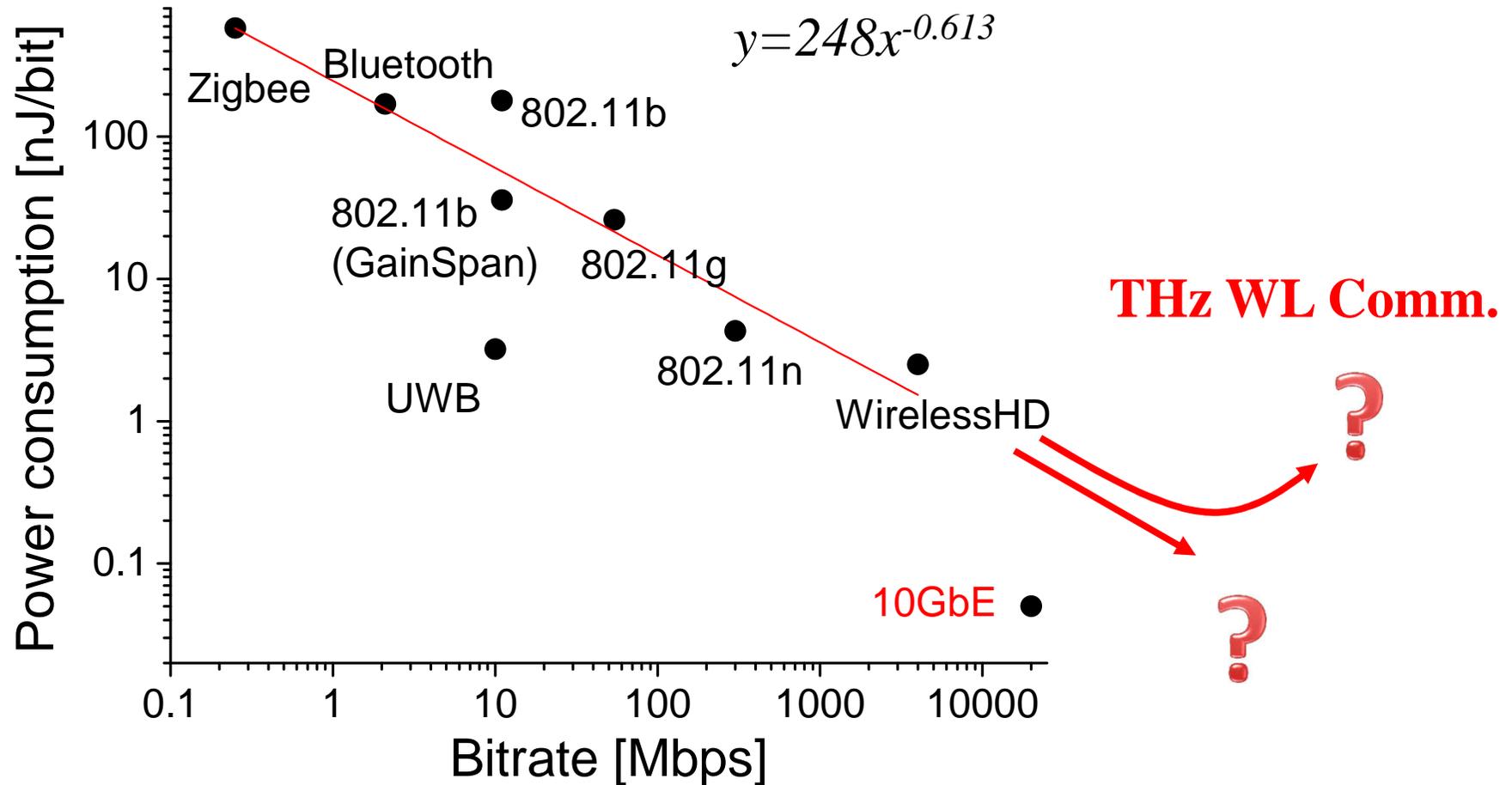
※2 「2020年におけるICTによるCO2削減効果」(グローバル時代におけるICT政策に関するタスクフォース 地球的課題検討部会 環境問題対応ワーキンググループ) より抜粋

