

■9 群 (電子材料・デバイス) - 5 編 (光デバイス)

3 章 フォトダイオード

【本章の構成】

本章では以下について解説する.

- 3-1 PIN フォトダイオード
- 3-2 アバランシェフォトダイオード (APD)
- 3-3 単一走行キャリアフォトダイオード (UTC-PD)
- 3-4 雑音と受信感度

■9 群-5 編-3 章

3-1 PIN フォトダイオード

(執筆著者：田中滋久) [2019年1月 受領]

半導体にそのバンドギャップより大きなエネルギーを持つ光を照射すると、光が吸収されて電子-正孔対が生成される。半導体に pn 接合が形成されている場合、pn 接合の空乏層付近で生成された電子-正孔対は、空乏層内の内部電界によって電子は正極側へ、正孔は負極側へ集められる。したがって、pn 接合ダイオードに外部回路を接続して光を照射すると、電流 (光電流) が流れることになる。これがフォトダイオードの光信号検出の原理である。

光通信に用いるフォトダイオードとしては、高感度かつ高速で動作するものが望ましい。光電流に寄与する電子-正孔対は、通常は空乏層付近で生成されるもののみであり、空乏層でより効率良く光を吸収した方が大きな光電流を取り出せることになる。そのためには、空乏層を厚くする構造が一般的には有利である。空乏層の厚さは、p 型または n 型のドーピング濃度で決まり、空乏層を厚くするには低ドーピング濃度の半導体層が必要になる。そこで、意図的な不純物ドーピングをせず、出来るだけ真性 (Intrinsic) 半導体に近い層を p 型層と n 型層の間に挟んだ構造が考案され、PIN フォトダイオードと呼ばれている。この構造は、空乏層を厚くできることから pn 接合の容量も小さくすることができ、動作周波数の広帯域化にも有利な構造であるため、高速光通信の受信器に広く用いられている。

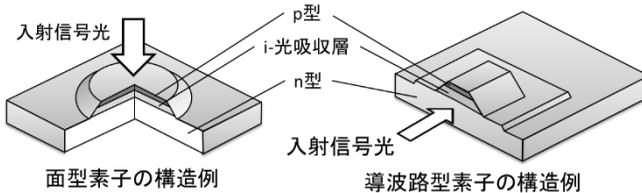


図 1・1 面型素子と導波路型素子の構造例

光通信用の PIN フォトダイオードの特性として重要なのは、感度に加えて帯域と暗電流である。帯域は、主に CR 時定数と空乏層領域のキャリアの走行時間で決まる。高速の応答を実現するには、CR 時定数を低減するとともに、適切な逆バイアス印加によって光吸収層を空乏化させキャリアを電界加速して走行時間も低減してやる必要がある。また、大きな光入力があると、生成された多量のキャリアが滞留して電界を遮蔽してしまう、いわゆる空間電荷効果により著しく応答速度が低下する場合がある。このためにも適切な逆バイアスを印加する必要がある。暗電流は光入力がない状態でもフォトダイオード内で発生している電流であり、受信器の感度や雑音特性に影響する。暗電流は、主に結晶欠陥や種々の界面でのリーク電流、トンネル電流に起因するため、結晶性や素子作製プロセスの改善が重要である。

フォトダイオードの形状は面型と導波路型の 2 つに大きく分けることができる。面型では光吸収層をキャリアが走行する方向と光を吸収する方向が同じである。このため、光感度を得るために吸収層を厚くするとキャリアの走行する時間が長くなり応答速度が低下する。すなわち、面型のフォトダイオードでは感度と応答速度がトレードオフの関係にある。また、従来は光の

入射領域の設計自由度が高いことが面型素子の利点の一つであったが、高速化するには容量の低減が必要になるため、光入射面の面積も素子の高速化とともに小さくなる傾向にあり、感度と応答速度のトレードオフに加えて光結合も課題となってきた。

