

テラヘルツ波応用の今後の展望 ～アカデミアと企業の40年～

永妻 忠夫

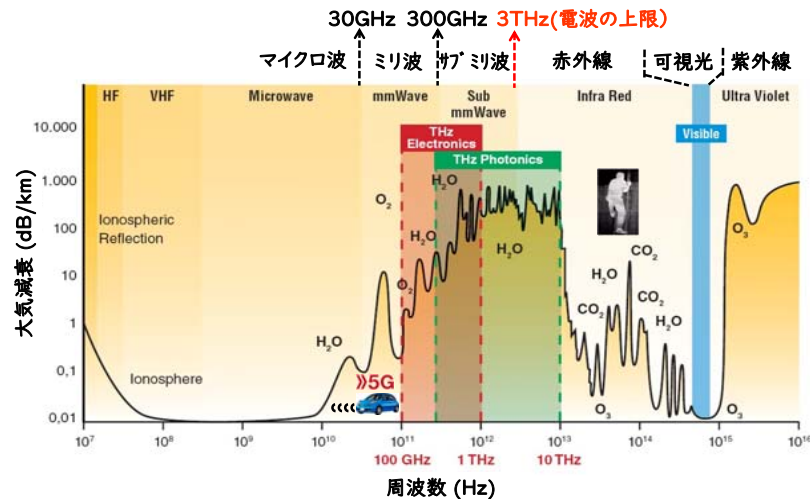
大阪大学産業科学研究所
東京大学大学院理学系研究科フotonサイエンス研究機構

講演内容

約40年の技術革新の流れを振り返り、特に産業応用という観点から、何ができるようになったかを考察し、今後の課題を議論したい

- ・流れを振り返る
40年の大きな流れ、世代毎の到達点
基盤技術(含、部品・材料技術)の進展
- ・産業応用の動向:いくつかの話題
- ・将来への期待と課題

テラヘルツ波～ミリ波+サブミリ波+遠赤外



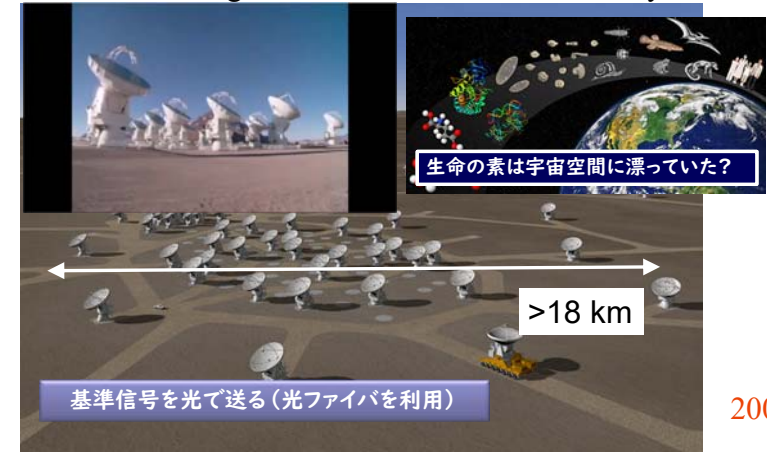
全宇宙の電磁波エネルギーの50%がTHz
ビッグバン以来放射された全光子の98%がTHz

星の一生と電磁波



地球一大きなアンテナで宇宙からの電波を観測

Atacama Large Millimeter/submillimeter Array



2000年代~

私のテラヘルツとの出会い: 学位論文

J. Appl. Phys. 54 (6), pp.3302-3309 (1983).

Flux-flow type Josephson oscillator for millimeter and submillimeter wave region

T. Nagatsuma, K. Enpuku, and F. Irie
Department of Electronics, Kyushu University, Fukuoka 812, Japan

K. Yoshida
Department of Electrical Engineering, Nagasaki University, Bunkyo-machi 1-14, Nagasaki 852, Japan

(Received 15 November 1982; accepted for publication 3 February 1983)

An oscillator which utilizes the effect of the vortex motion in long Josephson tunnel junctions, i.e., flux flow, has been presented in millimeter and submillimeter wave region. An electromagnetic wave generated by the oscillator is detected with a small tunnel junction as a detector with a refined coupling configuration. Quantitative evaluation of the detected power showed that the detected power attained the value of 10^{-6} W in the frequency range between 100 and 400 GHz, which is far superior to previous results. Frequency and magnetic field dependences of the present system were also measured, which showed that the output power was able to be controlled by the dc magnetic field. The present oscillator will be promising as the local oscillator in the integrated Josephson receiver systems.

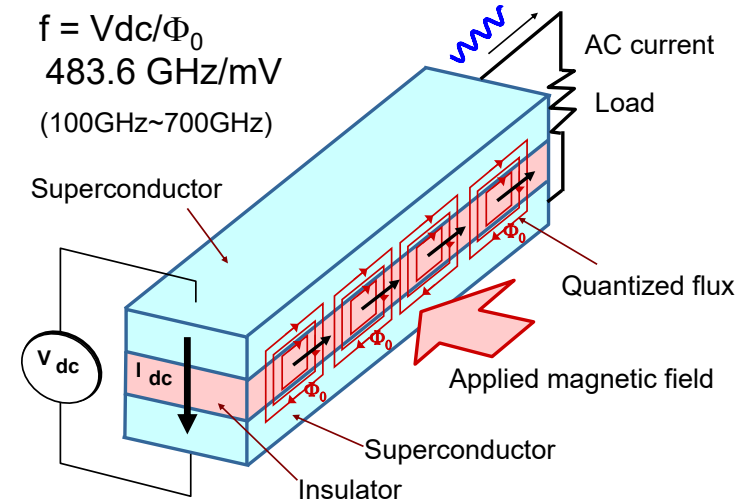
PACS numbers: 74.50.+r, 85.25.+k

超伝導デバイス: Flux-Flow Oscillator (FFO)

$$f = V_{dc} / \Phi_0$$

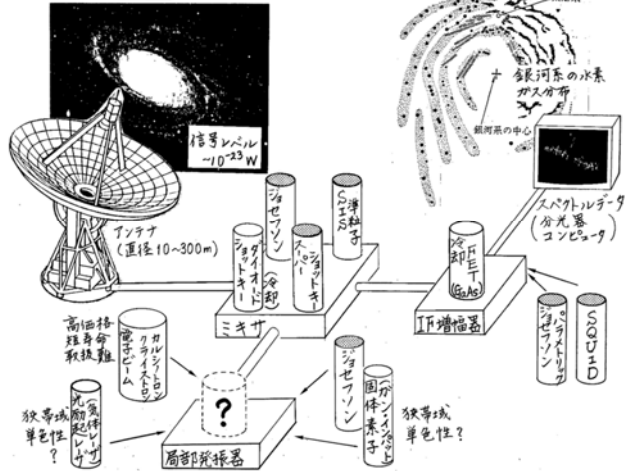
$$483.6 \text{ GHz/mV}$$

$$(100 \text{ GHz} \sim 700 \text{ GHz})$$



論文公聴会資料から

□研究の背景(1)



2

論文公聴会のお知らせ

昭和61年1月10日

閣下

下記の通り、論文公聴会を開きたいと存じます。多数の御来聴を歓迎致します。

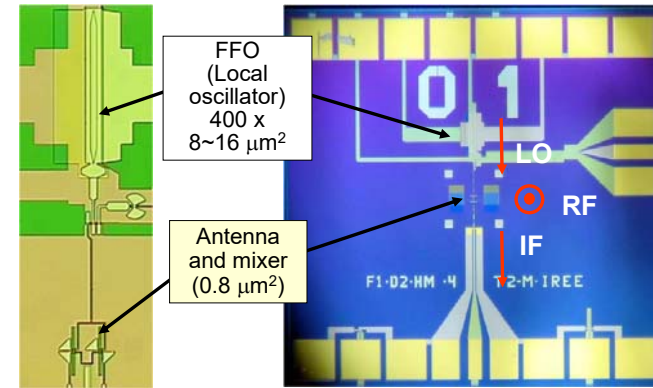
電子工学科 山藤 肇

記

論文提出者 永 妻 忠 夫
 論文題名 量子超導フロー型ジョセフソン発振器に関する研究
 日時 昭和61年1月22日(水) 13:40~15:30
 場所 電子大学院演習室 (電子4階)

“FFO”が目指したもの：Integrated MMW/THz Receivers

Integrated superconducting receiver for atmosphere monitoring at 500-650 GHz (TELIS project: TERAhertz and submm Limb Sounder)



ISEC 2007 “Integrated Receivers for Space” by V. Koshelets

THz技術の世代推移：“5thGen.”へ

1980年代：超高速光エレクトロニクス

ピコ秒・フェムト秒パルスレーザ、フォトコンダクタ
 化合物半導体デバイス⇨光通信の発展を牽引

1990年代：光技術によるTHz研究のブレイク

THzパルス波の進展⇨イメージング、分光の提案
 THzパラメトリック発振器(1996)、UTC-PD(1996)

2000年代：THz波の産業応用の萌芽

通信応用(2002)、THz量子カスケードレーザ(2002)
 分光システムの商品化、テラヘルツカメラ(2008)

2010年代：実用化に向けた新たな展開

電子デバイス・集積回路技術の進展(Siでも…)
 計測技術の進展(スベアナ・ネットアナ)
 周波数割当の議論

2020年代：“第5世代”マーケットの拡大へ

エレクトロニクスとフォトニクスの集積化

THz技術の世代推移：“第1世代”

1980年代：超高速光エレクトロニクス

ピコ秒・フェムト秒パルスレーザ、フォトコンダクタ
 化合物半導体デバイス⇨光通信の発展を牽引

1990年代：光技術によるTHz研究のブレイク

THzパルス波の進展⇨イメージング、分光の提案
 THzパラメトリック発振器(1996)、UTC-PD(1996)

2000年代：THz波の産業応用の萌芽

通信応用(2002)、THz量子カスケードレーザ(2002)
 分光システムの商品化、テラヘルツカメラ(2008)

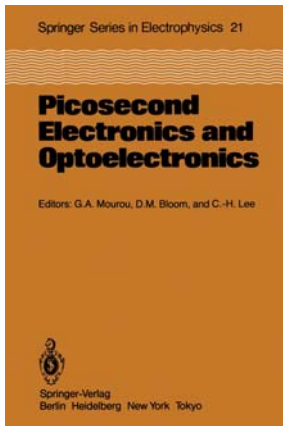
2010年代：実用化に向けた新たな展開

電子デバイス・集積回路技術の進展(Siでも…)
 計測技術の進展(スベアナ・ネットアナ)
 周波数割当の議論

2020年代：“第5世代”マーケットの拡大へ

エレクトロニクスとフォトニクスの集積化

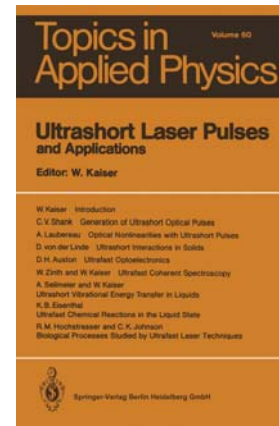
1980年代に築かれた基礎技術 (1)



Picosecond Electronics and Optoelectronics
Proceedings of the Topical Meeting Lake Tahoe, Nevada, March 13–15, 1985

Ultrafast Optical Electronics: From Femtoseconds to Terahertz
***D. H. Auston, K. P. Cheung, J. A. Valdmanis, P. R. Smith
Prospects of High-Speed Semiconductor Devices
***Naresh Chand, Hadis Morkoç
The Role of Ultrashort Optical Pulses in High-Speed Electronics
***C. V. Shank
GaAs Integrated Circuit Technology for High Speed Analog and Digital Electronics
***R. Castagne, G. Nuzillat
Heterojunction Bipolar Transistor Technology for High-Speed Integrated Circuits
***P. M. Asbeck
Permeable Base Transistor
***R. A. Murphy
Two Dimensional E-Field Mapping with Subpicosecond Resolution
***K. E. Meyer, G. A. Mourou

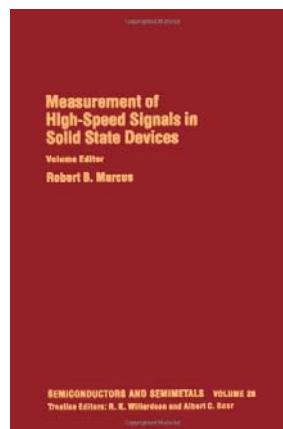
1980年代に築かれた基礎技術 (2)



Ultrashort Laser Pulses and Applications, 1988

Generation of Ultrashort Optical Pulses
***Charles V. Shank
Optical Nonlinearities with Ultrashort Pulses
*** Alfred Laubereau
Ultrashort Interactions in Solids
*** Dietrich von der Linde
Ultrafast Optoelectronics
*** David H. Auston
Ultrafast Coherent Spectroscopy
*** Wolfgang Zinth, Wolfgang Kaiser
Ultrashort Intramolecular and Intermolecular Vibrational Energy Transfer of Polyatomic Molecules in Liquids
*** Alois Seilmeier, Wolfgang Kaiser
Ultrafast Chemical Reactions in the Liquid State
*** Kenneth B. Eisenthal
Biological Processes Studied by Ultrafast Laser Techniques
*** Robin M. Hochstrasser, Carey K. Johnson

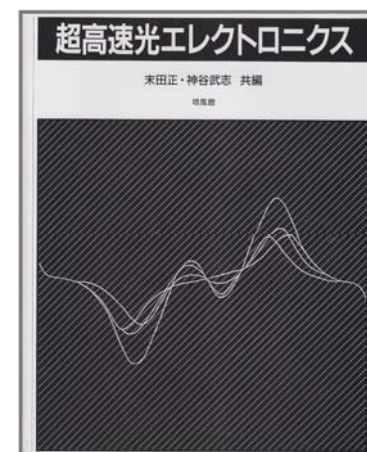
1980年代に築かれた基礎技術 (3)



Measurement of High-Speed Signals in Solid State Devices
(Semiconductors and Semimetals, Vol. 28, 1990)

Materials and Devices for High-Speed and Optoelectronic Applications
***Jeffrey Frey, Dimitris E. Ioannou
Electronic Wafer Probing Techniques
***Hermann Schumacher, Eric W. Strid
Picosecond Photoconductivity: High-Speed Measurements of Devices and Materials
*** D.H. Auston
Electro-Optic Measurement Techniques for Picosecond Materials, Devices, and Integrated Circuits
*** J.A. Valdmanis
Direct Optical Probing of Integrated Circuits and High-Speed Devices
*** J.M. Wiesefeld, R.K. Jain
Electron-Beam Probing
*** Graham Plows
Photoemissive Probing
*** A.M. Weiner, R.B. Marcus

我が国もこの時代を先導した！



超高速光エレクトロニクス 末田 正・神谷 武志 (編) 培風館 1991

超高速エレクトロニクス総論

基礎・物性編
レーザパルス圧縮一分散およびチャープの効果; 光ファイバ中のソリトンパルスの伝搬; 量子閉込構造半導体の光物性と応用; **フェムト秒光エレクトロニクス**の基礎

デバイス編
超高速量子井デバイス; 半導体レーザの高速化; 非線形光能デバイス; 高速変調技術; 超高速光検出技術; **光・電子集積回路の高速化**

フォトニクスシステム編
超高速光ファイバ伝送; 超高速光スイッチング; 光コンピューティングの基礎技術; 光トリガー方式マルチプレクシングの基礎; 非線形光ファイバ

THz技術の世代推移：“第2世代”

1980年代：超高速光エレクトロニクス

ピコ秒・フェムト秒パルスレーザー、フォトコンダクタ
化合物半導体デバイス⇨光通信の発展を牽引

1990年代：光技術によるTHz研究のブレイク

THzパルス波の進展⇨イメージング、分光の提案
THzパラメトリック発振器(1996)、UTC-PD(1996)

2000年代：THz波の産業応用の萌芽

通信応用(2002)、THz量子カスケードレーザ(2002)
分光システムの商品化、テラヘルツカメラ(2008)

2010年代：実用化に向けた新たな展開

電子デバイス・集積回路技術の進展(Siでも…)
計測技術の進展(スベアナ・ネットアナ)
周波数割当の議論

2020年代：“第5世代”マーケットの拡大へ

エレクトロニクスとフォトニクスの集積化

1990年代：研究開発のブレイクのきっかけとなった論文

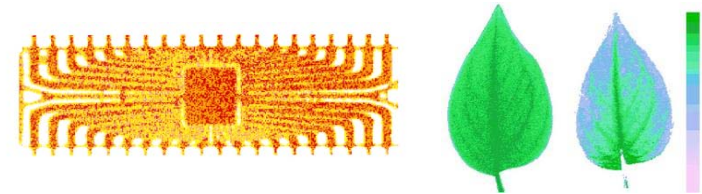
THzパルス分光(TDS)の最初の論文

“Far-infrared time-domain spectroscopy with terahertz beams of dielectrics and semiconductors,” D. Grischkowsky, Soren Keiding, Martin van Exter, and Ch. Fattinger, J. Opt. Soc. Am. B, 7, 2006-2015 (1990).

