

# 高RF出力PDモジュール

酒井清秀\* 石村栄太郎\*\*\*  
板倉成孝\*\*  
中路雅晴\*\*\*

## High-power RF Photodiode Module

Kiyohide Sakai, Shigetaka Itakura, Masaharu Nakaji, Eitaro Ishimura

### 要旨

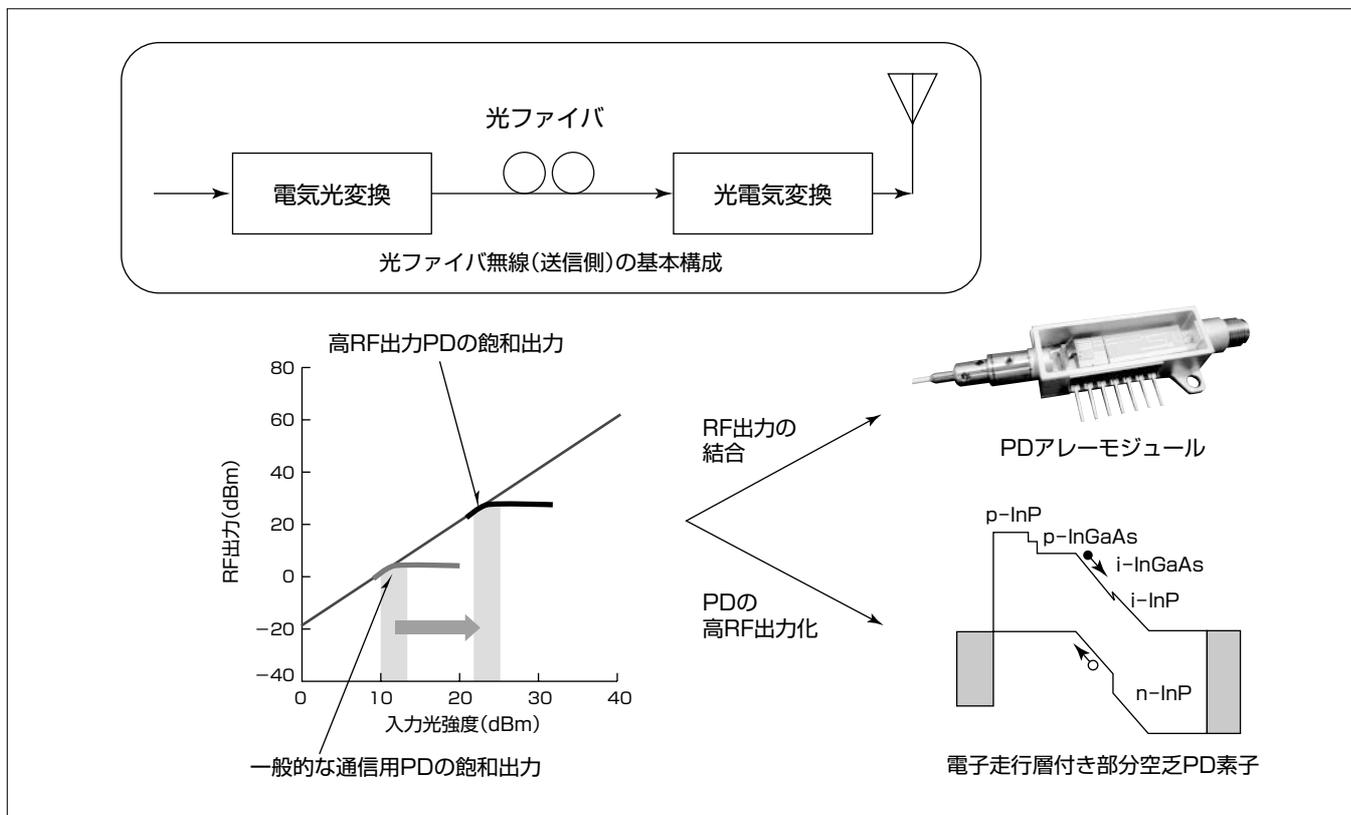
1980年代、米国ケーブルテレビ網の光ファイバ同軸システム向けに分布帰還型半導体レーザーモジュールを開発、商品化して以来、三菱電機は様々なアナログ光伝送用の光半導体デバイスを開発してきた。