導波路型素子は、端面出射型の半導体レーザによく似た構造をしており、光を吸収する方向とキャリアが走行する方向とがほぼ直交しているため、感度と帯域を独立に設計できる。このため、面型に比べて高感度化と広帯域化の両立が容易であり、高速光通信に有利である。また、他の導波路型デバイスとの集積に適するなどの特長もあり、近年では Si フォトニクスなどで広く用いられている構造になっている。一方で、単体で用いる場合には、半導体の微小な導波路への光結合の工夫が課題となる。

■9 群-5 編-3 章

3-2 アバランシェフォトダイオード (APD)

(執筆者：田中滋久) [2019年1月 受領]

半導体内の自由キャリア（電子または正孔）は、結晶原子と衝突し散乱されながら移動している。半導体に電界を印加すると、キャリアは電界によって加速されて次第に大きな運動エネルギーを持つようになる。このような状態のキャリアが結晶原子と衝突すると、ある確率で結晶原子から新たなキャリアを放出させる衝突電離（衝突イオン化）という現象が起きるようになる。電界が十分に高いと、放出された新たなキャリアも電界によって加速されて直ちに大きな運動エネルギーを蓄え新たな衝突イオン化が次々と起きるようになる。このような連鎖反応が生じると、一気に自由キャリアが増加し大きな電流が流れることになる。これが半導体のアバランシェブレイクダウン（雪崩降伏）と呼ばれる現象である。

このアバランシェブレイクダウン現象を利用して、自己増幅機能を持たせた受光素子がアバランシェフォトダイオード (APD) である。APD では、素子の一部にアバランシェブレイクダウン寸前の高いバイアス電界をあらかじめ印加しておく。ここに光入射によって一気にフォトリニアが発生すると、これらのキャリアが電界に加速されていたところで衝突イオン化が生じ、ちょうどアバランシェブレイクダウンしたのと同じ状態になって大きな電流が流れる。入射光が途絶えると、元々はアバランシェブレイクダウンをしない電界しか印加されていないので、連鎖反応が維持できなくなり光電流が流れなくなる。

PIN フォトダイオードでは入射した光子数以上のキャリアは発生しないが、APD では入射した光子数以上のキャリアが発生することから入射光信号を増幅したのと同じ効果が得られる。アバランシェ降伏現象を利用した増幅であることからアバランシェ増倍とも呼ばれる。APD の素子自体は、多少複雑ではあるが PIN フォトダイオードに類似しており、高いバイアス電圧さえ準備できれば容易に微小な入射光信号を大きな信号電流に変換できる。このため、ある程度の距離までであれば、外付けの光増幅器などを用いることなく非常に簡便に長距離の光通信が可能になる。

上述のように、APD では、素子の一部にアバランシェブレイクダウンに近い電界を印加する必要がある。長波長の光通信波長帯に用いるバンドギャップエネルギーが小さい半導体では、高電界を印加すると著しいトンネル電流を発生してしまう場合が多い。このため、信号光を吸収するためのバンドギャップエネルギーが小さい光吸収層とアバランシェ増倍を生じさせる層（増倍層）を分離して、それぞれに適した材料を用いる素子構造もよく採用されている。この場合には、光吸収層にはあまり大きな電界が印加されないようにしつつ、増倍層には適切な電界が印加されるように素子を設計するとともに、精密にドーピングを制御して素子内に所望の電界分布を実現することが重要である。

光通信用の APD の性能指標には、利得 (Gain) と帯域 (Bandwidth) の積の利得帯域積 (GB 積) が用いられることが多い。一般に、利得と帯域はトレードオフの関係にあり、増倍層の材料物性の影響を大きく受ける。高速 APD の場合、増倍層に用いる材料物性としては、高電界でもトンネル電流が低いことに加えて、イオン化率比と呼ばれる指標が重要である。これは、電子による衝突イオン化の確率と正孔による衝突イオン化の確率の比であり、両者の差が大きい材料ほど高速動作の APD に有利となる。長波長の光通信波長帯では、従来は光吸収層に

InGaAs, 増倍層に InP や InAlAs を用いた APD が実用化されている. 最近では, 光吸収層に Ge, 増倍層に Si を用いた APD も登場している.