THzイメージングの最初の論文

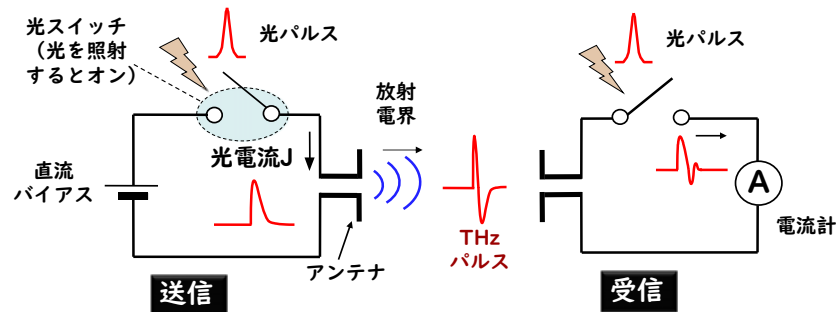
“Imaging with terahertz waves,”

B. B. Hu and M. C. Nuss, Opt. Lett., 20, 1716-1718 (1995).



THz研究のブレイク：パルス波から始まった

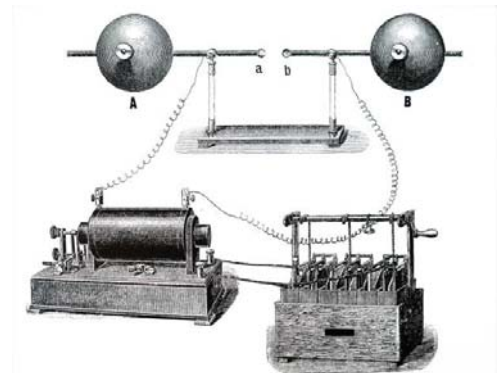
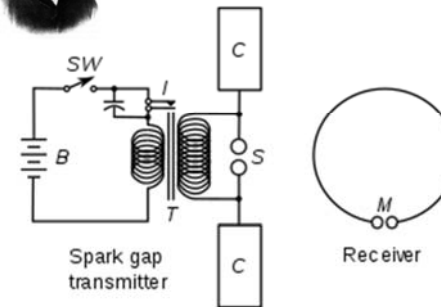
「光技術とエレクトロニクス技術の融合」：光電融合



Hertz's 1887 apparatus for generating and detecting radio waves

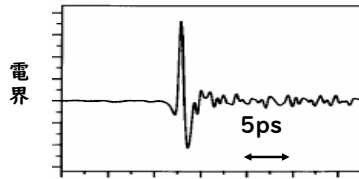


A spark-gap transmitter (left) consisting of a dipole antenna with a spark gap (S) powered by high voltage pulses from a coil.

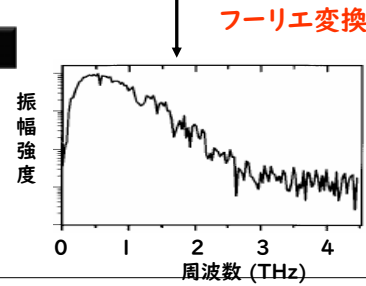


時間波形と周波数との関係

時間波形



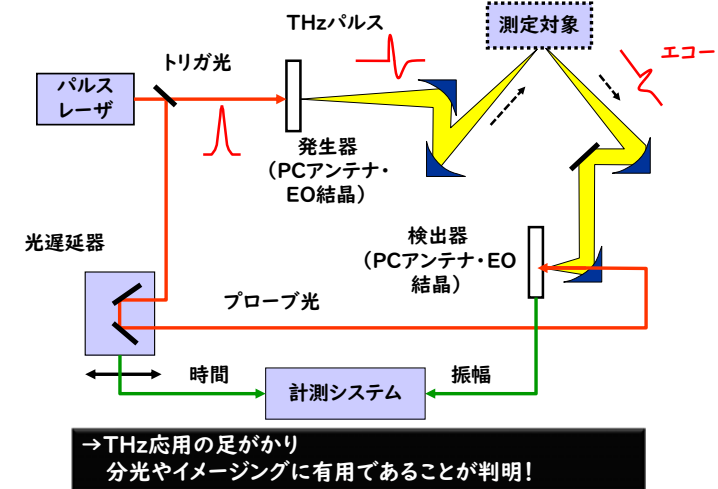
周波数スペクトル



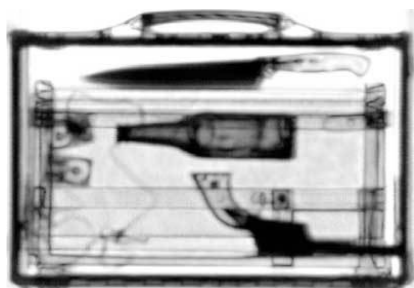
振幅情報だけでなく
位相情報も測定できる

■ 複素誘電率が測定できる

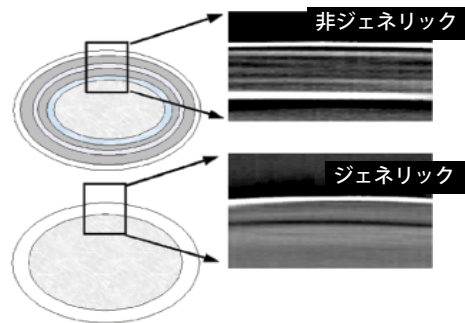
THzパルスシステムの構成例



テラヘルツイメージングの例

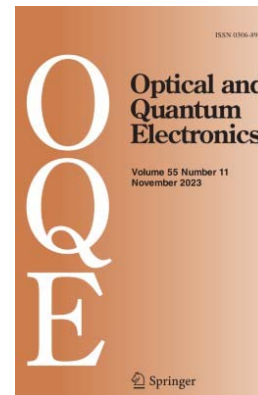


鞆の内部検査



タブレットの層構造の検査 (断面図)

私の職業としてのテラヘルツ技術



Optical and Quantum Electronics, Volume 28, issue 7, July 1996

Special Issue: Optical probing of ultrafast devices and integrated circuits

***Tadao Nagatsuma

Ultrafast electrical signal generation, propagation and detection

*** D. R. Dykaar, U. D. Keil

Full wave electromagnetic simulation of electrooptic high-speed probes

*** D. Conn, H. X. Wu, M. Zhang

Optoelectronic techniques for ultrafast device network analysis to 700 GHz

*** M. Y. Frankel

Two-dimensional field mapping of monolithic microwave integrated circuits

using electrooptic sampling techniques

*** W. Martin

Scanning probe microscopy for testing ultrafast electronic devices

*** A. S. Hou, B. A. Nechay, D. M. Bloom

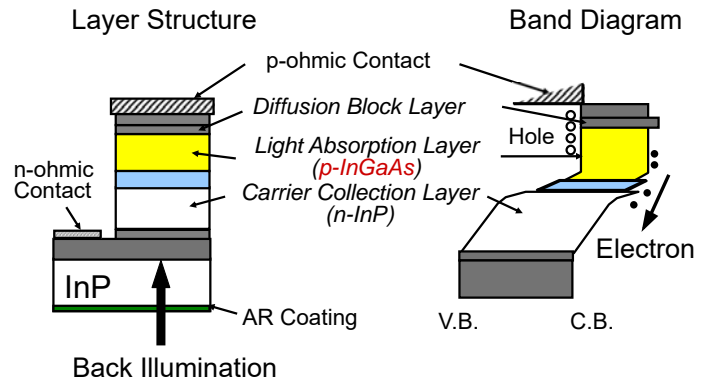
Ultrafast-ultrafine probing of high-speed electrical waveforms using a

scanning force microscope with photoconductive gating

*** J. Nees, S. I. Wakana, S. Hama

他、全18件の論文

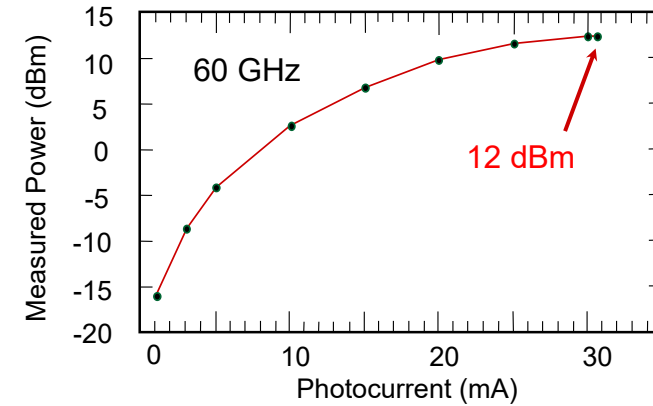
高速・高出力フォトダイオードの誕生: 1996



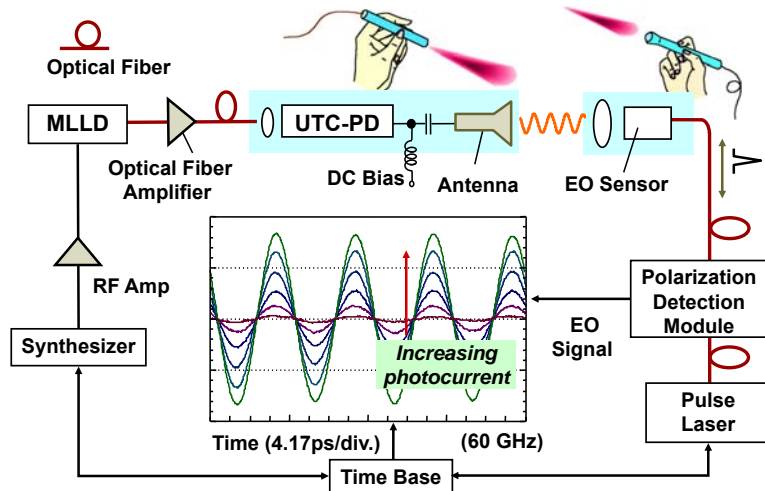
UTC-PD: **U**ni-**T**raveling-**C**arrier-**P**hotodiode

驚異的な出力 (MWP 1998)

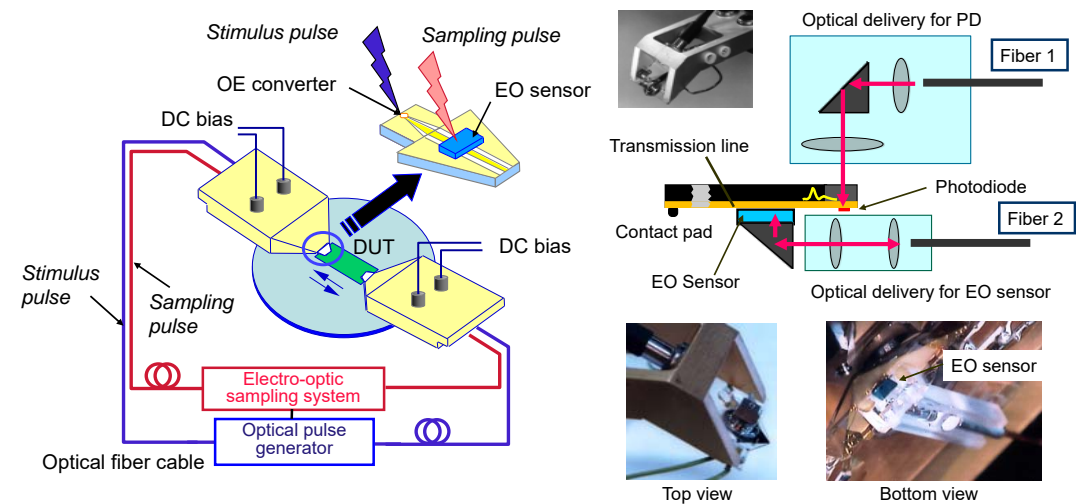
MWP 1998 (Melbourne) "All Optoelectronic Generation and Detection of Millimeter-Wave Signals":
Photonic generation of high-power MMWs with UTC-PD (>10 mW @ 60 GHz)



光技術を用いたミリ波テラヘルツ信号の発生と検出

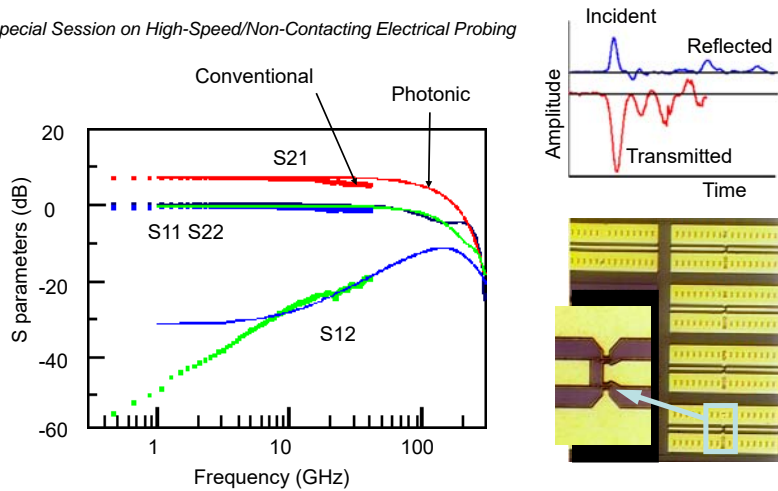


フォトニック・ミリ波テラヘルツネットワークアナライザ



高周波トランジスタHEMTの計測

IMS2002 Special Session on High-Speed/Non-Contacting Electrical Probing



関連技術を計測機器メーカーから商品化

真の高速信号を捉える。新世代オシロスコープ。EO (Electro-Optic) サンプリング技術を用いた、新世代オシロスコープ。アナログ電圧のリアルタイムサンプリングを実現し、極めて高い帯域幅と高い入力インピーダンスを実現しています。

リアルタイムEOプローブ。従来の電圧プローブは必ず接触が必要でした。一方には、接触は不完全なためコンタクト抵抗が発生し、EQを取る性質によって変動が伴います。しかし、EOプローブは信号ラインの電圧を測定する方式で、信号線のみ一点接触測定ですので、接触抵抗による変動を完全に排除することが出来ます。

EO波形測定システム。E.O (Electro-Optic) 検出器測定システムは、短パルスレーザ光と電気光結晶を用いて、IC内部の信号を大気中で非接触測定するシステムです。

赤外線工学より

1994年刊



234

赤外線工学

更にバイパス比が増して空気との接触面積が増え、ノズル形状も円形から方形となり、排気ガスの赤外線放射は非常に少なくなった。家庭でも断熱材が壁に埋め込まれ、外部への赤外線放射は少なくなっている。

大気、気象も人工的に変化できない要素である。炭酸ガスの減衰、微粒子による散乱、水分による減衰、霧による減衰など、いずれも制御できない、大気を媒体としない場合でも、減衰は存在する。

赤外線の波長域で透過率の高い大気の窓の波長は定まっており、変えることはできない。今後も赤外線装置はこの波長域で動作を行うことに変化はない。14 μm 以上 1 mm 以下、すなわち、赤外線と電波の間に広い未使用の帯域があるが、この波長域では通常扱う物体からの放射が少ないこと、大気減衰が大きいことから地球上では使われる可能性は低いと思われる。受光装置は光学系とセンサ、回路、表示装置に分かれ、改善が可能な要素がある。光学系の材料および処理は現在の延長上で発展をされると思われる。新しい技術は2進光学系(binary optics)の採用であろう。2進光学系では集積回路の製造方法がそのまま使用でき、大量生産が容易で更にファイバ径に合うように小

THz技術の世代推移：“第3世代”

1980年代：超高速光エレクトロニクス

ピコ秒・フェムト秒パルスレーザ、フォトコンダクタ化合物半導体デバイス、光通信の発展を牽引

1990年代：光技術によるTHz研究のブレイク

THzパルス波の進展、イメージング、分光の提案
THzパラメトリック発振器(1996)、UTC-PD (1996)

2000年代：THz波の産業応用の萌芽

通信応用(2002)、THz量子カスケードレーザ(2002)
分光システムの商品化、テラヘルツカメラ(2008)

2010年代：実用化に向けた新たな展開

電子デバイス・集積回路技術の進展(Siでも…) 計測技術の進展(スベアナ・ネットアナ) 周波数割当の議論

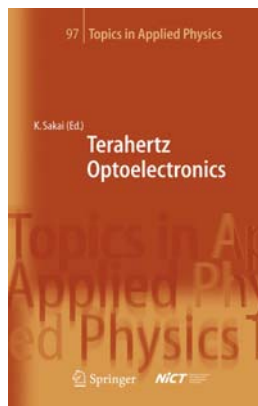
2020年代：“第5世代” マーケットの拡大へ

エレクトロニクスとフォトニクスの集積化

テラヘルツ技術に関するテキストの発刊



西澤潤一(著) 2005

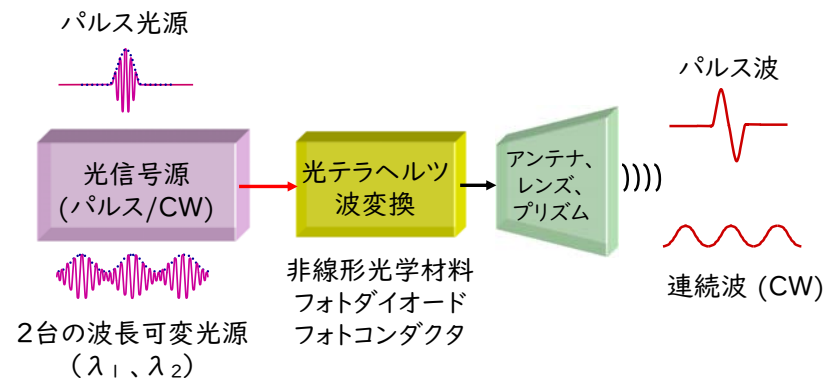


K. Sakai, ed, 2005



斗内政吉(監修)・テラヘルツテクノロジー動向調査委員会(編) 2005

光テラヘルツ波変換技術によるテラヘルツ波発生法



マクスウェルの方程式によるTHz波発生の理解

マクスウェルの方程式

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \end{aligned}$$

① 光非線形効果の場合

誘電分極

$\mathbf{J} = 0, \mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}, \mathbf{P} = \mathbf{P}_0 + \mathbf{P}_{NL}$ より

放射源

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \epsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = \mu \frac{\delta^2 \mathbf{P}_{NL}}{\partial t^2}$$

($\epsilon \mathbf{E} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}_0$)

② 光電流を変調する場合

$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$ より

放射源

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \epsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = \mu \frac{\partial \mathbf{J}}{\partial t}$$

光非線形効果 (非線形分極) による光テラヘルツ波変換

光電界により物質が分極する: 原子・分子の平均位置がずれる

分極密度 $\mathbf{P} = \mathbf{P}_0 + \mathbf{P}_{NL}$ (χ : 電気感受率)

$$= \epsilon [\chi^{(1)} \mathbf{E}(t) + \chi^{(2)} \mathbf{E}^2(t) + \chi^{(3)} \mathbf{E}^3(t) + \dots]$$

光整流
差周波混合 (DFG)
パラメトリック発振

ガスプラズマ
からの発生

光材料およびデバイス

①非線形効果(非線形分極)の場合

非線形結晶(LN, ZnTe, GaP, DAST, ...) の光励起

- 光整流【広帯域パルス】
- 差周波混合(DFG)・パラメトリック発振【準CW:周波数可変】

②電流を変調する場合

光による電流変調

- フォトコンダクタ・フォトダイオード (GaAs, InGaAs, InP, ...)

