

修士論文

プロセス・デバイスシミュレーターを用いた 半導体光検出器PPDの基本特性における研究

村瀬拓郎

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻
東京大学素粒子物理国際研究センター 山下了研究室

murase@icepp.s.u-tokyo.ac.jp

eleven9s@gmail.com

2010年2月1日

概要

Pixelated Photon Detector (PPD) は、ガイガーモード領域で動作させるアバランシェフォトダイオードをピクセル上に多数配置した検出器である。ガイガーモード領域では電子とホール両キャリアにより雪崩増幅するため、 $10^5 \sim 10^6$ 程度の増倍率を得る事ができる。そのため PPD は単一光子に感度を持ち、半導体光検出器として様々な業界で近年注目を集め始めてきた。これは一重に、PPD が光電子増倍管などの従来の光検出器の抱える課題を克服し、これまで踏み込めなかった分野での貢献が期待されるためである。その特徴は半導体デバイスである事から光電子増倍管に比べ非常に安価に製造が可能であり、極薄に製作できる事から磁場耐性も備えている。さらに高い検出効率も持ち合わせているため、次世代光検出器として世界各地で開発が進められている。

しかし未だ発展途上の検出器であるために課題もいくつか残されている。中でも $10^5 \sim 10^6$ という増倍率は既存の光電子増倍管に比べまだ低く、PPD 需要拡大を阻む一つの要因となっている。その高増倍率化を妨げる原因の一つとして、PPD の高いノイズレートを挙げられる。そのノイズレートの測定に関する研究は本研究に至る非常に重要な研究となっており、その PPD のノイズ別独立精密測定 (第 3 章) は、従来まで考えられていた 3 種類のノイズの電圧に対する発生比率を明らかとした。この事実により PPD の構造から改める開発方針こそが、現在抱えている課題を根本的に解決する手段であるという考えに至った。

PPD を構造から見直すにあたり、現在の PPD の動作メカニズム、主に内部の物理現象をこれまで以上に正しく理解する必要に迫られた。そのため新たな開発方針として、製造プロセスシミュレータ、デバイスシミュレータ、回路シミュレータを含めた総合的なシミュレータ Technology CAD (TCAD) を利用し、本来測定する事のできない内部現象の理解と新型 PPD の設計を目指す方針を立てた。TCAD の利用により、半導体プロセスのシミュレーションから不純物濃度分布を計算し、定常解析、過渡解析を実行するという極めて現実的なシミュレートが可能となる。また開発期間の短縮と大幅なコストの削減も同時に実現する事ができる。

本研究ではその TCAD を利用し、PPD の基本特性の再現と、TCAD の可能性を探った。
以下が本研究で取り組んだ事である：

1. 定常解析

- (a) CV 特性と IV 特性の計算
- (b) 空乏層の電圧依存性
- (c) 温度依存性 (CV 特性, IV 特性, 飽和電流, 降伏電圧)

2. 過渡解析

- (a) アバランシェ増幅の時間変化
- (b) クエンチング抵抗によるクエンチング効果の検討
- (c) 電流値および時定数の電圧依存性
- (d) シミュレーションと MPPC の波形の比較
- (e) 初期に生成される電子・ホールペア数による諸特性の変化
- (f) 熱励起レートの場所依存性と温度依存性

目次

概要	1
第 1 章 序論	7
1.1 始めに	7
1.2 PPD の目指す所	8
1.3 本論の構成	8
第 2 章 PPD について	9
2.1 PPD の応用先	9
2.1.1 国際リニアコライダー計画	9
2.1.2 陽電子断層撮影装置	10
2.2 PPD の説明	12
2.2.1 Avalanche Photo Diode の増倍機構	12
2.2.2 Pixelated Photon Detector の増倍機構	14
2.2.3 Multi-Pixel Photon Counter	14
2.2.4 ケンチング機構	15
2.2.5 フォトンカウンティング	17
第 3 章 PPD の開発目的とその状況	19
3.1 開発の目的	19
3.1.1 高増幅率化	20
3.1.2 大面積化と開口率の向上	20
3.1.3 フォトンカウンティング性能の向上	20
3.2 開発の方向性	21
3.2.1 各種ノイズの説明	21
3.3 各種ノイズの独立な測定結果	23
3.3.1 アフターパルスの測定	23
3.3.2 クロストークの測定	23
3.3.3 ランダム・ノイズレートの測定	24
3.3.4 総和ノイズと再構成	25
3.3.5 ノイズ抑制による効果検討	26
3.3.6 光子検出効率 (Photon Detection Efficiency) の傾向分析	27
3.3.7 アバランシェ確率とノイズの関係についての考察	28
第 4 章 プロセス・デバイスシミュレーターを用いた PPD の開発	29
4.1 <i>Technology Computer Aided Design</i> について	29
4.2 ENEXSS の概要	29
4.2.1 ENEXSS の解析手法	29
4.2.2 ENEXSS のソースコード	31
4.3 従来の <i>TCAD</i> シミュレーションと本研究の内容	31
4.3.1 オリジナルプロファイルの基本データ	33

第 5 章	物理モデル	35
5.1	キャリア生成・再結合 モデル	35
5.2	Impact Ionization モデル	35
5.3	Shockley-Read-Hall モデル	36
5.4	Auger モデル	37
第 6 章	定常解析	38
6.1	CV 特性	38
6.2	IV 特性	40
6.3	温度依存性	41
6.3.1	IV 特性と降伏電圧の温度依存性	41
6.3.2	CV 特性の温度依存性	43
6.4	定常解析の議論のまとめ	44
第 7 章	過渡解析	45
7.1	過渡解析の手順	45
7.1.1	電子・ホールペアの生成	46
7.1.2	各種パラメータの値	46
7.2	アバランシェ増幅の時間変化	47
7.2.1	Impact Ionization モデルの効果	47
7.2.2	APD と G-APD の比較	47
7.2.3	アバランシェ増幅中の内部物理量の時間変化	48
7.3	クエンチング抵抗による効果	52
7.4	クエンチング抵抗付加時の定常電流発生 of 課題	52
7.5	電子・ホールペア数の依存性	56
7.6	熱励起ノイズの温度依存性	58
7.7	過渡解析の議論のまとめ	59
第 8 章	結論	61
付録 A		62
A.1	光子の吸収	62
付録 B		63
B.1	オリジナルプロファイルのソースコードと各種解析コード	63