■9 群-5 編-3 章

3-3 単一走行キャリアフォトダイオード (UTC-PD)

(執筆著者：伊藤 弘) [2019年1月 受領]

フォトダイオード (PD) の性能指標のなかで、高速 (広帯域) 性と高出力性は実用面で重要である。現在も広く用いられている pin-PD では、光信号の入力により発生した電子-正孔対のうち、ドリフト速度の遅い正孔の輸送が PD の特性を支配するため、動作速度や飽和出力に一定の制約があった。そのため、光通信、計測、高周波応用など様々な分野において、更なる特性の改良が求められていた。その解決策として、1996 年に NTT 研究所において、単一走行キャリアフォトダイオード (Uni-Traveling-Carrier Photodiode : UTC-PD) が開発された。

図 3・1 に UTC-PD のバンド図を示す。UTC-PD の光吸収層は p 型にドーパされ、光吸収の起こらないワイドギャップのキャリア走行層が空乏層を形成している。光信号の入力により発生したキャリアのうち、多数キャリアである正孔は集団的に誘電緩和時間程度で高速に応答するため、UTC-PD の動作速度は光吸収層中の電子拡散時間とキャリア走行層中の電子ドリフト時間で決まる。また、キャリア走行層中での「電子速度オーバーシュート」をうまく利用することで、比較的厚い空乏層を用いても動作速度への影響は抑えられる。更に、空乏層中を走行するキャリアが電子のみであるため、pin-PD と比べ電子と正孔のドリフト速度比程度に空間電荷効果 (空乏層電界の低下による出力飽和) も抑制できる。これらの特徴により、「速度の遅い正孔」の影響を排除した高速で高出力な動作が実現される。これまでに、InP/InGaAs 系の UTC-PD により、長波 (1.55 μm) 帯で動作する PD としての最高値である 3 dB 帯域 310 GHz が実現されている。また、飽和出力電流も、pin-PD と比べ 1 桁程度高い値が得られている。更に、高周波で強度変調された光信号を光電変換する「フォトミキシング」と呼ばれる手法を用いることで、THz 領域までの広帯域で高出力な電磁波発生も実現されている。

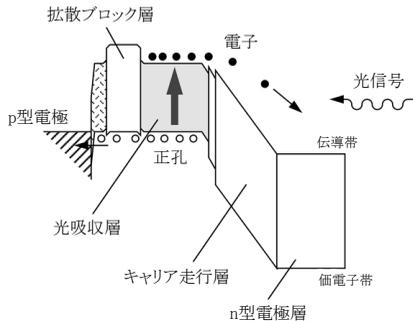


図 3・1 単一走行キャリアフォトダイオード (UTC-PD) のバンド図

■参考文献

- 1) T. Ishibashi, N. Shimizu, S. Kodama, H. Ito, T. Nagatsuma, and T. Furuta : “Uni-Traveling-Carrier Photodiodes,” in *Ultrafast Electronics and Optoelectronics*, M. Nuss and J. Bowers, eds., vol.13 of OSA Trends in Optics and Photonics Series (Optical Society of America, 1997), paper UC3.
<https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=UEO-1997-UC3>
- 2) H. Ito, S. Kodama, Y. Muramoto, T. Furuta, T. Nagatsuma, and T. Ishibashi : “High-Speed and High-Output Uni-Traveling-Carrier Photodiodes,” *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics* 10, no.4, pp.709-727, 2004.

