

2021年3月31日

# テラヘルツ無線の現状

～フォトニクス技術を使ったアプローチ～

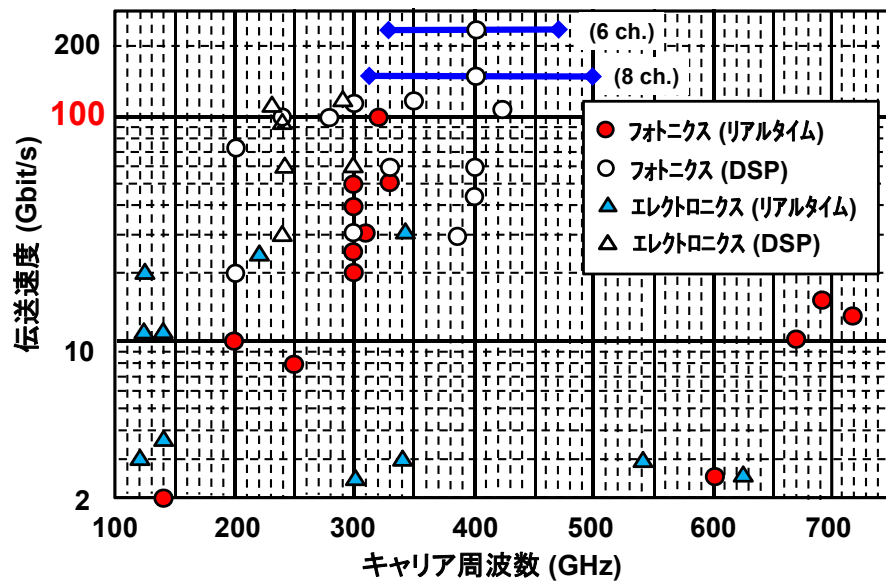
永妻忠夫

大阪大学大学院 基礎工学研究科

## 講演内容

- ・ テラヘルツ無線通信の最近の動向
- ・ 光技術の役割と課題
- ・ 今後の展望  
デバイス技術、集積化技術、  
新たな集積化のコンセプト

## THz無線の現状：キャリア周波数 vs. 伝送速度



## THz無線の現状のまとめ

- ・ 200 ~ 400GHz のキャリア周波数を用い 100Gbit/sの伝送速度が達成されている。
- ・ 上記の多くは、光技術を利用したものであり、光技術がTHz無線の研究フロントを牽引している。
- ・ 超100Gbit/sの報告もあり、これは光技術をベースにした多チャンネル化を利用したものである。

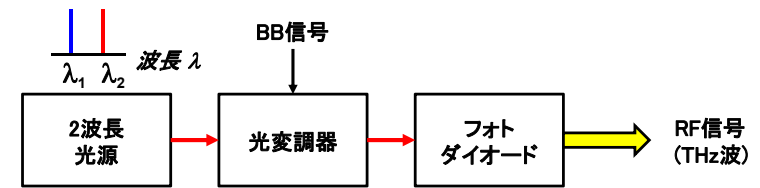
## 光技術の特徴と役割

- 送信技術において、THz信号の発生と変調の点で、電子技術よりも広帯域でかつその実現が容易
- 超広帯域性を利用したテラヘルツ無線応用のテクノロジードライバ
  - ☞ 実用性能を早期に実現し応用を開拓
- 光ファイバネットワークとの融合において不可欠

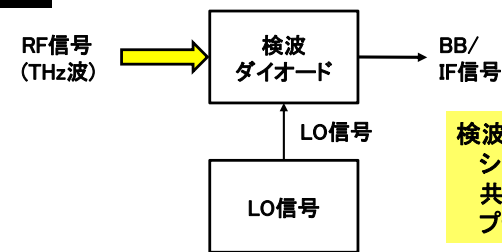
5

## 光技術を利用したTHz無線の基本形

### 送信機



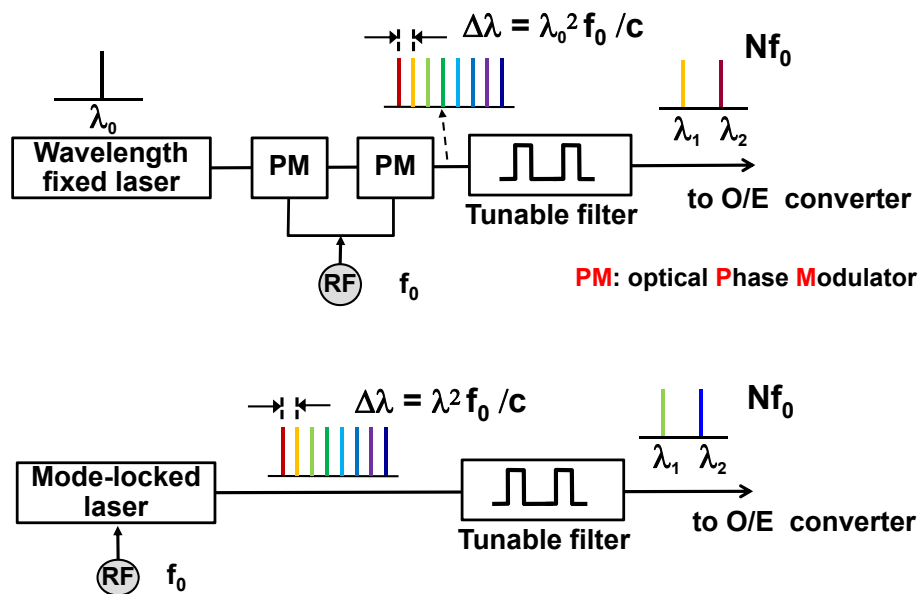
### 受信機



検波ダイオード  
 ショットキーバリアダイオード  
 共鳴トンネルダイオード  
 プラズマ波検波器(FET)

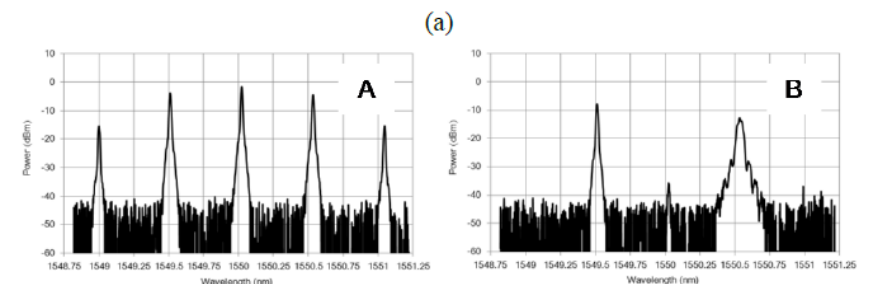
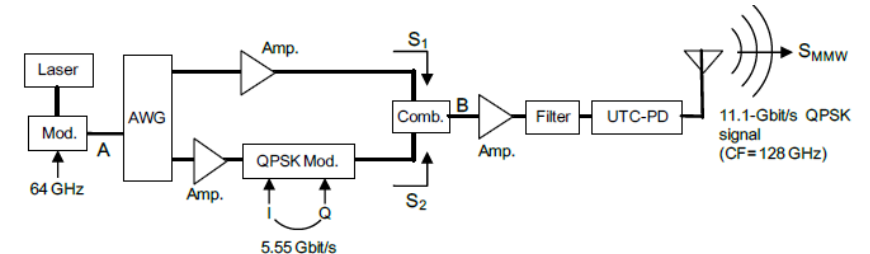
6

## 光周波数コムを用いた安定化2波長光源



7

## 光多値変調技術：QPSK



(b)

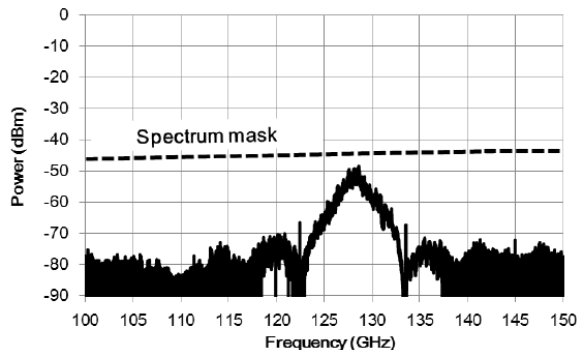
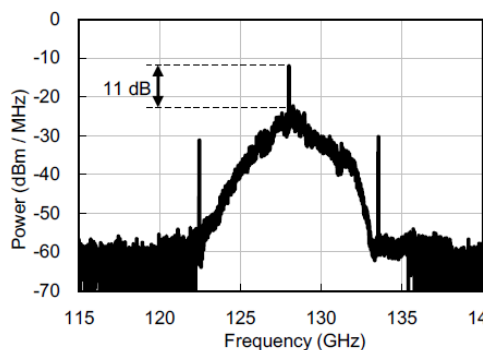
8

## 電気的手法と光技術を用いた場合の比較

H. Takahashi et al., "10-Gbit/s close-proximity wireless system meeting the regulation for extremely low-power radio stations", IEICE Electronics Express, Vol. 11, Issue 3, 20130989, 2013.