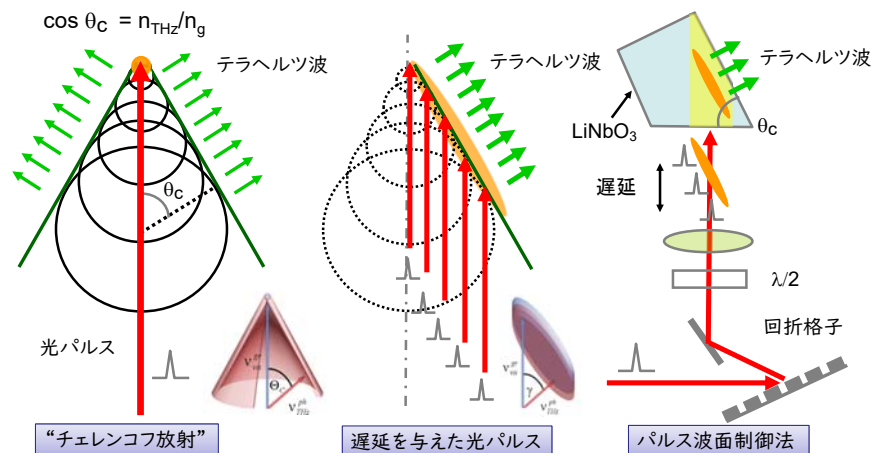
光パラメトリック発振器(理研・名古屋大学)

テラヘルツ波周波数 = ポンプ光周波数 - アイドラー光周波数
(波数も同じ関係式)



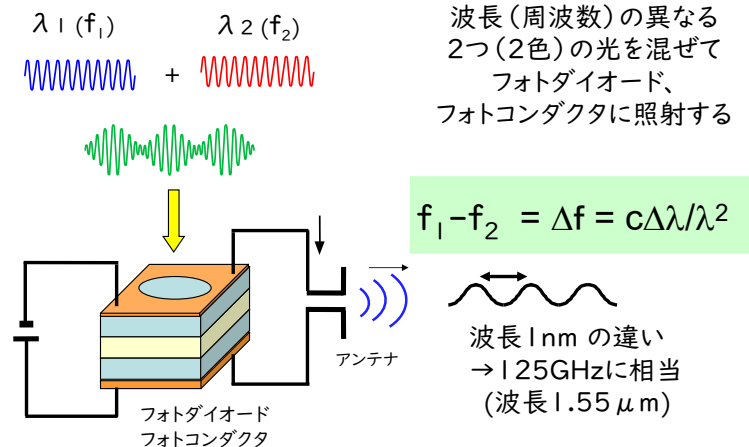
最近の進展: K. Murate, S. Mine and K. Kawase, "Terahertz Parametric Generators and Detectors for Nondestructive Testing Through High-Attenuation Packaging Materials," in *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 29, no. 5: Terahertz Photonics, pp. 1-13, Sept.-Oct. 2023, doi: 10.1109/JSTQE.2023.3296989.

「パルス波」面制御法を用いた高強度テラヘルツ波の発生技術



János Hebling et al., "Velocity matching by pulse front tilting for large area THz-pulse generation," *Optics Express*, Vol. 10, No. 21 p.1161(2002).

フォトミキシングの原理



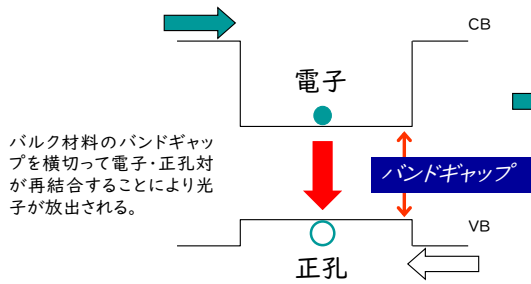
波長(周波数)の異なる
2つ(2色)の光を混ぜて
フォトダイオード、
フォトコンダクタに照射する

$$f_1 - f_2 = \Delta f = c\Delta\lambda/\lambda^2$$

波長 1nm の違い
→ 125GHz に相当
(波長 1.55 μm)

量子カスケードレーザ:原理

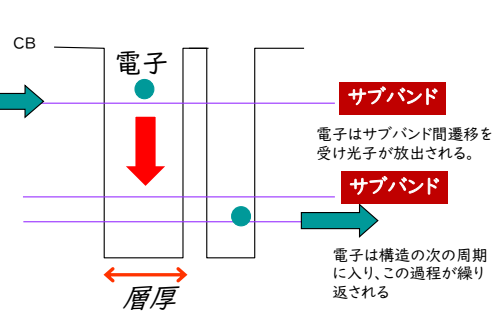
通常の半導体レーザ



バルク材料のバンドギャップを横切って電子・正孔対が再結合することにより光子が放出される。

材料でバンドギャップが決まり、
発振波長が決まる

量子カスケードレーザ

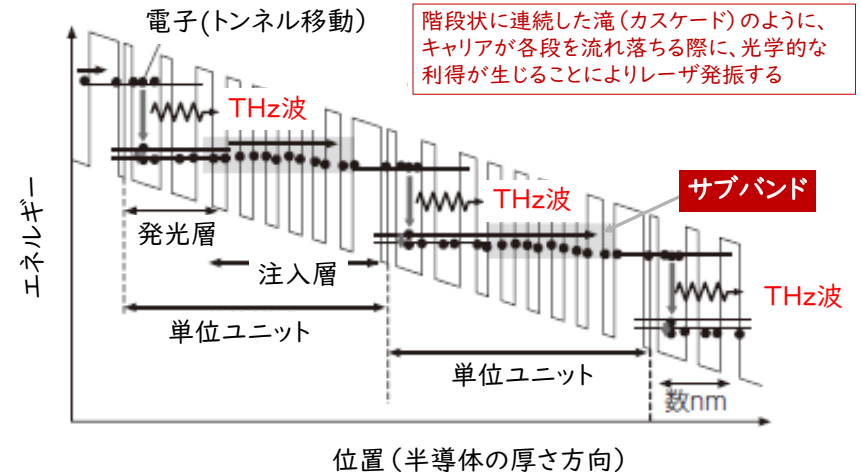


サブバンド
電子はサブバンド間遷移を受け光子が放出される。

サブバンド
電子は構造の次の周期に入り、この過程が繰り返される

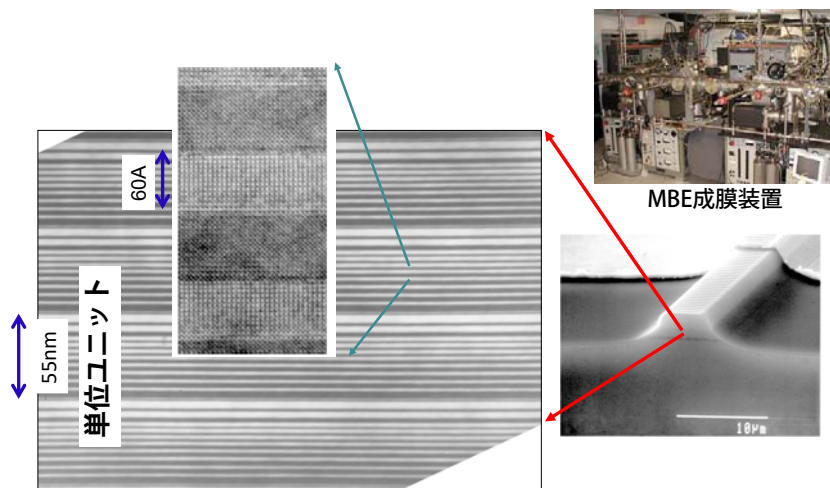
構造(膜厚等)で発振波長が決まる

サブバンド間遷移とカスケード構造



階段状に連続した滝(カスケード)のように、
キャリアが各段を流れ落ちる際に、光学的な
利得が生じることによりレーザ発振する

実際の膜構造

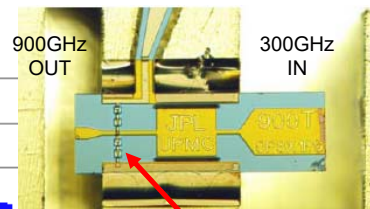
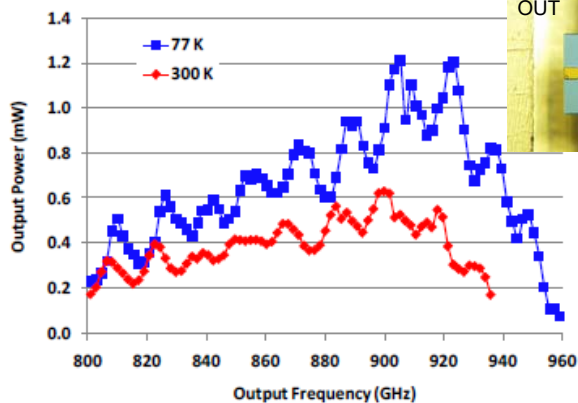


エレクトロニクス技術による信号発生

- ◆高出力マイクロ波増幅器+ 周波数逡倍器
- ◆トランジスタによる発振器 IC
化合物半導体: 基本波発振
Si系半導体: 逡倍回路とアレイ化
- ◆共鳴トンネルダイオード(RTD) 発振器
基本波発振
アレイ化

周波数通倍器 (マルチプライヤ)

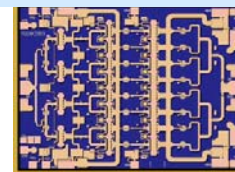
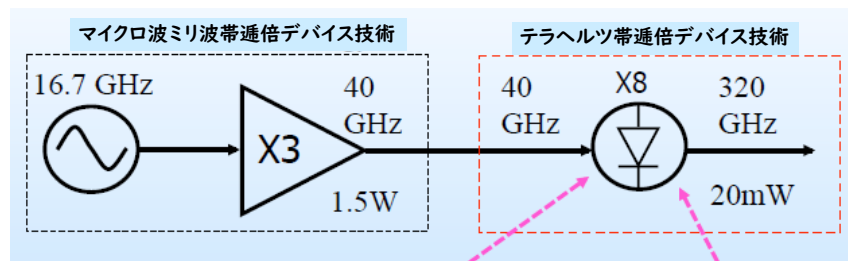
200mW (@100GHz) → 20 mW (@300GHz)
→ 1 mW (@900GHz)



ダイオード
(バラクタ)

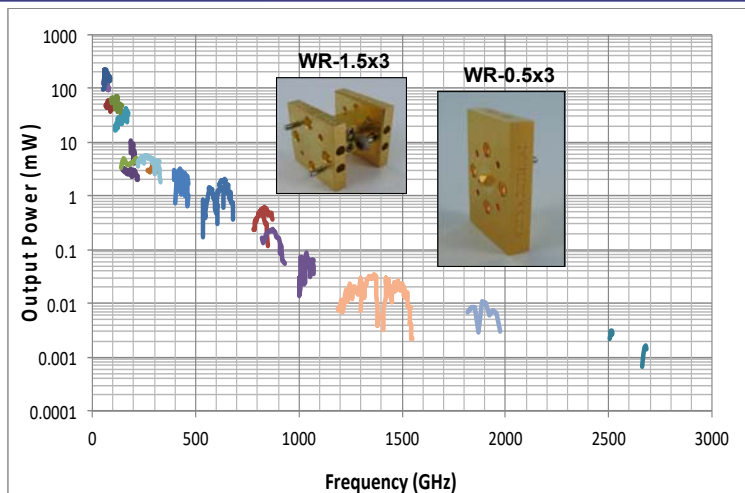
Imran Mehdi et al.,
IRMMW-THz 2009.

コマーシャル周波数通倍器

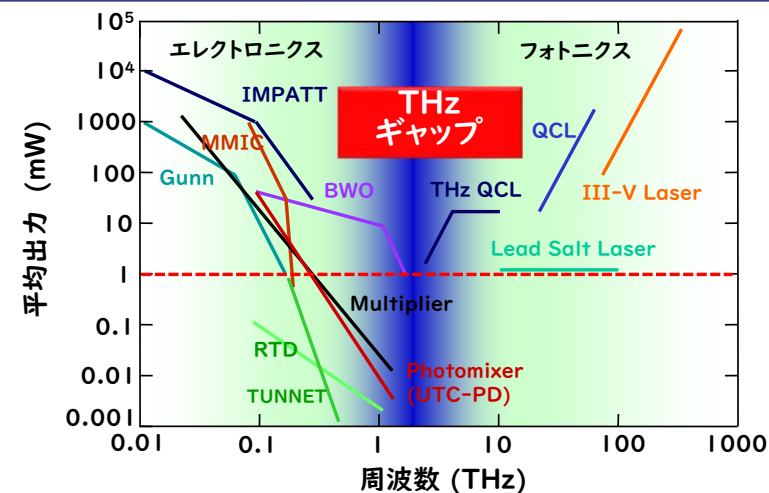


Ex) Triquint

周波数通倍器：バージニアダイオード(VDI)社



THz波の出力の限界: THzギャップ (当時の共通認識)



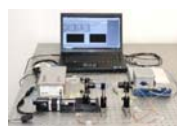
THz波を用いた科学・産業用機器



TeraView (UK)



Menlo Systems (Germany)

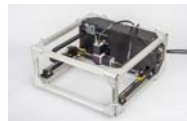


BATOP (Germany)

Ⓜ 現在、製造
されていないも
の含まれます



Ekspla (Lithuania)



LUNA (API) (US)



Rainbow Photonics (Swiss)



Nippo Precision (JPN)



Advantest (JPN)

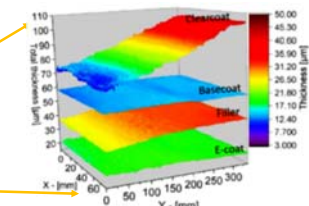


Pioneer (JPN)

THz波だけに出来る応用が存在：波長と透過性



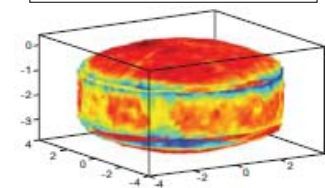
車体の塗装膜検査



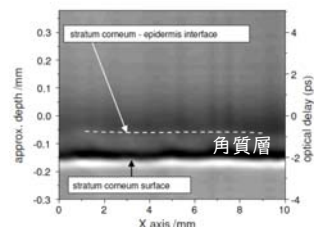
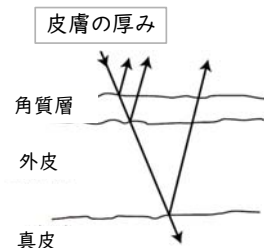
Appl. Phys. Lett. 109, 021105 (2016).