目次

2.1	ILC-Detector のイメージ図	9
2.2	ILC により得られると予想されるイベント	9
2.3	PEC/CT 装置の外観 (出典: 千葉県がんセンター)	10
2.4	PET/CT 画像 (出典: 高知大学医学部附属病院 PET センター)	11
2.5	APD の構造	13
2.6	APD の外観図	13
2.7	増幅過程	14
2.8	afterpulsing probability	15
2.9	MPPC の等価回路	16
2.10	PPD をレーザー顕微鏡を用いて拡大撮影 (Keyence 社協力)	16
2.11	パッシブクエンチング機構	17
2.12	フォトンカウンティングの線形性と光を照射した際の MPPC の検出フォトン数と頻度分布	18
3.1	光源のない暗箱内において ΔV に対する波形の変化	19
3.2	キャパシタンスを各ピクセルに並列配置した PPD	19
3.3	表面照射型と裏面照射型の比較	20
3.4	MPPC のノイズ	21
3.5	各種ノイズの相乗効果の関係	22
3.6	典型的なアフターパルスの度数分布	23
3.7	アフターパルスの発生確率	23
3.8	典型的なクロストークによる増倍率分布	24
3.9	クロストーク発生確率の ΔV 依存性	24
3.10	ランダム・ノイズレートの ΔV 依存性	24
3.11	ノイズの再構成	24
3.12	各種ノイズを抑制した場合の予想されるノイズレート	26
3.13	LED を光源とした時の MPPC の PDE	27
3.14	シミュレーションによるアバランシェ確率	27
3.15	p-on-n 型 PPD の構造と内部物理量の分布	28
4.1	pn 接合半導体ダイオードの構造図とその次元方向	30
4.2	オリジナルプロファイルの深さ方向に対する不純物濃度分布と降伏電圧付近の電場分布	33
4.3	オリジナルプロファイルの 3次元構造	34
5.1	インパクトイオン化係数の電場依存性	36
6.1	階段接合型の pn 接合ダイオードのプロファイル	39
6.2	階段接合型の pn 接合ダイオードの CV 特性における ENEXSS と手計算の比較	39
6.3	オリジナルプロファイルの CV 特性の 1次元解析と 2次元解析の比較	40
6.4	オリジナルプロファイルにおける空乏層の厚さおよび空乏層領域の電圧依存性	40
6.5	オリジナルプロファイルの IV 特性	41
6.6	オリジナルプロファイルの IV 特性における温度依存性	42
6.7	飽和電流の温度依存性	42
6.8	オリジナルプロファイルの降伏電圧における温度依存性	43

6.9	MPPC の降伏電圧における温度依存性	43
6.10	オリジナルプロファイルの CV 特性における温度依存性とその拡大図	43
7.1	過渡解析で用いたセットアップの概念図	45
7.2	電子・ホールペア生成	45
7.3	アバランシェ増幅の時間変化 (<i>II</i> モデルの ON/OFF の比較)	47
7.4	APD と G-APD の増倍の時間変化の比較	48
7.5	インパクトイオン化現象の時間変化	49
7.6	電子の電流密度の時間変化	50
7.7	ホールの電流密度の時間変化	51
7.8	各抵抗値における波形の時間変化	52
7.9	電子・ホールペアを生成しなかった場合の波形の時間変化 (印加電圧 63V)	53
7.10	オリジナルプロファイルでクエンチング抵抗 $R = 35M\Omega$, $V = 62V$ の波形	53
7.11	Impact Ionization の OFF 時の時定数の電圧依存性	54
7.12	Impact Ionization の OFF 時の最大電流値の電圧依存性	54
7.13	実際の MPPC の増倍率の電圧依存性	55
7.14	降伏電圧付近の MPPC に対するシングルフォトンレベルの出力波形 (左) と各電圧の波高に 対して規格化したもの (右)	55
7.15	降伏電圧付近の PPD に対するシングルフォトンレベルの出力波形 (左) と各電圧の波高に 対して規格化したもの (右)	56
7.16	降伏電圧手前 (56V) で生成ペア数変化させた場合における波形の時間変化	57
7.17	降伏電圧以上 (64V) で生成ペア数変化させた場合における波形の時間変化	57
7.18	降伏電圧付近の PPD に対する 5 フォトンレベルの出力波形 (左) と各電圧の波高に 対して規格化したもの (右)	57
7.19	深度方向における熱励起頻度分布	58
7.20	熱励起モデルの温度依存性	58
7.21	実際の MPPC のノイズレートの温度依存性	58
A.1	シリコン単結晶の 300K および 77K における光の吸収係数	62

表目次

2.1	APD の諸特性比較	12
2.2	MPPC の諸特性比較	15
3.1	衝突電離確率の各係数值	27
4.1	支配方程式の変数名	30
6.1	端子間容量導出に伴う各係数值	38
7.1	過渡解析に使用したオリジナルプロファイルの各種パラメータ (デフォルト値)	46

第1章 序論

1.1 始めに

様々な研究において、起こっている現象を可視化する事は非常に大きな意味を持つ。それは人間の情報収集能力の大半が視覚に依存している事にも大きく関わっているとも考えられる。物理、化学、生物、気象学、医学などのような様々な学問においても、本来見る事のできない物を見える形に変換し、理解を深める事は学問として避けて通る事のできないステップである。

特に物理においては、素粒子の世界を加速器で覗き、宇宙の果てに望遠鏡で迫っている。化学においては化学反応の過程や物質の表面を電子顕微鏡で探り、スペクトル分析により内容物を特定する。生物においてはタンパク質の移動経路を対象物を発光させる事で追跡し、構造などを散乱を用いて解明する。気象学で言えば、雲の動きを衛星などを使い大規模に調査する事で、その後の天気を予測する。そして医学においては、MRI、CT、PETなどの医療機器を利用して人体にメスを入れることなく内部構造を観測し手術をサポートする。さらに脳波の観測に至っては、その活動を読み取ることで映像化するだけでなくロボットを「思う」だけで動かすという事まで現実味を帯びてきた。