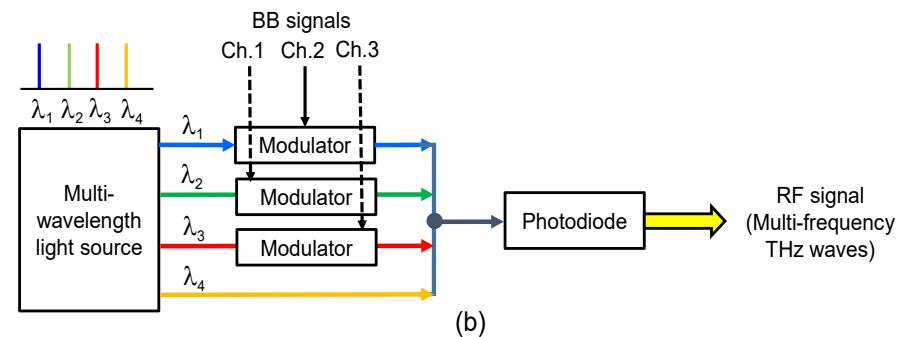
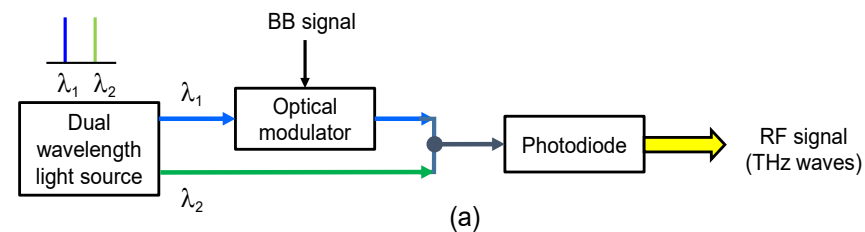
電気: キャリアリーク有

光電気: キャリアリーク無 **微弱無線**  
(免許不要)



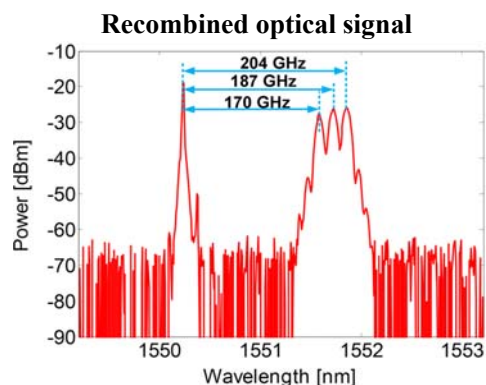
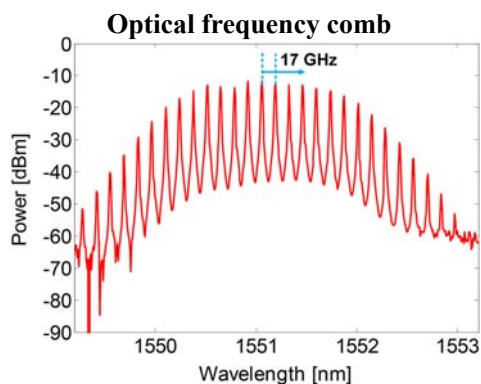
9

## マルチチャンネル化が容易



10

## マルチバンド・光スペクトルの例



T. Shao et al., "Phase noise investigation of multicarrier sub-THz wireless transmission system based on an injection-locked gain-switched laser," IEEE Trans. THz Sci. Tech., vol. 5, issue 4, 590 (2015).

11

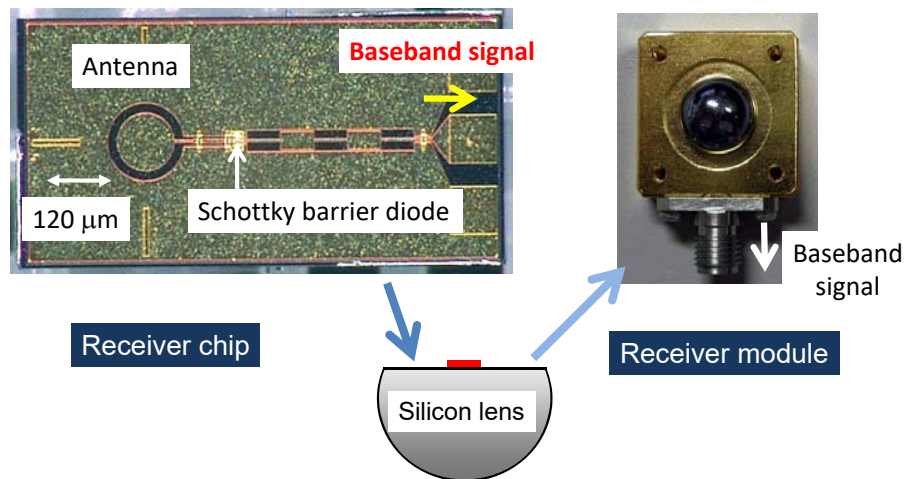
## 検波用ダイオード技術

- ショットキーバリアダイオード(SBD)  
*Much commonly used. Workhorse!*
- プラズマ波検出器(FET)  
*Excellent uniformity for arrays*
- 共鳴トンネルダイオード(RTD)  
*Operated as self-injection mixer (no LO)*
- フェルミレベル制御バリアダイオード(FMBD)  
*Low LO power, high sensitivity*

12

## 受信機：ショットキーバイアダイオード

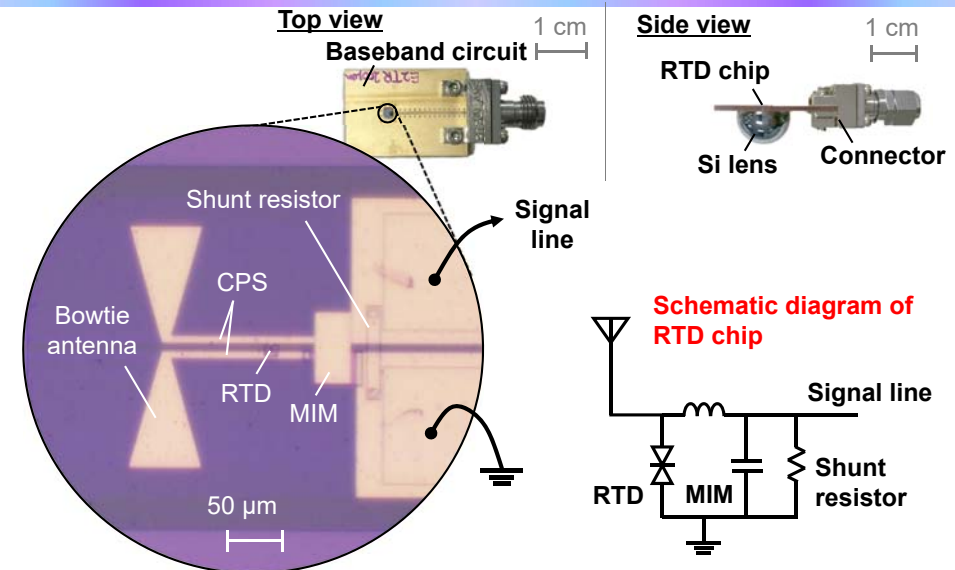
### 300-GHz Receiver with SBD



H.-J. Song, et al., *Electronics Letters*, 48 (15), pp. 953-954 (2012).