※3 経済産業省「平成22年度の原子力発電所の運転実績について」日本全国の原子力発電所(54基)1基あたりの平均年間発電量53.4億kWh(平成23年5月)

Power Consumption/bit v.s. Bit rate



Fitted by Zigbee, Bluetooth, 802.11b(GainSpan), 802.11g, 802.11n, WirelessHD



By Dr. Tetsuya Kawanishi of NICT

<http://www.soumu.go.jp/soutsu/kinki/studygroup/2010/THz/index.html>

Possible Applications and Complexity of the Technical Solutions

Application	Operational Environment	Typical Range	Specific Propagation Conditions	Requirements for Antenna Alignment
Fixed Wireless Links	Links of the backbone network; static use; outdoor	A few hundred meters up to several kilometers	LOS; Atmospheric attenuation becomes important	Highly directive antennas; alignment during the installation process by radio engineers
THz Nano Cells	Part of a hierarchical cellular network; potentially mobile users; indoor as well as outdoor	< 100m	LOS/NLOS; dynamically changing conditions	automatic beam steering required
WLAN/WPAN	Connection to access points; nomadic users; mainly indoor	< 100m (mostly < 10m)	LOS/NLOS; dynamically changing conditions	automatic beam steering required
Kiosk Downloading	indoor, nomadic use	A few meters (a few cm)	LOS, multiple reflections from Tx and Rx	automatic beam steering (manual alignment may be possible)
Connecting Devices on Short Ranges	indoor (typically on a desktop), nomadic use	a few cm	LOS, multipaths from nearby objects and multiple reflections from Tx and Rx	ideally by automatic beam steering, but manual alignment may be possible
Board-to-Board Communication	inside computers, fixed use	a few cm	LOS/NLOS, potentially strong multipaths	fixed alignment during design process possible (automatic beam steering as an option)

Source: based on <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/11/15-11-0749-00-0thz-scenarios-for-the-application-of-thz-communications.pdf>

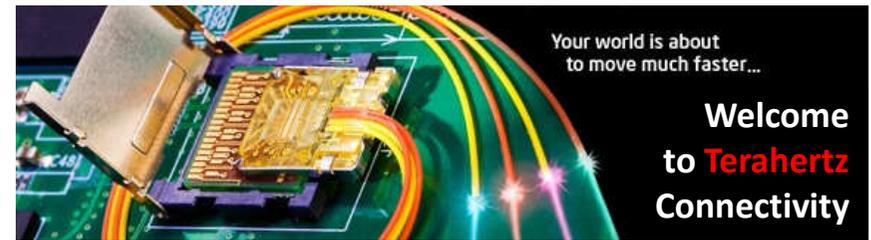
IEEE802.15 WPAN IGTHz : doc.:IEEE 802.15-12-0652-00-0thz

- „Fixed“ THz WLANS with limited beamsteering
 - Server farms
 - In-room multi user WLANS
 - Multi-processor gaming stations
 - 4kx4k TV/in-room entertainment WLANS
 - Business kiosk video download
- „Mobile“ THz WLANS with full active beamsteering and phase control
 - Pedestrian plazas in buildings
 - Broadband stadium access
 - Automotive
 - [Rail, Airplane]

ポイント！

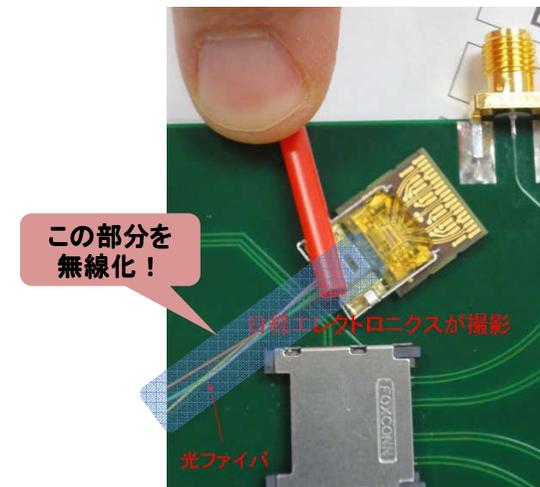
インテルが提唱する光ファイバインターフェース LightPeak(Thunder bird)の光フロントエンドのみを THz無線に入れ替えると、、、LightPeak(有線)と同じことが無線で実現可能