現在、光ファイバ無線と呼ばれるアナログ光伝送が注目を集め、携帯電話基地局への長距離伝送や、電波不感帯対策用の無線中継装置など、様々な無線システムで活用されている。無線通信の電波強度は距離や障害物で大きく変動するため、光ファイバ無線にはダイナミックレンジ拡大と、微弱な信号でも復調できるように雑音指数改善が求められる。この課題の解決には、リンク損失の低減、つまり伝送光量の増大が有効だが、デジタル光通信用に開発されたフォトダイオード (Photodiode : PD) は飽和光強度が数ミリ

ワットと低く、光ファイバ無線の適用範囲を狭めてきた。

当社は高周波 (Radio Frequency : RF) 帯での高出力化を目指し、部分空乏型PD素子アレーのRF出力をウィルキンソン結合回路で4合成するPDアレーモジュールを開発し、世界最高レベルのRF出力29dBm (周波数5GHz時) を達成した。さらに、構造が簡単で低コスト化が期待される同軸型PDモジュールへの搭載を目指し、単一素子でRF出力29dBmが得られる電子走行層付き部分空乏型PD素子の開発に成功した。この素子を搭載した同軸型PDモジュールは、過去に例のないRF出力25.2dBm (周波数5GHz時) を実現している。

今後、同軸ケーブルや導波管が用いられてきた短距離のマイクロ波伝送における利用拡大が期待される。



### 光ファイバ無線と高RF出力PDモジュール

光ファイバ無線は光信号を無線信号で変調して光ファイバ伝送する技術である。この光ファイバ無線は強度変化の大きい無線信号を取り扱うため、ダイナミックレンジの拡大と、微弱な信号でも復調できるように雑音指数の低減が求められる。これらの解決にはリンク損失の低減が有効だが、一般的な通信用PDの飽和光強度は数ミリワットであり、十分な高周波 (RF) 出力が得られない。そこで、光ファイバ無線用のPDには、RF出力に対するけた違いの改善が求められている。

## 1. ま え が き

光ファイバ無線(Radio Over Fiber, 又は, Radio On Fiber)は, 光信号を無線信号で変調して光ファイバ伝送する技術である。光ファイバは伝送損失が小さく, かつ, 広帯域であるため, 高周波の長距離伝送に適している。この光ファイバ無線は, 1980年代後半に米国ケーブルテレビ放送向けに光同軸ハイブリッド(Hybrid Fiber-Coaxial)システムとして普及<sup>(1)</sup>, 1990年代半ばから光同軸ハイブリッドを用いた電話やインターネットネットなどの上り回線(Return Pass)<sup>(2)</sup>, 携帯電話基地局への伝送<sup>(3)</sup>, ビル・地下鉄などの電波不感帯対策用無線中継装置などに用いられてきた。特に, 無線中継装置に利用される広帯域光ファイバ無線では, 敷設後に異なる周波数と信号方式を用いた新しい無線サービスが追加されても問題なく通信可能であり, インフラストラクチャとして優れた面を持っている。一方, 短距離の高周波伝送では, 電気光変換と光電気変換での高周波損失が大きいため, いまだに同軸ケーブルや導波管が利用されており, 光ファイバ無線の適用範囲を狭めてきた。