13

## 受信機：共鳴トンネルダイオード



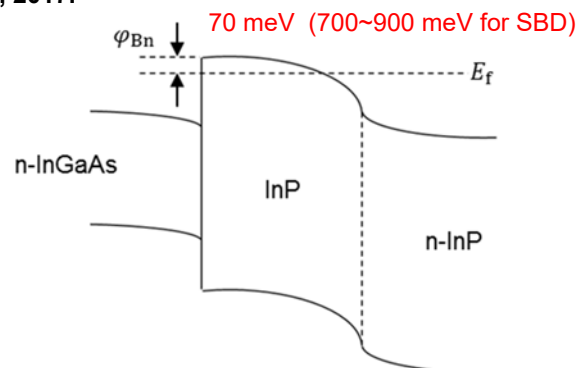
Y. Nishida, N. Nishigami, S. Diebold, J. Kim, M. Fujita, and T. Nagatsuma, "Terahertz coherent receiver using a single resonant tunnelling diode," *Sci. Rep.* 9, 18125 (2019)

14

## フェルミレベル制御バリア (FMB) ダイオード

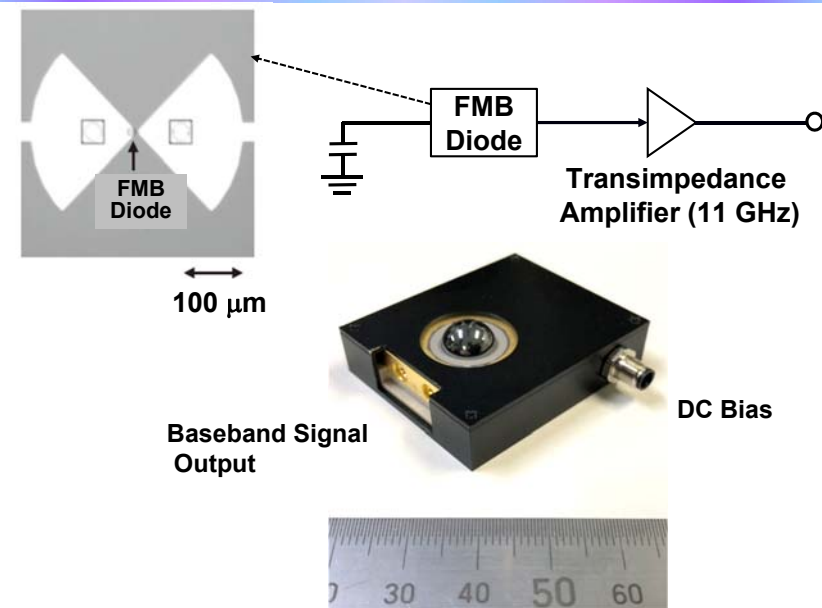
### FMBD: Fermi-level Management Barrier Diode

H. Ito and T. Ishibashi, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 56, No. 014101, pp. 1-7, 2017.



• Low barrier height: **70 meV** → lower differential resistance  
→ high frequency operation, lower required LO as mixers

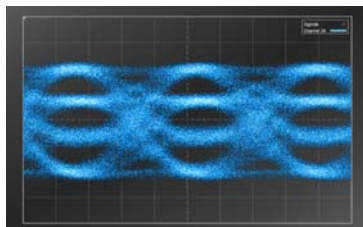
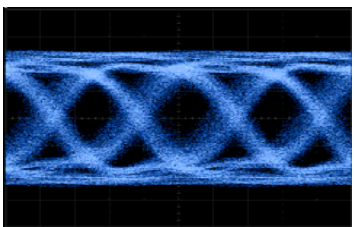
## 受信機：FMBダイオード



## 光技術を用いた送信機とRTD受信機の最近の例

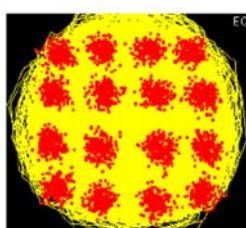
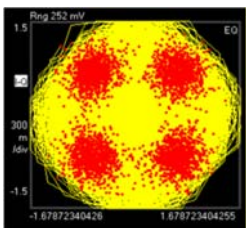
OOK: 38 Gbit/s (real-time)

PAM4: 48 Gbit/s (online DSP)



QPSK: 60 Gbit/s (online DSP)

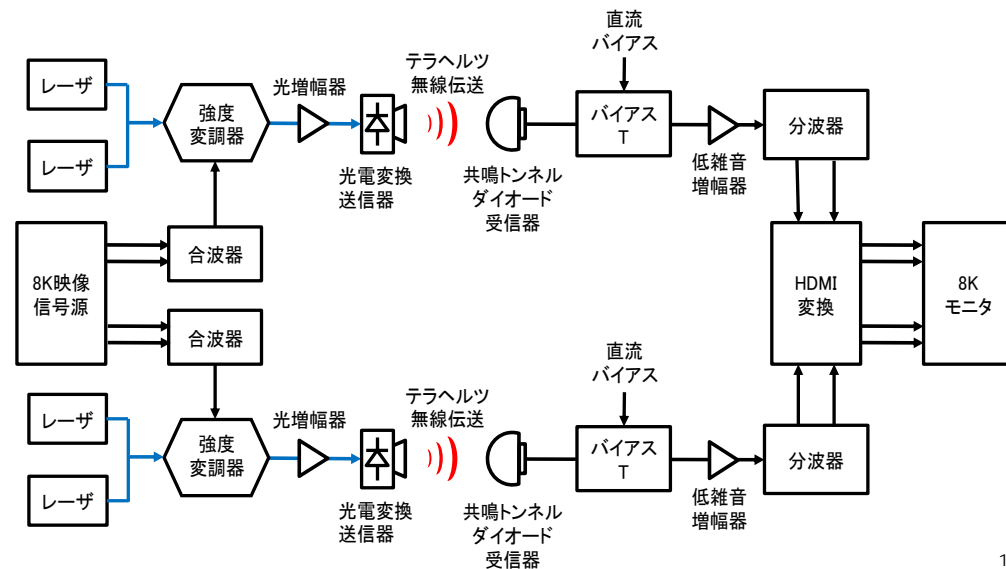
16QAM: 68 Gbit/s (online DSP)



17

## フル解像度8Kの非圧縮無線伝送：48Gbit/s

[https://resou.osaka-u.ac.jp/en/research/2021/20210201\\_1](https://resou.osaka-u.ac.jp/en/research/2021/20210201_1)



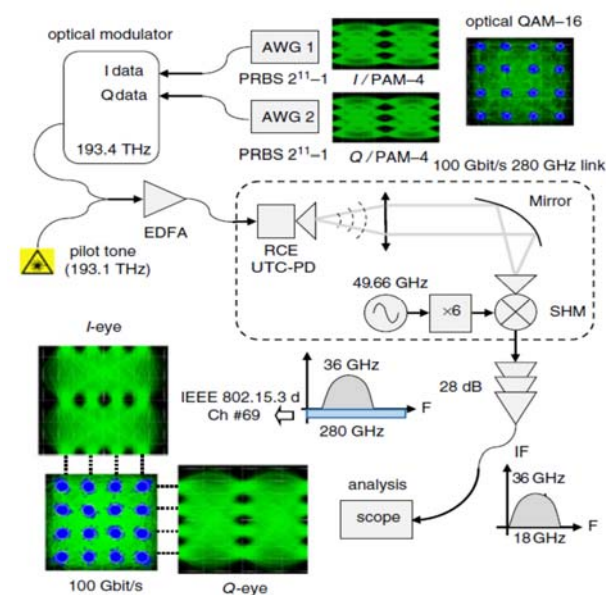
18

## 光技術を利用した100Gbit/s級無線の例

Authors	Frequency	Modulation	Data rate	Signal processing
S. Koenig et al. (KIT, 2013)	~240 GHz	16QAM (25 Gbaud)	100 Gbit/s	DSP (off-line)
V. K. Chinni et al. (IEMN, 2018)	280 GHz	16QAM (25 Gbaud)	100 Gbit/s	DSP (off-line)
H. Shams et al. (UCL, 2015)	~200 GHz	QPSK (12.5 Gbaud) 4 carriers	100 Gbit/s (4 ch)	DSP (off-line)
X. Yu et al. (DTU, 2016)	300 GHz ~500 GHz	QPSK (10 Gbaud) 8 carriers	160 Gbit/s (8 ch)	DSP (off-line)
X. Pang et al. (NETLAB, 2016)	300 GHz ~500 GHz	16QAM (12.5 Gbaud) 6 carriers	260 Gbit/s (6 ch)	DSP (off-line)
A. Stöhr et al. (Duisburg U., 2017)	328 GHz	64QAM (7.4 Gbaud)	59 Gbit/s	DSP (off-line)
X. Pang et al. (NETLAB, 2017)	425 GHz	16QAM (32 Gbaud)	106 Gbit/s	DSP (off-line)
T. Nagatsuma et al. (Osaka U., 2016)	320 GHz	QPSK (50 Gbaud)	100 Gbit/s	Analog Real time

