

## フォトダイオードを用いた連続 THz 波の発生

- InP/InGaAs ダイオード・フォトミキサの諸特性, それから見える高速電子輸送 -

石橋 忠夫

NTT エレクトロニクステクノ株式会社 〒243-0198 厚木市森の里若宮 3-1

E-mail: ishibashi-tadao@ntt-et.co.jp

**あらまし** THz フォトダイオード技術の現状について簡単に述べると共に, 広帯域化を目的として設計・製作した“アンテナ集積フォトミキサ”を紹介し, その出力評価結果をもとにダイオード内の電子輸送特性との関わりを議論する. Bow-tie アンテナを集積したフォトミキサは, 再現性の良い周波数特性を示し, 緩やかな roll-off を伴う連続 THz 波出力は 3THz まで観測される. 従来, 低周波数域では見えにくかった“電子速度の振る舞い”が, THz 領域では顕著に観測される.

**キーワード** photodiode, UTC-PD, terahertz, photomixer, bow-tie antenna, electron velocity overshoot.

## Generation of Continuous THz wave using Photodiodes

- Characteristics of InP/InGaAs Diode Photomixers and Related High-Speed Electron Transport -

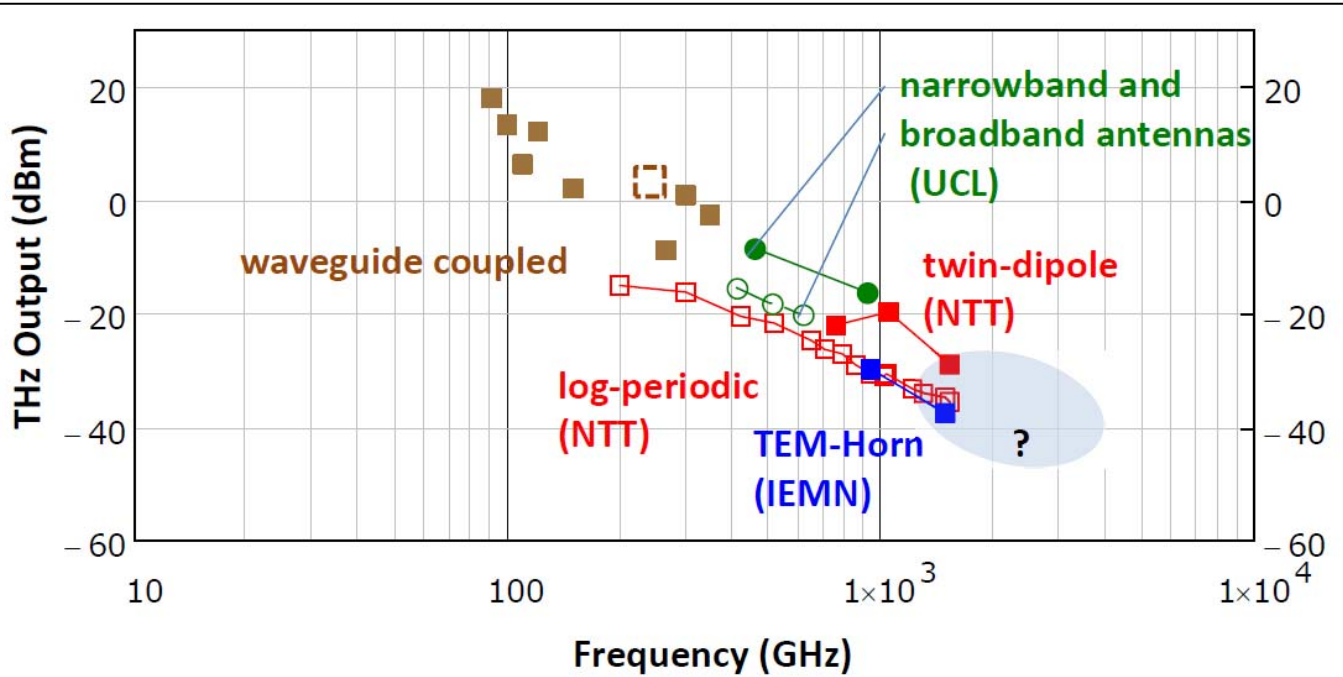
Tadao ISHIBASHI

NTT Electronics Techno corporation, Morinosato-Wakamiya 3-1, Atsugi,  
Kanagawa 243-0198, Japan

