

氏 名 河田 剛

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大乙第 263 号

学位授与の日付 2020 年 3 月 24 日

学位授与の要件 学位規則第6条第2項該当

学位論文題目 Geiger-mode で駆動する avalanche photodiode の時間応答解析

論文審査委員 主 査 教授 熊井 玲児
教授 五十嵐 教之
教授 田中 真伸
教授 岸本 俊二

博士論文の要旨

氏 名 河田 剛

論文題目 Geiger-mode で駆動する avalanche photodiode の時間応答解析

Avalanche photodiode (APD)は半導体プロセスで作成でき、微弱光を高い増幅率で検出可能な半導体光センサである。光を粒として捉えるフォトンカウンティング計測を安価でコンパクトに実現可能なデバイスとして注目されている。近年の技術進歩により、読み出し回路の高集積化や、CMOS半導体プロセスの適用による読み出し回路と一体化したイメージセンサとしてのCMOS-APDの開発も検討されている。

ダイオード内のavalanche増倍過程は100ピコ秒未満と瞬時に完了する。その優れた時間分解能から、タイミング計測による飛行時間測定 (Time-of-flight: TOF) や蛍光寿命測定による光物性評価などに応用されている。Geiger-mode で駆動するAPD (GM-APD) は、 $10^3 \sim 10^6$ という高い利得と10%以上の高い光子検出効率を有する半導体光センサとして注目されている。さらに、半導体プロセスを適用してGM-APDを10 μm ピッチ程度で集積化すれば、高い時間分解能と空間分解能、そして大きな内部増幅率を有する光センサとなる。このようなGM-APDアレイは、産業・学術分野の幅広い領域で期待を集めている。

TOF計測への応用を考えた場合、車載LiDAR用光センサや γ 線カメラやPET向けの放射線検出器、そして2次元蛍光寿命イメージング用の光センサなどの応用が考えられる。GM-APDが高精細化すれば、対象となる応用分野の価値は益々高まることが期待される。放射光を利用した物質構造科学の分野でも、計測対象物質を拡大するために時間分解能と空間分解能の向上は重要となっている。近年、実生活には無機・有機問わず幅広い材料が用いられており、時間分解能100ピコ秒未満で空間分解能100 μm 未満のAPD実現への期待は大きい。

翻って、GM-APDを用いた時間分解計測において、ダイオード内部の複雑なavalanche増倍過程と、その増倍過程に付随する過剰ノイズ発生機構を理解することは、デバイスのカスタム設計やシステム応用の広範化を実現する上で重要となる。本研究ではGM-APDの時間応答過程に注目した。ピコ秒幅のパルスレーザーを単一GM-APDに照射し、デバイス内部に電子-正孔対を励起する。その応答波形を用いて時間分解計測や出力波高計測を行った。GM-APD内部のavalanche増倍のクエンチングメカニズムの理解と、アフターパルスの確率モデルを検討した。

本論文の構成は以下のとおりである。1章は本研究の背景と目的を示すための序論である。APDの概要とその特徴を生かした応用システムについて述べる。

2章では、本研究で注目するAPDの光センサとしての特徴を、増倍機構を有する光電子増倍管 (PMT)、マイクロチャンネルプレート (MCP)、そして増倍機構を有さないフォトダイオード (PD) と比較する。特に、時間分解計測と強度分布を同時に測定することを目的とした場合に重要となる、時間分解能および増幅率に着目する。

3章ではAPDの優れた時間応答、そして、半導体プロセスを適用することで実現される

高い集積性を利用した APD の応用例を、特に GM-APD に注目して、その特徴を説明する。そして、GM-APD の改良のポイントとしてさらなる高精細化を提案し、改良に向けた課題を指摘する。指摘した課題で、本研究で着目する GM-APD の時間応答に関するものとして、ダイオード領域面積の avalanche 増倍過程への影響と、APD アフターパルスの計測とモデル化の重要性について述べる。

4 章では GM-APD の利得に注目して得られた、本研究の成果を述べる。GM-APD の利得は、印加電圧とブレークダウン電圧との差で定義されるオーバー電圧に比例し、複数光子の入射に対して出力する信号波形は変わらないとされてきた。本研究では、GM-APD クエンチングメカニズムに改めて注目し、この関係が必ずしも成り立たないことを示す。パルス幅数十ピコ秒のパルスレーザーを単一 GM-APD マイクロセル (Single-photon avalanche diode (SPAD)) に照射し、パルスの入射タイミングに同期した SPAD 出力パルスの解析を行った。SPAD に照射するレーザー光強度を変化させたところ、光子入射の結果誘起される平均的な avalanche 増倍の数が 1 個以上のとき、明瞭なパルス波高の増加が認められた。これは、これまでの GM-APD のモデルでは説明できない現象である。本研究では、GM-APD の 1 次元 TCAD シミュレータを自作し、3 次元的な avalanche 電流を等価回路で模擬した。具体的にはダイオードの接合容量を、avalanche 電流領域と電流が流れない領域とに分割することで模擬した。APD モデルにおいて、SPAD への入射光子数が増えるほど同時に生成される avalanche 増倍の電流領域の面積が増え、結果として avalanche 電流の構成する容量が大きくなる。このモデルを用いて実験結果を評価したところ、SPAD に誘起される avalanche 増倍の数が多くなるほど、SPAD の出力信号が増加することを数値的に示すことが出来た。なお、単一光子によって生成される avalanche 電流領域の面積は、Lacaita らの検討と同様、ダイオード領域の 10% 程度であるとした。