無線通信では電波強度が距離や障害物など通信環境によって大きく変動するため, この無線信号を入出力とする光ファイバ無線では高いダイナミックレンジと, 低い雑音指数が求められる。光ファイバを伝送する光量を増やせばリンク損失が低減され, ダイナミックレンジの拡大と雑音指数の改善が図られる。しかし, 光電気変換器であるフォトダイオードやアバランシェフォトダイオードは, 飽和光強度が数ミリワットと低いため, 20dB程度のリンク損失が避けられない。そこで, PD素子の飽和光強度を向上させ, リンク損失を低減すれば, 光ファイバ無線の適用範囲を更に拡大させることができる。例えば, リンク損失を20dB減らすには, PD素子のRF出力が光電流の二乗に比例するので, 飽和光電流を10倍増加させれば良い。

当社はこの課題を解決するために, 部分空乏型pinPD素子と, それを並列接続したPDアレーモジュールを開発した。最近, さらにRF出力を高めた電子走行層付き部分空乏型pinPD素子と同軸型PDモジュールを開発した。本稿ではこれらの研究成果について述べる。

## 2. PDアレーモジュール

### 2.1 部分空乏型pin PD素子

高RF出力タイプのPD素子は, 円盤型の受光領域に表面又は裏面から光を入射するものと, 角柱型の光導波路に側面から光を入射するものがある。構造の簡単さと周波数特性とのトレードオフから, 前者はおおむね20GHz以下, 後者はそれ以上の周波数で利用されている。また, その半導体構造は, 主に真性半導体(insulator : i)層で光を吸収するpin構造と, 主にp型半導体層で光を吸収し電子のみをキ

ャリアとする単一走行キャリア構造(Uni-Traveling Carrier)がある。前者は光吸収領域を厚くして高感度化しやすい反面, 光電変換によるキャリアによって電界強度が低下しキャリア移動が停滞する空間電荷効果が発生しやすい課題がある。一方, 後者はその逆の特徴を持っている。

当社では, 普及した無線システムの多くが周波数5.8GHz以下を利用することから, 図1に示す裏面入射型のpin構造を採用した。そして, 空間電荷効果を抑圧するため, p-InGaAs層の一部を空乏化, かつi-InGaAs層を薄くして空乏層内の電界強度を高める工夫を行った。また, 40Gbps用光部品と同様に<sup>(4)</sup>, PD素子のp電極が熱伝導性の良いサブマウントに設けたマイクロ波ストリップ線路に直接接続する構造にすることで, 廃熱抵抗の低減と, 配線インダクタンスの低減を図った。その結果, pin PD素子としては世界最高レベルのRF出力25.8dBm(5GHz)を達成した<sup>(5)</sup>。

### 2.2 PDアレーモジュール

複数のPD素子のRF出力を結合する方法は, リンク損失を低減する現実的な方法である。従来, デジタル通信向けに進行波を用いた広帯域の結合方法が研究されてきたが, 無線通信では電波法に基づき周波数が狭帯域に区切られて利用されるため, 狭帯域の低損失化が可能なウィルキンソン結合回路による結合方法を提案し, 構造の簡単化を図った。図2にPDアレーモジュールの回路構成を, 図3にその内部写真を示す。入力光はプリズムで4等分され, PDアレー素子に入射する。4つのPD素子からのRF出力は2段構成のウィルキンソン結合回路を介して結合され, 高周波コネクタ(K connector)から出力される。PD素子へのバイアス電圧は開放スタブとウィルキンソン結合回路を介して印加される。図4は, PD素子単体とPDアレーモジュールのRF出力特性を示す。この図から, PDアレーモジュールでRF出力29.0dBmが得られたことが分かる。理想的にはPD素子単体に比べ6dBのRF出力増加が期待されるが,