タブレットのコーティング検査
(Teraview)

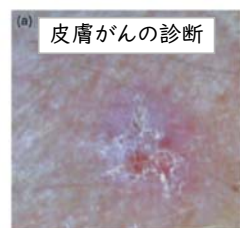
製紙プロセスの検査
(Advanced photonics Inc)



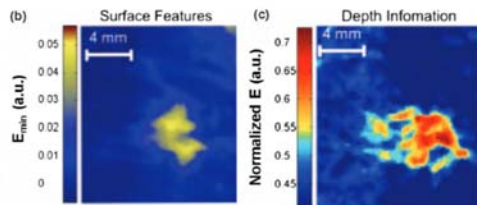
もっと身近な応用の可能性



Proc. SPIE, 4276, 2001.

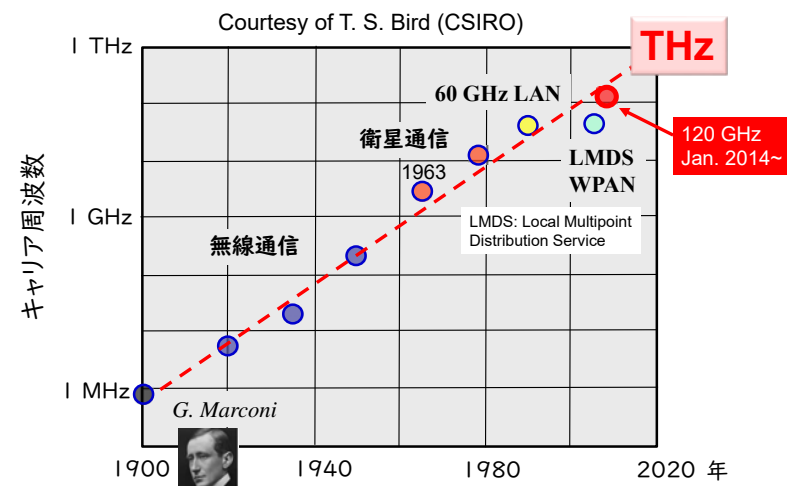


皮膚がんの診断



J. Appl. Phys. 125, 190901 (2019).

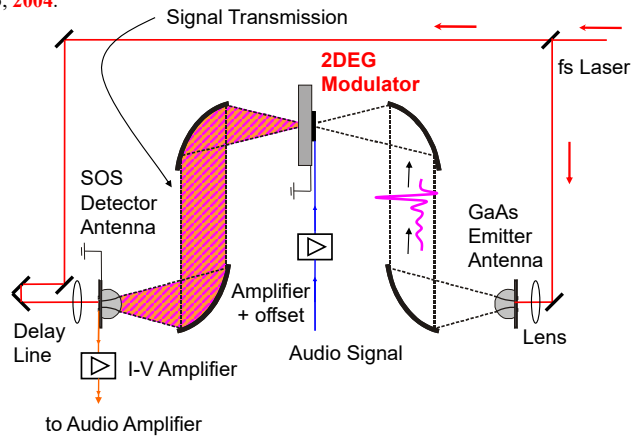
無線技術の進化とキャリア周波数の開拓



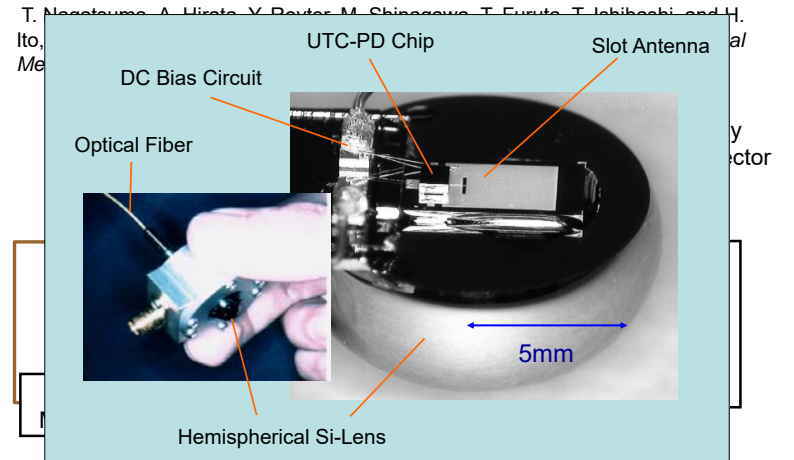
Courtesy of T. S. Bird (CSIRO)

THz無線の原点: THzパルス波

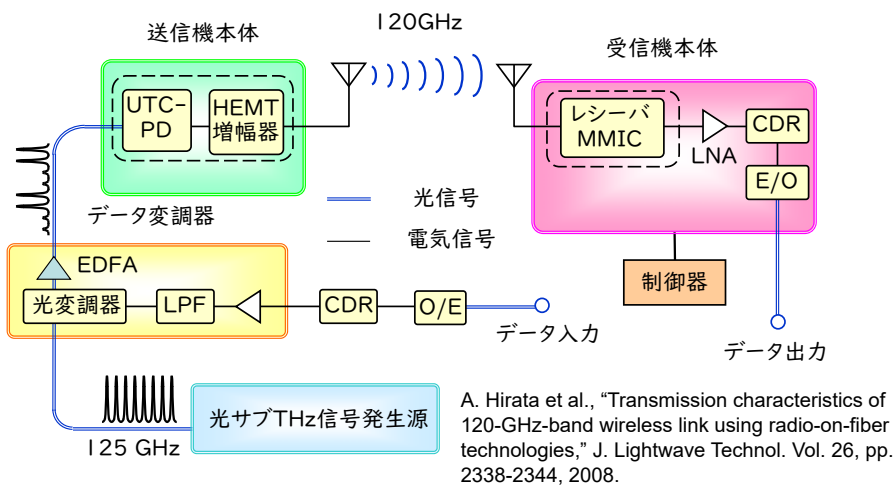
T. Kleine-Ostmann, K. Pierz, G. Hein, P. Dawson and M. Koch, "Audio signal transmission over THz communication channel using semiconductor modulator," *Electron. Lett.*, vol. 40, pp. 124-125, 2004.



120GHz帯無線通信の最初の実験



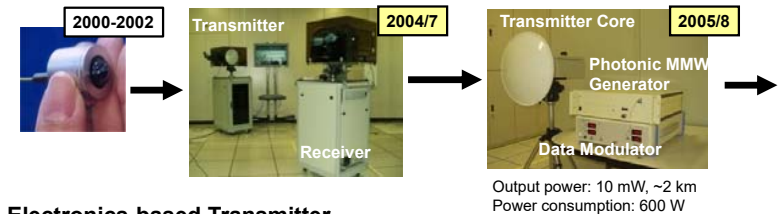
120GHz帯無線：送信機に光技術を用いた方式



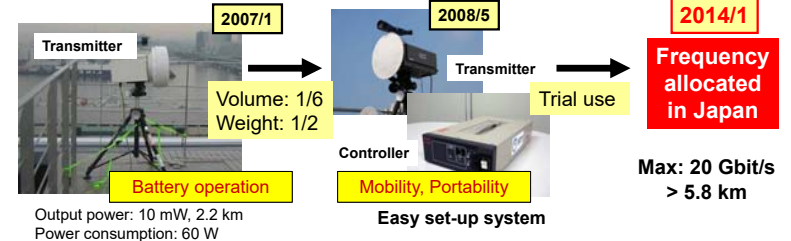
A. Hirata et al., "Transmission characteristics of 120-GHz-band wireless link using radio-on-fiber technologies," *J. Lightwave Technol.* Vol. 26, pp. 2338-2344, 2008.

120GHz帯無線の歩み (2000年代)

Photonics-based Transmitter



Electronics-based Transmitter

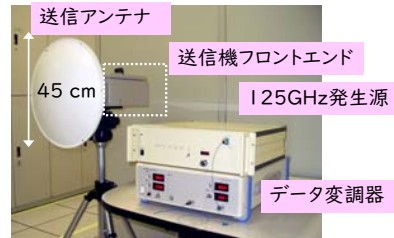


120GHz帯無線送信機: 光技術を用いた方式



送信機仕様

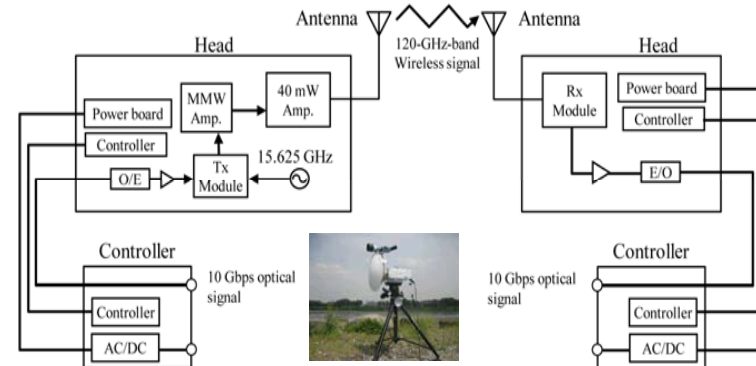
- ・ 中心周波数 125GHz
- ・ 占有帯域 116.5~133.5GHz
- ・ 変調方式 ASK変調
- ・ 出力 10mW
- ・ 最大伝送距離 1.5km
- ・ アンテナ カセグレンアンテナ
- ・ アンテナ利得 49dBi



InP MMIC技術による120GHz帯無線システム

10 Gbit/s, >5 km, InP-HEMT MMIC with FEC
偏波多重方式により双方向

A. Hirata et al., 2010 IEEE Intern. Conf. on Wireless Information Tech. and Sys.(ICWITS), 207. 1, 2010.



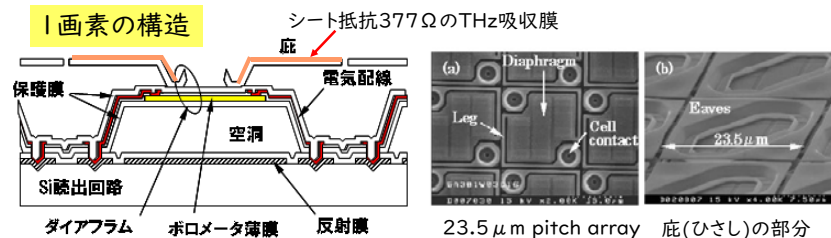
120GHz帯無線の歩み (まとめ)

Seeds-oriented research

- 2000** 120-GHz band Transmitter (photonics-assisted)
10 Mbit/s transmission (tabletop)
- 2001** 3 Gbit/s transmission
- 2002** 10 Gbit/s transmission (<10 m)
wideband receiver
- 2003** Component & system for longer distance transmission
high-gain antenna (>100 m)
- 2004** First licensed system for experimental wireless unit (1 mW)
- 2005** Second licensed system with 10 mW
Tx: post-amplifier, Rx: MMIC
6-ch HDTV transmission: meets needs
- 2006** Demonstration at world-wide exhibitions
InterBEE (Japan), NAB (Las Vegas), IBC (Amsterdam)
- 2007** Third licensed system with all electronics (MMIC)
Exhibition at BIRTV 2007 (Beijing), >2 km
- 2008** Broadcasting use at 2008 Beijing Olympic Game

User-specific development

ボロメータ型テラヘルツカメラ: NEC



320x240 with 37 μm pitch,
640x480 with 23.5 μm pitch
NEP: 40pW@3.1 THz
1~7THzで感度有



N. Oda et al., Proc. of SPIE Vol. 6940, 69402Y, (2008)

IRV-T083 | NEC誘導光電事業部(当時)

THz技術の世代推移：“第4世代”

1980年代：超高速光エレクトロニクス

ピコ秒・フェムト秒パルスレーザ、フォトコンダクタ
化合物半導体デバイス、光通信の発展を牽引

1990年代：光技術によるTHz研究のブレイク

THzパルス波の進展⇒イメージング、分光の提案
THzパラメトリック発振器(1996)、UTC-PD(1996)

2000年代：THz波の産業応用の萌芽

通信応用(2002)、THz量子カスケードレーザ(2002)
分光システムの商品化、テラヘルツカメラ(2008)

2010年代：実用化に向けた新たな展開

電子デバイス・集積回路技術の進展(Siでも…)
計測技術の進展(スベアナ・ネットアナ)
周波数割当の議論

2020年代：“第5世代”マーケットの拡大へ

エレクトロニクスとフォトニクスの集積化

計測技術の進展：パワーメータ



VDI Erickson “PM4/5”

75GHz~2THz, 1μW~200mW
(吸収体+温度センサ, 参照センサと
差動動作させることで安定化、
1μWの測定には40秒の時定数要)



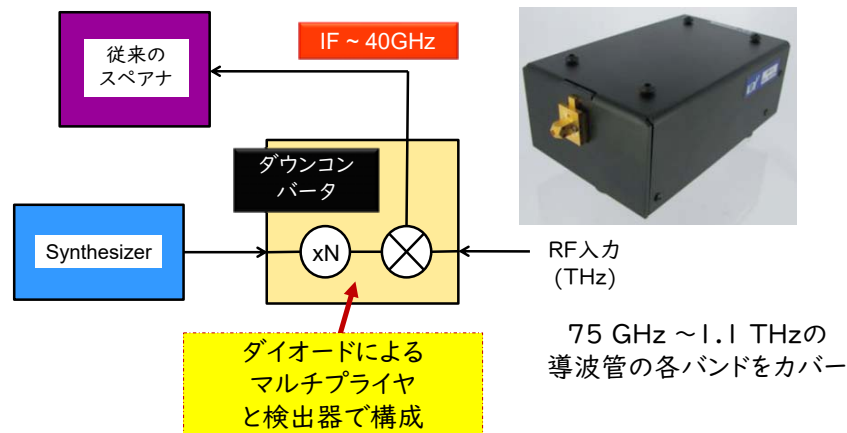
Gentec-EO “THz-B”
0.1T~30THz, 200nW~20mW
(焦電素子を利用しているので
別途光チョップが必要)



Ophir (オフィール) “3A-P-THz”
0.1T~3THz, 60μW~3W
(サーモパイル型; 吸収体+熱電対
と思われる, PTB: 独で校正)

計測技術の進展：スペクトラムアナライザ

VDI Mixer/Amplifier/Multiplier Chains (MixAMCs)



計測技術の進展：ネットワークアナライザ



Agilent (Keysight) + VDI Extender
50 GHz ~ 1.1 THz



Anritsu
70kHz ~ 110 GHz w/ coax.
現在、226GHzまで(右図)



Rohde & Schwarz
50GHz ~ 500 GHz
(0.5~1THz; option)

半導体集積回路技術の進展

化合物半導体(III/V) ICs

25nm InP HEMT, $f_{max}=1.5\text{THz}$,
(9-dB >1-THz amp)
GaN, $f_{max}=0.58\text{ THz}$
InP-GaAsSb DHBT, $f_{max}=1.18\text{ THz}$

Si-半導体 ICs

CMOS bulk/SOI/FinFETs,
 $f_{max}\approx 300\text{-}450\text{ GHz}$
(20nm~60nm node,
3nm applicable recently)
SiGe BiCMOS/SiGe HBT,
 $f_{max}\approx 700\text{GHz}$ (100~150nm)

ヘテロジニアス集積(異種チップ集積)

InP + SiGe
InP + SiC

電子・光融合集積

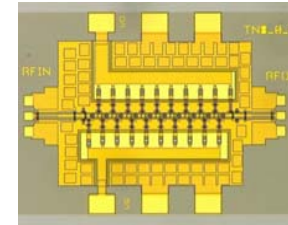
Optical modulator/optical waveguide/
Ge photodiode/ on Silicon

III-V族化合物半導体による集積回路技術が先行し、やがてシリコン(Si)半導体集積回路に置き換わるという歴史は続かない?

InP系電子デバイスの能力: 1THz増幅

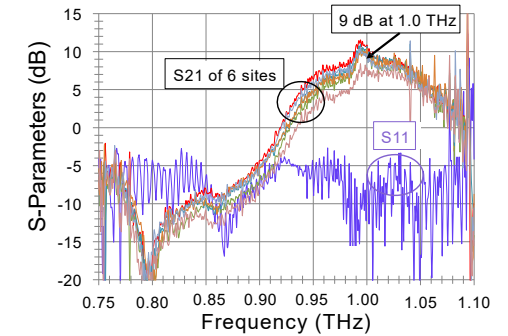
X. Mei, et al., "First Demonstration of Amplification at 1 THz using 25-nm InP High Electron Mobility Transistor Process," *IEEE Electron Dev. Lett.*, 36, pp. 327-329 (2015).