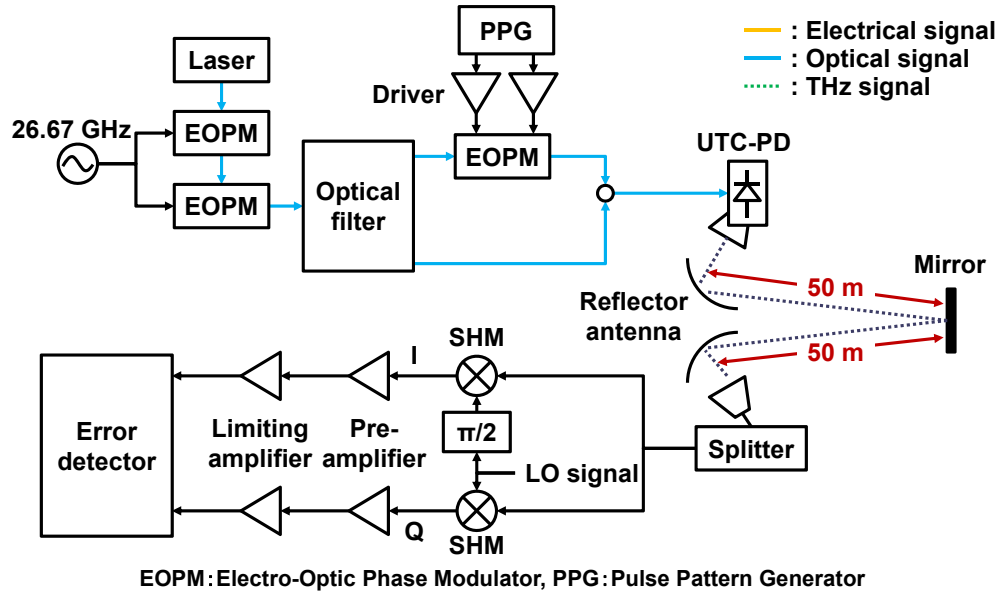
19

## 100 Gbit/s 無線：IEMN (仏) の例

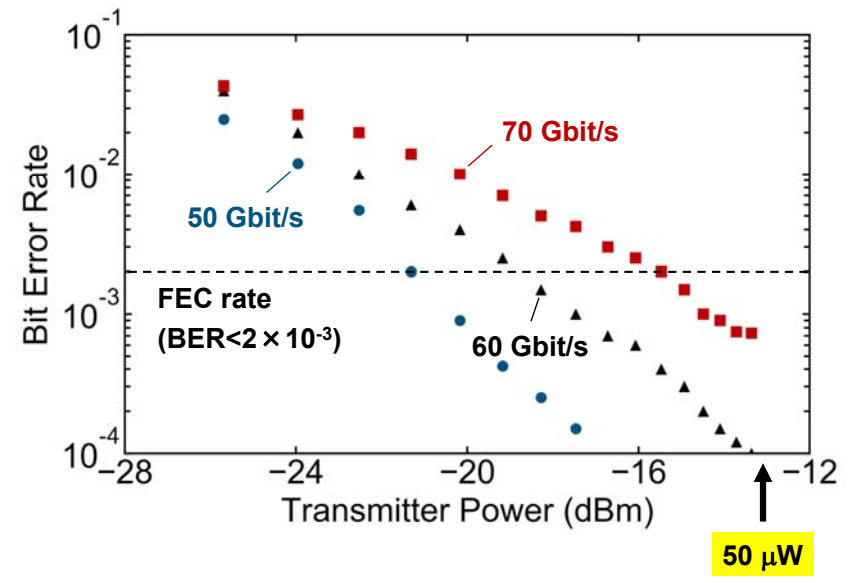


20

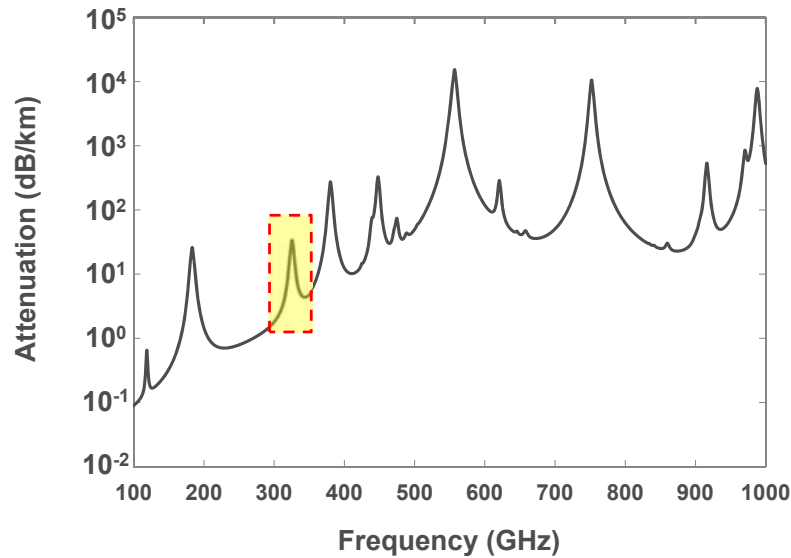
# QPSK 100m 伝送実験 (320GHz)



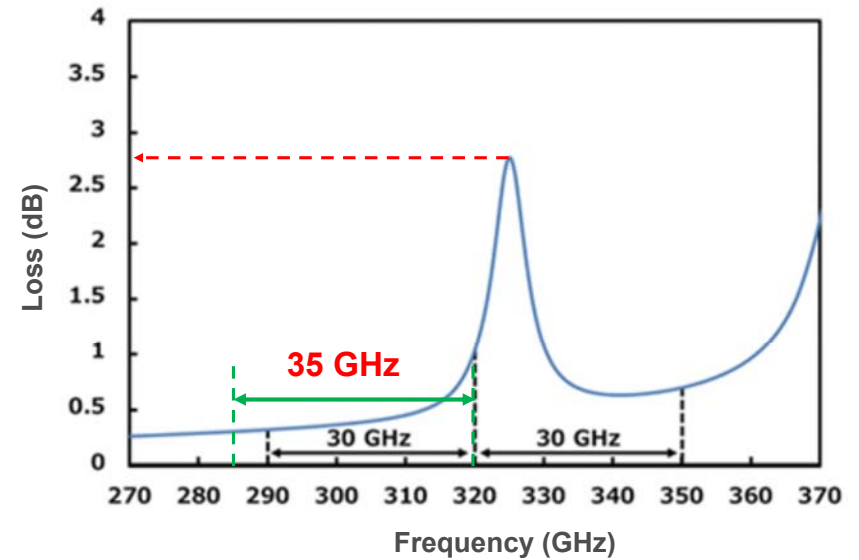
# 伝送特性 (320GHz)



# 大気減衰の影響



# 100mでUSBが最大で3dB減衰

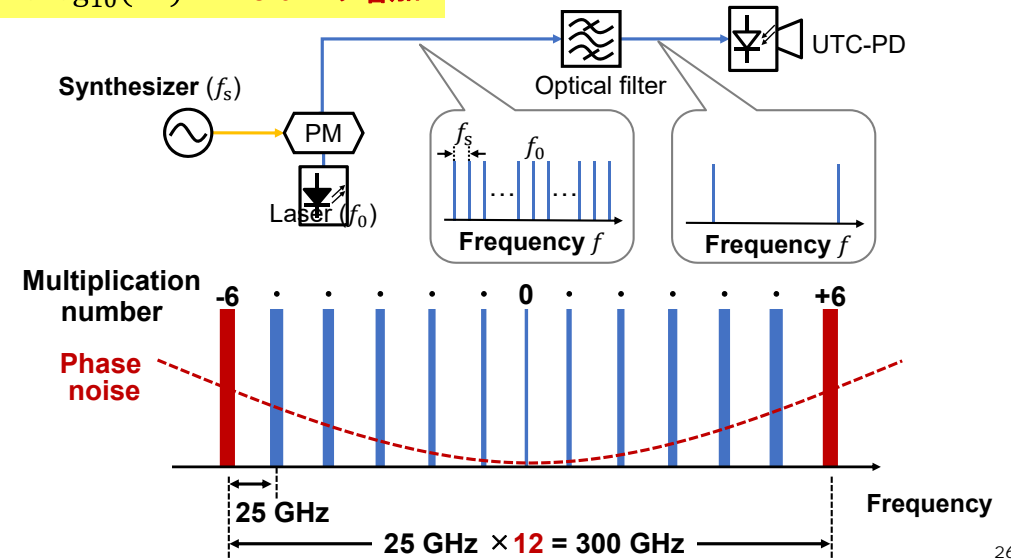


# キャリア周波数と伝送距離

Carrier Frequency	Data Rate	Distance	Ref.
125 GHz	10 Gbit/s (OOK/real time)	5.8 km	A. Hirata et al., ICWITS 2010
240 GHz	64 Gbit/s (QPSK/off line)	850 m	I. Kallfass et al., J. IRMMW/THz, 2015
320 GHz	70 Gbit/s (QPSK/real time)	100 m	K. Iwamoto et al., MTSA 2017
300 GHz	100 Gbit/s (QPSK/off line)	110 m	T. Harter et al., ECOC 2018