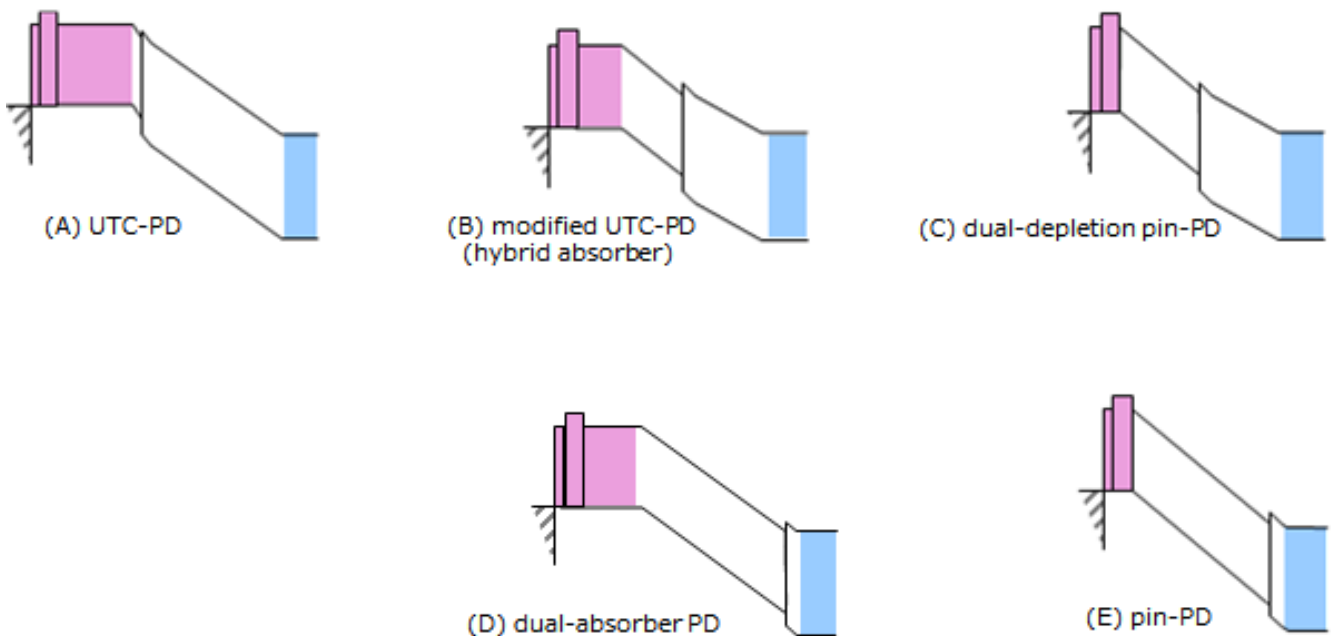
E-mail: : ishibashi-tadao@ntt-et.co.jp

**Abstract** The recent development of diode-based Photomixers for the purpose of generating continuous THz-wave is briefly reviewed, then newly designed and fabricated antenna-integrated photomixers are described. From the results of output characteristics of photomixers, relation of the photoresponse and electron transport in the diode is discussed. The output of fabricated bow-tie antenna integrated photomixers exhibited reproducible frequency dependence, and it extends to a frequency range of up to 3 THz with smooth roll-off. It is found that the behavior of electron velocity in a diode is more clearly observed in THz frequency range.

**Keywords:** photodiode, UTC-PD, terahertz, photomixer, bow-tie antenna, electron velocity overshoot.

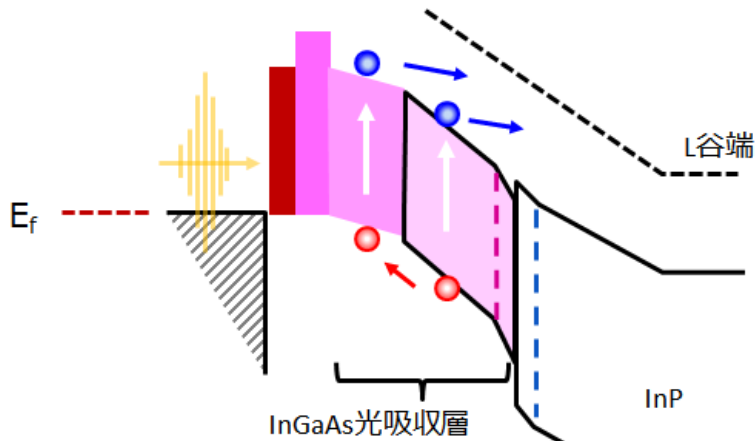


**Fig. 1** 報告されているダイオードベース・フォトミキサの出力レベル。300 GHz 以下では導波管出力形，それ以上の周波数では，アンテナ集積形のフォトミキサが製作されている。Log-periodic, Bow-tie アンテナなどの広帯域形に比べ，twin-dipole, slot形の狭帯域形フォトミキサのそれは，数dB~10 dB出力が高い。



**Fig. 2** 様々なタイプのフォトダイオード構造（バンドダイアグラム）UTC-PD は電子のみが活性なキャリア，pin-PD では，電子とホール，同等の誘導電流振幅となる。光吸収層の重心がアノード側によるほど，電子電流の寄与が大きくなる。