■9 群-5 編-3 章

3-4 雑音と受信感度

(執筆者：宍倉正人) [2019年1月 受領]

雑音と受信感度の間には密接な関係がある。特に、如何に微弱な光信号を受信できるかを示す最少受信感度は、受光デバイスと増幅器で構成される光受信器の性能を表す最も重要な指標の一つである。これは入力光信号強度と光受信器雑音の比である SN 比 (Signal to Noise Ratio) を用いて表現することができる。最少受信感度向上には、SN 比を大きくすることが肝要で、光受信器の変換効率や雑音特性の改善が必要となる。

光受信器の変換効率を上げるには、受光デバイスの内部光電変換効率、及び光ファイバーと受光デバイス間の光結合効率向上が必要となる。また、光電流によって発生する受光器のショット雑音と増幅器で発生する熱雑音をともに小さくすることが必要である。

ショット雑音 $\overline{i_{Ns}^2}$ は受光デバイス内で光電変換によって生じる電子や正孔といった荷電粒子の揺らぎにより発生し、以下の式のように表される。

$$\overline{i_{Ns}^2} = 2q(I_p + I_d)B \quad (4 \cdot 1)$$

ここで、 q は電荷、 I_p は光電流、 I_d は暗電流、 B は帯域幅である。

一方、熱雑音 $\overline{i_{Nt}^2}$ は、以下の式で表される。

$$\overline{i_{Nt}^2} = \frac{4kT}{R_L} F_t B \quad (4 \cdot 2)$$

ここで、 k はボルツマン係数、 R_L は増幅器の入力抵抗、 F_t は増幅器の雑音指数である。

光信号電流を $\overline{i_s^2}$ とすると、式(4・1)、式(4・2)を用いて SN 比は以下のように表される。

$$\frac{S}{N} = \frac{\overline{i_s^2}}{\overline{i_{Ns}^2} + \overline{i_{Nt}^2}} = \frac{I_p^2}{2 \left\{ 2qB(I_p + I_d) + \left(\frac{4kTF_t}{R_L} \right) \right\}} \quad (4 \cdot 3)$$

PIN フォトダイオードでは、ショット雑音 $\overline{i_{Ns}^2}$ に比べ、熱雑音 $\overline{i_{Nt}^2}$ が支配的となることから、上記の式(4・3)を用いて、最少受信感度 P_{min} は以下の式で表される。

$$P_{min} = \left(\frac{h\nu}{\eta q} \right) \left\{ \frac{8kTF_t B}{R_L} \left(\frac{S}{N} \right) \right\}^2 \quad (4 \cdot 4)$$

ここで、 h はプランク定数、 ν は入力光信号周波数、 η は光受信器の光電変換効率である。このように最少受信感度 P_{min} の向上には、光電変換効率の向上、雑音、特に熱雑音の低減が必要である。また APD の場合は、増倍率 M により光電変換効率が改善されるが、一方でこの増倍現象に伴うショット雑音も上昇するため、これを考慮する必要がある。

以下に、PIN フォトダイオードの場合の最少受信感度 P_{min} の概算式を示す。式(4・5)が OMA (Optical Modulation Amplitude) 表記、式(4・6)が平均電力表記である。

$$P_{rmin}(OMA, dBm) = 10 \log \left(\frac{i_n SNR}{\eta} \right) \quad (4 \cdot 5)$$

$$P_{rmin}(Average, dBm) = 10 \log \left(\frac{i_n SNR(\gamma_e + 1)}{\eta(\gamma_e - 1)2} \right) \quad (4 \cdot 6)$$

ここで、 γ_e は消光比、 i_n は増幅器の雑音電流であり、例えば TIA (Trans-Impedance Amp.) の入

力換算雑音電流となる。また SNR は、例えば BER (Bit Error Rate) が $1E-12$ の場合は 14.069, $1E-5$ の場合は 8.530, $1E-4$ の場合は 7.438 となる。上記により、簡単に最少受信感度の概算値を見積もることができる。ただし、上記は最少受信感度が SN 比のみで決まっている場合であり、周波数応答特性に依存した受信波形品質は考慮されていない。特に高速・高周波の伝送や PAM 4 (Pulse Amplitude Modulation) といった多値伝送時には波形に関する注意が必要である。