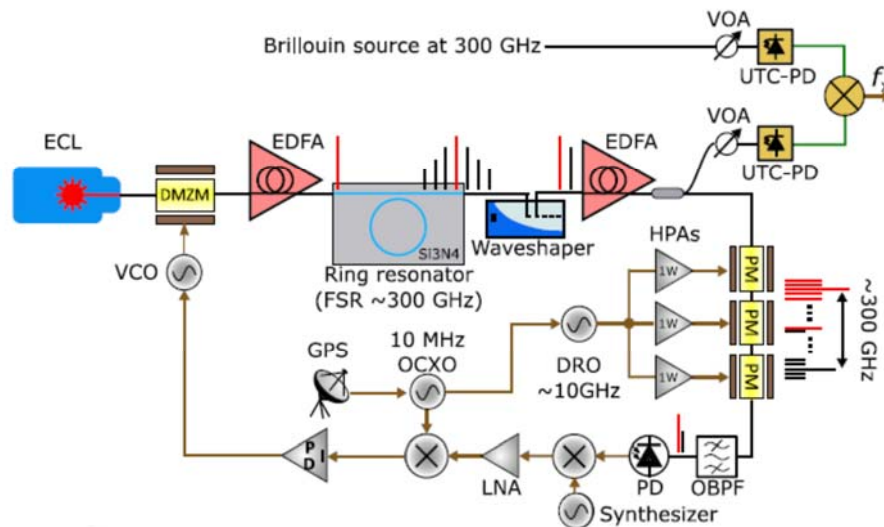
# 光周波数コムの問題点：高調波位相雑音

$20 \log_{10}(12) = 21.6 \text{ dB}$ の増加



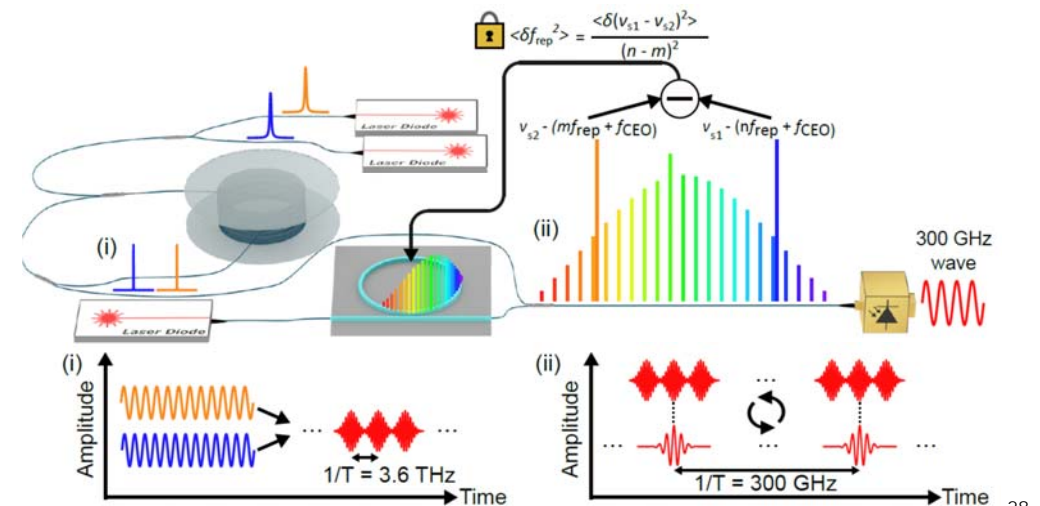
# 新たな低位相雑音光源の開発例 (1)

T. Tetsumoto et al., Opt. Lett., vol. 45, pp. 4377-4380, 2020.



# 新たな低位相雑音光源の開発例 (2)

T. Tetsumoto, T Nagatsuma et al., "300 GHz wave with attosecond-level timing noise," arXiv:2009.10784, 2020.



## 光電変換素子：フォトダイオードの課題

- 高出力化（高出力飽和＝線形動作）

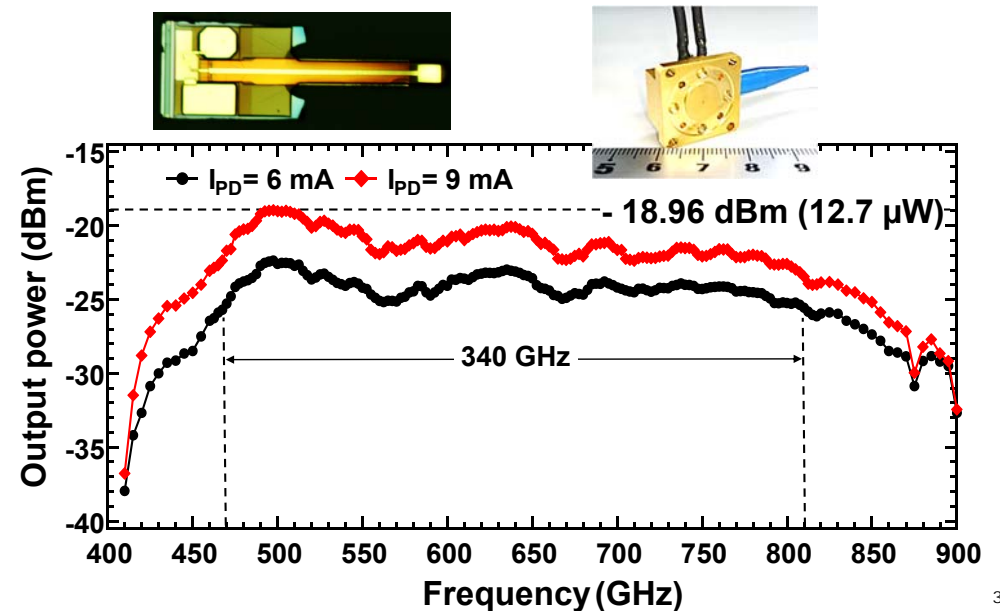
単体：放熱デバイス構造（基板トランスファー）  
アレー化&広帯域電力合成

- 高周波数化（＝広帯域動作）

新たな周波数開拓に向けて  
（600GHz帯、800GHz帯）

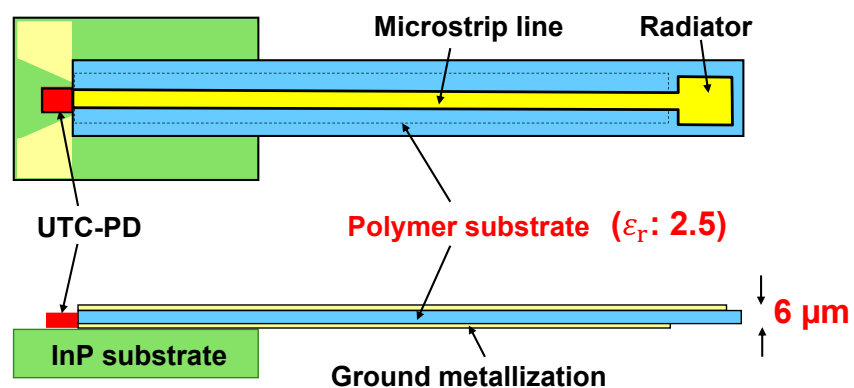
29

## 600GHz帯フォトダイオードの開発例



30

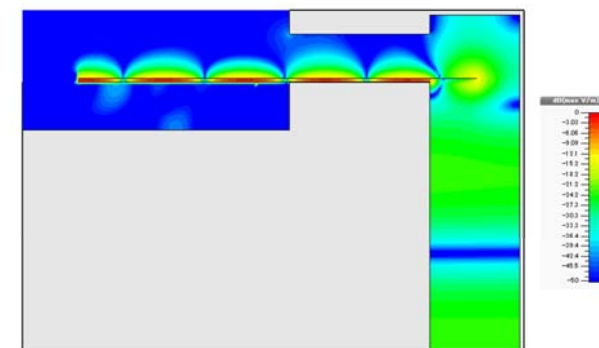
## 600GHz帯フォトダイオードの構造



T. Kurokawa, T. Ishibashi, M. Shimizu, K. Kato, and T. Nagatsuma,  
“Over 300 GHz bandwidth UTC-PD module with 600-GHz band  
rectangular-waveguide output,” *Electron. Lett.*, 54, pp. 705-706 (2018).

