

Pixelated Photon Detector における動作メカニズムのモデル化に関する研究

音野 瑛俊^{a,*}, 生出 秀行^a, 吉岡 瑞樹^b, 山下 了^b,

^a113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1 東京大学理学系研究科物理学専攻
^b113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1 東京大学素粒子物理国際研究センター

Abstract

Pixelated Photon Detector (PPD) は高い光子計数能力を持つ新型半導体光検出器である。現在まで PPD の内部等価回路を理解する研究が進められているが、増倍現象を含みかつ出力波形を再現する等価回路は考案されていない。我々は、アパランシェの増倍過程と収束を含んだ動的な等価回路を考案し、PPD の特徴的な波形を再現することに成功した。本稿では既存の等価回路について考察を加えた後、それらの問題点を改善したモデルについて報告する。

Key words: PPD, Geiger-mode APD, Multi-pixel Photon Counter

1. Introduction

PPD は単光子に感度があり、光子計数能力を持つ新型半導体検出器である。この検出器はダイオードとクエンチング抵抗からなるピクセルが多数個集まることで構成されている。1990 年代にロシアで開発が始まって以来、世界中の多くの施設で研究が進められてきた [1]。現在、PPD は PMT より優れた特性を多く持ち、高エネルギー物理実験分野や医療分野で近い将来 PMT に取って代わることが期待されている。

PPD はガイガーモードと呼ばれる雪崩破壊が起こる電圧領域で駆動させ、クエンチング抵抗の寄与で正常に動作すると考えられている。PPD の内部等価回路を理解する研究が進められているが、これまで増倍現象を含みかつ出力波形を再現する等価回路は考案されていない。本稿では既存の等価回路について考察を加えた後、それらの問題点を改善するモデルについて報告する。

本稿での測定は浜松ホトニクス製の PPD である MPPC(S10262-11-025) を用いた [2, 3]。MPPC とは浜松ホトニクスが製造した PPD の販売名称である。

2. Existing Model of PPD

2.1. Traditional Model

PPD の駆動電圧 (V_{op}) はブレイクダウン電圧 (V_{br}) より数ボルト高く、この電圧領域をガイガーモードと呼ぶ。

この電圧領域では、ダイオードでの増倍が止まらず雪崩破壊を起こしてしまうため、クエンチング抵抗を直列に配置することでダイオード部の印加電圧を低下させる (Fig.1 参照)。つまり、クエンチング抵抗に流れ込む電流が $\frac{V_{op}-V_{br}}{R_q}$ に等しくなった時にダイオードの印加電圧はブレイクダウン電圧まで低下し、増倍が止まる。ここで R_q はクエンチング抵抗の抵抗値である。クエンチング抵抗の抵抗値は順方向電圧電流特性を用い、 $R_q \times N_{pixels} = \frac{V_f}{I_f}$ から求められる。ここで N_{pixels} は PPD のピクセル数であり、本稿で用いた MPPC の場合 1600 である。また I_f 、 V_f は順方向電圧時の電流、電圧値である。以上

* corresponding author.

Email address: otono@icepp.s.u-tokyo.ac.jp (音野 瑛俊).

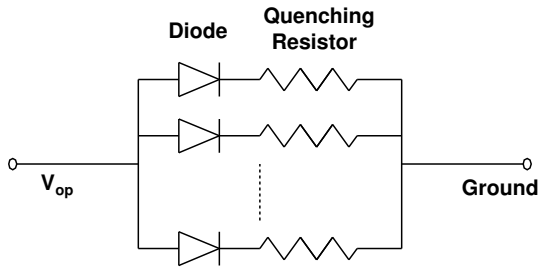


Fig. 1. 従来の PPD の等価回路。それぞれのピクセルはダイオード部とクエンチング抵抗から構成される。

より、300K、200K、77K で測定を行い、その結果 $0.21\text{M}\Omega$ 、 $0.40\text{M}\Omega$ 、 $1.68\text{M}\Omega$ の抵抗値を得た [4]。各温度での抵抗値からクエンチング抵抗が負の抵抗係数を持っていることが分かるが、これは MPCC のクエンチング抵抗の素材であるポリシリコンの非晶体構造に起因する [5]。

Fig.2 は印加電圧が $V_{op} = V_{br} + 3V$ での各温度の平均波形を示し、77K、200K においてスパイク状の成分が確認できる。また、300K においても単一指数関数でフィットできないことから、77K と同様のスパイク状の成分を持っていると予想される。Fig.2 内の点線は上述の動作モデルから示唆される波高 $V_{expected}$ であり以下の式に従う。

$$V_{expected} = \frac{V_{op} - V_{br}}{R_q} \times A \times Z_{input}$$

ここで A は本稿で用いているアンプ (帯域: 1.5GHz、浜松製 C5549) の増倍率 63、 Z_{input} はオシロスコブのインプットインピーダンスで 50Ω である。 $V_{expected}$ と比較すると、実測波形は温度が下がるにつれて大きな波高を示し、上述のモデルが不十分であることが分かる。