5 章では GM-APD の過剰ノイズの内、特にアフターパルスに注目した本研究の成果を述べる。GM-APD やそれを並列に接続してアレイ化した検出器において、観測光子数の正確さや光子数揺らぎは APD の過剰ノイズに制限される。ここで、GM-APD の過剰ノイズとしてはアフターパルスや APD マイクロセル間クロストークが考えられる。これらの過剰ノイズは互いに相関しているため、相互の影響を排除して独立にアフターパルスや APD マイクロセル間クロストーク確率を決定することは難しい。とりわけ、アフターパルスは素子分離構造を用いるなどして物理的に抑制することが出来ないため、現象理解が重要となる。本章では、APD マイクロセル間クロストークの影響を排除するために単一 GM-APD である SPAD を用いた。SPAD 出力の時間相関測定を行い、アフターパルスの発生数や発生タイミングの確率的モデルを検討した。パルス幅数十ピコ秒のパルスレーザーを用いてパルスサイクル内に観測されるアフターパルス数の頻度とアフターパルスの観測時間間隔の分布を測定した。パルスサイクル内のアフターパルス発生数の分布は幾何分布に従うことを実験的に確認した。アフターパルス発生時刻に関する確率分布関数をモデル化し、解析的に求めた。提案したモデル関数を用いてアフターパルス時間相関分布の解析を行った。評価した SPAD サンプルでは、10 ナノ秒程度の浅い欠陥準位と 100 ナノ秒程度の深い欠陥準位がアフターパルスへの寄与に支配的であることを見いだした。また、観測アフターパルス数の期待値から推定したアフターパルス確率が、時間相関解析から推定したアフターパルス確率によく一致することを確認し、SPAD のデバイス特性 (利得と応答時定数) か

らアフターパルス確率を予測することに成功した。

6章では、GM-APDの時間応答に注目し avalanche 増倍のクエンチングメカニズムとアフターパルス発生機構を検討した本研究の到達点と、今後の展望を示す。

博士論文審査結果

Name in Full
氏名 河田 剛

論文題目 Geiger-mode で駆動する avalanche photodiode の時間応答解析

本論文は、微弱光を高い増幅率で検出可能な半導体光センサーである Avalanche photodiode (APD)に関するもので、とくに $10^5 \sim 10^6$ という高い利得と 10%以上の高い検出効率を有する Geiger-mode で駆動する APD (GM-APD) に注目した研究である。

河田氏は、APD 内部の avalanche 増倍過程と増倍過程に付随するノイズ発生機構を理解することがデバイスのカスタム設計やシステム応用の広範化を実現する上で重要であることに注目し、単一 GM-APD マイクロセルにパルスレーザーを照射して時間分解計測や出力波高計測など、デバイスのダイナミックな応答に関する実験を行った。さらに APD の時間応答を模擬するモデルを用いて GM-APD 内部の avalanche 増倍のクエンチングメカニズムとアフターパルスの発生タイミングを検討した。その結果、以下の知見と結論を得た。

(1) GM-APD の利得は複数光子の入射に対する出力信号波高は変わらないとされているが、照射するレーザー光強度を増加させ入射する平均光子数が 1 個以上のとき、明瞭な信号強度増加を観測した。この結果について avalanche 電流を等価回路で模擬したモデルを使って解析した。ダイオードの接合容量を、avalanche 電流領域と電流が流れない領域とに分割することで APD への入射光子数が増えるほど同時に生成される avalanche 増倍の電流領域の面積が増え、結果として avalanche 電流の出力信号が増加する様子を確認した。また、単一光子によって生成される avalanche 電流領域の面積は接合領域の 10%程度であると見積もった。

(2) APD やそれをアレイ化した検出器における過剰ノイズの原因のひとつである、アフターパルスは物理的に抑制することが難しく、その現象を理解することが補正やキャリブレーションを行う上でも重要となる。パルス幅数 10 ピコ秒のパルスレーザーを用いてパルスサイクル内に観測されるアフターパルス数の頻度とアフターパルスの観測時間間隔の分布を測定し、パルスサイクル内のアフターパルス発生数の期待値は幾何分布に従うことを確認した。アフターパルス発生時刻に関する確率分布を解析的に求めたところ、キャリアが捕獲される寿命 10 ナノ秒程度の浅い欠陥準位と 100 ナノ秒程度の深い欠陥準位がアフターパルスへの寄与に支配的であることを見いだした。また、アフターパルス数の期待値から推定したアフターパルス確率が、時間相関解析から推定したアフターパルス確率によく一致することを確認し、デバイス特性(利得、端子電圧の回復時間)からアフターパルス確率を予測することに成功した。

GM-APD は、イメージングデバイスとして、産業的にも広範な応用が期待され、注目されている。本研究では、イメージングデバイスとして注目される GM-APD の時間応答に注目し、その avalanche 増倍機構とアフターパルス発生機構について検討した結果、デバイス構造に起因した重要な知見を新たに見出した。これらは、今後のデバイス設計や製造プロ

セスの改良に結びつく研究成果であり、これらの研究結果は国際的な英文学術雑誌 IEEE Transactions on Nuclear Science 64 (2017) 2386 及び IEEE Transactions on Electron Devices 65 (2018) 2525 に掲載済みである。公開発表会では、本研究で得た知見に関して明瞭な報告が行われた。予備審査で指摘された、計測の応用範囲に関しても、時間分解能と空間分解能の関係から GM-APD を用いた検出器の展望を示しつつ説明があった。質疑への応答も的確であり、研究分野の背景についての基礎的な理解もよくまとめられており、学位論文として質・量ともに十分である。

以上の理由により、審査委員会は、本論文が博士(理学)の学位の授与に値すると判断した。