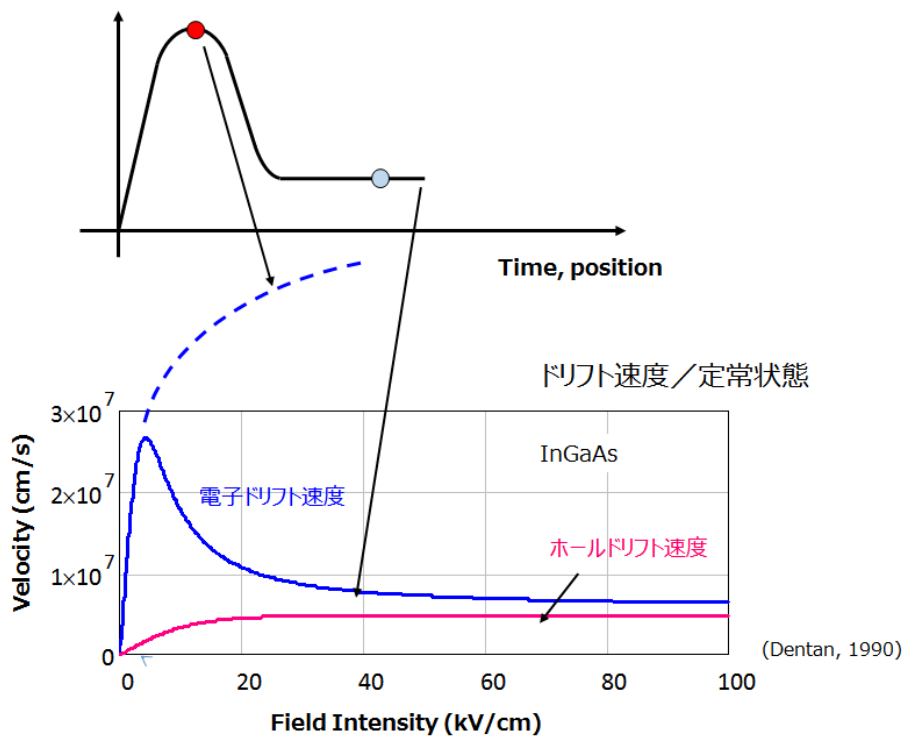
高速化 = 非定常輸送の好条件を使い切る + ホール輸送の影響を抑制！



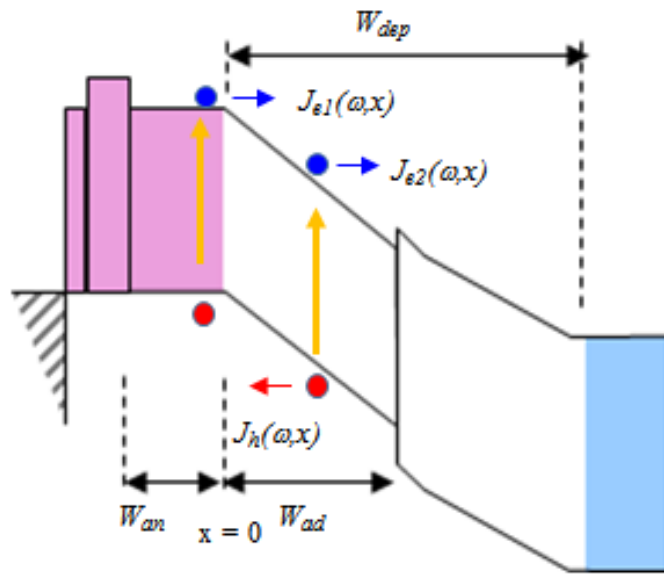
- ◆ 傾斜ドーピングにより p-InGaAs 光吸収層に擬電界誘起
- ◆ p-InGaAs / 空乏化 InGaAs 層厚の最適化