- 25-nm InP HEMT
- 10-stage common source
- 2-finger 8-um wide devices
- On-wafer measurements

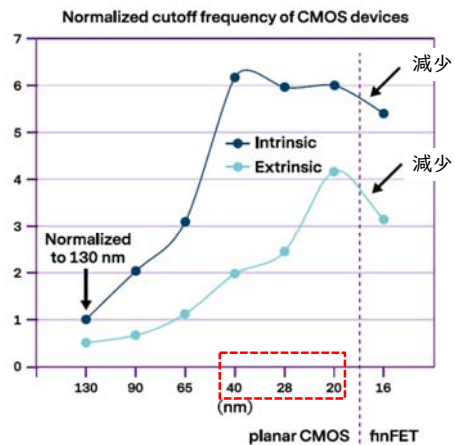


(基板厚25um)

9 dB Gain demonstrated on wafer at 1 THz



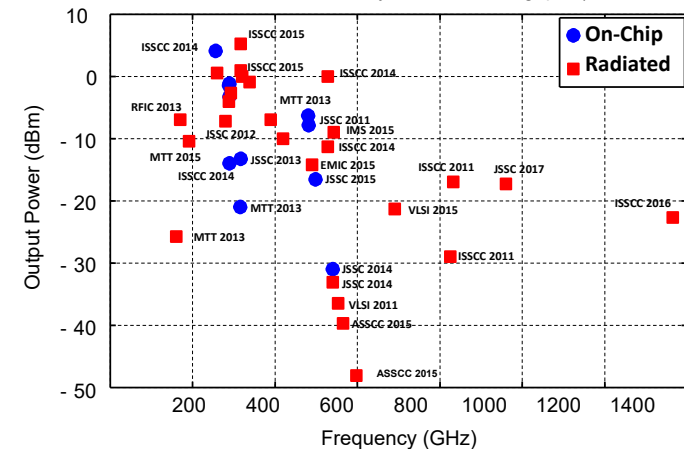
CMOSの f_T とテクノロジーノード



M.H. Wakayama, "Nanometer CMOS from a mixed-signal/RF perspective," Tech Dig. IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM) Technical Digest, pp. 17.4.1-17.4.4, 2013.

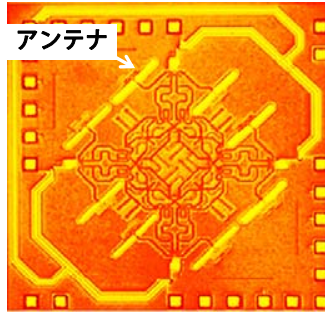
Si-CMOSでTHzの発生が可能に

Courtesy of Prof. K. Sengupta (IMS-WS 2017).



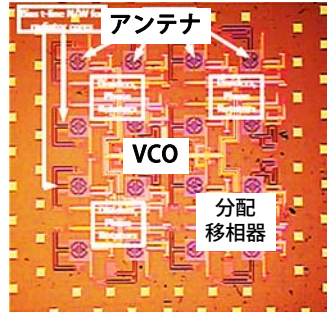
CMOSによるアレー発振器

260GHz 1mW アレー発振器
(65nm)



K. Sengupta and A. Hajimiri, ISSCC 2012. (Caltech)

280GHz 4x4 アレー発振器
(45nm)

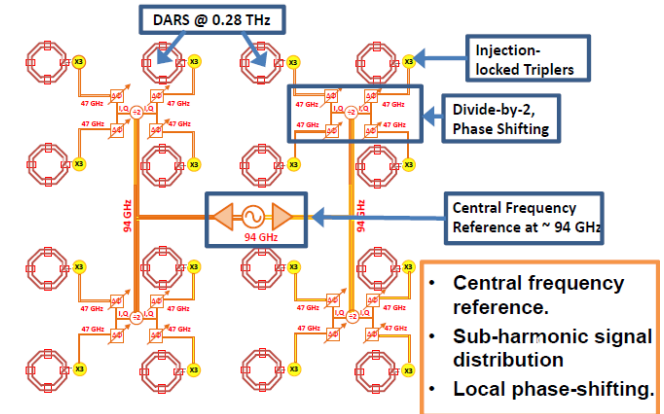


R. Han and E. Afshari, ISSCC 2013. (Cornel Univ.)

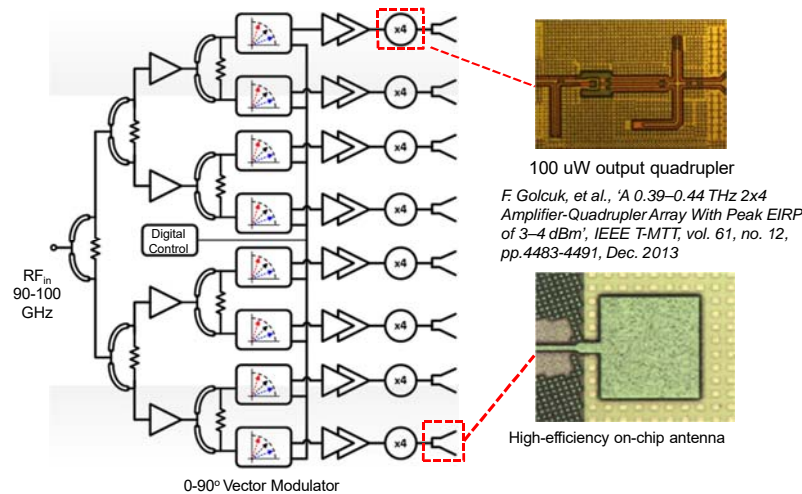
アレー型発振器の回路構成: 空間電力合成

K. Sengupta and A. Hajimiri (Caltech)

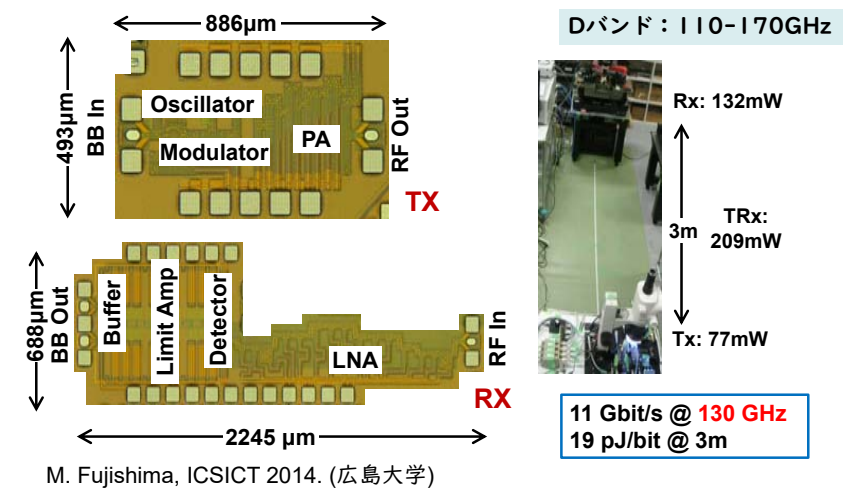
4x4 Beam-steering architecture at 0.28 THz



CMOS-way: 1x8 フェーズドアレイ



Si-CMOSによる130GHz帯送受信IC



増幅器: InP/GaAs vs. Si (>300 GHz)

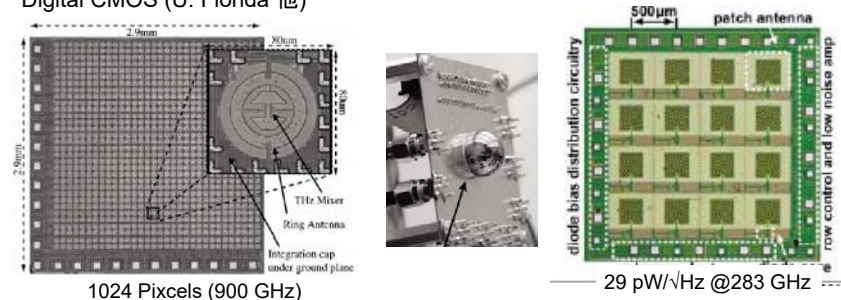
半導体	Tr性能	送信器の構成
InP/GaAs	$f_{RF} < f_{max}$	
Si	$f_{RF} > f_{max}$	

Si-CMOS によるTHzカメラ

ISSCC2012より

① A 1kPixel CMOS Camera Chip for 25fps Real-Time Terahertz Image Applications (STMicroelectronics, 他)

② 280GHz and 860GHz Image Sensors Using Schottky-Barrier Diodes in 0.13 μ m Digital CMOS (U. Florida 他)

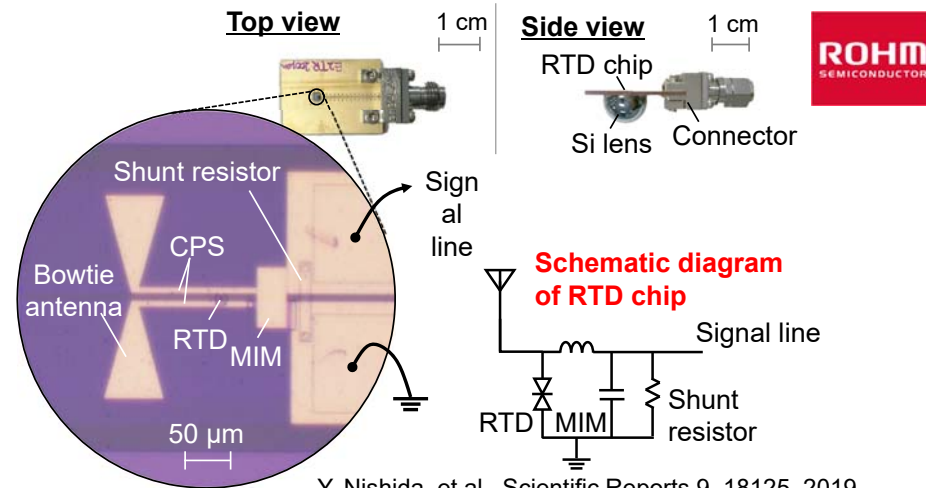


共鳴トンネルダイオード “70年代からの期待の星”

大阪大学では2010年頃から検討をスタート



RTD モジュール



Y. Nishida, et al., Scientific Reports 9, 18125, 2019.

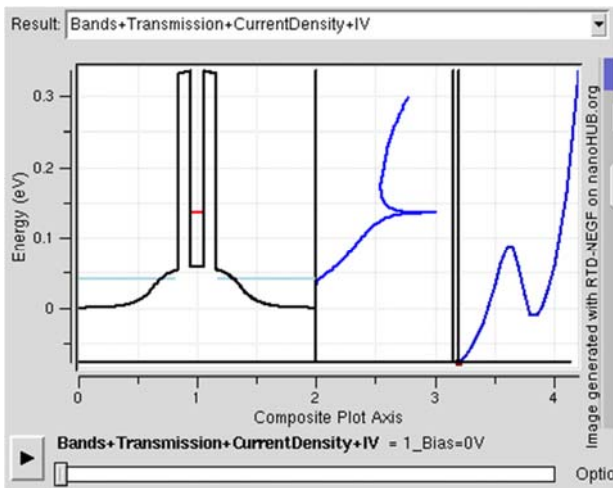


バンド構造 vs. 直流I-V特性

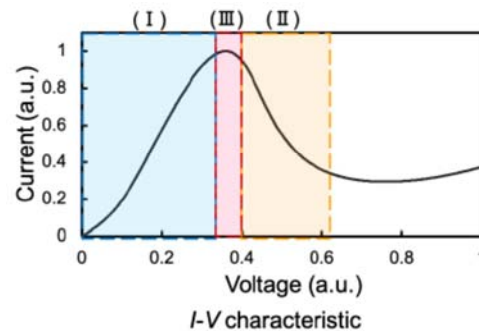
二つのポテンシャル障壁に囲まれた量子井戸中のサブバンドが形成。

入射してくる電子のエネルギーが、サブバンドのエネルギーと一致した時、障壁を通り抜ける現象。

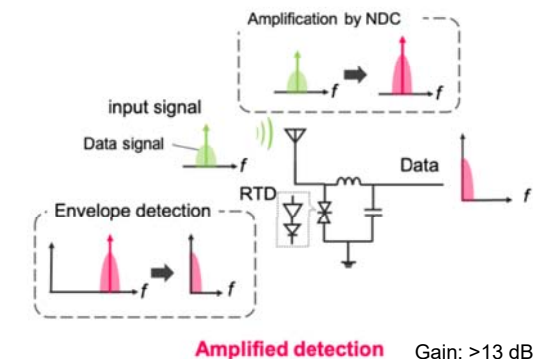
その結果、微分負性抵抗特性が現れる。



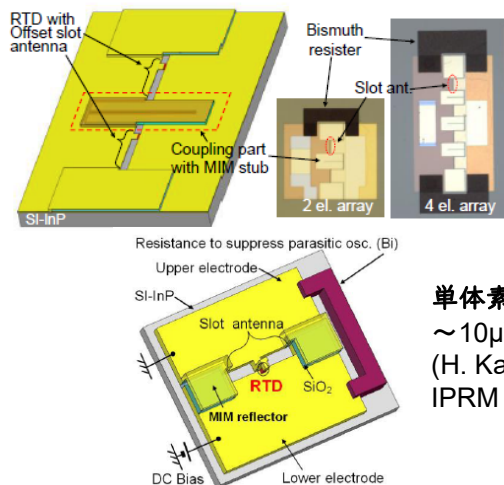
増幅検波動作



A. Oshiro et al., IEICE Electronics Express 19 (2), 20210494-20210494, 2022.



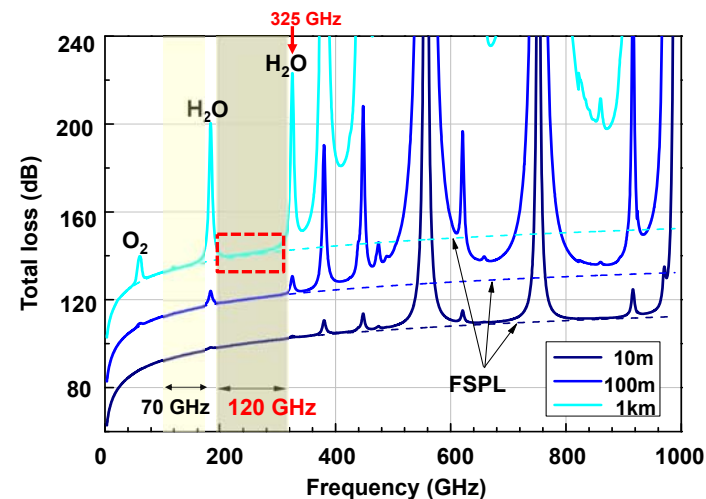
先駆的なRTD発振器の研究: 東京工業大学



2 素子アレー
610 μ W @624GHz
(S. Suzuki et al.,
IEEE J. Select. QE,
2012)

単体素子
~10 μ W @1.4 THz
(H. Kanaya et al.,
IPRM 2012)

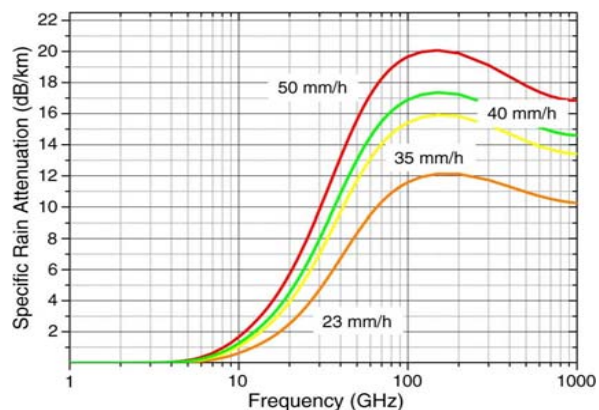
大気吸収から決まる周波数帯域: 200GHz~320GHz



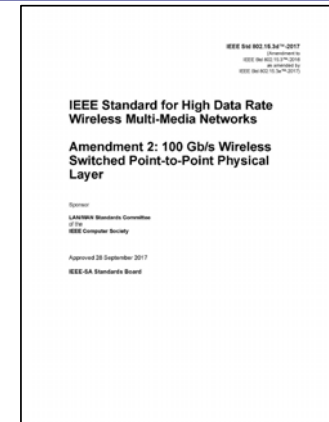
FSPL:
Free
Space
Propagation
Loss

降雨の影響

T. Schneider et al., "Link budget analysis for terahertz fixed wireless links," IEEE Trans. THz Science and Tech., Vol. 2, No.2 , pp. 250-256 (2012).



標準化の議論 : IEEE Standardization: Oct. 2017



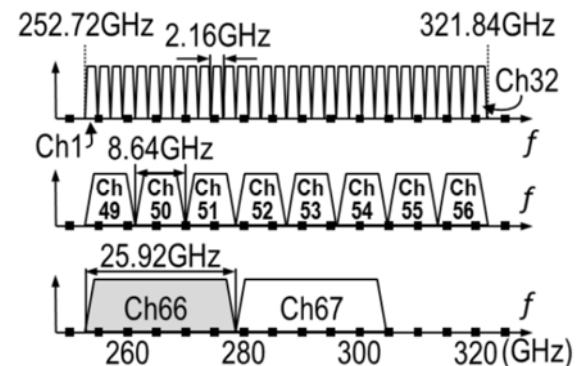
Standardization of the PHY and MAC layers of wireless systems at frequencies from 252 GHz to 325 GHz for use cases such as kiosk downloading, inter-chip/inter-board communications, data center communications, and mobile fronthaul/backhaul.