このように学問が研究対象物の現象を可視化する事に大きな意味を持つ事は明らかであり、対象物をより正確に知るためにそこから漏れだす僅かな情報をいかに効率的に、かつ高精度で大量に取得できるかは非常に重要である。

その中でも光に関する理解やセンサーの開発からは目を離す事ができない。2009年のノーベル物理学賞は「光ファイバー」と「CCD」[2]であり、どちらも光に関わる技術であった。光ファイバーの長距離伝送理論に関しては大量の情報を広範囲に効率的に伝送するために欠かす事のできない理論であり、CCDに置いてはデジタルカメラの撮像素子として利用され、一般に普及した可視化の基本技術として現在にはなくてはならないものとなった。

このように光に関わる技術研究は活発に行われており中でも光検出器においては、一般ユーザーだけでなく過酷な条件下で、かつ高性能が求められるような場面においても重宝されている。その代表標的な光検出器が光電子増倍管 (Photomultiplier Tube:PMT) と言われるものである。PMTは光電効果を利用した光検出器であり、微弱な光を電気信号として確認できるレベルにまで増幅する事が可能である。その用途先としては、陽子崩壊を探ったスーパーカミオカンデのようなアカデミックな場面から、陽電子断層法 (Positron Emission Tomography,PET) の様な医療装置にまで幅広く利用されており、PMTのサイズは径が1cm程度の物から50cm程度の物までラインナップは充実している。しかし製造工程が複雑で手作業に頼る工程も多いため、未だ高価な代物であり、手が届かない物も多い。また真空中に作り出した高電場により電子を加速し増幅する機構のため、非常に磁場に弱いという弱点も様々な環境下で使用したいというニーズを満たせていない。

しかしPMTの開発からしばらくして半導体製造の向上と半導体に対する理解が進んだ事により、量産化と低コスト化に現実味を帯びたため半導体センサーの開発が盛んに行なわれ始めた。半導体検出器は当初からPMTに比べ安価に製造にできる反面、大型化が困難と言う課題をかかえていた。しかしPMTが使用できない場面でのニッチな需要を勝ち取る事で成長を続け勢力を広げてきた。その半導体光検出器にはフォトダイオード (Photo Diode,PD) やアバランシェフォトダイオード (Avalanche Photo Diode,APD) と呼ばれるものがあり、これらはPMTに比べて小型で安価に製造でき、磁場耐性と高光子検出効率を備えている。しかしその増倍率は、PDが1、APDが50~1000と、PMTの持つ $\sim 10^6$ オーダーを越える増倍率を半導体光検出器が実現する事は極めて困難であった。

だが近年、Pixelated Photon Detector (PPD) と称される半導体光検出器が開発され注目を集めている。PPD とは MPPC, SiPM などといわれる製品として既に世の中で幅広く知られている光検出器の総称である。この検出器の最大の特徴は APD よりも更に高電場であるガイガーモード領域で動作させる事で電子・ホール の両キャリアの雪崩 (アバランシェ) 増幅を引き起こし、 $10^5 \sim 10^6$ と云ったレベルの増幅率を実現する。さらにそのガイガーモード領域で使用する APD (G-APD) をピクセル状に配置する事で、入射してくる光子数を測定する事を可能にしている。もちろんフォトダイオードやアバランシェダイオードと同様に半導体光検出器の長所を受け継いでおり、増幅率が不足しているとされた課題を今後克服する可能性を秘めた新型のデバイスである。

1.2 PPD の目指す所

PPD 開発で目指す最終的な目標は、PMT を凌駕する光検出器としての地位を獲得する事である。そのためには以下に記す 3 つの課題がある。

1. 高増倍率化 (PMT 並みである 10^6 程度まで向上させる)
2. 光子数のカウントに対するダイナミックレンジを広げる
3. 大面積化 (現在の最大チップサイズ $3\text{mm} \times 3\text{mm}$ を、更に大きくする事でさらなるニーズに応える)

上記に記したこれらのどの課題に対しても、その限界を定めている要素としては高いノイズレートが挙げられる。浜松ホトニクス社製の PPD である MPPC (S10362-11-25) のノイズレートは、動作電圧下で $\sim 100[\text{kHz}]$ のノイズレートが確認されている [3]。このノイズレートは基本的には検出器のチップサイズに比例し、大面積化を阻んでいる。またこのノイズは動作電圧を上げる事で急激に上昇したちまちま $\sim 1[\text{MHz}]$ を超えるノイズレートとなってしまうため、電圧を上げる事で増倍率を稼ぐという従来の方法を抑制している事となる。さらに一定面積下においてピクセル数と増倍率はトレードオフの関係にあるため、フォトカウンティングに対するダイナミックレンジを広げるためにはピクセルサイズによらない増倍率の向上が必須となってくる。以上のように現在解決したいと考えている課題には、どれも高いノイズレートが関わっている。

1.3 本論の構成

本研究は第 2 章で PPD の基本的な概要と用途先を説明した後、第 3 章で PPD の開発目的と課題に触れる。そしてこれまでの開発状況 (ノイズ別独立精密測定) について報告した後、本研究の鍵であるプロセス・デバイスシミュレーター (Technology Computer Aided Design, TCAD) の解析手法について第 4 章で概説し、本題に移る。

本題ではまずまず TCAD で使用する物理モデルや背景について第 5 について解説する。次に第 6 章で解析手法の代表的な物の 1 つである『定常解析』に関して CV 特性と IV 特性、そしてそれらの温度依存性を計算した結果について報告する。次に第 7 章で、もう 1 つの代表的な解析手法である『過渡解析』についてゲインカーブと時定数の電圧変化、そして抵抗による波形の変化の結果を報告し、最後に第 8 章で結論を語り締めとする。