**Fig. 3** サブミクロン領域では、容易に電子の非定常効果が現れる。電子エネルギーが高すぎると L 谷への遷移により速度は低下。

電子速度オーバーシュート（過渡応答）

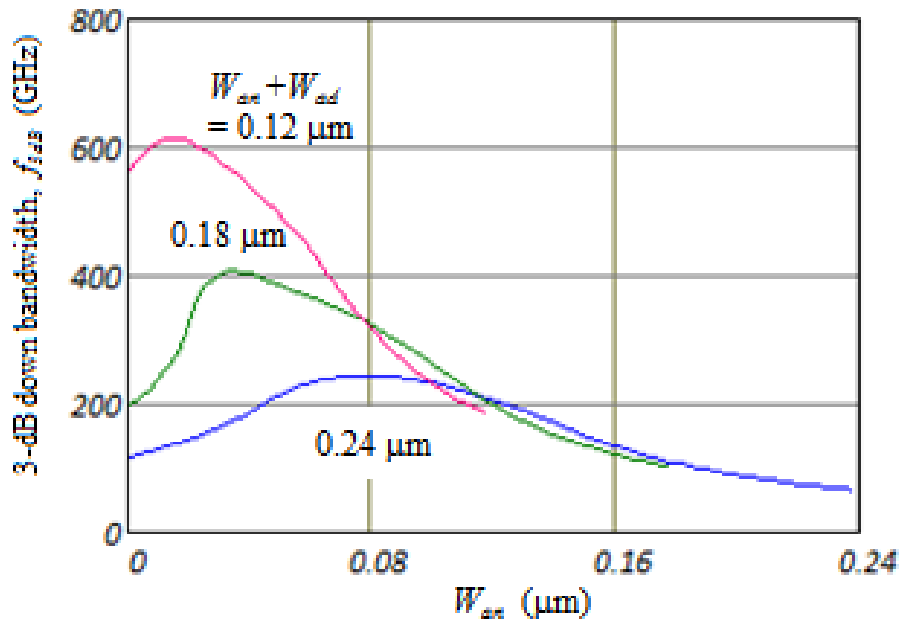


**Fig. 4** サブミクロン領域では、容易に電子の非定常効果が現れる。



Modified UTC-PD (Hybrid Absorber) structure.

**Fig. 5** p形と空乏化した光吸収層を配置した Modified UTC-PD 構造. 電子電流は2つの吸収層から, ホール電流は, 空乏化光吸収層で発生したキャリアが誘導電流を誘起.



**Fig. 6** Modified UTC-PD について, 全光吸収層厚(\$W\_{an} + W\_{ad}\$), 空乏層厚を一定の条件で計算した \$f\_{3dB}\$ 低下帯域. 配置した構造. \$W\_{an}\$ と \$W\_{ad}\$ の割合を調整することにより, 最大の \$f\_{3dB}\$ を得る.

### Bow-Tie Antenna Integrated UTC-PD

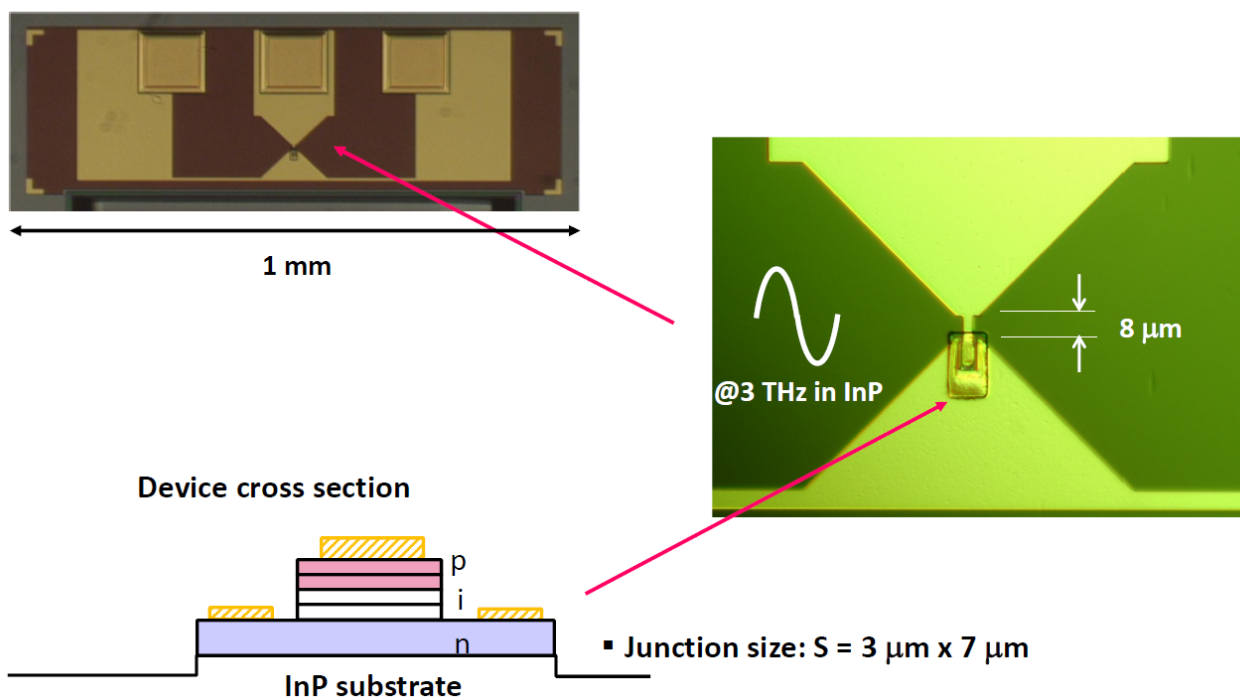


Fig. 7 フォトミキサチップ, bow-tie アンテナとフォトダイオードの接続, フォトダイオード構造.