ここで、低温下での波形は抵抗の増加にのみ起因することは、温度に依らず

- キャリアの速度は高電場ではほぼ一定である ($E \sim 10^5 [\text{V}/\text{cm}]$)
- 空乏層の厚さは変化しない [4]
- V_{br} 近傍で衝突イオン化係数はほぼ同じである [6] ことを根拠としている。さらに、MPCC の下流に抵抗を外付けした際に低温下と同様の波形が確認されており、この事実からもスパイク状波形が半導体物理の温度変化に依らないものであることが理解できる。

2.2. A model developed by ITC-irst group

常温において同様のスパイク状の波形が ITC-irst グループによっても報告されており、起源はクエンチング抵抗とシリコンの間に挟まれている酸化シリコンの静電容量 C_q であるとしている [7]。Fig.3 は 1

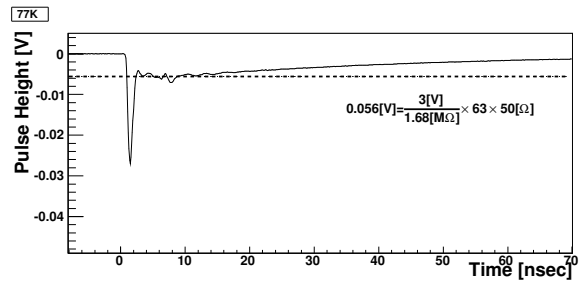
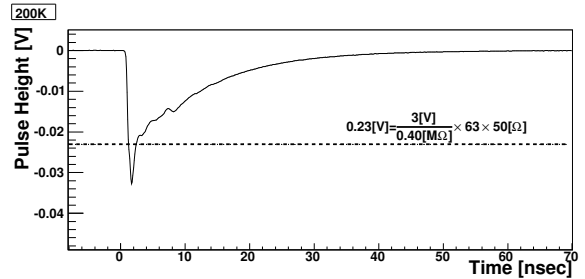
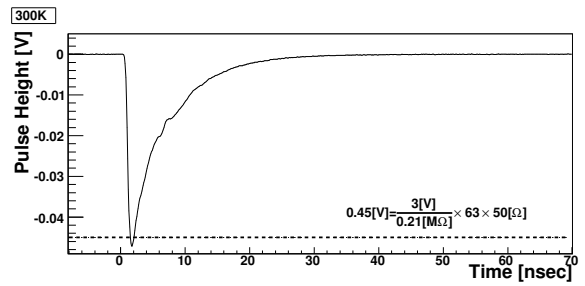


Fig. 2. 上から 300K、200K、77K での平均波形。低温になるにつれてスパイク部が顕在化していく様子が分かる。破線は 2.1 節でのモデルから予想される波高を示し、低温になるにつれて一致が悪くなる。

ピクセルの等価回路を示し、スイッチはダイオード部に電子正孔が 1 対出来た時に OFF から ON に変わり、印加電圧が V_{br} に漸近した時に OFF に戻る。 R_s はそれぞれのシリコンピクセルの持つ直列抵抗成分、 C_d はその静電容量である。ここで、回路方程式

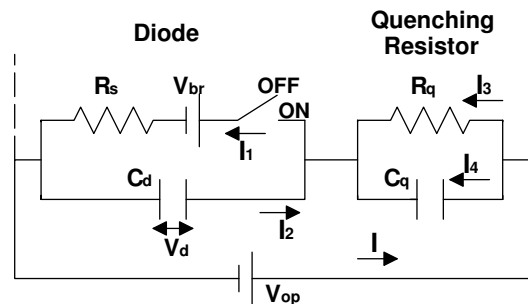


Fig. 3. ITC-irst グループの示した PPD モデル。クエンチング抵抗とダイオードの間に実効的な静電容量 C_q があると考えている。また、アバランシェの増幅過程とその収束をスイッチの ON、OFF で表している。

の解析解から、 $C_q R_q - R_s C_d$ の値が正の場合にスパイク成分が顕在化した 2 成分波形となり、負の場合にテール部のみの 1 成分波形が予想され、観測される出力波形を定性的に説明することが可能である。また、ITC-irst グループは C_q の値が小さくなるようにクエンチング抵抗を配置した PPD を作製した所、スパイク状の成分は観測されなかった [7]。これは $C_q R_q - R_s C_d$ が負の値になったことを示している。