- + テラヘルツ帯無線を用いたインターフェース
- + 大容量性 > 10 Gbit/s (将来的には100 Gbit/sも)
- + 超高速物理層
- + 各種インターフェース規格(data や video)を1つのハードウェアに集約
- + video や data の標準インターフェースに互換
- + コネクタや送受信LSIを削減
- + 低価格
- + 接続構成の再構成可能性 (THz無線のみの特徴)



	LightPeak (10Gbit/s)	光ファイバ SFP+ (10Gbit/s)
消費電力	130 mW	1 W
機器体積	12mm x 10 mm, h: 2 mm	56.5mm x 13.4 mm, h: 8.5 mm
生産コスト	< 2 US\$ (@high-volume production)	14 US\$

LightPeakの場合の値だが、光フロントエンドをTHz無線に入れ替えてもほぼ同程度で実現花押ではないかと思われる。



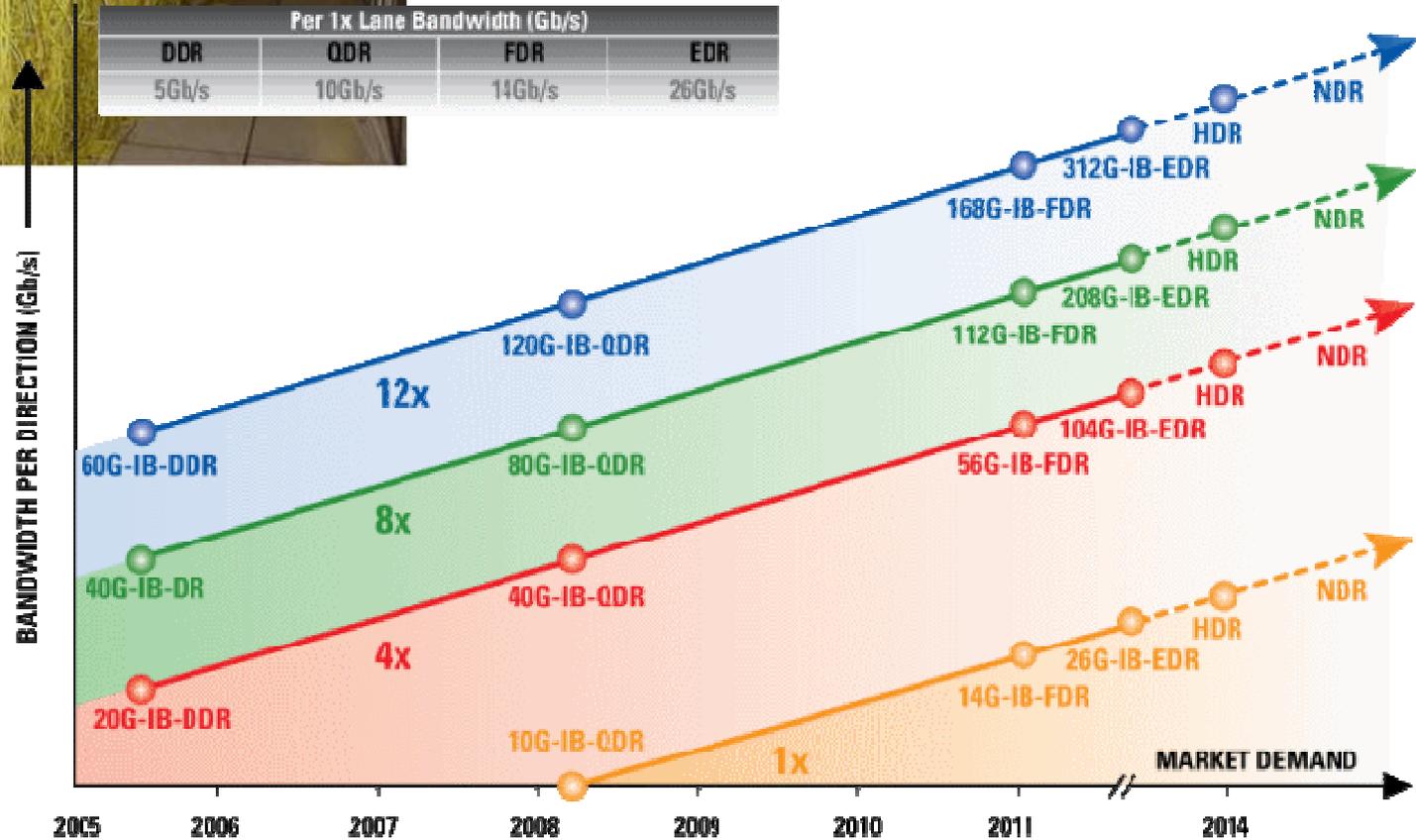


<http://www.thebuzzmedia.com/the-super-internet-wall-of-ethernet-cable/>



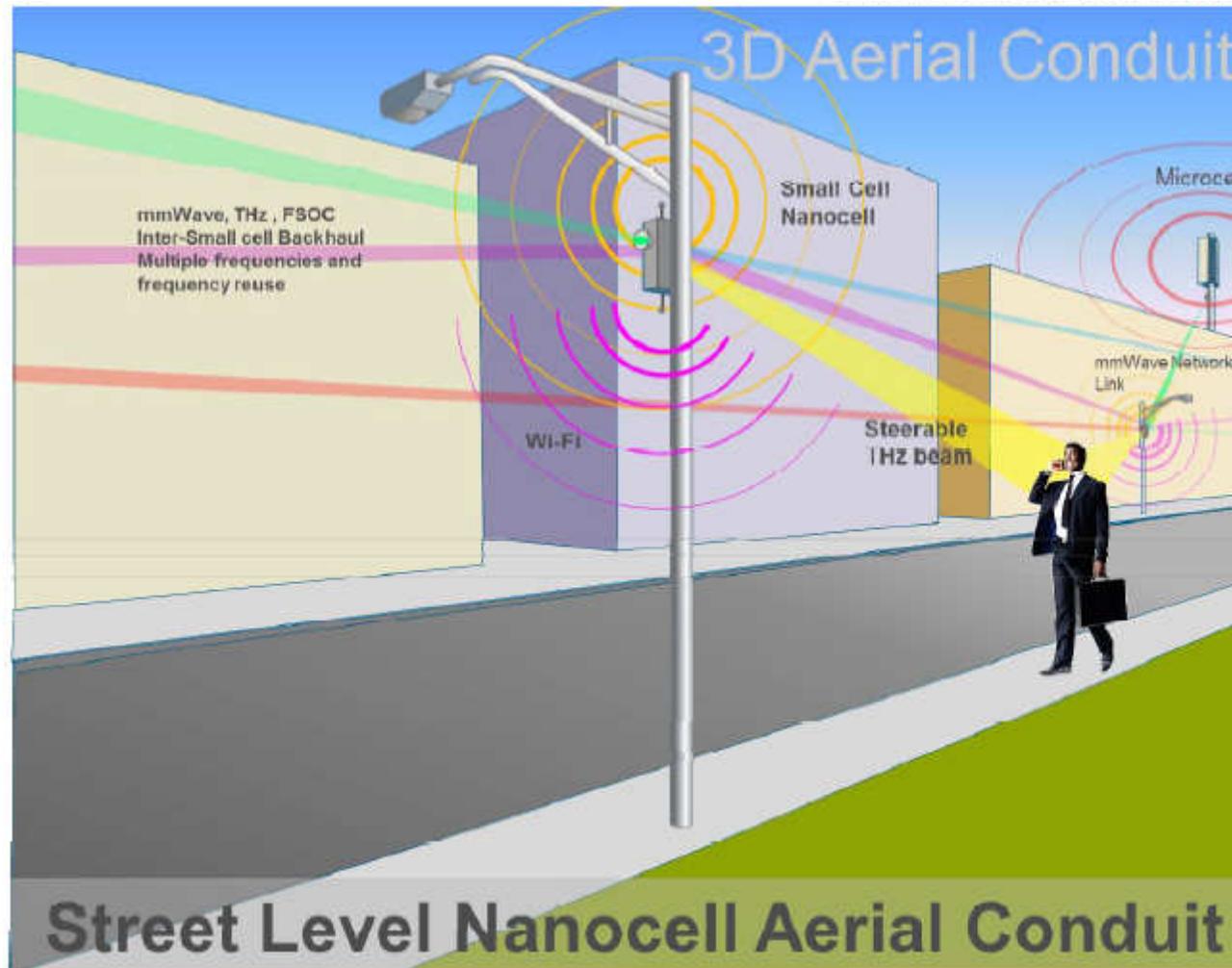
http://www.infinibandta.org/content/pages.php?pg=technology_overview