付録 AB.1 には本研究に必要なと考えられる予備知識や物理モデルなどを簡単に解説した。

第2章 PPD について

2.1 PPD の応用先

単一光子に感度があり、光子数をカウントできる次世代半導体光検出器 PPD は様々な業界から幅広く期待されている新型のデバイスである。その中でも素粒子業界のような基礎研究分野の応用例と、医療業界のような社会的重要度の高い応用例の 2 種類を取り上げて以下に紹介する。

2.1.1 国際リニアコライダー計画

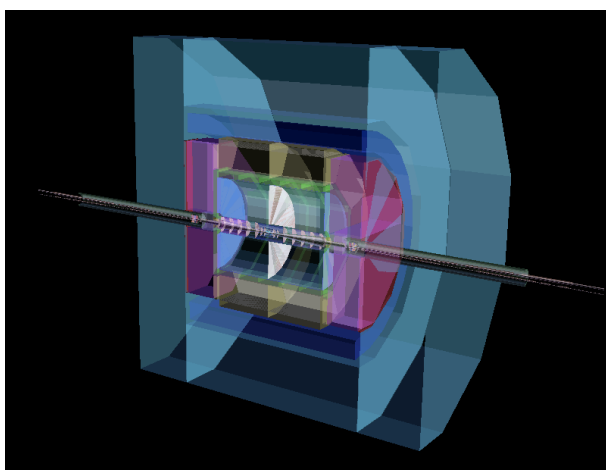


図 2.1: ILC-Detector のイメージ図

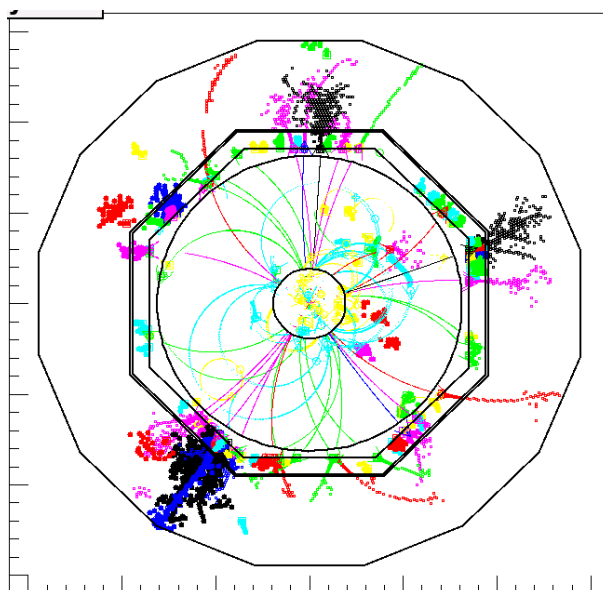


図 2.2: ILC により得られると予想されるイベント

まず我々の素粒子業界が次世代に期待する加速器プロジェクトの国際リニアコライダー計画 (International Linear Collider, ILC) は PPD の大きな活躍の舞台と言える。直線距離にして 40km、中心エネルギーの目標値は 1TeV の偏極電子-陽電子直線加速器計画である。本プロジェクトは Higgs 粒子および超対称性粒子に関わる精密測定を行なう事で素粒子、さらにはこの宇宙についての謎を解き明かそうとするものである。本プロジェクトは、その前段である大型陽子ハドロンコライダー (Large Hadron Collider: LHC) 実験により、これら未知の粒子の存在が確かめられた後、それらのより詳細な性質を確かめる名目で進行しているプロジェクトとして位置づけられている。

LHC は陽子-陽子を衝突させる事で、レプトンコライダーでは容易に実現できない高エネルギー領域の探査を円形型加速器で実現している。しかし陽子は内部構造を持ち、現在素粒子とされるクォークから構成されるため衝突の際に多数の粒子が発生する。これはバックグラウンドの増加へとつながり複雑な解析を施す必要が出てくる。そのため未知の粒子を発見する事は可能であったとしても、それらの詳細な性質を調べる事は容易ではない。そこで内部構造を持たないとされるレプトン (電子と陽電子) を使用したコライダーを円形型加速器でなく直線型加速器で実現する事によりシンクロトロン放射によるエネルギー損失を抑え、未知の粒子の性質を探るという計画が ILC 計画である。

直線型加速器の場合は従来の円形型加速器とは違い、衝突に関与しなかったバンチ内の粒子達はダンプして捨てる事になる。その数は膨大となるため、できる限り高確率で衝突するよう衝突断面積を絞る努力

が現在なされている。また精密測定となるため検出器側にもより精度の高いデータを取得する事が求められる。高エネルギー分解能を実現するためにカロリメータと呼ばれる部分を 1000 万チャンネルに細分化し、磁場中で使用する事が予定されている。カロリメータとは電子や中性粒子および光子のエネルギーを測定するための部分でありビームパイプに近い場所に配置される。そのためインストールする光検出器は 1000 万個使用してもかさ張らず、安価であり、磁場耐性がある事が求められる。この要求に対して小型化が難しく高価で磁場にも弱い従来の PMT は候補にはなりにくい。その反面、小型で、かつ半導体ベースで安価に製造でき、さらに磁場耐性もある次世代型の検出器の PPD は候補の一つとして挙っており、各研究施設でも開発が進んでいる。

2.1.2 陽電子断層撮影装置



平成21年2月から稼動する最新型 PET/CT装置

図 2.3: PEC/CT 装置の外観 (出典：千葉県がんセンター)

陽電子断層装置 (Positron Emission Tomography, PET) は腫瘍組織から放出された陽電子を検出し、その情報をコンピューター断層撮影技術により生体機能観察する事ができる放射線医療装置の一つである。最近では陽電子放出核種に転換された腫瘍組織のブドウ糖の代謝上昇を光検出器を用いる事で捕らえ、癌の早期発見に役立てられている。また同じく放射線医療装置である X 線コンピューター断層撮影装置 (X-ray Computed Tomography, X 線 CT) は外部から X 線を照射し、照射された X 線が検査対象に一部吸収をされ減衰した X 線を線源の反対側に存在する X 線検出装置によりとらえる事で全体像を可視化する。それに比べ PET は生体内部の放射性トレーサーを観察しているため、通常の X 線 CT に比べて患者の被曝量が少ないと言う大きなメリットがある。