31

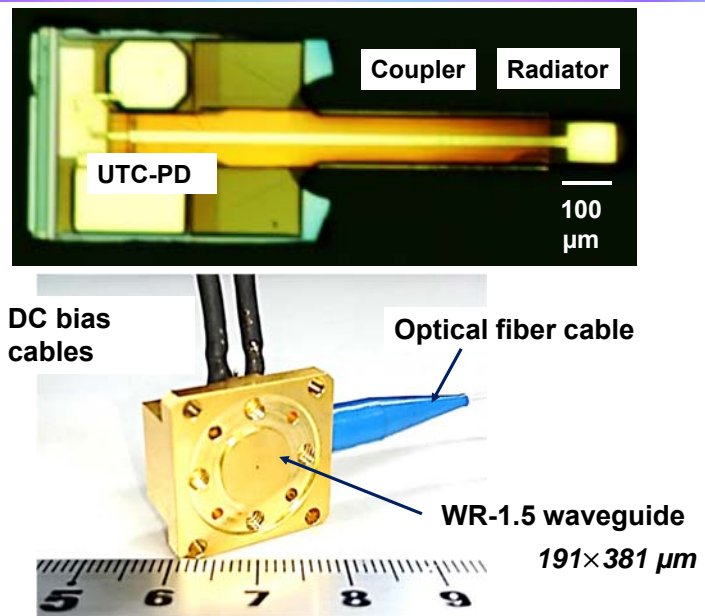
## 導波管への伝送：電磁界シミュレーション



32

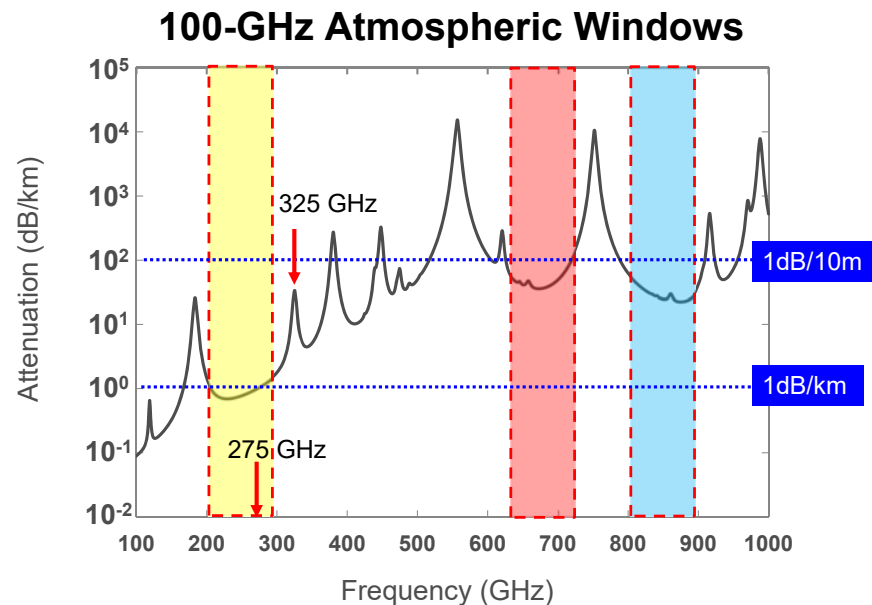


## 試作した600GHz帯フォトダイオード



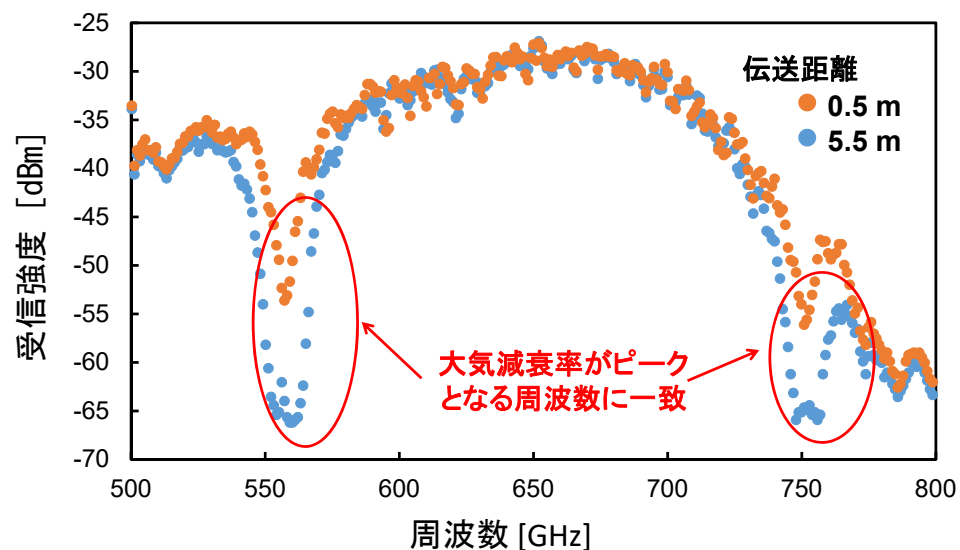
33

## 次なる無線通信のターゲット：600GHz帯



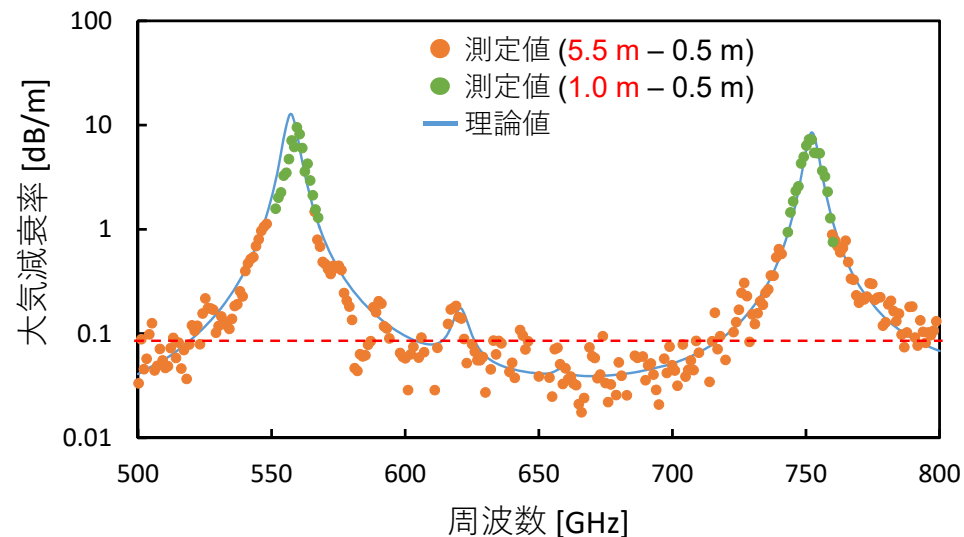
34

## 大気減衰の実測例



35

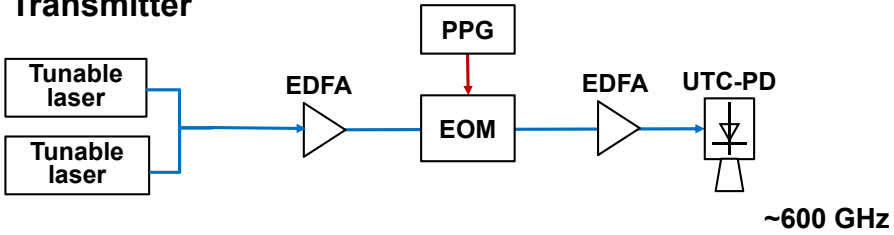
## 減衰率への換算



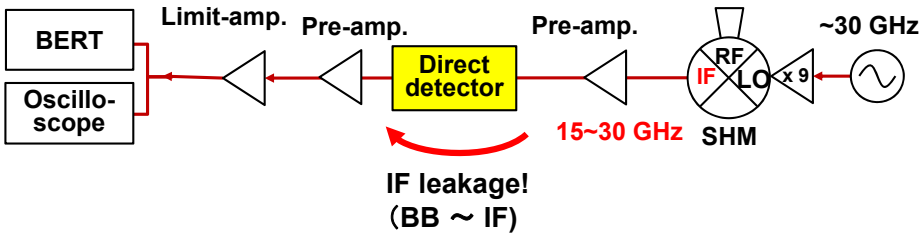
36