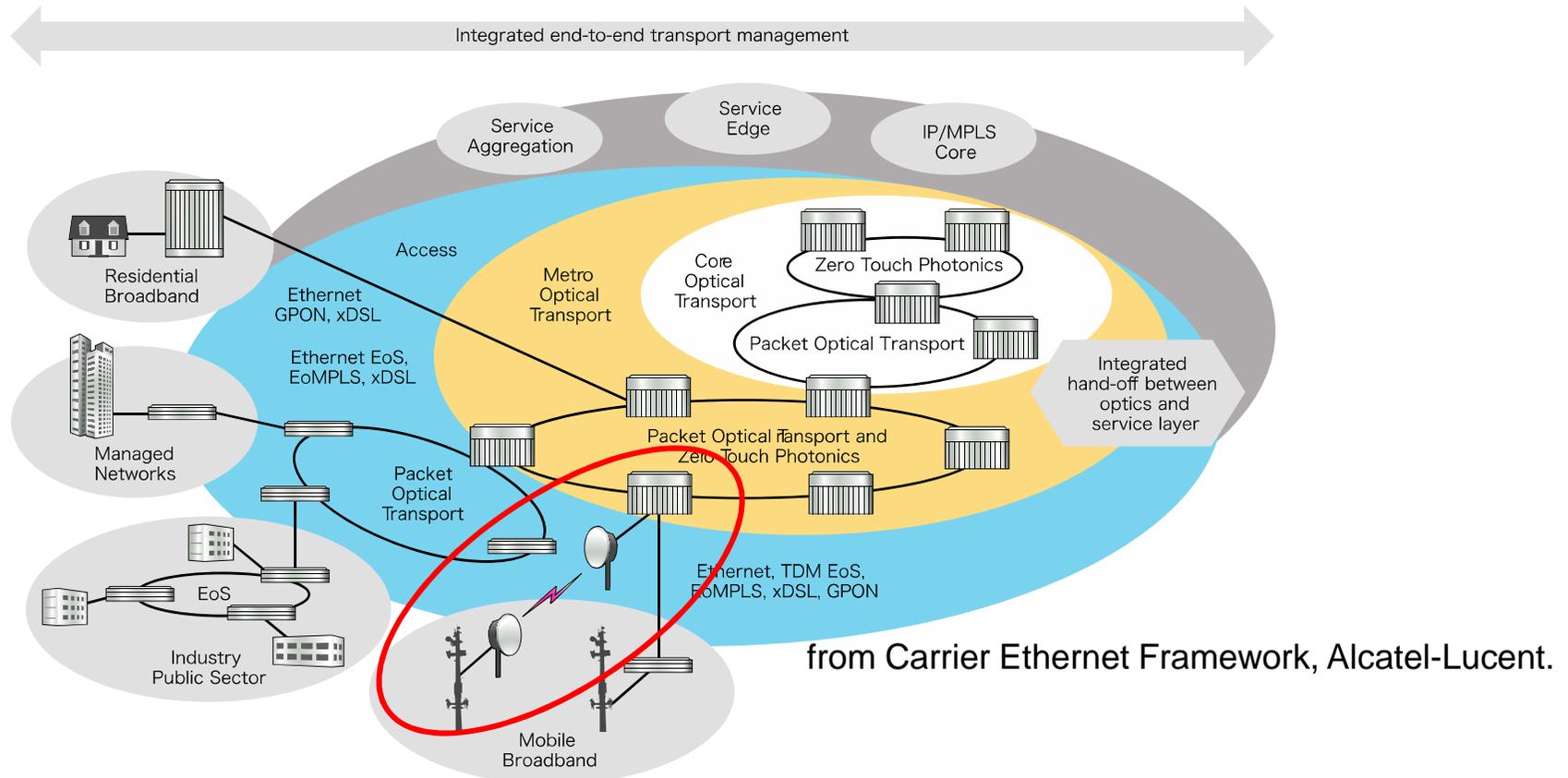
Per 1x Lane Bandwidth (Gb/s)			
DDR	QDR	FDR	EDR
5Gb/s	10Gb/s	14Gb/s	26Gb/s