医学的には CT 画像は解剖学的な情報に優れているとされ、通常は形態画像と呼ばれる。一方、PET 画像は生理学的な情報に優れているため機能画像と呼ばれる。どちらも利点を持っており、近年ではこの 2 つの利点を持ち合わせた PET/CT といわれる装置も開発されている。これは両手法で取得したそれぞれの画像をフュージョンする事でこれまでにない利便性の高い 3 次元画像を医師や患者に提供できるように事になる。

この画期的な融合を実現するためには、PPD の高感度は非常に大きな役割を果たし検査時間の短縮を実現すると期待されている。また従来まで PET に使用されていた光電子増倍管に比べ PPD は安価に製造できることから、検査コストの低下も見込まれている。さらに磁場耐性を備えた PPD には、核磁気共鳴画像法 (Magnetic Resource Imaging, MRI) と併用して利用できるメリットがあるため更なる期待が持たれている。

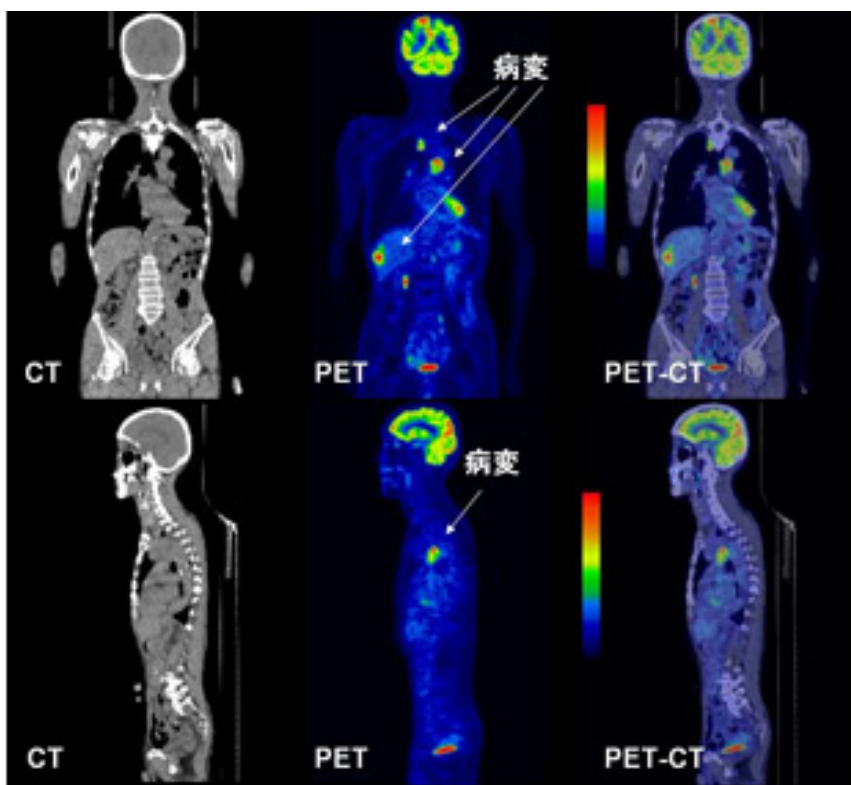


図 2.4: PET 画像、CT 画像と PET/CT 画像の比較 (出典：高知大学医学部附属病院 PET センター)

2.2 PPDの説明

Pixelated Photon Detector (PPD) は半導体光検出器である Avalanche Photn Diode (APD) をガイガーモード領域で動作させ、さらにそれらをピクセル状に配置したデバイスである (以下、ガイガーモード領域で動作させる APD を G-APD と呼び、さらにこれを多数並列に配置しピクセル化した物を PPD と呼び分ける事にする)。半導体内部でガイガーモード領域に達するような高電場を作り出す事により、内部では電子とホールの両キャリアがアバランシェ増幅を起こす事が可能となる。このように通常起こし得ないホールもアバランシェ増幅を起こす対象となる事から、G-APD は APD の 50 ~ 1000 程度の増倍率以上である $10^5 \sim 10^6$ 程度の増倍率を実現する事ができる。しかしこの両キャリアの増幅は電子だけで増倍する APD とは違い自身で収束する事ができないためクエンチ機構を必要とする。そのため G-APD の基本的な動作メカニズムは APD とは一部異なる。そこで本章ではまず基本的な半導体光検出器の増倍機構を APD を例にとりながら解説し、その後クエンチ機構を付加した G-APD の解説を行なう事にする。PPD に関しては G-APD をピクセル化した物であるため、基本的には同じ動作原理であるため解説は省く。

2.2.1 Avalanche Photo Diode の増倍機構

まずシリコンの APD を例にとって増倍機構を持った半導体光検出器について説明する。諸特性に関しては、浜松ホトニクス社が製作する APD のデータシート [4] を参考文献として載せた (表 2.1)。

アバランシェフォトダイオード (通称:APD) は半導体光検出器の一種であり、逆バイアスを印加する事により光電流が増倍する高速・高感度のフォトダイオードである。光を受光する基本原理はフォトダイオードとは変わらないが、内部にアバランシェ領域を加わえる事により自己増倍機構を設けている点がフォトダイオードと異なっている。そのためバンドギャップ以上の大きなエネルギーを持った入射光子は半導体内部で電子・ホールペアを生成し、キャリアである電子がアバランシェ増幅を起こし光子を直接電気信号で確認するまでに増幅させる事ができる。この現象によりフォトダイオードにはない増倍率という概念が生まれる。従って単純にフォトダイオードの増倍率は 1 と表現すれば、APD は種類にもよるが大体 50 ~ 1000 の増倍率を持つ物が一般的である (ただし、この増倍率では単一光子を読み出すには足りない)。

表 2.1: APD の諸特性比較 [4]

