

高輝度における Si-APD の S/N 特性

金高 修子*・植松 滋幸*

S/N Ratio of The Si-APD at High Background Light

Naoko KINTAKA and Shigeyuki UEMATSU

ABSTRACT

To detect small signal with bright background light, the photosensor must be high responsive for incident light and noise level is low.

Avalanche Photo diode (APD) is good for detecting the small signal at high brightness, because it has high efficiency by avalanche multiplication.

In the case of detecting very small signal, that level is usually $10^{-3} \sim 10^{-4}$ of background light, S/N ratio that depends on noise, is very serious problem.

The purpose of this study is to measure the sensibility limit of using APD at high level background light.

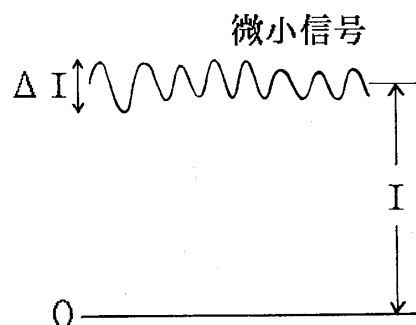
As a result, it is come out that the sensibility limit of APD is about 10^{-4} of background level.

key words : APD, S/N ratio, background light, signal, noise, sensibility limit

キーワード : APD、S/N比、背景光、微小信号、雑音、検出限界

1. まえがき

近年、バイオコンピュータに関する研究が盛んに行われている。⁽¹⁾ そのアプローチとして生物の神経細胞の相互関係についての研究が行われている。⁽²⁾ この研究に使用されている手段の1つに光学的計測法がある。これは、非接触測定であり、また、一度に多くの細胞の挙動を同時計測できる特徴がある。この光学的計測方法は、生物の神経細胞を膜電位感受性色素⁽⁴⁾（膜電位変化に応じて発光したり、透過率が変化する）という特殊な色素で染色した後、フィルタ透過光を照射し、試料を透過した光を受光素子で検出する方法である。このとき受光素子で検出される光は透過光に微小な光量変化が重畳したものであり、その振幅は通常、図1のように背景光の $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 程度と非常に小さい。このような光を検出するのに適した受光素子は高感度で電流利得が高く、低雑音でなければならない。



$$\frac{\Delta I}{I} = 10^{-3} \sim 10^{-4}$$

Fig.1 Relation between background photo current and signal photo current

そこで、光ファイバ通信において長距離用の受光器として使用されている Avalanche Photo Diode に注目した。Avalanche Photo Diode (以下、APD と略す) は、アバランシェ増倍による自己増倍機能のため量子効率が高く、高速応答、かつ低雑音であり、背景光に重畳する微弱な光信号の検出に適していると考えられる。

しかし、微小信号の光量変化が小さい場合、S/N比は無視できない。

本研究は、背景光に重畳した微小な光信号の検出を行う場合に使用するAPDの検出限界を求めることを目的としている。

2. APDのS/N特性

微小な光信号の検出を支配するのは雑音であり、この雑音が検出限界を決める要素となる。

APDの出力を取り出す方法は、図2のような回路が一般的である。APDに光が入射すると光電流*i*が流れ、負荷抵抗Rに発生する電圧を増幅し出力とする。

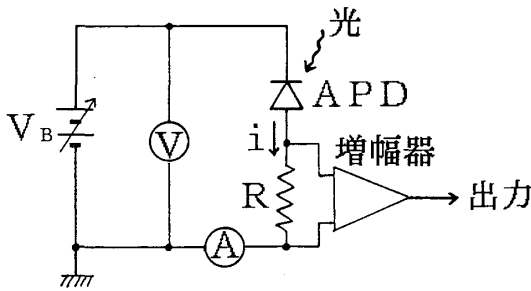


Fig.2 Circuit diagram of photo detection by APD

APDの雑音で主なものはショット雑音と熱雑音である。受光素子で発生する光電流は、空乏層内に発生する電子及び正孔の動きによるものであるが、この荷電粒子の発生がバラバラであるため発生電流にはゆらぎが生じる。これがショット雑音である。

一方、熱雑音は負荷抵抗および増幅器において発生する雑音である。負荷抵抗等の抵抗体中存在する自由電子は常温でも熱運動をするため、その自由電子の動きによってゆらぎ電圧が起こり、接続回路にゆらぎ電流が流れる。したがって、APDから出力される電流は光信号によって発生した信号電流にショット雑音および熱雑音による雑音電流が加わったものとなる。