# 600GHz帯無線：ヘテロダイン受信の問題点

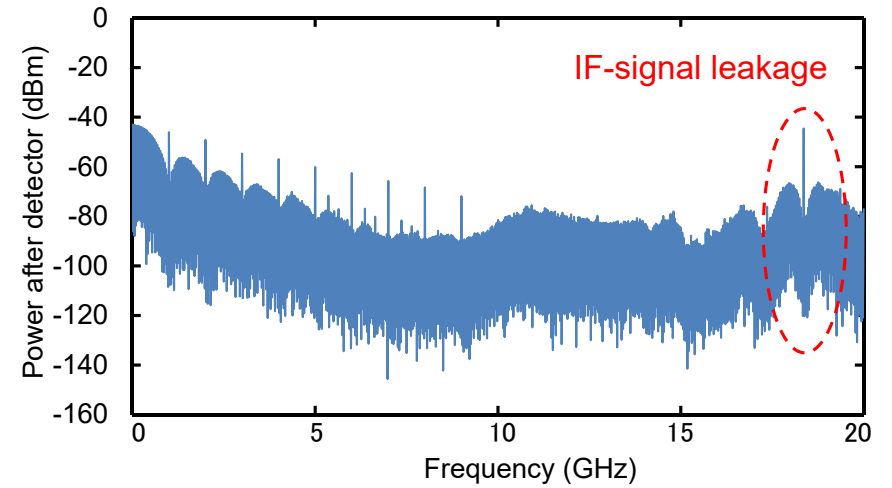
## Transmitter



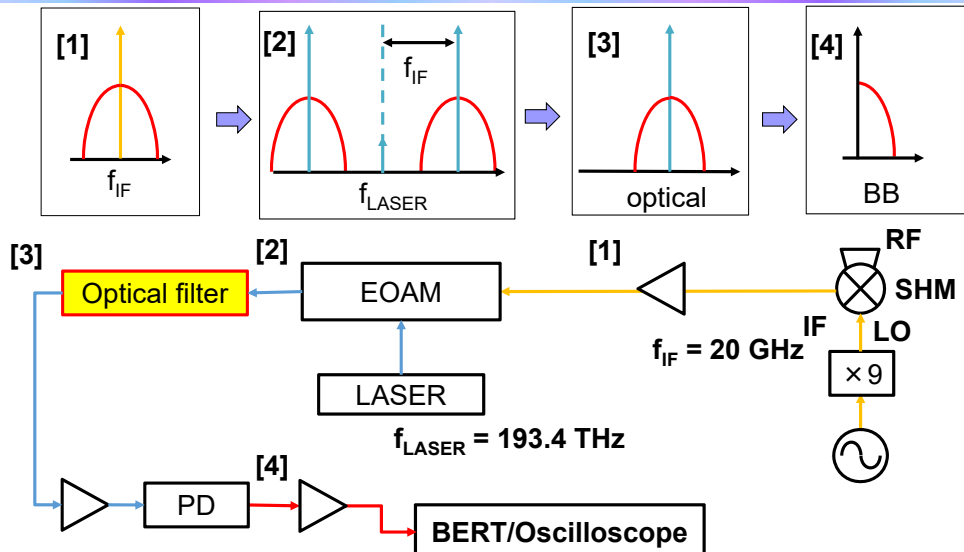
## Receiver



# IF信号リークの実例

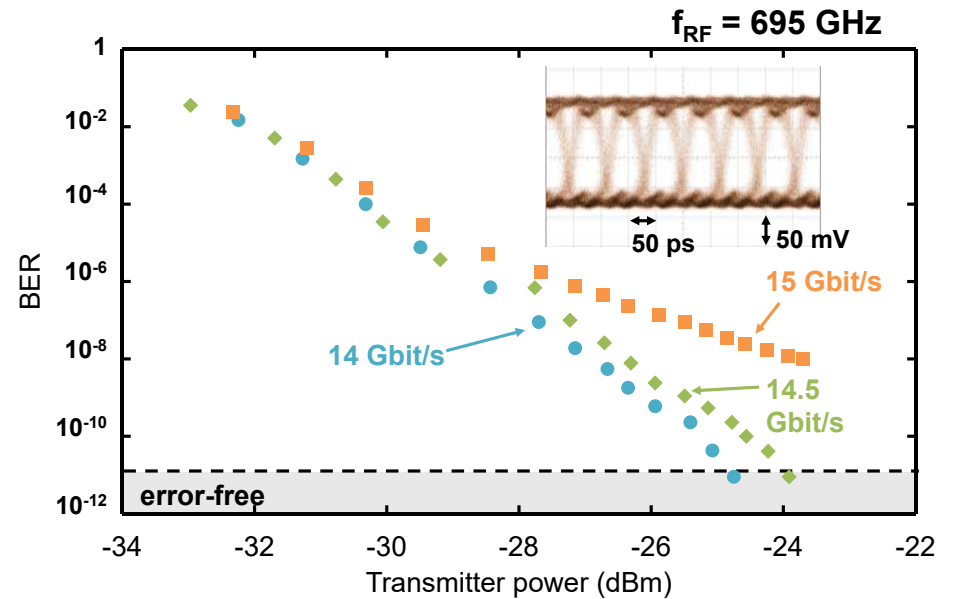


# 受信機への光技術の効果的な導入

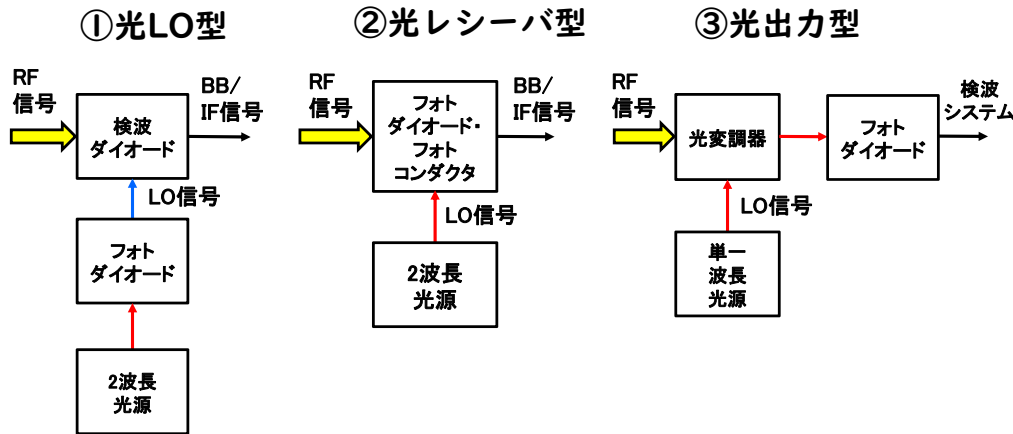


Y. Uemura et al., "600-GHz-band heterodyne receiver system using photonic techniques," Tech. Dig. IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP2020), P.35, 2020.