APD		
型番	S8664	
サイズ型番	-55	-1010
チップサイズ [mm ²]	10.6 × 9.0	13.7 × 14.5
受光面サイズ [mm ²]	5 × 5	10 × 10
ピクセル数	-	
ピクセルサイズ [μm ²]	-	
開口率 [%]	-	
感度波長領域 [nm]	320 ~ 1000	
最大感度波長 [nm]	600	
量子効率 [%]	70@λ = 420 ns	
光子検出効率 [%]	-	
動作電圧 [V]	400 ~ 500	
ダークノイズ [Hz]	-	
増倍率	50	
降伏電圧の温度係数 [V/°C]	0.78	
端子間容量 [pF]	80	270

このような機構を備える APD の基本内部構造は、p 型半導体と n 型半導体により構成されており図 2.5 のように pn 接合ダイオードとなっている。APD に関しては増倍を引き起こすキャリアが電子のため、電子がドリフトして行き着く先である電極側に増倍層である pn 接合面を形成させる必要がある。またその pn 接合面は内部で濃度勾配がもっとも激しい場所であり、外部電圧の多くが割り振られる場所となるため設計上、最も気を使う場所である。

さらにこの p 型と n 型の半導体により作り出される空乏層は光の吸収長と密接に関わっており、設計前にどの波長領域に感度を高めるかを検討した上で製作を行う。これはシリコンの光に対する吸収長が図 A.1 に示す通り、青色波長である 470 nm では $0.5\mu\text{m}$ 、赤色である 700 nm では $5\mu\text{m}$ と可視光領域内でさえ約 10 倍の開きがあるためである。また赤外領域に至っては検出効率を確保するためには $10 \sim 100\mu\text{m}$ の空乏層領域を確保する必要がある。しかし単純に空乏層を所定の値まで厚くすれば良い訳でもない。それは空乏層の厚さによりドリフト時間も長くなるため、高時間分解能を犠牲にする事になるからである。さらに熱ノイズの源は第 7 章でも述べるが空乏層の体積に比例するため、空乏層の体積を大きくすればノイズを増大させる事につながる。このように高検出効率化と高時間分解・低ノイズ化はトレードオフの関係にあるため、これらを考慮した上で製作に工夫を懲らさなくてはならない [5]。

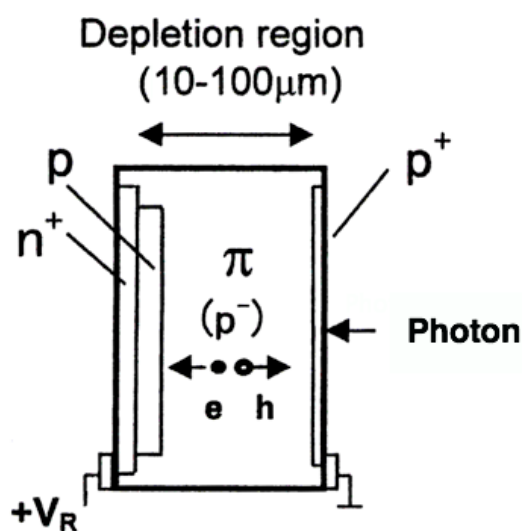


図 2.5: APD の構造 (電子がドリフトする先に pn 接合面を設ける構造となっている)

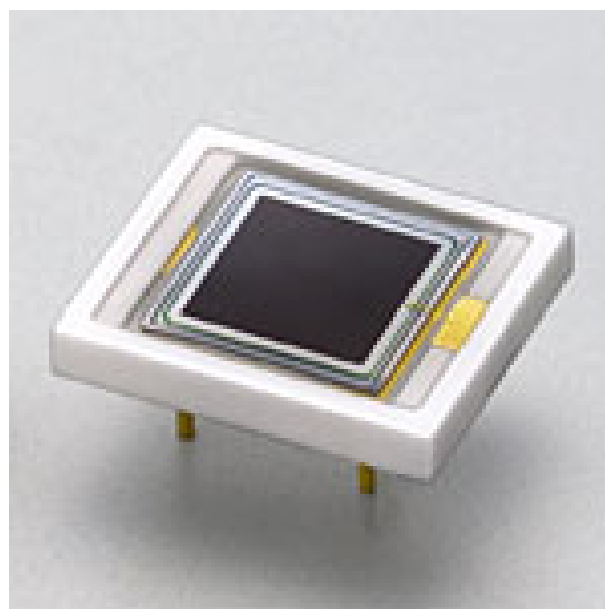


図 2.6: 浜松ホトニクス社が製作した APD (s8664-55-150) の外観図

2.2.2 Pixelated Photon Detector の増倍機構

Pixelated Photon Detector(通称:PPD)の1ピクセル分であるG-APDはAPDをガイガーモード領域で動作させる事によりAPD以上の増倍率を獲得し、それらを多数並列配置する事でフォトンカウンティングを可能とした半導体光検出器である。その高増倍率の理由はAPDが電子のみを増倍キャリアとして利用するのに対して、ガイガーモード領域で動作するAPD(G-APD)は電子とホールの両キャリアを相乗的に増倍に利用する所にポイントがある。その様子をあらわしたものが図2.7であり、左はAPDの増倍の様子、右はG-APDの増倍の様子を表している。通常、APDの様な電子にのみよる増倍の場合、電子のほとんど全てがn型半導体の電極に向かってドリフトして行く。この間、僅か $\sim 30\text{ps}$ 程度で電子は空乏層から抜けきり自然に増倍は取束する。しかしG-APDにおいては電子とホールが増倍キャリアとなるため、電子の増倍によって発生したホールは電子とは逆方向に進み再び増倍層を駆け抜ける事になる。この事はホールの場合においても同じであるため、空乏層にはいつまで経ってもキャリアが存在し排除される事はない。これでは検出器として成立しない事が容易に想像できる。このためG-APDにはAPD意図的に増倍を止めるクエンチング機構を設ける必要がでてくる。