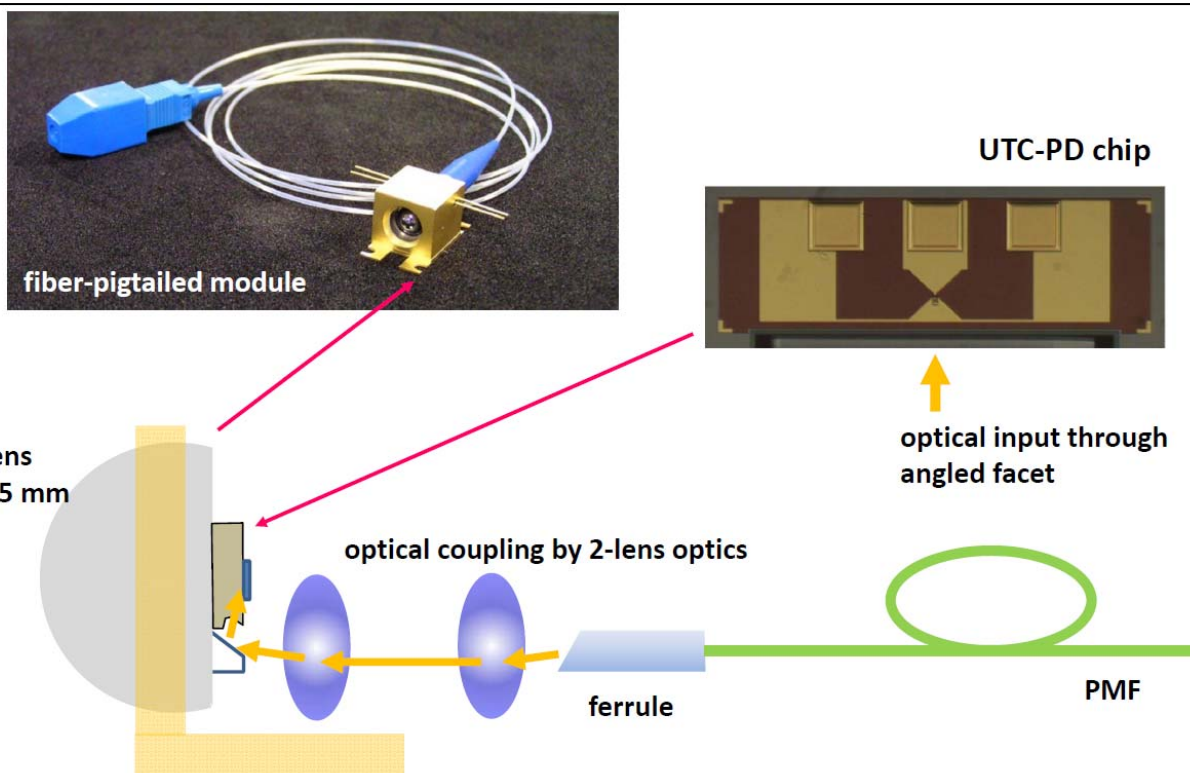
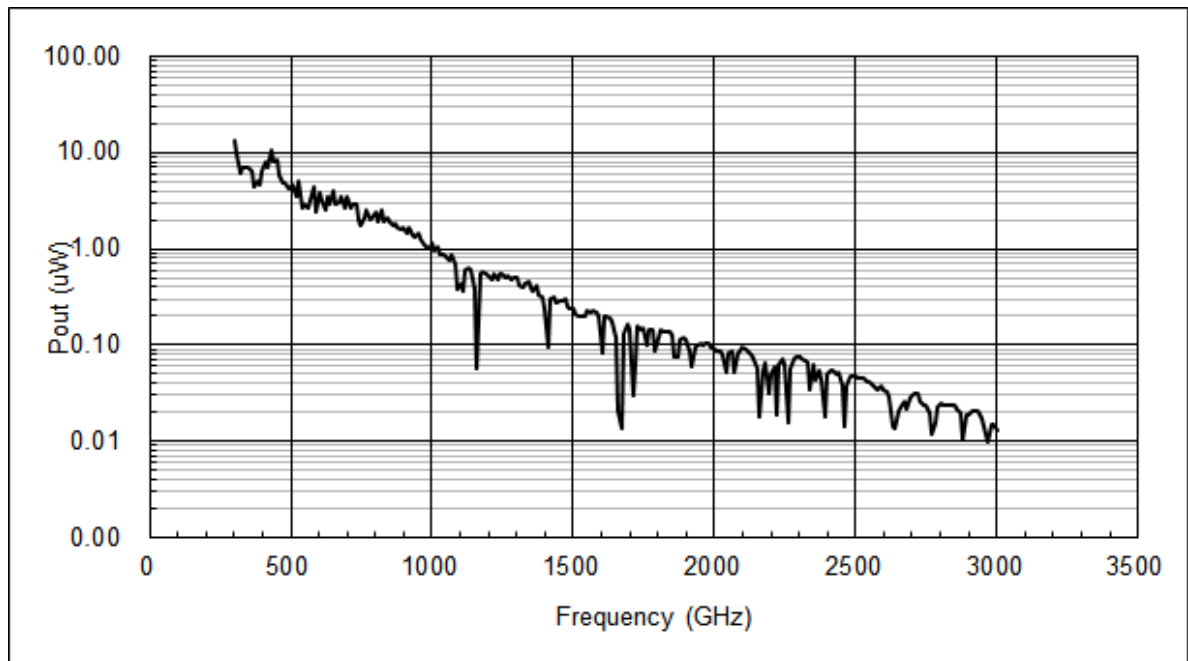
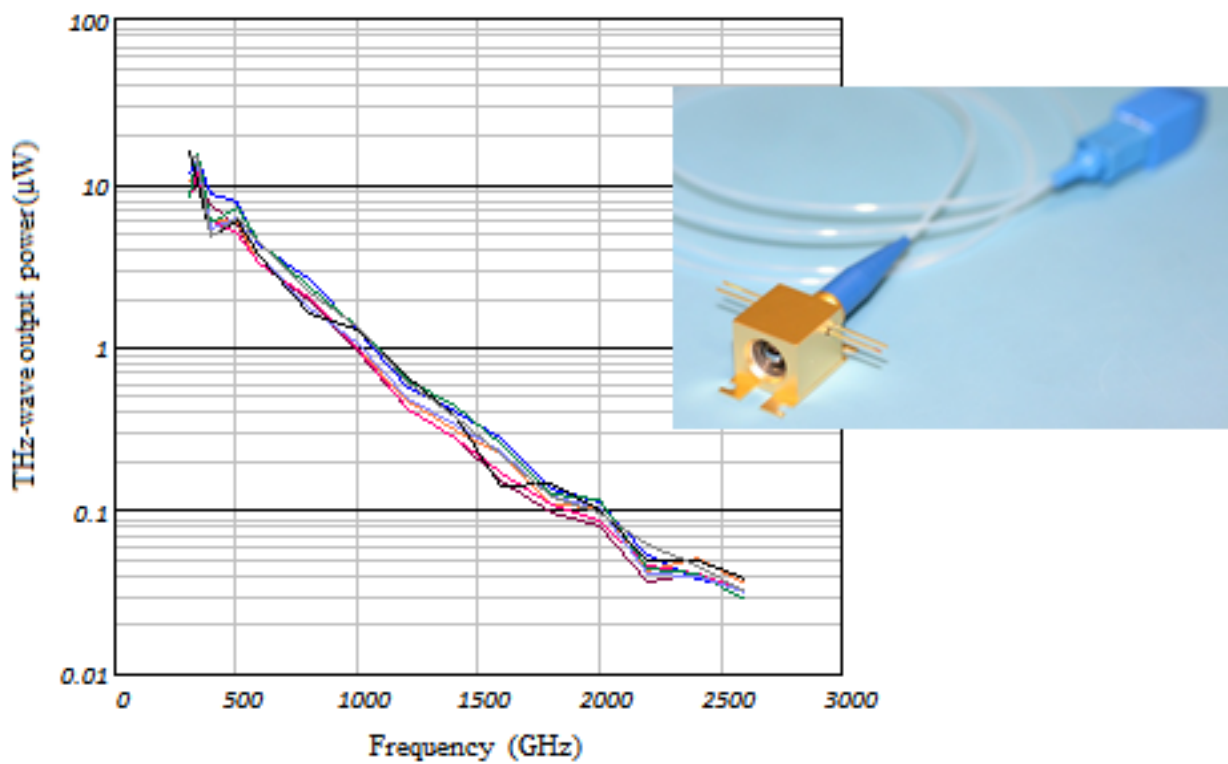