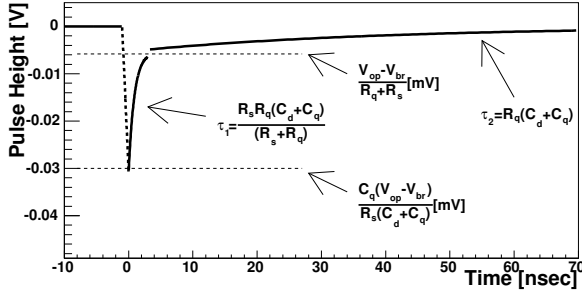


Fig. 4. Fig.3 の等価回路から導かれる典型的な 2 成分波形。

このモデルでは R_s 、 C_q が波形の再現に重要な役割を果たし、スイッチが OFF から ON に変わると、電流は最初に C_q に流れ込み、その立ち下がりには R_s で特徴づけられる時定数で記述される。その結果 Fig.4 に示すようなスパイク状の波形が観測されると説明される。

3. A new model including avalanche process

前述のモデルではアバランシェの増幅過程をスイッチの ON と OFF で表しており過渡変化そのものを記述しておらず、そのため Fig.4 に示すような電圧値の不連続点が存在する。そこで、我々はアバランシェ増幅の過渡変化を組み込むことで、自律的に収束を起こす等価回路を考案した。特筆すべきはシリコンピクセルの持つ直流抵抗成分 R_s に相当する成分も必要としないことであり、Fig.5 に示すようなシンプルな回路になっている。回路方程式を以下に示す。

$$\begin{cases} V_{op} = V_d(t) + I_1 R_q \\ V_{op} = V_d(t) + \frac{\int_0^t I_2 dt}{C_q} \\ V_d(t) = \frac{Q - q(t) + \int_0^t (I(t) dt)}{C_d} \end{cases}$$

ここで、 $V_d(t)$ は増倍層に印加された電圧であり、変動はダイオード内部で生成される電荷 $q(t)$ と外部回路から流入する電流 $I(t)$ で表している。これらを解いて、

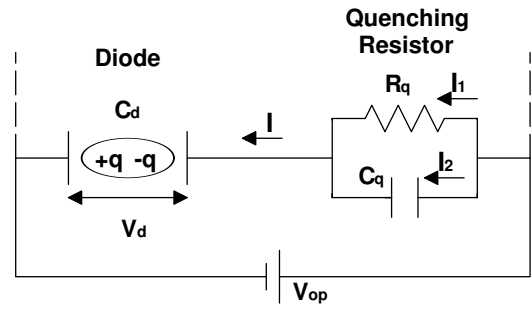


Fig. 5. 本稿で考案した PPD の等価回路。増倍層に印加された電圧 V_d は内部でアバランシェ増幅によって生成される電荷と外部回路から流入する電流 I で決定される。流入電流は回路方程式に従い、アバランシェ増幅は衝突イオン化係数に従う。

$$\frac{dV_d(t)}{dt} = \frac{1}{R_q(C_d + C_q)} (V_{op} - V_d(t) - R_q \frac{dq(t)}{dt})$$

となる。 $t = 0$ において光の入射などに起因する電子正孔が 1 対できたと仮定する。衝突イオン化によるキャリアの増加は $V_d(t)$ に強く依存し、それぞれの瞬間に生成されるキャリアの電荷は電荷素量 e 、及び増倍層に存在する電子正孔の数 $N_e N_h$ 、衝突イオン化係数 $\alpha_e \alpha_h$ 、速度 $v_e v_h$ を用いることで

$$\frac{dq(t)}{dt} = e(N_e \alpha_e(V_d(t))v_e + N_h \alpha_h(V_d(t))v_h)$$

と記述される。 $\frac{dV_d(t)}{dt}$ と合わせて数値的に微分方程式を解くことが可能となり、 $q(t)$ 及び $V_d(t)$ の逐次変化を知ることができる。PPD の出力電流でもある $I(t)$ は

$$I(t) = C_d \frac{dV_d(t)}{dt} + \frac{dq(t)}{dt} \quad (1)$$

となり、コネクタ、ケーブル及びアンプの周波数特性を考慮することで実測波形と比較することが可能となる [8]。本稿では 1.4GHz までの周波数帯域を持つコネクタ (Suhner 製 QLA コネクタ) を用いており、このコネクタが伝送特性を決めている。Fig.6 に波形の変形の様子を示す。

Fig.7 に式 (1) 及び伝送特性から予測される波形と実測した波形を示す。ここで C_q は 2fF とした。各温度で変化させたパラメータはクエンチング抵抗の抵抗値 R_q (0.21 M Ω 、0.40 M Ω 、1.68 M Ω) のみであり、300K から 77K に渡るまで波形を再現できていることがわかる。