これらは次のような式で表される。

信号成分
$$\overline{i_s^2} = \frac{1}{2} \rho^2 M^2 P_S^2 \dots\dots(1)$$

ショット雑音成分
$$\overline{i_{SH}^2} = e \rho M^2 F P_S B \dots\dots(2)$$

熱雑音成分
$$\overline{i_{TH}^2} = 4 k T B / R \dots\dots(3)$$

- e : 電荷(1.602×10⁻¹⁹[c])
- M : 増倍率
- P_S : 入射光エネルギー [J]
- ρ : 量子効率 [%]
- F : 過剰雑音指数 (=M^X) [X_{Si}=0.2~0.3]
- B : 増幅器の周波数帯域 [Hz]
- R : 負荷抵抗 [Ω]
- k : Boltzman定数 (1.38×10⁻²³ [J/K])
- T : 絶対温度 [K]

これら3式の値はすべて電流の自乗平均値で表されている。ここで、Fの過剰雑音指数はAPD特有の雑音であり、F=M^Xで表される。APDは高い逆バイアス電圧を加えることで空乏層を広げ、キャリアの格子衝突によるイオン化を利用して電流を増倍するが、このイオン化の際に生じるキャリアのゆらぎが過剰雑音である。つまり光エネルギーによって生じた最初のキャリアが原因で発生するショット雑音に、このイオン化による過剰雑音を加わったものがAPDのショット雑音となる。

式(1)、(2)、(3)を用い、APDに関するデータをもとに $\overline{i_s^2}$ 、 $\overline{i_{SH}^2}$ 、 $\overline{i_{TH}^2}$ を計算した結果を、図3に示す。