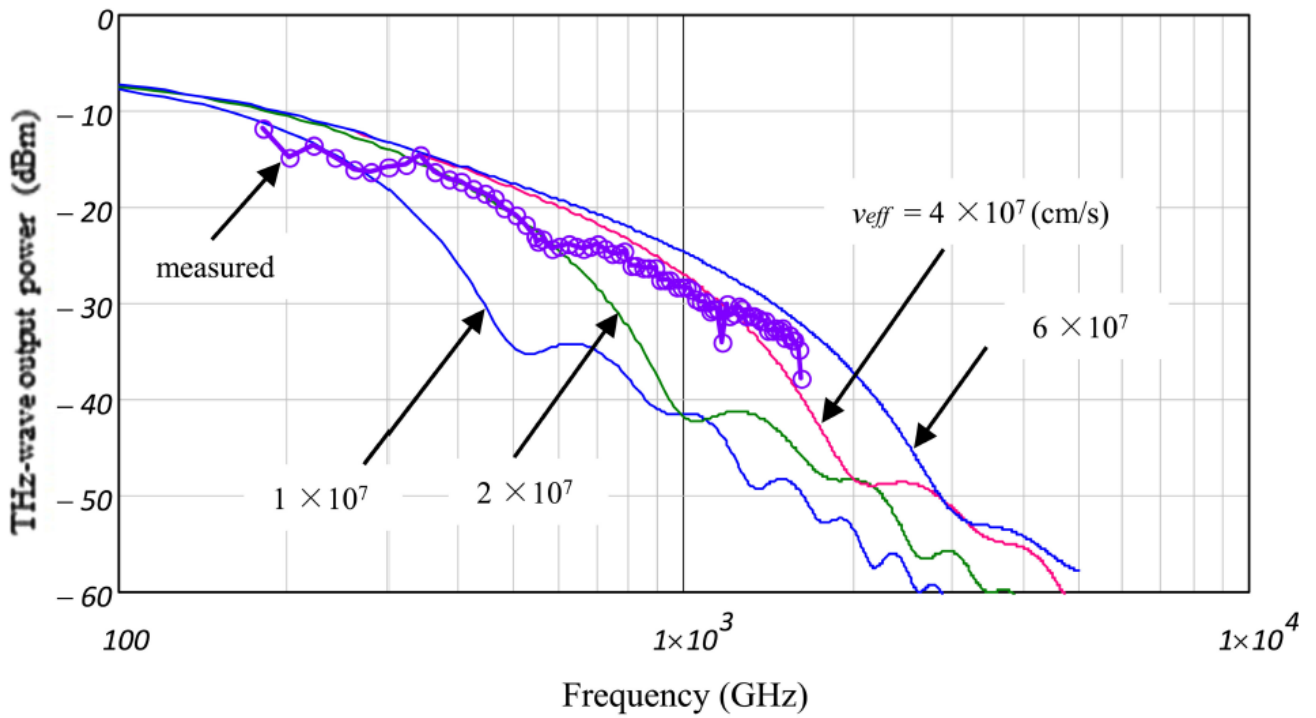
Fig. 8 フォトミキサモジュールとパッケージング.