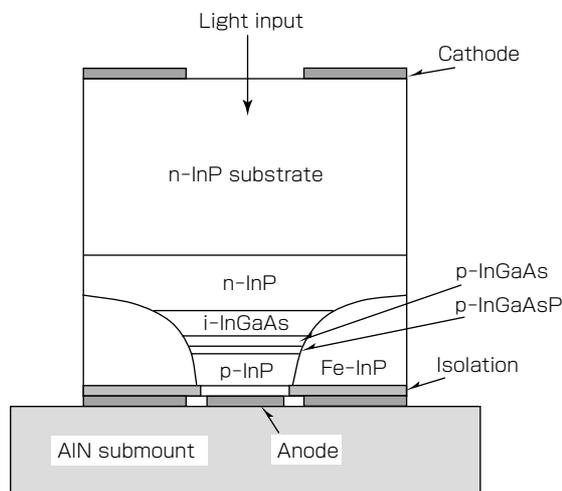


図1. pin PD素子構造

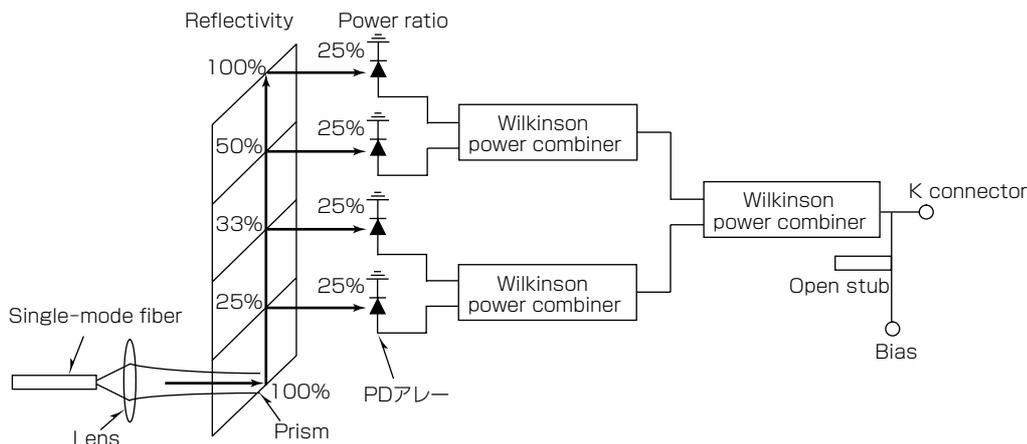


図2. PDアレーモジュールの回路構成

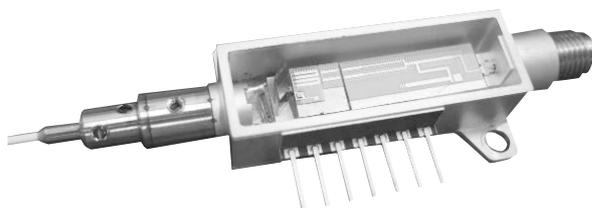


図3. PDアレーモジュールの内部写真

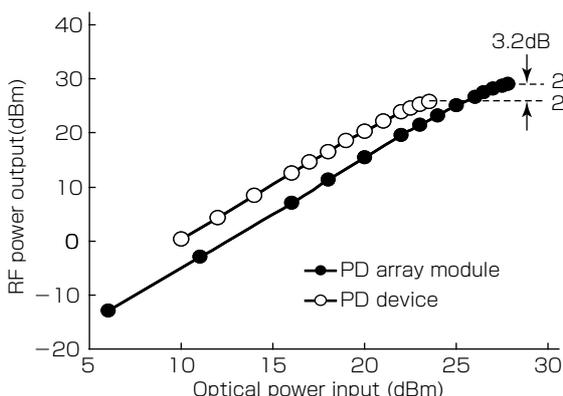


図4. PDアレーモジュールのRF出力特性

実際には3.2dBの増加にとどまっている<sup>(5)</sup>。これは、PDアレー素子間の熱的な干渉が避けられないためである。先の通り、4素子を用いたアレー合成例を示したが、比帯域を狭めれば、さらに合成数を増加させることも可能である。

### 3. 同軸PDモジュール

#### 3.1 電子走行層付き部分空乏型pin PD素子

高RF出力PDモジュールを用いた光ファイバ無線を普及させるには、安価な製造プロセスが確立している同軸PDモジュールで高RF出力化することが望ましい。そのためには、PD素子単体の飽和出力をさらに改善して、単一素子でもワット級のRF出力が得られるようにする必要がある。光吸収層の過熱を防ぎRF出力を増加させるには、受光面積を拡大して単位面積あたりの放熱を改善することが有効である。しかし、受光面積を拡大すると静電容量も増