テラヘルツ無線の用途と技術要求

用途	動作環境	通信距離	伝搬条件	アンテナ位置決め
固定無線 (FWA)	バックボーンNW リンク 固定・屋外	数100m~ 数km	見通し通信 大気減衰の影響	高指向性 エンジニアが 位置決め
THzナノセル	モバイルNWの 一部 屋内・屋外	<100m	見通し・非見 通し(動的変化)	自動ビーム位 置決めが必要
WLAN/WPAN	アクセスポイント への接続 主に屋内	<10~100m	同上	同上
キオスク ダウンロード	屋内・移動	<0.1~1m	見通し Tx/Rx多重反射	同上 (手動も可)
短距離での 機器接続	屋内 主にデスク	<0.1m	見通し マルチパス	同上
ボード間通信	コンピュータ 装置内	<0.1m	同上	位置決め固定 自動の用途有

IEEE Std 802.15.3d: Channels (一部)

252~325 GHz



周波数割り当ての議論：世界無線通信会議（WRC2019）

World Radio-communication Conference 2019

目的：周波数や衛星軌道の利用方法等に関する国際的な取決めを規定した無線通信規則の改正

期間：2019年10月28日～11月22日

場所：エジプト（シャルム・エル・シェイク）

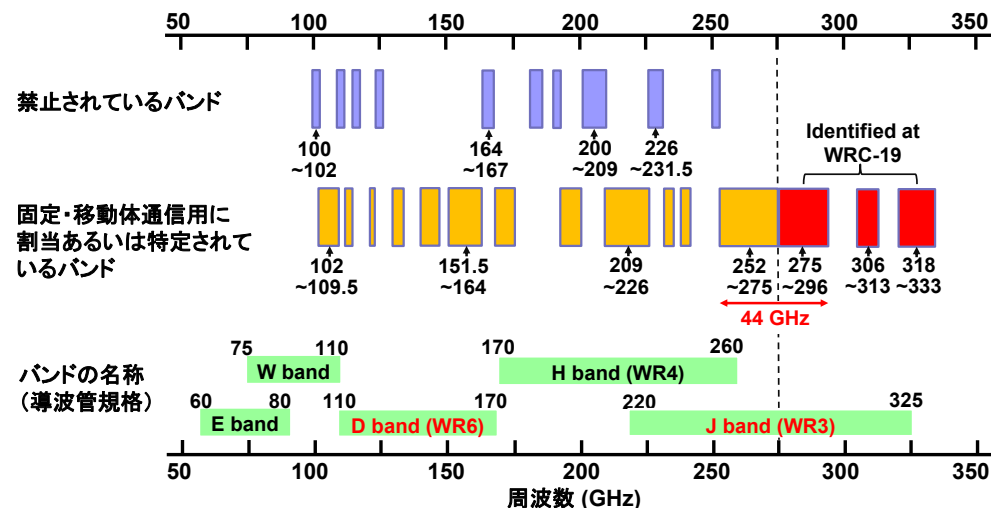
162か国、約4000名が参加

議題1.15：

275-450GHzの周波数範囲で運用する陸上移動及び固定業務アプリケーションへの使用の**特定**に向けたコンセンサスの形成（周波数割り当ての前の段階であるが、初めて公式に利用の意思が共有される）

結果：275-296 GHz (21 GHz) 306-313 GHz (7 GHz)
318-333 GHz (15 GHz) 356-450 GHz (94 GHz)

周波数の選択: 国際的なコンセンサス



我が国のテラヘルツ無線は世界を先導

2014年1月30日：120GHz帯の周波数割り当て

周波数割り当て計画の一部を変更する告示案

～120GHz帯放送事業用無線局 (FPU)の導入等に係る制度整備～

参考

◎変更概要

- 116GHzから134GHzまで [116-119.98GHz*, 119.98-122.25GHz*, 122.25-123GHz, 123-130GHz*, 130-134GHz]
 - ・ 移動業務[無線局の目的: 放送事業用]を新たに分配。(●)120GHz帯放送事業用無線システム (FPU)の導入に係る変更
 - ※国際分配で「移動業務」が分配されていない周波数帯においては、脚注「J84」を付して二次業務として分配
 - 【参考】J84: 移動業務によるこの周波数帯の使用は、この周波数割当表に従って運用する他の無線局又は受信設備に有害な混信を生じさせてはならず、他の無線局による有害な混信からの保護を要求してはならない。
- 915-930MHz
 - ・ 一般業務の使用において移動体識別用での限定を解除。(●)スポーツ競技連絡用の無線システムの導入に係る変更
- 710MHzから770MHzまで [710-714MHz, 714-750MHz, 750-770MHz]
 - ・ 運用が終了したアナログテレビジョン放送に係る規定の削除。

中心周波数: 125GHz 周波数帯域: 18GHz

120GHz帯の周波数割り当て

周波数	114.5~116	116~122.5	122.5~123	123~130	130~134	134~136
		120 GHz band (center: 125 GHz / 18GHz bandwidth)				
用途	地球観測 電波天文 宇宙探査	地球観測 宇宙探査	固定無線 移動無線 衛星通信 アマチュア	衛星通信 ナビゲーション 電波天文	地球観測 固定無線 衛星間通信 電波天文	アマチュア 衛星通信 電波天文

60GHz帯では最大で9GHzが割り当て2倍の帯域!

米国が動いた：2019年12月

米FCCがミリ波を超えるテラヘルツ帯を実験用として開放へ



Media Contact:
Neil Grace, (202) 418-0506
neil.grace@fcc.gov

ripe: fully matured and ready to be used

For Immediate Release

FCC TAKES STEPS TO OPEN SPECTRUM HORIZONS FOR NEW SERVICES AND TECHNOLOGIES

WASHINGTON, March 15, 2019—The Federal Communications Commission adopted new rules to encourage the development of new communications technologies and expedite the deployment of new services in the spectrum above 95 GHz. This spectrum has long been considered the outermost horizon of the usable spectrum range, but rapid advancements in radio technology have made these bands especially ripe for new development.

2019年2月のFCC報告書より

FCC FACT SHEET Spectrum Horizons

First Report and Order – ET Docket 18-21

Background: Airwaves above 95 GHz have long been considered at or beyond the outermost edge of usable spectrum. However, the Commission has seen an uptick in interest in conducting experiments using such spectrum and the inclusion of these frequencies in rulemaking petitions. We presently have no rules to permit licensed or unlicensed communications in this region of the spectrum, other than by amateur operators or on an experimental basis. As a result, the Commission has been studying ways to provide attractive opportunities for technology development that will promote the deployment of new services and devices in this spectrum and keep the United States at the forefront of wireless innovation.

II. BACKGROUND

3. Both industry and academia have expressed interest in the bands above 95 GHz, as evidenced by the wide range of ongoing research and experimentation. Institutions such as Brown University and the New York University Tandon School are conducting propagation measurements at frequencies as high as 400 GHz. Companies such as Boeing and Raytheon have undertaken testing of antennas and radar receivers at frequencies near 100 GHz.⁵ Frequencies above 95 GHz have also been identified as optimal for instantaneous temporary data links that can enable the transmission of large bandwidth uncompressed high-definition (HD) video signals and other high-speed data for other types of applications. For example, in 2008, Japan's NTT used wireless links in the 120 GHz band to provide live TV coverage of the 2008 Beijing Olympics.⁶ Further, the shorter wavelengths associated with frequencies above 95 GHz may be particularly well-suited for non-communication sensing applications such as

シリコン（砂）でTHzギャップを埋める！

テラヘルツ技術は、システムの集積化技術の進展によって、より小型で安価になり、私達の身の回りで使われるようになるだろう！

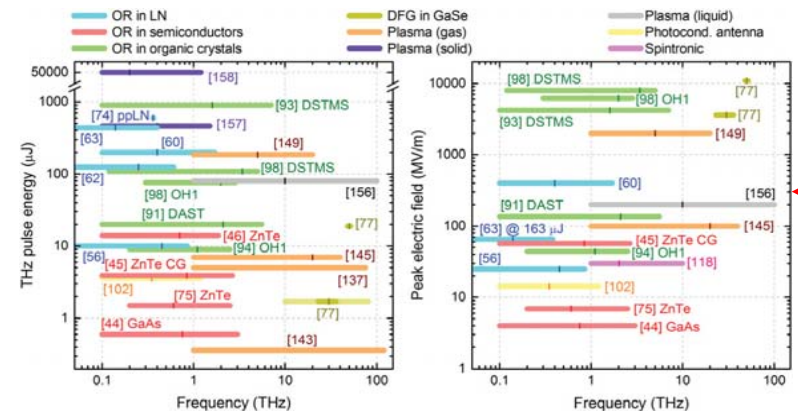
“Opening Terahertz for Everyday Applications,” K. K. O et al., IEEE Communications Magazine, vol. 57, no. 8, Aug. 2019.



“Filling the Gap with Sand,” S. Naghavi et al., IEEE Solid-State Circuits Magazine, Summer 2019.

THzギャップ “出力の谷” も埋まりつつある：光非線形素子

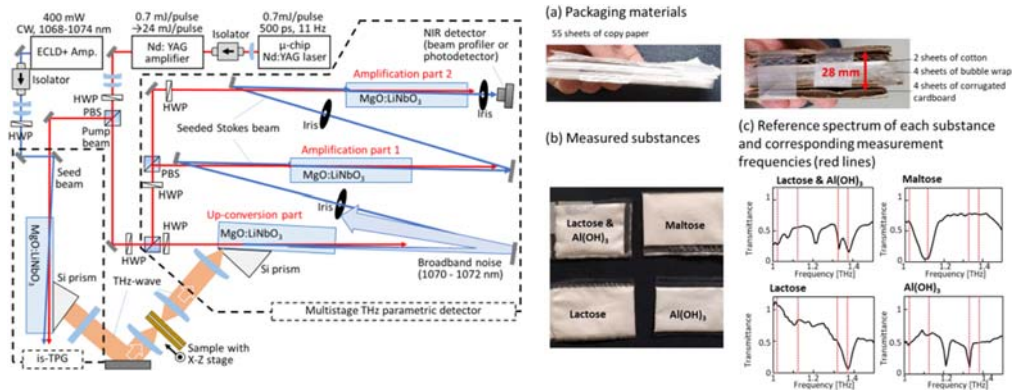
Laser-Driven Strong-Field Terahertz Sources



Advanced Optical Materials, Volume: 8, Issue: 3, First published: 03 December 2019, DOI: (10.1002/adom.201900681)

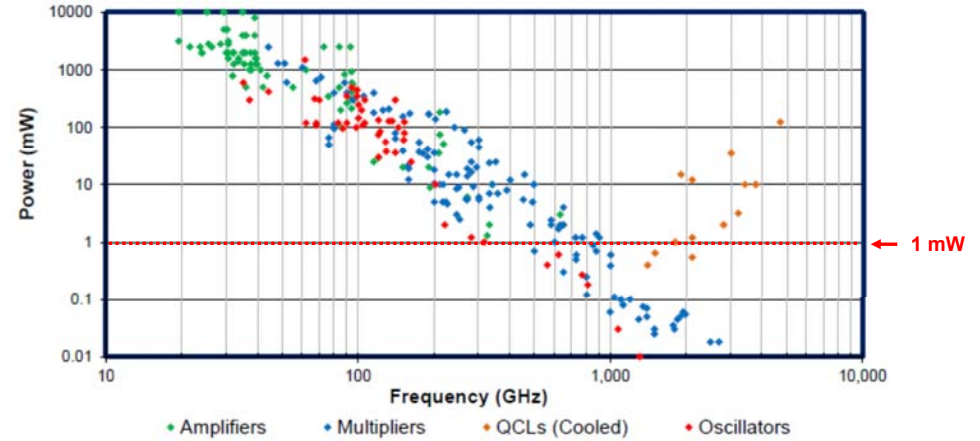
高出力化がもたらすブレイクスルーの例：名古屋大学

パラメトリック発生器と検出器により、ダイナミックレンジが>120dBに



K. Murate, et al., IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 29, no. 5, pp. 1-13, Sept.-Oct. 2023.

THzギャップ “出力の谷” も埋まりつつある：半導体素子



<https://www.vadiodes.com/images/AppNotes/ApplicationNote-SummaryofSolid-StateSources.pdf>

THz技術の世代推移：“第5世代”

1980年代：超高速光エレクトロニクス

ピコ秒・フェムト秒パルスレーザ、フォトコンダクタ
化合物半導体デバイス⇨光通信の発展を牽引

1990年代：光技術によるTHz研究のブレイク

THzパルス波の進展⇨イメージング、分光の提案
THzパラメトリック発振器(1996)、UTC-PD(1996)

2000年代：THz波の産業応用の萌芽

通信応用(2002)、THz量子カスケードレーザ(2002)
分光システムの商品化、テラヘルツカメラ(2008)

2010年代：実用化に向けた新たな展開

電子デバイス・集積回路技術の進展(Siでも…)
計測技術の進展(スベアナ・ネットアナ)
周波数割当の議論

2020年代：“第5世代” マーケットの拡大へ

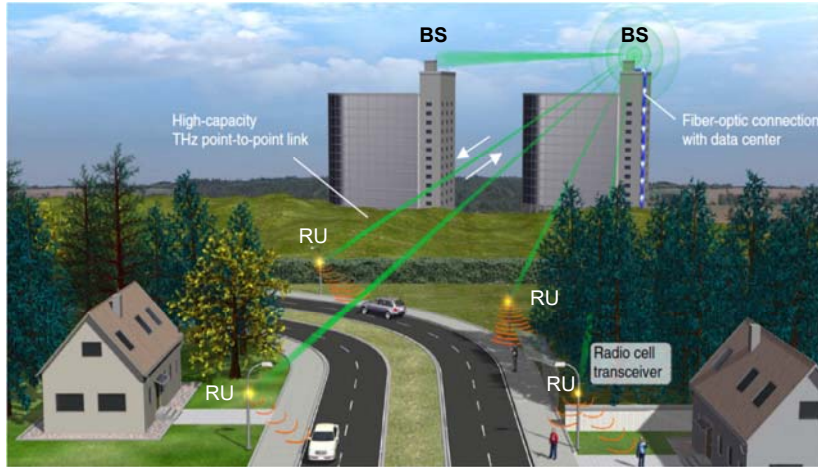
エレクトロニクスとフォトニクスの集積化

Beyond 5G(6G/7G)に求められる伝送速度

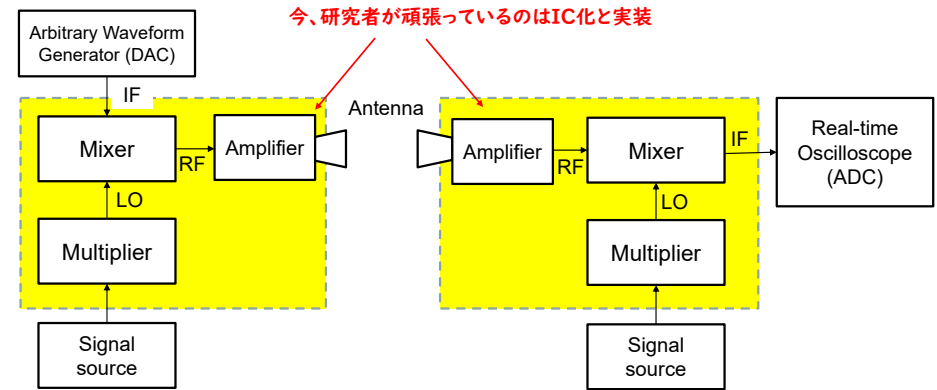
2000	2010	2020	2030	2040
100M bit/s	1G bit/s	10G bit/s	100G bit/s	1T bit/s
3G	LTE/4G	5G	6G	7G

無線と光ファイバネットワークとの融合

T. Harter et al., Optica, vol. 6, 1063(2019).

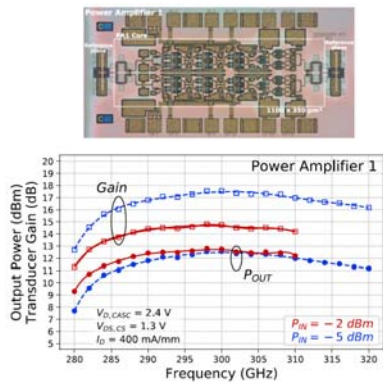


300 GHzまではすべての部品が購入できる!



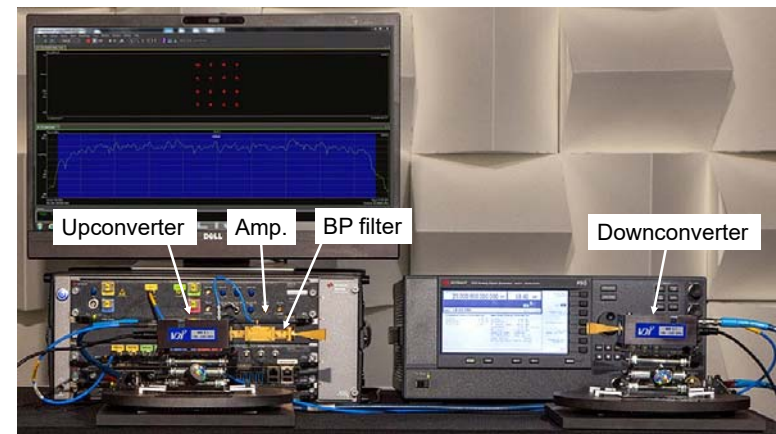
Jバンドの実用的な増幅器の例

InGaAs mHEMT 300 GHz



L. John et al., IEEE Trans. THz Science Tech., vol. 10, no. 3, pp. 309-320, 2020

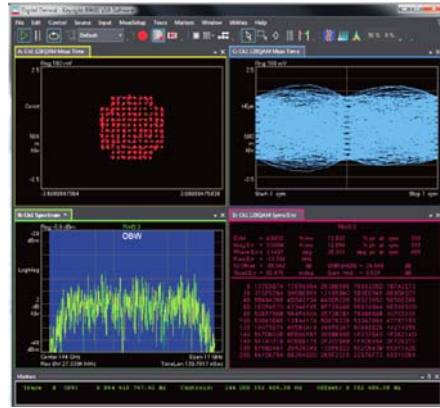
Dバンド無線の例: Keysight/ LG



<https://www.temcom.com/6g-keysight-and-lg-implement-high-speed-transmission-at-sub-thz-frequencies/> (2022/2)