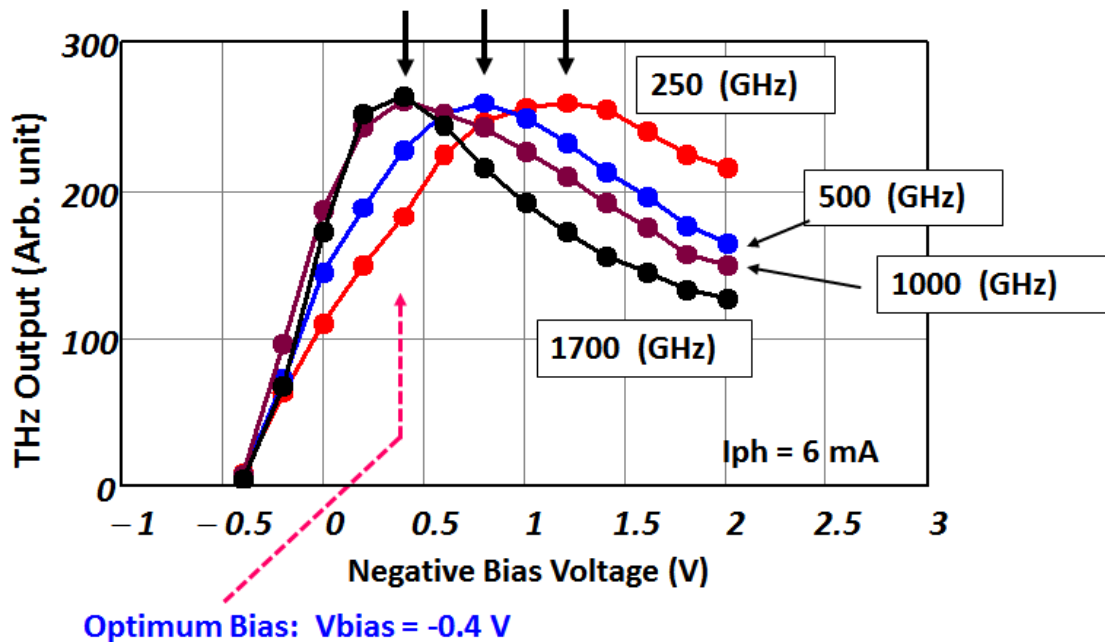
**Fig. 9** フォトミキサ出力の周波数特性の一例. 多くの大気吸収ラインを含む.  $I_{pd} = 6 \text{ mA}$ ,  $V_{bias} = -0.4 \text{ V}$ .