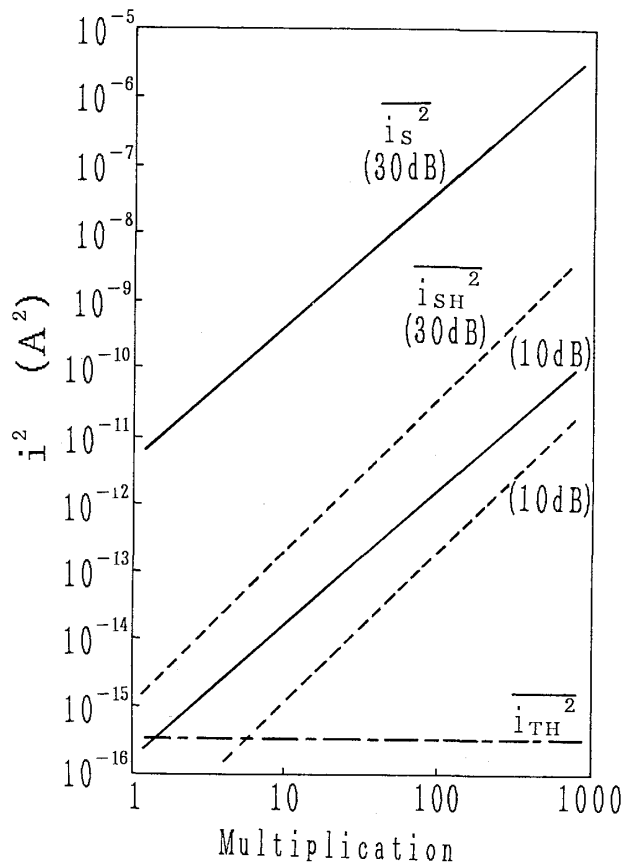


Fig.3 Multiplication factor dependence of photo current and noise current

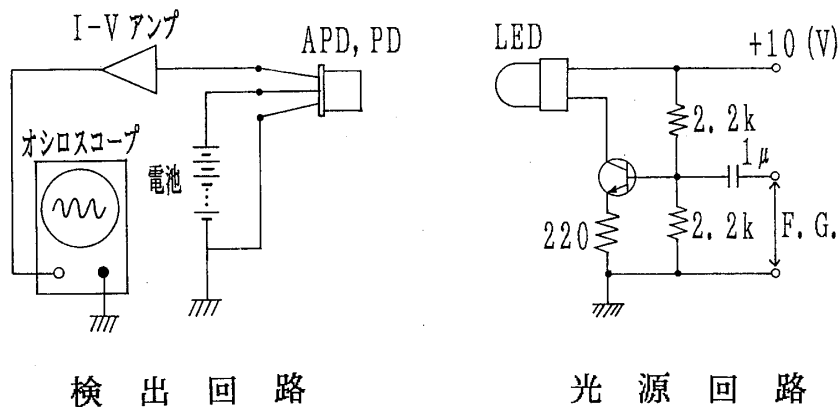


Fig.4 Measurement circuit

縦軸、横軸はそれぞれ電流の自乗平均値、増倍率をである。図中の30 [dB]、10 [dB] は、入射光の強度を表すパラメータである。入射光のレベルが30 [dB] であるときと、10 [dB] であるときのS/N比を比較すると、30 [dB] の方が約4倍良い。つまり、入射光レベルが高い方がS/N比が上がることになる。また、入射光が30 [dB] であるときの雑音はショット雑音が主であり、熱雑音は無視できる。

微小信号が検出可能であるためには、微小信号の振幅が雑音の振幅よりも大きくなければならない。この図の場合、微小信号のレベルが i_{SH}^2 または i_{TH}^2 の値より大きいとき検出可能である。このときの検出限界は i_{SH}^2 または i_{TH}^2 の値を i_S^2 で割った値で表せる。

この図において、入射光レベルが30 [dB] であるときの検出限界は、自乗平均値で 10^{-4} であるから、電流値では 10^{-2} 程度となる。

3. APDによる背景光中の微小信号の測定

上記考察をもとに、実際にAPDを用いて微小信号検出の測定を行った。

3.1 測定回路および検出方法

図4は測定に使用した光源と検出回路である。光源には波長660 [nm] (赤色) のLEDを使用した。白熱電球を使用した場合、フィラメントの振動および発熱により出力が不安定となり雑音が多く発生したためLEDを使用した。

この回路は、Function Generatorの出力をLEDの電源に重畳して微小な光量変化を与えることができる。

検出回路には、受光器としてAPDと、比較・参照のためPDを使用した。増幅器には、背景光成分と微小信号成分がそれぞれ直流電圧、交流電圧で出力されるI-Vアンプを使用し、その電圧値から計算によって電流値を求めた。

3.2 測定結果

図5はFunction Generatorで変調度を変化させたときの微小信号成分の出力電流である。背景光のレベルを高、中、低と3種類とった。PDの出力電流を基準とすると、低が13.3 [nA]、中が27.3 [nA]、高が39.4 [nA]で、低を1とすると中が2倍、高が3倍となっており、入射光エネルギーも同じく1倍、2倍、3倍となっていると考えられる。また、APDのバイアス電圧も56.0