SDR - Single Data Rate
 DDR - Double Data Rate
 QDR - Quad Data Rate
 FDR - Fourteen Data Rate
 EDR - Enhanced Data Rate
 HDR - High Data Rate
 NDR - Next Data Rate







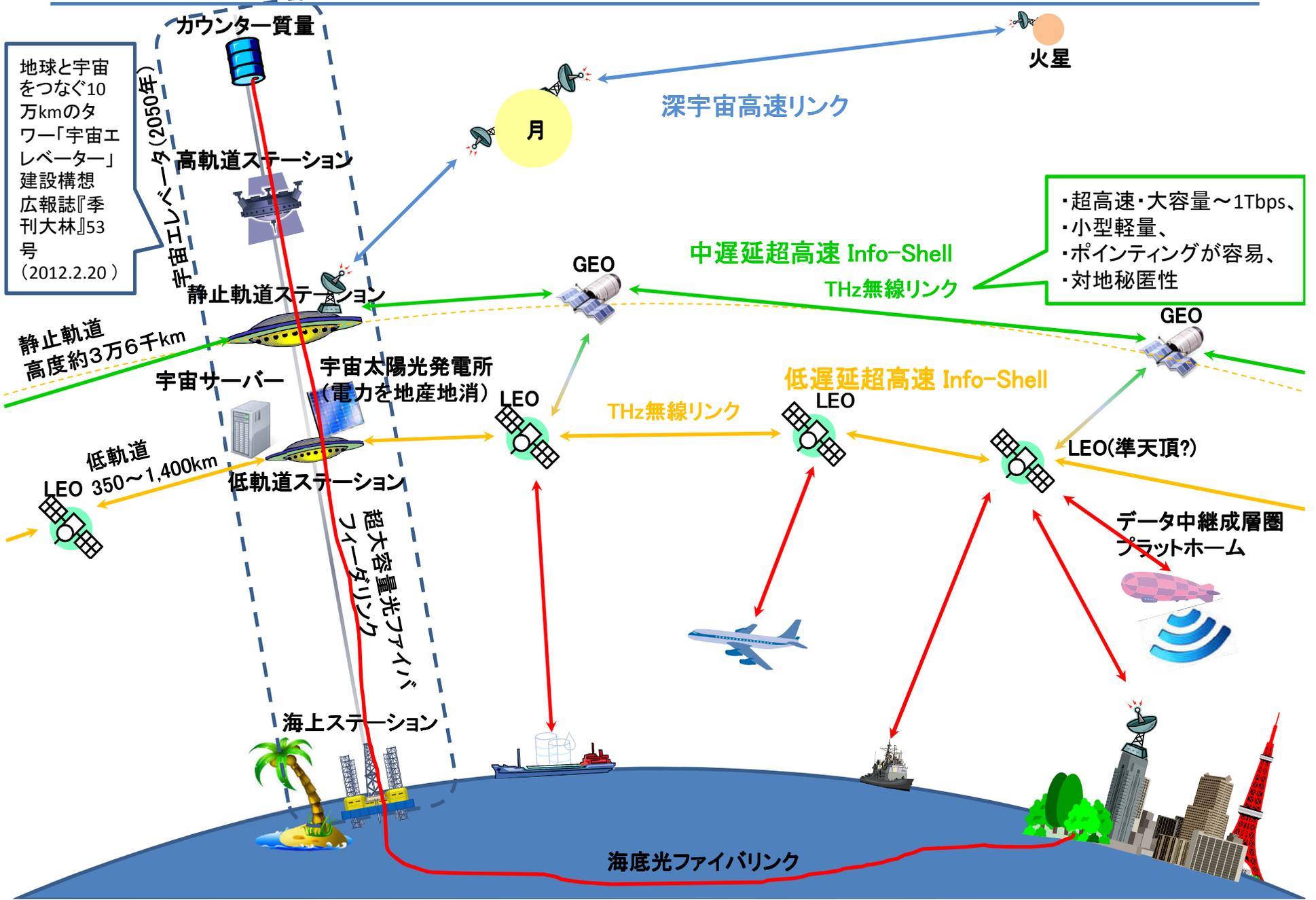
•光アクセス・ネットワークに直結したバックホール回線

IMT-advanced, IEEE802.11ac/ad: >1 Gb/s

-> **アグリゲーション: >>1 Gb/s**

2016年には\$9Bのマーケットに成長
 年率成長率 > 2% (from Dell'Olio Group)

Space Info-Shell System 構想 ※超高速RoF + THz-WL (IEICE ROAD MAP 2050)



- ・超高速・大容量~1Tbps、
- ・小型軽量、
- ・ポインティングが容易、
- ・対地秘匿性

イントロダクション

研究開発動向（欧米、日本）

デバイス技術の進展
（III-V、CMOS、真空管素子、他）

周波数分配、干渉、他
（ITU-R: 国際電気通信連合 無線通信部門）

テラヘルツ無線通信導入シナリオ
（IEEE802.15 IGTHzでの議論）

電力標準、周波数標準

まとめ

Dバンド電力標準の開発

現在国家計量標準のないミリ波・テラヘルツ波帯の電力標準を産総研と協力して開発している。H24年度には、世界に先駆けて170GHzまでの電力校正システムを完成した。H25年度には、減衰量の精密計測等を共同開発し、電磁環境研究室の中期計画のテーマである電力計の較正法について、国家計量標準とのトレーサビリティを確保する予定である。

K. Shimaoka, M. Kinoshita, K. Fujii, T. Tosaka, "Design of a Broadband Calorimeter for mm-Wave Power Standard in the Frequency Range from 110 GHz to 170 GHz", The 37th IRMMW-THz, No. Tue-C-3-3, 2012