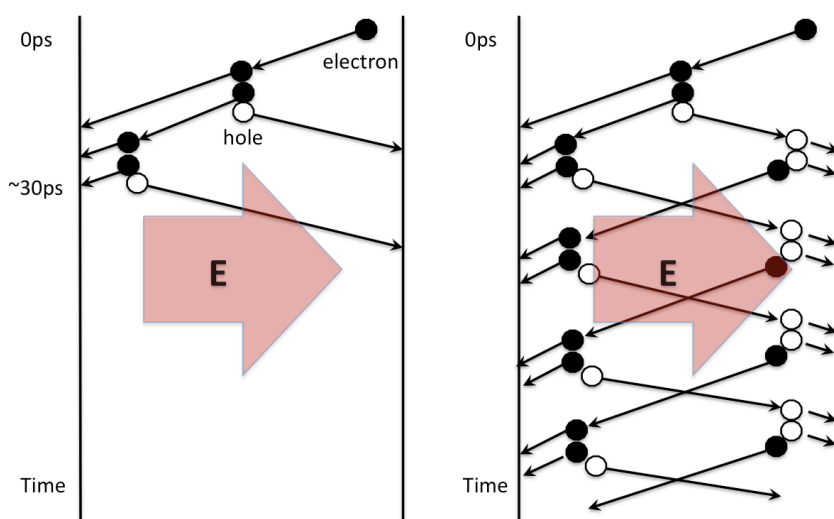


図 2.7: 左: APD の増幅過程 (電子のみ寄与)、右: G-APD のアバランシェ増幅 (電子・ホールの両キャリアが寄与)

またG-APDの特徴はAPDとは違い、バンドギャップ以上のエネルギーを持った光子が空乏層内で電子ホールペアを生成した場合、電子またはホールのどちらかが増倍層に到達する事ができれば増倍が始まる事になる。ここで重要な事は電子ホールペアが生成された場所が空乏層内であれば、生成場所に関わらず増倍を引き起こすと言う点である。これは電子・ホール両キャリアのいずれもが増倍層でアバランシェ増幅を起こし得るキャリアである事に関係している。なぜなら電子・ホールは互いに逆方向にドリフトして行くため、一度空乏層内でペアが生成すれば、再結合を考えなければ必ずいずれかのキャリアが増倍層を通過する事になるためである。

2.2.3 Multi-Pixel Photon Counter

ここで本研究で主に使用したPPDの一つであるMulti-Pixel Photon Counter(通称:MPPC) [6][7]を紹介する。MPPCは浜松ホトニクス社の製造販売するPPDであり、その基本的な諸特性 [8] に関しては表 2.2 を参照してもらいたい。第3章で取り上げるノイズの精密測定に使用した型番は浜松ホトニクス社製1600pixel MPPC(S10362-11-025)であり、その外観は図 2.8 である。

表 2.2: MPPC の諸特性比較 [8]

MPPC			
型番	S10362-11		
サイズ型番	-025	-050	-100
チップサイズ [mm ²]	1.5 × 1.5		
受光面サイズ [mm ²]	1.0 × 1.0		
ピクセル数	1600	400	100
ピクセルサイズ [μm ²]	25 × 25	50 × 50	100 × 100
開口率 [%]	30.8	61.5	78.5
感度波長領域 [nm]	270 ~ 900		
最大感度波長 [nm]	400		
量子効率 [%]	Min.70		
光子検出効率 [%]	25	50	65
動作電圧 [V]	~ 70		
ダークノイズ [Hz]	1.0 × 10 ⁵	2.7 × 10 ⁵	4.0 × 10 ⁵
増倍率	2.75 × 10 ⁵	7.5 × 10 ⁵	2.4 × 10 ⁶
降伏電圧の温度係数 [V/°C]	0.056		
端子間容量 [pF]	35		
不感時間 [ns]	~ 20	~ 50	100 ~ 200

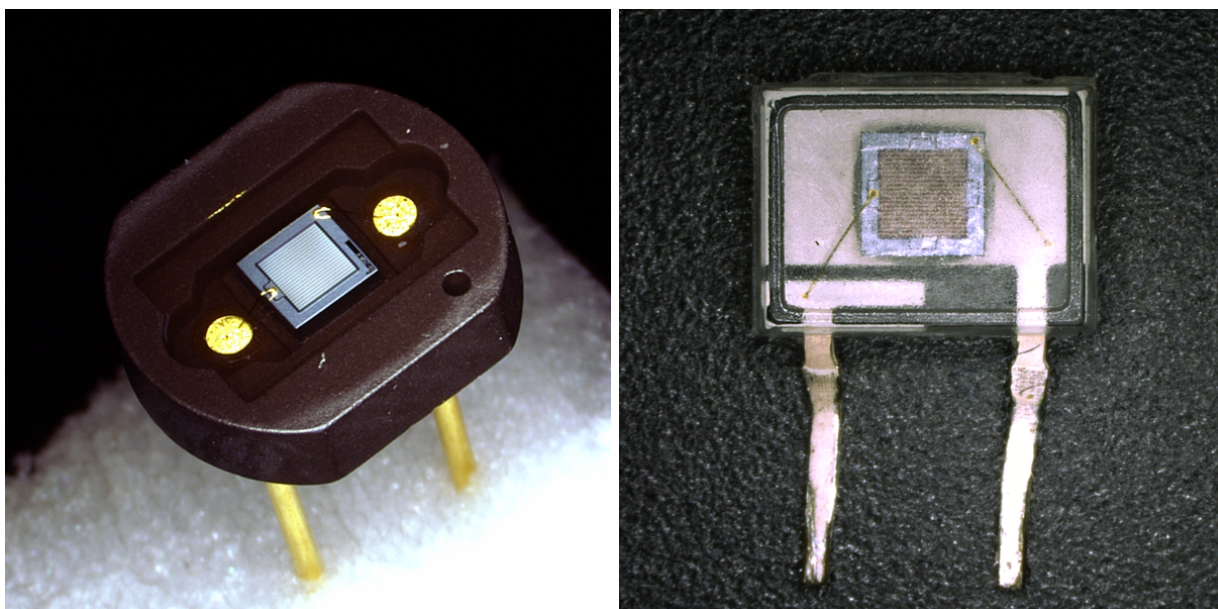


図 2.8: MPPC(S10361/S10362-11-25) のセラミックパッケージ (左) とプラスチックパッケージ (右) の外観図 (撮影協力: 物理学専攻相原研究室)