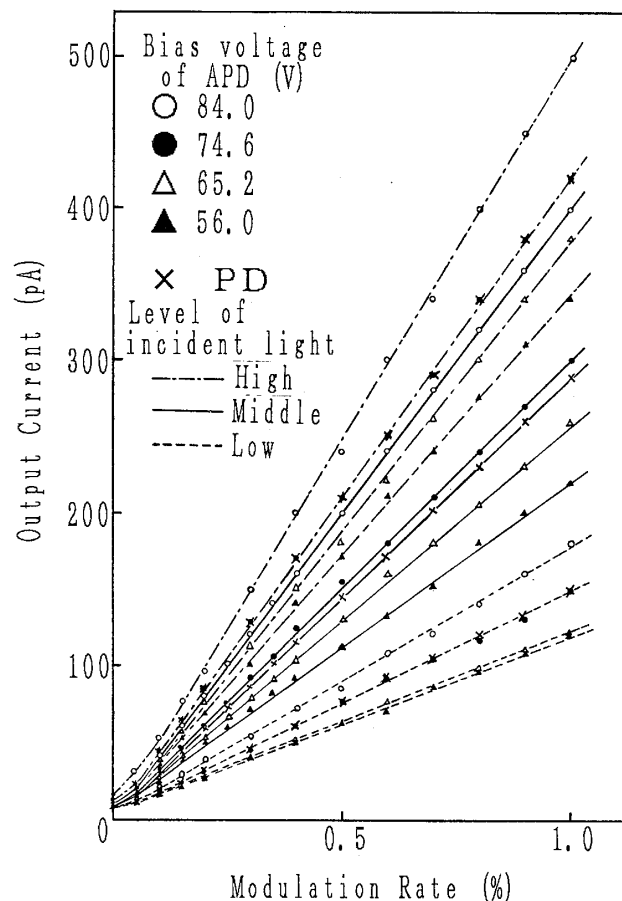


Fig.5 Modulation rate dependency of output signal current

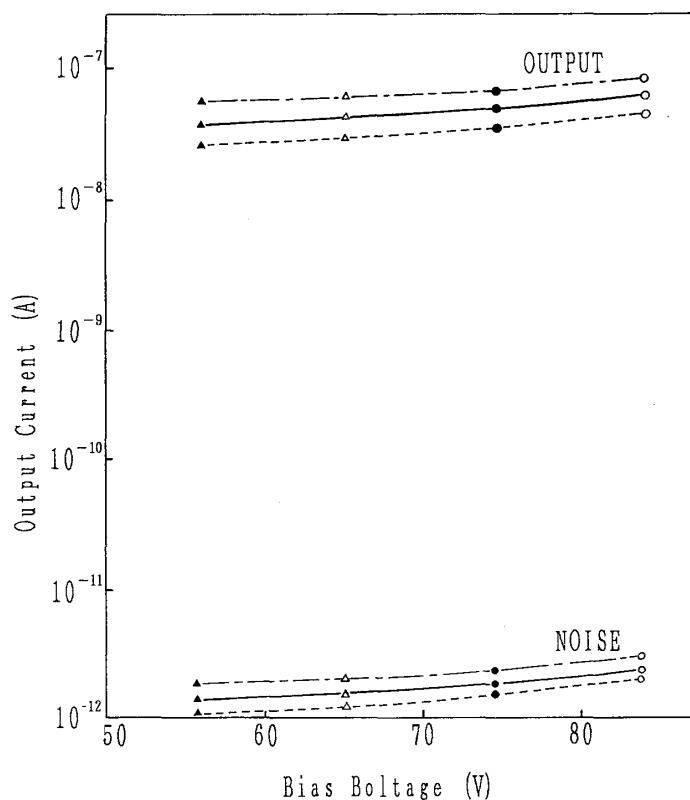


Fig.6 Background photo current and noise current

[V]、65.2 [V]、74.6 [V]、84.0 [V] と変化させた。

この図からわかるように、変調度が0 [%] から1.0 [%] まで微小信号が検出されている。また、バイアス電圧が高くなるにつれて出力電圧も高くなる。

ここで注目することは、変調度0 [%] のときの微小信号成分である。これが雑音であり、微小信号検出の検出限界を決定するものである。

そこで、背景光を3段階に変化させたときの雑音を、測定した。

図6は背景光電流と雑音電流の関係を示す。図中の、OUTPUTは背景光に対する出力電流、NOISEは雑音電流を示す。横軸は、APDの逆バイアス電圧である。

この図から、APDの検出限界が約 10^{-4} 程度であることがわかる。また、バイアス電圧の増加に対する出力電流の増加率に比べ雑音電流の増加率の方が大きい。つまり、APDの逆バイアス電圧を高くすることは雑音の増加につながり、検出限界が大きくなる。

4. まとめ

APDに光を照射したときの背景光電流と雑音電流の測定により、次の事項がわかった。

① APDで光信号の検出を行う場合、背景光が低いとき

よりも、高いときの方がS/N比が高い。

② APDは微小信号の検出に有利であり、その検出限界は背景光レベルの約 10^{-4} 程度である。

【謝 辞】

実験を手伝ってくれた福山大学工学部電子・電気工学科学生の伊藤浩二君に感謝します。

参考文献

- (1) 神沼 二真 他：バイオコンピュータ，紀伊国屋 (1988)。
- (2) B. Katz：“narve, muscle and synapse”，Mc’Graw Hill (1990)
- (3) 永津 俊治 他：脳のレセプターと運動，P175，平凡社 (1990)。
- (4) 米津 宏雄：光通信素子工学—発光・受光素子—，工学図書株式会社 (昭和59年)。
- (5) 桜庭 一郎：オプトエレクトロニクス入門，森北出版 (1983)。
- (6) 合原 一幸：ニューラルコンピュータ 脳と神経に学ぶ，東京電機大学出版局 (昭和63年)。
- (7) 未発表資料