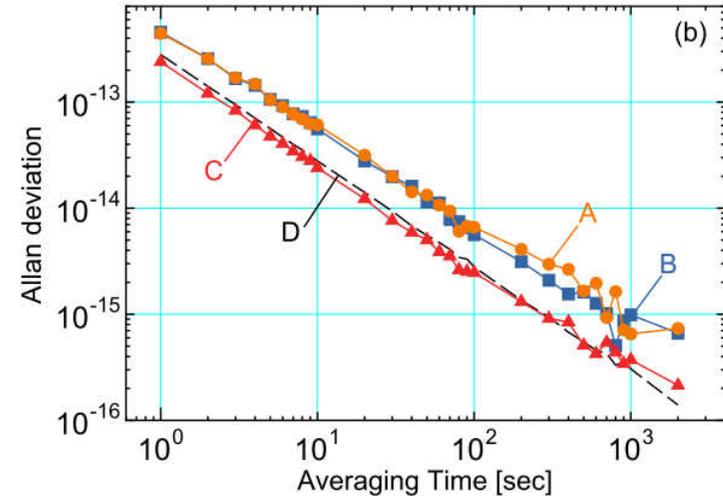
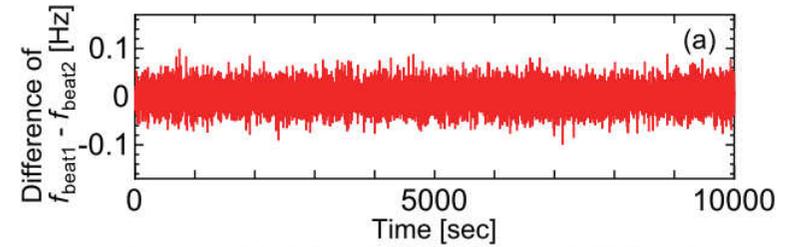
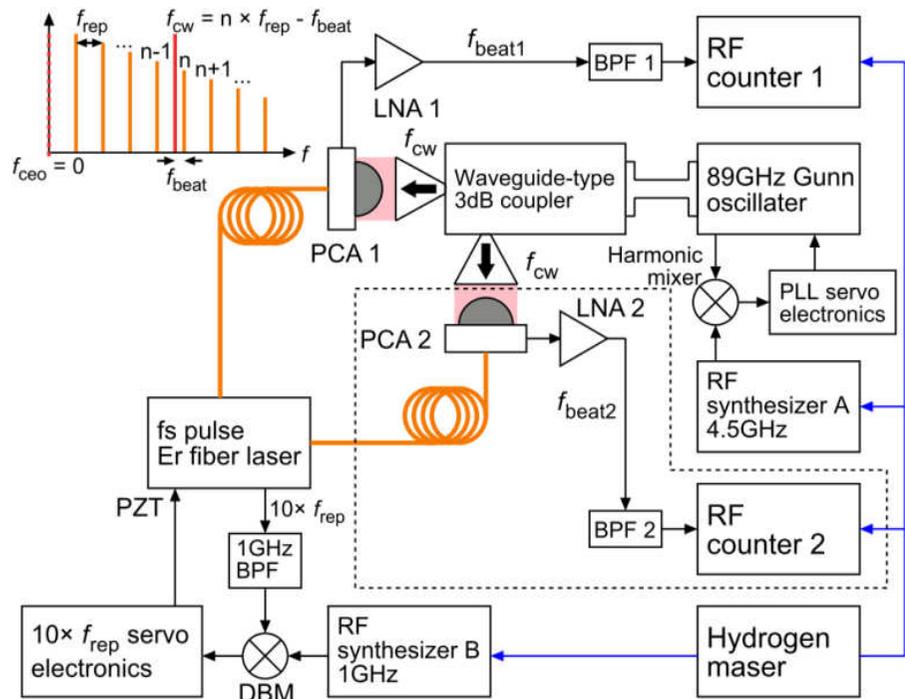


基準導波管



Dバンド(110 GHz～170GHz)用
電力校正システムと絶対強度測定センサ

THz Frequency Counter Uncertainty $\sim 10^{-16}$ (for 300s)



イントロダクション

研究開発動向（欧米、日本）

デバイス技術の進展
（III-V、CMOS、真空管素子、他）

周波数分配、干渉、他
（ITU-R: 国際電気通信連合 無線通信部門）

テラヘルツ無線通信導入シナリオ
（IEEE802.15 IGTHzでの議論）

電力標準、周波数標準

まとめ

欧米では

- ・無線、センシング、イメージング応用に向けた大型研究ファンドが準備されている。
- ・開発競争が始まりつつある。乗り遅れないことが重要！
- ・→「市場性」が見えて来た。→競争が激化する。→日本でも体制を整える必要がある。
→ポイント:標準化を武器に！

デバイス開発

- ・III-V族化合物半導体デバイス、マイクロマシン真空管素子、Si-CMOS

電波行政・ITU-R(干渉・共用)

- ・テラヘルツ帯(275GHz超)では、超広帯域(~50GHz@300GHz)を使える可能性
- ・テラヘルツ帯は飛ばない・回り込まない→干渉しない→空間的に繰り返し利用可能
- ・ITU-R/WRC2012 脚注5.565の改訂
「実験及び開発に使用可能」→
「受動業務による275-1000GHzの周波数帯の使用は、
能動業務によるこの周波数帯の使用を妨げてはならない。」
- ・デジュール標準化には今後10年必要か？

ユースケース

- ・基幹系→基幹ファイバ系の補完、宇宙
- ・アクセス系→モバイルバックボーン、WLAN、WPAN
- ・その他 →データセンター、ボード間、チップ間