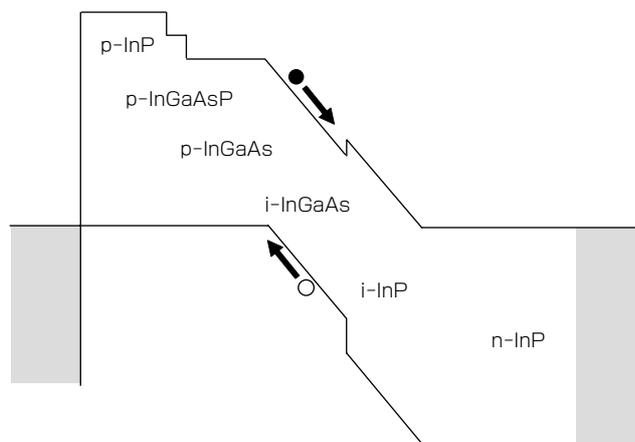


図5. 電子走行層付き部分空乏型pin PD素子のバンド図

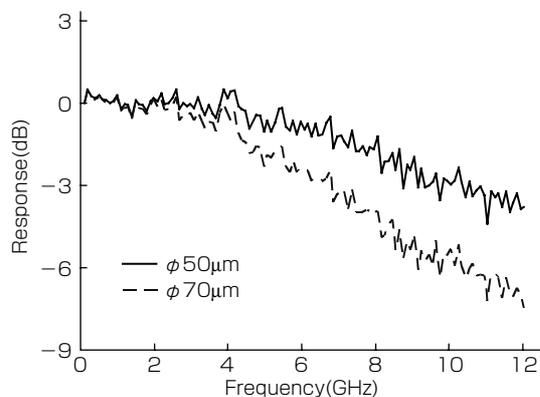


図6. 電子走行層付き部分空乏型pin PD素子の周波数特性

加し、周波数特性が劣化して逆に発熱が増加するジレンマがある。そこで、図5に示すとおり、部分空乏型pin PD素子のi-InGaAs層とn-InP層の間に禁制帯幅の大きい非吸収(i-)InP層を設け、ドリフト速度が高い電子だけを長距離走行させる工夫をすることで静電容量を大幅に低下させ、周波数特性を改善することができた。図6は、受光径50μmと70μmのPD素子の周波数特性である。それぞれ3dB遮断周波数7GHzと10.5GHzが得られているおり、周波数5.8GHz以下の利用では発熱を減少させることができる。この工夫によって、単体のPD素子としては世界最高



図7. 同軸型PDモジュールの外観

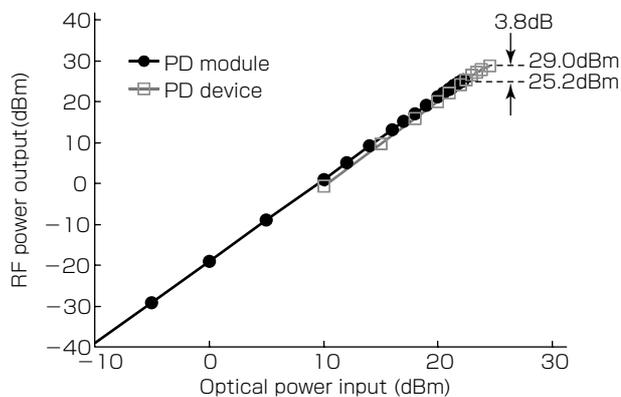


図8. 電子走行層付き部分空乏型pin PD素子と同軸型PDモジュールのRF出力特性

レベルのRF出力29.0dBm(5 GHz)が得られた<sup>(6)</sup>。

### 3.2 同軸型PDモジュール

電子走行層付き部分空乏型pin PD素子を搭載した同軸PDモジュールを開発しており、図7にその外観を示す。デジタル通信用に開発されたパッケージに実装した場合でも、図8に示すRF出力25.2dBm(5 GHz)が得られた。これは、同軸型PDモジュールとしては例のないRF出力である。ただし、モジュール化による熱抵抗の増加によって、PD素子出力に比べるとPDモジュール出力は3.8dB低下している。その原因は熱抵抗の低い筐体(きょうたい)材質による温度上昇が原因であり、熱抵抗の低い鉄などの材料に変更することでさらなる向上を達成することができる<sup>(7)</sup>。