144 GHzでの実験結果の例

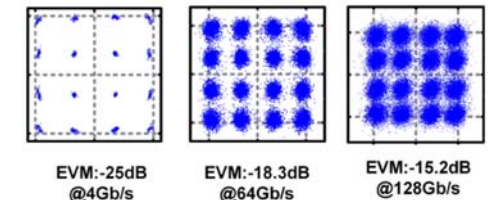
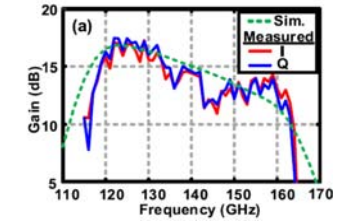
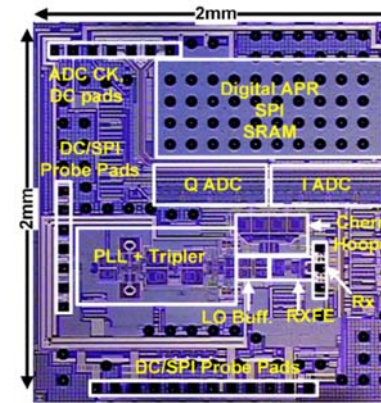
128 QAM at 144 GHz, 10 GHz occupied bandwidth 8.8 Gbaud → 61.6 Gb/s



<https://www.keysight.com/jp/ja/assets/7120-1082/white-papers/A-New-Sub-Terahertz-Testbed-for-6G-Research.pdf>

22nm Fin FETによるDバンド受信器IC (Intel)

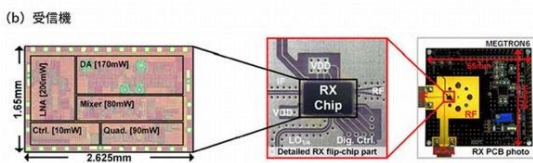
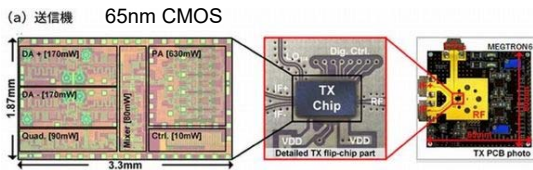
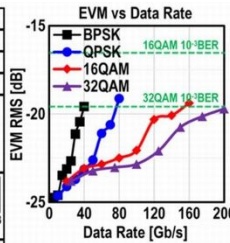
A. Agrawal et al., "A 128-Gb/s -Band Receiver With Integrated PLL and ADC Achieving 1.95-pJ/b Efficiency in 22-nm FinFET," IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 58, no. 12, pp. 3364-3379, Dec. 2023.



Dバンド送受信器ICによる通信実験 (東工大/NICT)

C. Liu et al., "A 640-Gb/s 4x4-MIMO D-Band CMOS Transceiver Chipset," 2024 IEEE Symposium on VLSI Technology & Circuits, June 2024.

Modulation	16QAM	32QAM
Symbol Rate	40Gbaud	40Gbaud
Data Rate	160Gb/s	200Gb/s
EVM (RMS)	-19.3dB	-19.7dB
Constellation (Equalized)		
Spectrum (Single-Carrier)		

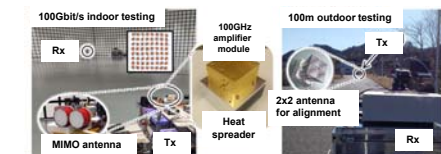
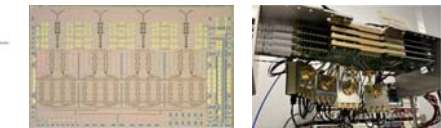
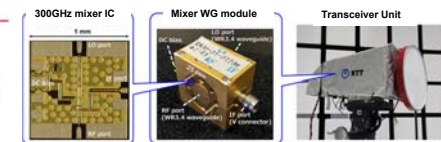
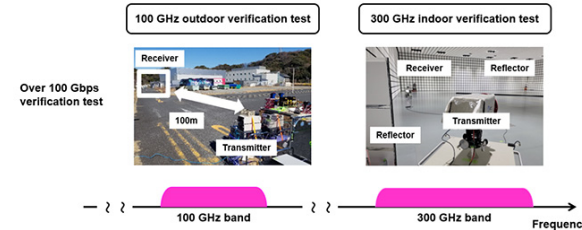


NTT docomo/NTT/NEC/Fujitsu によるプレスリリース(April 2024)

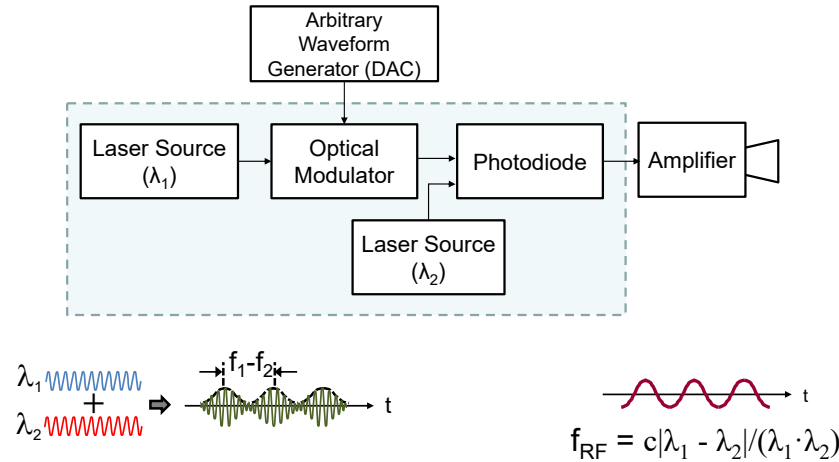
Press Releases



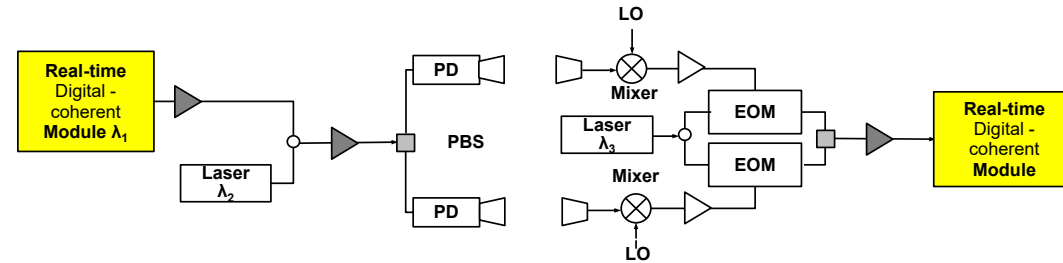
April 11, 2024
DOCOMO, NTT, NEC and Fujitsu Develop Top-level Sub-terahertz 6G Device Capable of Ultra-high-speed 100 Gbps Transmission



光技術を用いたアプローチ: 主に送信器

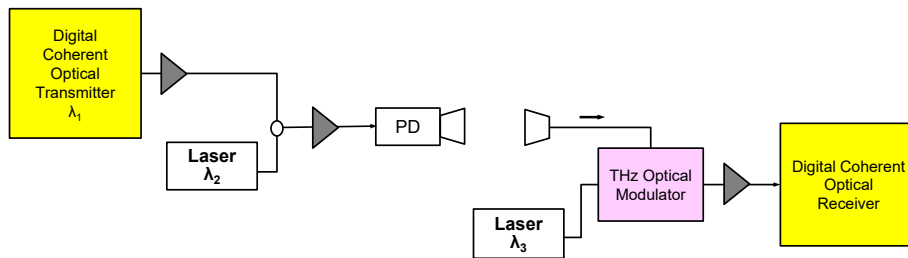


光-テラヘルツ-光リンクの構成例



J. Zhang, M. Zhu, M. Lei, B. Hua, Y. Cai1, Y. Zou, L. Tian, A. Li, Y. Huang, J. Yu, and X. You1, "Demonstration of real-time 125.516 Gbit/s transparent fiber-THz-fiber link transmission at 360 GHz~430 GHz based on photonic down-conversion," Tech. Dig. Optical Fiber Communication Conference, M3C. 2, 2022.

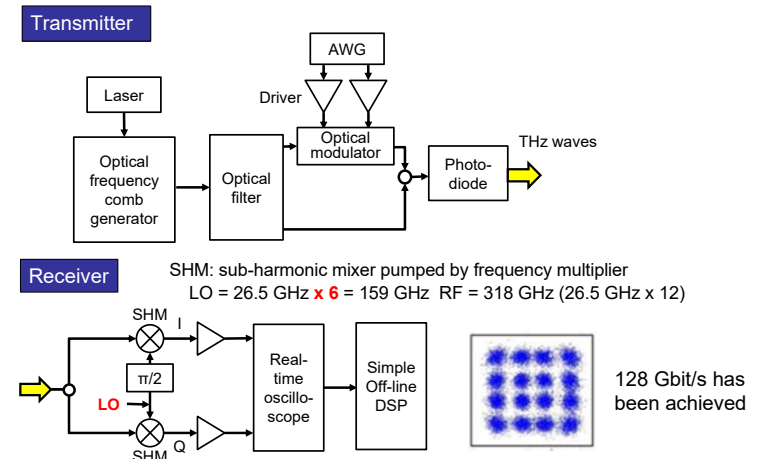
光技術を活用した受信器



Y. Horst, T. Blatter, L. Kulmer, B. I. Bitachon, B. Baeuerle, M. Destraz, W. Heni, S. Koepfli, P. Habegger, M. Eppenberger, E. D. Leo, C. Hoessbacher, D. L. Elder, S.R. Hammond, L. E. Johnson, L. R. Dalton, Y. Fedoryshyn, Y. Salamin, M. Burla, and J. Leuthold, "Transparent optical-THz-optical link at 240/192 Gbit/s over 5/115 m enabled by plasmonics," J. Lightwave Tech., vol. 40. no. 6, pp. 1690-1697, 2022

周波数安定化送信器とダイレクトI/Q受信器の構成

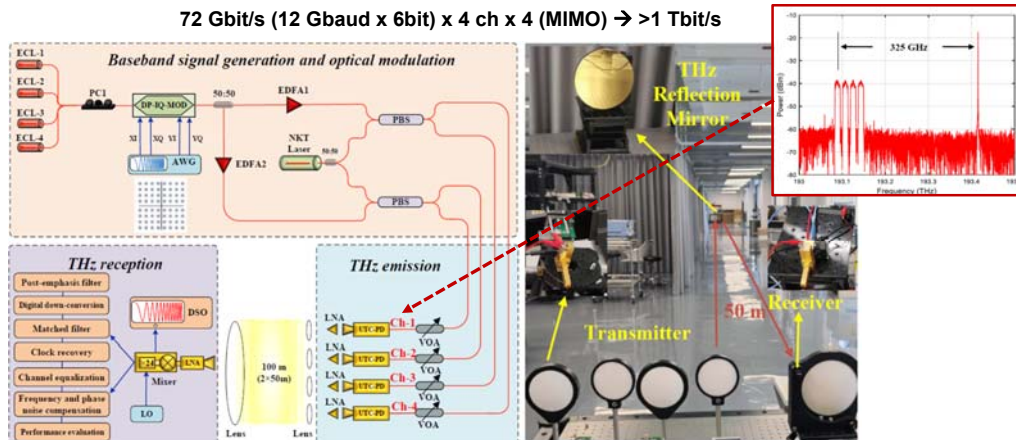
R. Igarashi et al., OptoElectronics and Communications Conference (OECC2022).



Carrier-aggregated MIMO Offers > 1-Tbit/s Capacity

Hongqi Zhang et al., "300 GHz photonic-wireless transmission with aggregated 1.034 Tbit/s data rate over 100 m wireless distance," OFC2024.

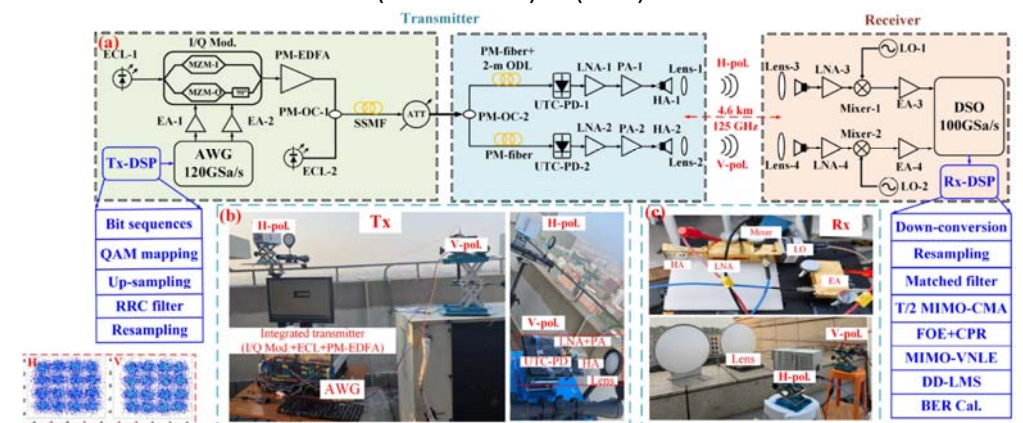
72 Gbit/s (12 Gbaud x 6bit) x 4 ch x 4 (MIMO) → >1 Tbit/s



D-band (125 GHz) 200-Gbit/s 4.6-km Transmission

Yi Wei et al., "Demonstration of 200 Gbps D-band Wireless Delivery in a 4.6 km 2x2 MIMO system," OFC2024.

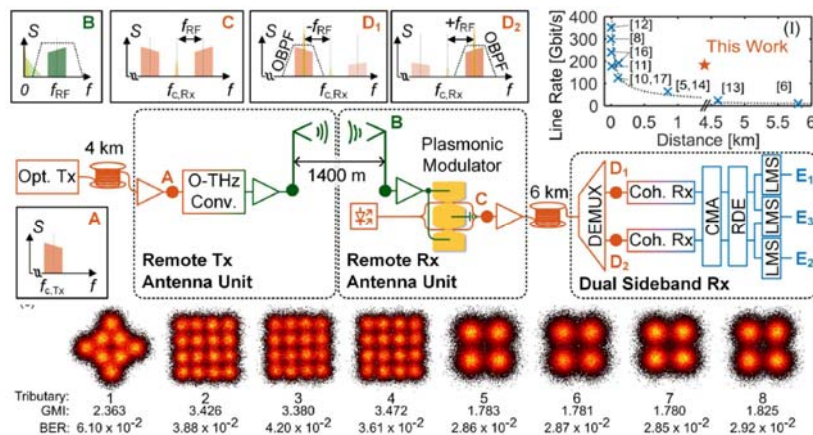
100 Gbit/s (25Gbaud x 4bit) x 2 (MIMO) → 200 Gbit/s



J-band (226 GHz) 160-Gbit/s 1.4-km Transmission

Tobias Blatter et al., "Dual-Sideband Receiver Enabling 160 Gbps Direct subTHz to-optical Conversion over 1400 m," OFC2024.

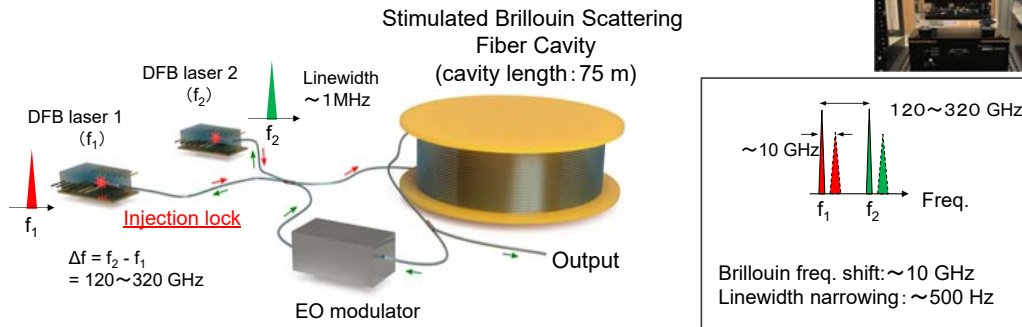
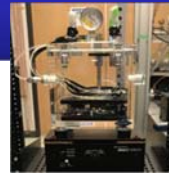
8 FDM channels are aggregated → Total counts > 184 Gbit/s (line rate) @226 GHz.