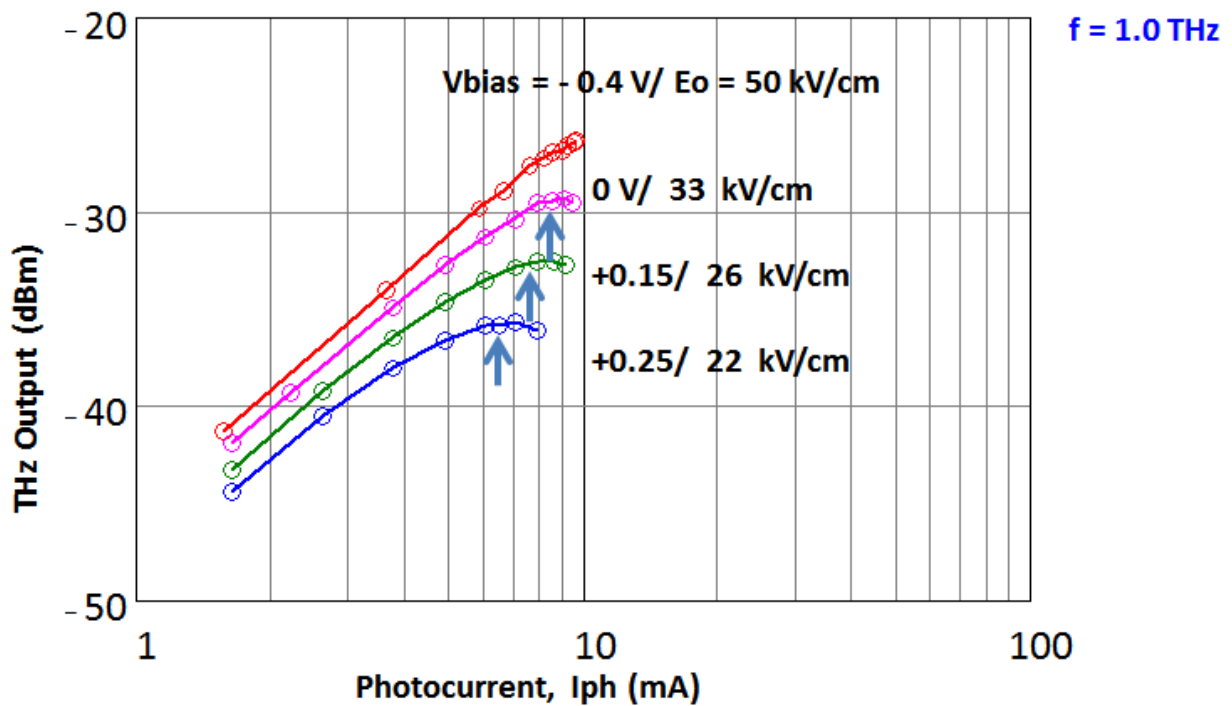
**Fig. 10** 同時に製作した 8 台のフォトミキサの出力周波数特性.  $I_{pd} = 6 \text{ mA}$ ,  $V_{bias} = -0.4 \text{ V}$ .



**Fig. 11** 同空乏層中の電子速度をパラメータとして計算した出力と実験値 ( $I_{pd} = 6 \text{ mA}$ ,  $V_{bias} = -0.4 \text{ V}$ ) の比較. 低バイアス時 (電界 =  $50 \text{ kV/cm}$  は小さくはない) の電子速度は, 飽和速度よりもはるかに高いオーバーシュート状態の速度を示す.



**Fig. 12** THz 出力の動作バイアス電圧依存性. 出力が電圧で大きく変化するのは, キャリア速度が変化することに起因する.  $1 \text{ THz}$  以上では, このフォトダイオード構造の場合  $-0.4 \text{ V}$  ( $50 \text{ kV/cm}$ ) が最適値. 低周波側では, ホール電流の寄与が関与しているものと推測される.



**Fig. 13** THz 出力の動作電流依存性. 最適電圧以下でも線形性を保つ. Fig. 12 で,  $V_{\text{bias}} = -0.4 \text{ V}$  よりも小さな状態であっても, 必ずしも非線形効果によるものではないことが確認される.

## まとめ

- Bow-tie アンテナ集積フォトミキサは優れた広帯域特性を持ち, 緩やかな roll-off を伴う THz 波出力 ( $\sim 3 \text{ THz}$ ) を観測.
- フォトミキサモジュールは, 優れた出力特性の再現性を持つ. (従来の導波管出力形モジュールとの比較)
- THz 出力のバイアス依存性の解析から, 低バイアス時に顕著な電子速度オーバーシュートが存在することを確認.
- 動作周波数による出力変化カーブの違いが存在. ホール電流の寄与によるものと推測される.