4. Conclusion

本稿では、アバランシェの増倍過程と収束を含んだ動的な等価回路を新たに考案し、MPPC の特徴的な波形を再現することに成功した。アバランシェ過

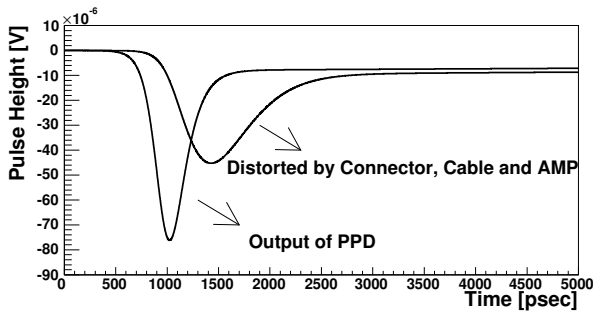


Fig. 6. 本稿で考案したモデルから予想される PPD の出力波形と、コネクタ、ケーブル及びアンプの伝送特性を考慮した波形

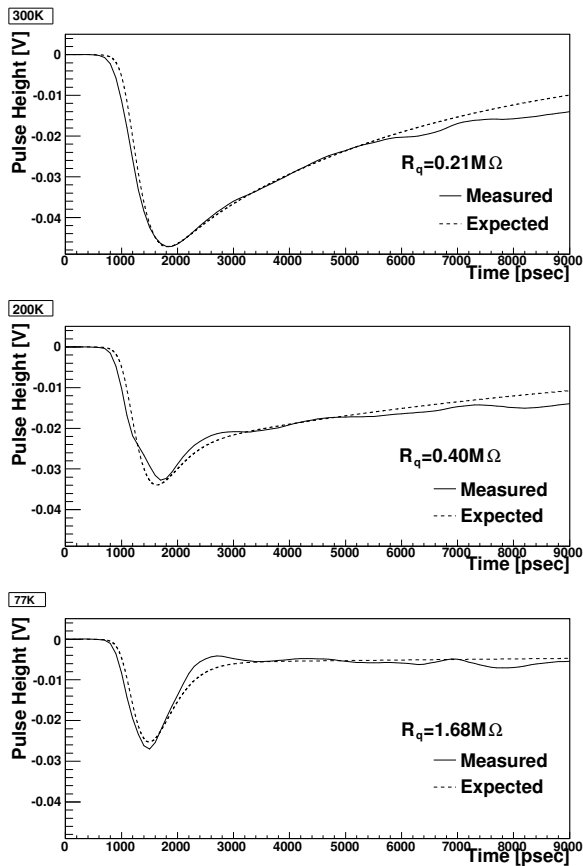


Fig. 7. 本稿で考案したモデルから予想される波形と実測波形。

程が始まると、電流は最初に酸化シリコンの静電容量に流れ込みスパイク状の波形として観測される。同時にアバランシェ増幅はクエンチング抵抗での電圧降下の寄与で抑制されて収束する。低温下でクエンチング抵抗の抵抗値が大きくなると、テール部が徐々になだらかになるため、スパイク状の波形が顕在化していく。

我々は半導体物性及び回路方程式を同時に扱える

シミュレータを用いて PPD の幾何構造の最適化を目指した研究開発を行なっている。我々の考案した等価回路によって、アバランシェ増幅とその収束及び出力波形を総合的に理解することが可能となり、今後の PPD 開発において重要な役割を果たすことと考えられる。

5. Acknowledgement

浜松ホトニクス及び KEK 測定器開発室のメンバーとの有益な議論が本稿の執筆にあたり、非常に助けとなりました。改めて感謝いたします。

References

- [1] D. Renker. Geiger-mode avalanche photodiodes, history, properties and problems. *Nucl. Instrum. Meth.*, A567:48–56, 2006.
- [2] K. Yamamoto et al. Newly developed semiconductor detectors by Hamamatsu. *International Workshop on new Photon-Detectors Proceedings*, PoS(PD07)004.
- [3] S. Gomi et al. Development and study of the multi pixel photon counter. *Nucl. Instrum. Meth.*, A581:427–432, 2007.
- [4] H. Otono et al. Study of MPPC at liquid nitrogen temperature. *International Workshop on new Photon-Detectors Proceedings*, PoS(PD07)007.
- [5] K. Kato et al. A Physical Mechanism of Current-Induced Resistance Decrease in Heavily Doped Polysilicon Resistors. *IEEE Trans. Elec.*, ED-29, No.8:1156–1161, 1982.
- [6] K. Rose et al. Temperature dependent effective ionization coefficient for Si. *J. Appl. Phys.*, Vol.83, No.9:4988–4990, 1998.
- [7] C. Piemonte et al. Characterization of the First Prototypes of Silicon Photomultiplier Fabricated at ITC-irst. *IEEE Transaction on Nuclear Science*, Vol.54, No.1:236–244, 2007.
- [8] G Brianti. Distortion of Fast Pulses in Coaxial Cables Numerical Analysis and Applications. *Cern Yellow Report*, 65-10, 1965.