THz constellations diagrams are still poor due to lack of SN



ブリルアン光源@ 300 GHz

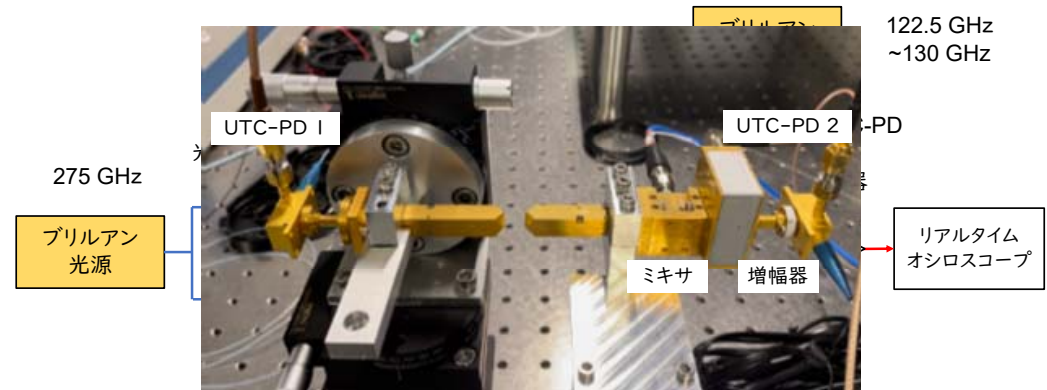


The frequency can be adjusted arbitrarily by adjusting the central wavelength of the continuous wave light source (LD). (120-320GHz)



送受信に“光クロック”を用いた実験

K. Maekawa et al., “300-GHz-band Wireless Link Using Photonics-based Ultralow-noise Transmitter and Receiver,” OFC2023, Mar. 2023.



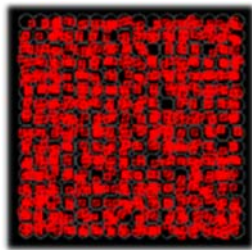
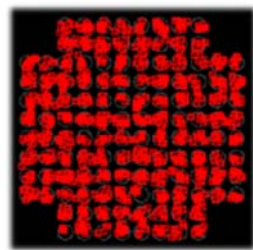
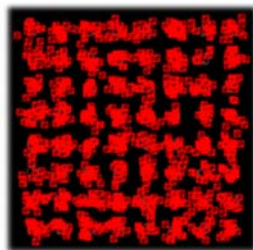
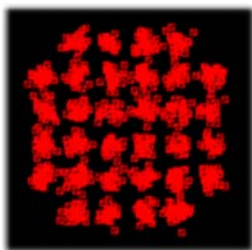
近距離伝送実験結果

32QAM/47Gbaud
235 Gbit/s

64QAM/42Gbaud
252 Gbit/s

128QAM/25Gbaud
175 Gbit/s

256QAM/15Gbaud
120 Gbit/s



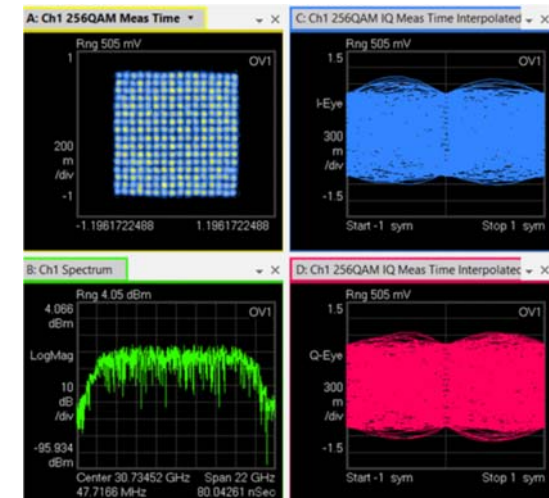
EVM: 11.1%
BER: 1.7×10^{-3}

EVM: 11.1%
BER: 3.22×10^{-3}

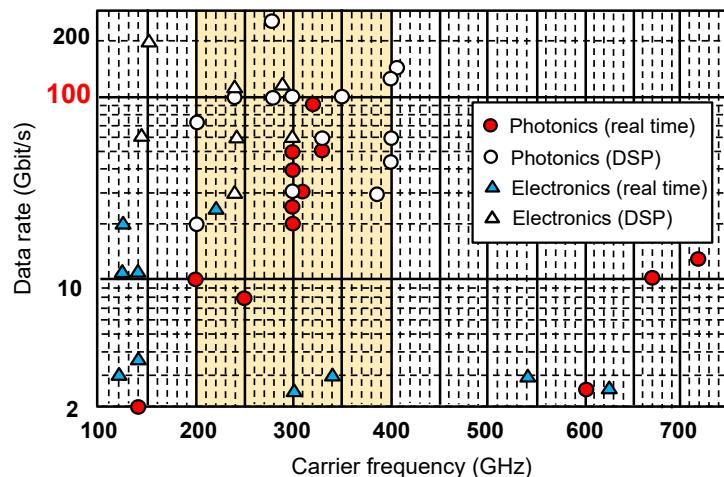
EVM: 3.33%
BER: 1.87×10^{-3}

EVM: 2.47%
BER: 1.62×10^{-3}

120Gbit/s@256QAMの詳細



最近のTHz無線の進展：シングルチャネルの伝送速度



6Gに向けて、技術的なポテンシャルは大きく進展した

- 100 Gbit/s の伝送速度が、100-400GHz のキャリア周波数で実現可能 (D and J バンド)。最近では、200 Gbit/s/ch へ。多重化 (周波数、空間、偏波等) で、1 Tbit/s が可能。
- これまではフォトニクス技術が研究開発をけん引してきたが、電子技術が追い付いてきた。
- Dバンド (110-170GHz) は、デバイス技術の成熟性の観点から最初に商用が進むと考えられる。

技術課題と挑戦

コンポーネント技術

送信出力の増大

素子の熱的制御

電力合成技術

受信感度/ダイナミックレンジの増大

低障壁ダイオード

Tera-FET (plasma-wave FET)

フェーズドアレイ (位相器問題) とアンテナ

発振器の低位相雑音化 (光技術の導入)

集積と実装技術

プラットフォームの選択: 金属導波管 vs. 誘電体導波路

光電融合集積・実装

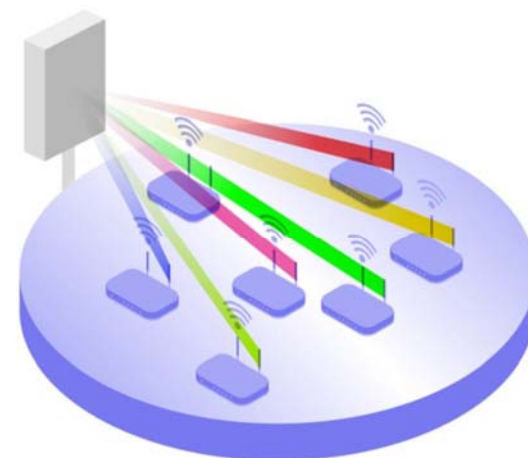
最近のニュースから

Ericsson to 6G radio microelectronics

- Ericsson participates in Microelectronics Technology Interest Group (MTEIG)
- Ericsson will be involved in the development of cost-effective, energy-efficient and low-power consumption and high-performance radio microelectronics for 6G.

NEWS SEP 19, 2023

<https://www.ericsson.com/press-releases/2023/ericsson-participates-in-mteig>



ment of

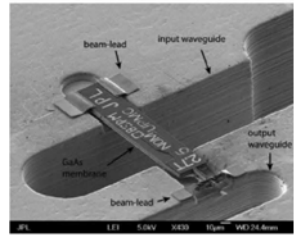
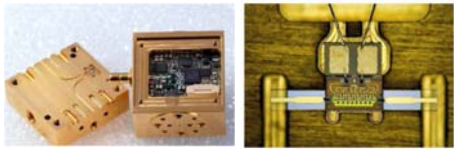
n Interest
(CT)
ogy
logies for

fast energy
networks

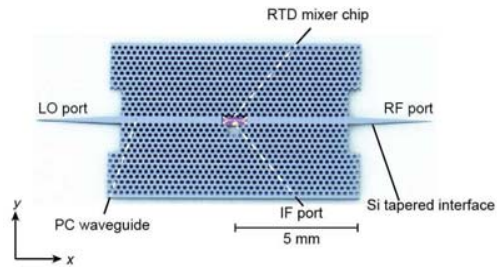
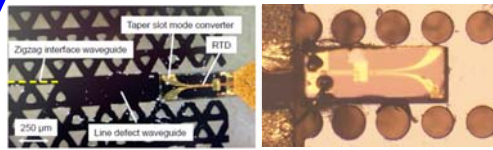
ment-of-6g-

プラットフォームの選択：接続技術

金属（中空を伝搬）

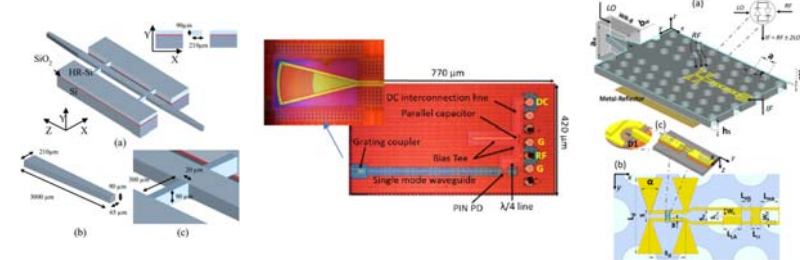
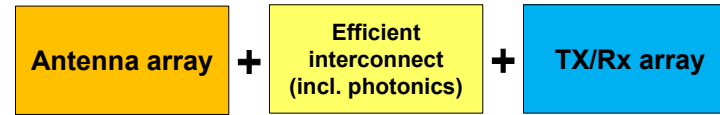


誘電体



光電融合：RF版シリコンフォトニクス

Hybrid integration/packaging



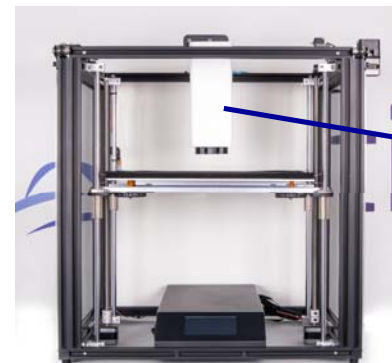
センシング：LSI技術による低価格化

SiGe BiCMOSプロセスによる120GHz帯FMCWレーダ：< 5 K€
(最近、240GHz帯、300GHz帯もラインアップ)

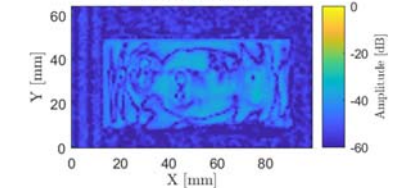
仏Lytid社：TeraScan I 00

周波数帯域幅：20GHz → 奥行分解能：7 mm

- ・産業応用の動向：いくつかの話題
- ・将来への期待と課題



Pharmaceutical tablet packaging
@ Z = -24.0 mm



SiGe BiCMOSレーダモジュールは市販されている！



TRA_120_045 : 113.9 GHz ~ 134.1 GHz
5 x 5 mm² (QFN 32)

(240 GHz Integrated Transceiver - TRA_240_091 も有り:
45GHzバンド幅)

SiGe BiCMOS Dバンドレーダ (126~182GHz)



独 2pi-Labs GmbH



Ruhr University Bochum (RUB)からのspin-off
2018~

<https://www.youtube.com/watch?v=QO7KDNxHPEA> (2021)

産業ロボットとの組み合わせ:車の塗装(多層)膜厚検査

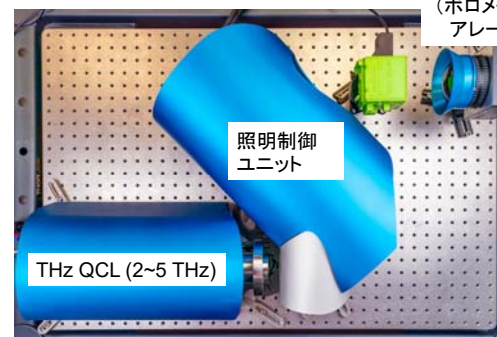
TeraCota (英TeraView)



Thickness Accuracy*	1.5 μm
Minimum Thickness*	5 μm
Sampled Area	Spot diameter of approximately 2 mm
Measurement Time	Typically 4 seconds per point (excluding alignment)
Sensor Positioning	Working distance to painted surface of 88 mm (± 0.15 mm)

<https://www.youtube.com/watch?v=DWveOEyD5wc>
(2022)

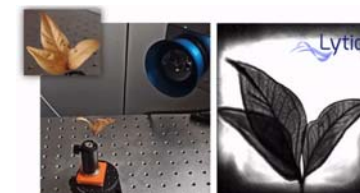
リアルタイム2次元イメージング: Lytid: TeraEyes-HV



THzカメラ
(ポロメータ
アレー)

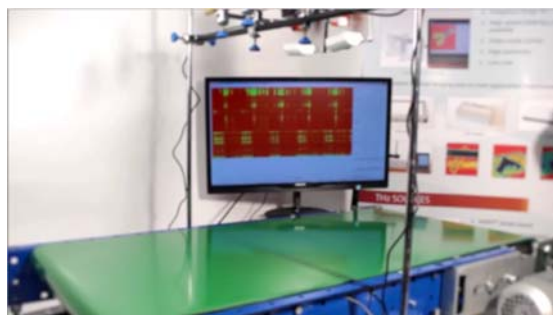
照明制御
ユニット

THz QCL (2~5 THz)



<https://lytid.com/imaging-system/>

リアルタイム2次元スキャナ:TeraSense

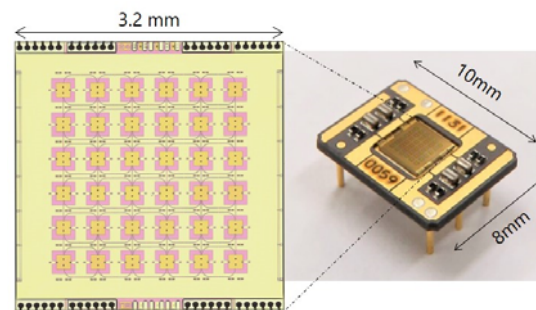


<https://terasense.com/products/thz-scanner/>

Number of pixels: 256 (256 x 1)
 Pixel size: 1.5 x 3 mm²
 Imaging area: 384 x 3 mm²
 Dimensions: 450 x 160 x 44 mm³
 Image acq. rate: 5000 fps (5 kHz)

高出力RTD発振器を照明に用いたTHzイメージング:キャノン

36個のRTD発振器の出力を同期させて合成 → >10mW@450 GHz



<https://global.canon/ja/news/2023/20230116.html>

https://www.youtube.com/watch?v=iPdv4yYm_4g

期待と課題：通信とセンシング技術開発の共創

◆基盤技術の共通化

通信：Point-to-PointからPoint-to-Multi Pointへ

- マルチアンテナ（マルチTx/Rx）、フェーズドアレー

センシング：Point計測から2D/3Dへ

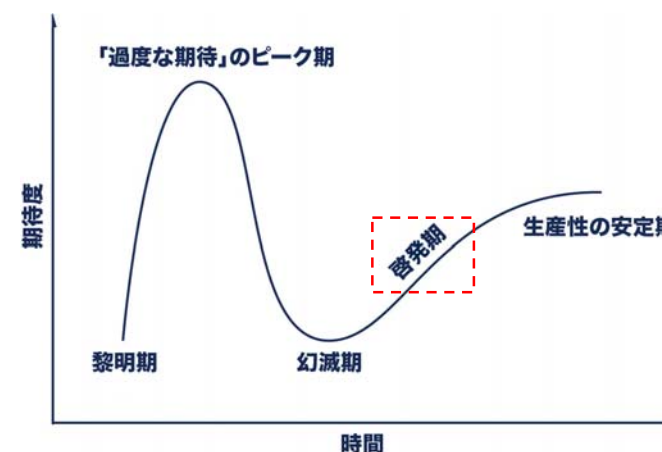
- マルチアンテナ（マルチTx/Rx）、アレーレーダ

プラットフォームの共通化

◆ブロードバンド電波利用における共存可能化

干渉回避技術と電波行政の両面（5G/6G時代の課題）

継続的な研究開発と顧客開拓を！



我が国の強みを見出し、磨き続けよ!

- ◆ 「国際連携」でイニシアティブを
- ◆ 「半導体」はシリコンだけでない：化合物半導体の強化を
- ◆ 「実利用」へ向けたポテンシャルユーザとの連携を

当協議会としても上記を支援