また、無線通信は狭帯域で利用されるため、ビート周波数が信号周波数に近くなる3次歪(ひず)み特性が重要になる。図9は2トーン試験法による3次歪みの測定結果であり、この図から、信号と3次歪みの交点(Third order intercept point : OIP3)で34.6dBmという良好な値が得られている。

## 4. む す び

光ファイバ無線の高性能化のためのキーパーツとして当社が開発した高RF出力フォトダイオード、並びにPDアレーモジュールについて述べた。さらに、その低コスト化を目指した電子走行層付き部分空乏型フォトダイオード、並びに同軸型PDモジュールの開発について述べた。これらの開発によって、高周波のリンク損失低減、ダイナミック

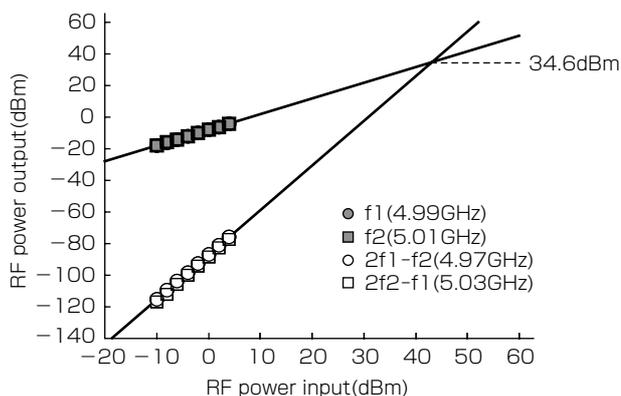


図9. 同軸型PDモジュールの3次歪み特性

レンジ拡大と雑音指数改善が図られ、光ファイバ無線の適用範囲を拡大することができるようになった。

なお、この研究の一部は独立行政法人情報通信研究機構(NICT)の民間基盤技術研究促進制度に基づく委託研究“移動体向け超高速通信用衛星搭載ビーム形状可変マルチビームアンテナ装置の研究開発”によって実施したものである。

## 参 考 文 献

- (1) Takemoto, A., et al.: Distributed feed back laser diode and module for CATV systems, IEEE J. Sel. Area in Comm., **8**, 1359~1364 (1990)
- (2) Watanabe, H., et al.: 1.3- $\mu\text{m}$  uncooled DFB lasers with low distortion for CATV application, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., **3**, 659~665 (1997)
- (3) Watanabe, H., et al.: 1.3- $\mu\text{m}$  strained MQW-DFB lasers with extremely low intermodulation distortion for high-speed analog transmission, IEEE J. Quantum Electron., **32**, 1015~1023 (1996)
- (4) Hatta, T., et al.: Inductance-controlled electroabsorption modulator modules using the flip-chip bonding technique, IEEE J. Lightw. Technol., **23**, 582~587 (2005)
- (5) Itakura, S., et al.: High-current backside-illuminated photodiode array module for optical analog links, IEEE J. Lightw. Technol., **28**, 965~971 (2010)
- (6) Sakai, K., et al.: High-current back-illuminated partially depleted-absorber p-i-n photodiode with depleted nonabsorbing region, IEEE T. Microw. Theory and Technol., **58**, 3154~3160 (2010)
- (7) Sakai, K., et al.: Coaxial high-current photodiode module for analog optical link: Proc. in Annual meeting of IEEE Photonics Society, MD3 (2011)