# 伝送結果：600GHz帯では最高速



# 受信機技術の今後：光技術の積極導入



# 光レシーバ (=光ミキサ) 型

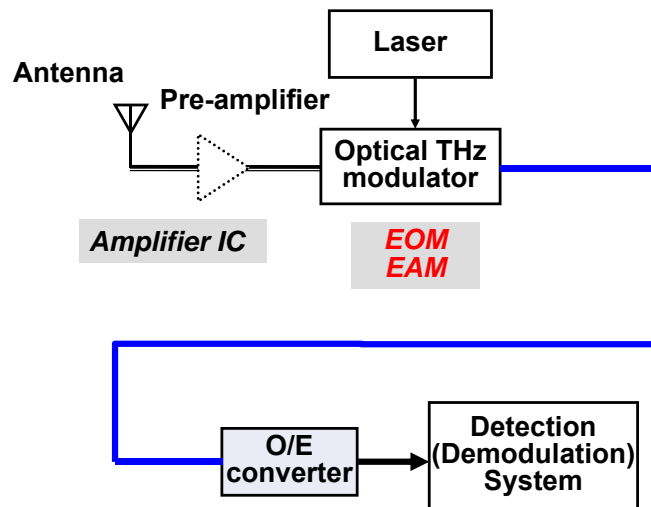
フォトダイオードやフォトコンダクタを使った報告例

課題：変換損が大 (>30~50dB)

A. W. Mohammad et al., "60-GHz Transmission Link Using Uni-Traveling Carrier Photodiodes at the Transmitter and the Receiver," Journal of Lightwave Technology, 36 (19), 4507-4513, 2018.

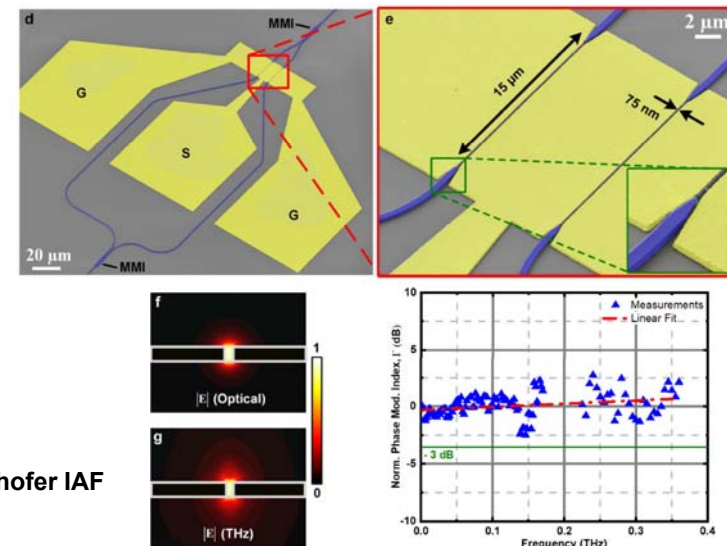
T. Harter et al., "Wireless multi-subcarrier THz communications using mixing in a photoconductor for coherent reception," 2017 IEEE Photonics Conference (IPC), 147-148, 2017.

# 光出力型



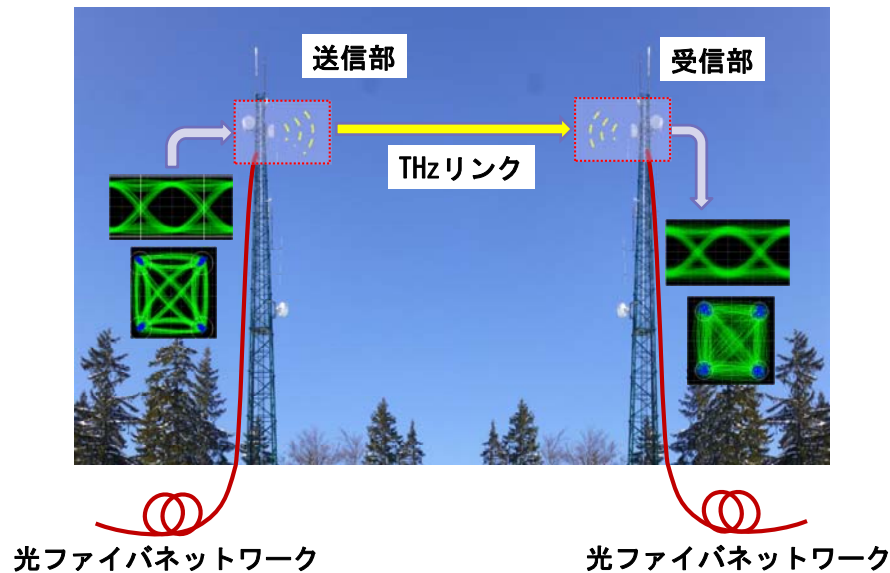
# THz光変調器の研究例

S. Ummethalae et al., "THz-to-Optical Conversion in Wireless Communications Using an Ultra-Broadband Plasmonic Modulator," arXiv:1812.04121, 2019.



KIT, Fraunhofer IAF

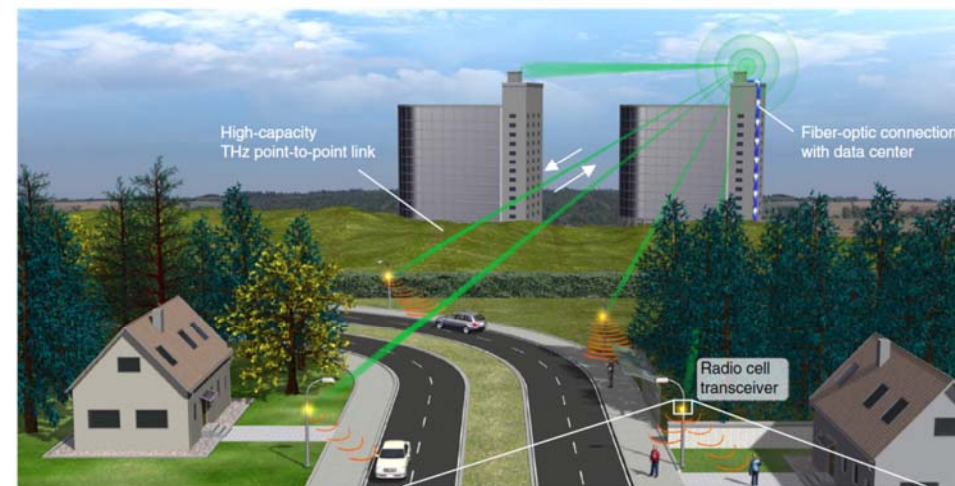
## 有線と無線とのシームレスな融合



45

## 光ネットワークと無線との融合

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

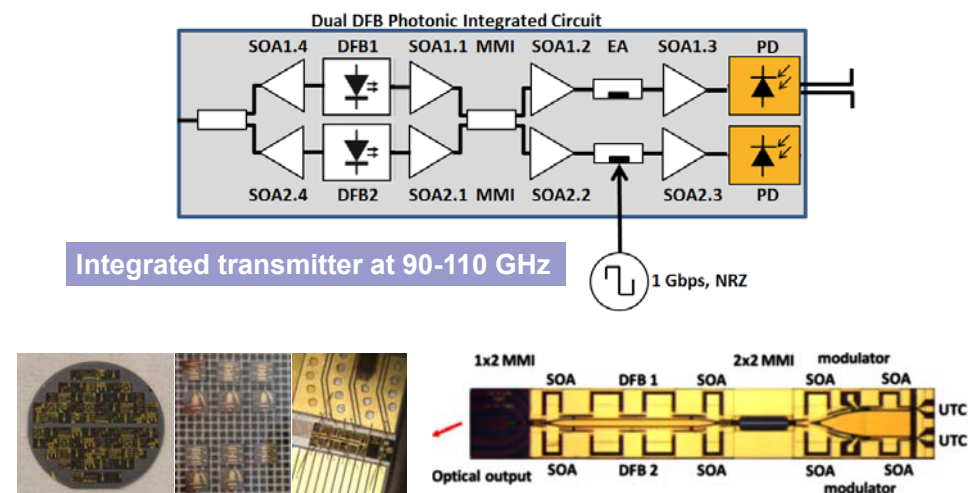


## まとめと今後の展望

- 光技術がTHz無線の研究実用化を牽引  
レーザ光源、フォトダイオード、光変調器の課題
- 光ファイバNWの融合においては、光技術を用いたアプローチが有望
- 光システムの小型化、集積化が不可欠  
モノリシック vs. ハイブリッド

47

## 光技術を用いた送信機集積化の例



G. Carpintero et al., *IEEE Journal of Lightwave Tech.*, vol. 32, 3495 (2014).

48

# 光技術を用いた受信機集積化の例