2.2.4 クエンチング機構

PPD にはクエンチング機構が不可欠である事は 2.2.2 節で説明した。PPD では電子・ホール両キャリアが増倍に加担し、増倍層から増倍キャリアが抜け出す事がないため増倍率が発散する。従ってクエンチング機構が必須となる訳であるが、その方法には大きく分けてセルフクエンチ機構、アクティブクエンチ機構、パッシブクエンチ機構の 3 つに分類される。そのいずれの方法も PPD の極板間にかかる電圧を下げる事でガイガーモード領域での動作から一時的に抜け出すクエンチ方式である。

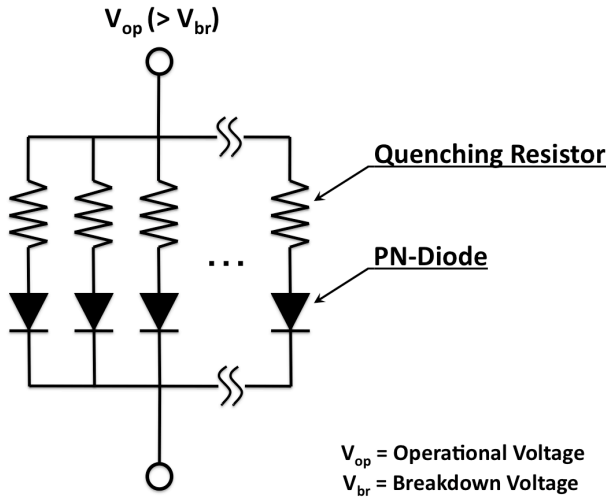


図 2.9: MPPC の等価回路

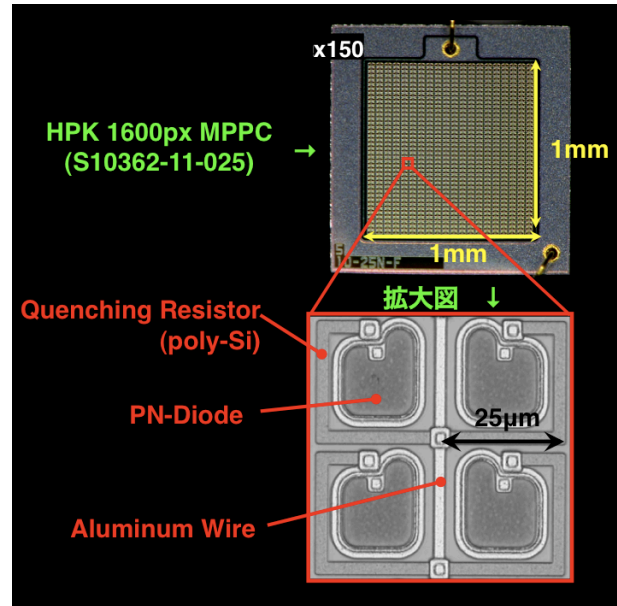


図 2.10: PPD をレーザー顕微鏡を用いて拡大撮影 (Keyence 社協力)

セルフクエンチ [1]

ここまで PPD はクエンチ機構を設けなくては増倍が収束しないとしましたが実は正確にはそうではない。電子・ホールによるアバランシェ増幅の信号は、増倍キャリアが電場により移動し始めた瞬間から誘導電流として流れ始める。この pn 接合ダイオード中で増幅されたキャリア雲による自己場は内部電場を押し下げる効果を持つ。そのため自己増倍によって自己クエンチが行なわれ最終的に収束する事となる。ただしこの収束の時定数は $\sim 1\mu\text{s}$ 程度と素粒子実験などに用いるにはあまりに長過ぎる上に、信号も不安定なためクエンチ機構としては好ましくない。

パッシブクエンチ

本研究で使用した MPPC のクエンチング機構はパッシブクエンチングと呼ばれる手法を使用している。これは各ピクセルに外部抵抗を付加させ、発生した電流が抵抗で電圧降下を起こす事で衝突電離を起こし始めるとされる降伏電圧 V_{br} まで空乏層の両端にかかる電圧を下げる方法である (図 2.11)。この機構の元ではデバイス全体にかかる電圧が ΔV だけ降下し pn 接合面にかかる電圧が V_{br} に達した時に空乏層内の衝突電離は停止し、内部増幅は起らなくなる。また動作電圧を V_{br} と降伏電圧 V_{br} の差を over voltage (ΔV) と呼び、 $\Delta V \equiv V_{op} - V_{br}$ の関係があるため、増倍率 $Gain$ は PPD の静電容量 C と素電荷である e を使い

$$Gain = \frac{C\Delta V}{e} \quad (2.1)$$

と表す事ができる。これは $C\Delta V$ に相当する電荷が出力として得られる事となり、インピーダンス $50[\Omega]$ で読み出した場合のパルスの波高 $H[V]$ はクエンチング抵抗 $R[\Omega]$ を用いて

$$H = \frac{\Delta V}{R} \times 50 \quad (2.2)$$

と書き表す事ができる。従ってこれは出力波形が ΔV に対して線形である事を示しており、常に一定の波高を出力する事を示している。この手法の特徴としては各ピクセルに抵抗を付加させただけであり製作が簡単な事に加え、チップ上の場所を他の手法に比べ占領しないため開口率を大きく保つ事ができる。図 2.10 に MPPC の表面拡大図を載せた。これを見て分かる通りアルミニウム電極と光電面つなぐようにポリシリコン抵抗が挿入されている。このポリシリコン抵抗はピクセルサイズ $25\mu\text{m} \times 25\mu\text{m}$ の MPPC の場合、室温中で約 $\sim 200\text{K}\Omega$ の抵抗値持つものを現在は付加している。一般的にピクセルサイズを小さくすると端子

間容量も必然的に小さくなる。従って RC による時定数を一定に保つために抵抗値をその分大きくする必要がある。そのためピクセルサイズの小さい MPPC には抵抗をより長く必要とするため、開口率の低下が避けられないという課題は残っている (表 2.2 参照)。

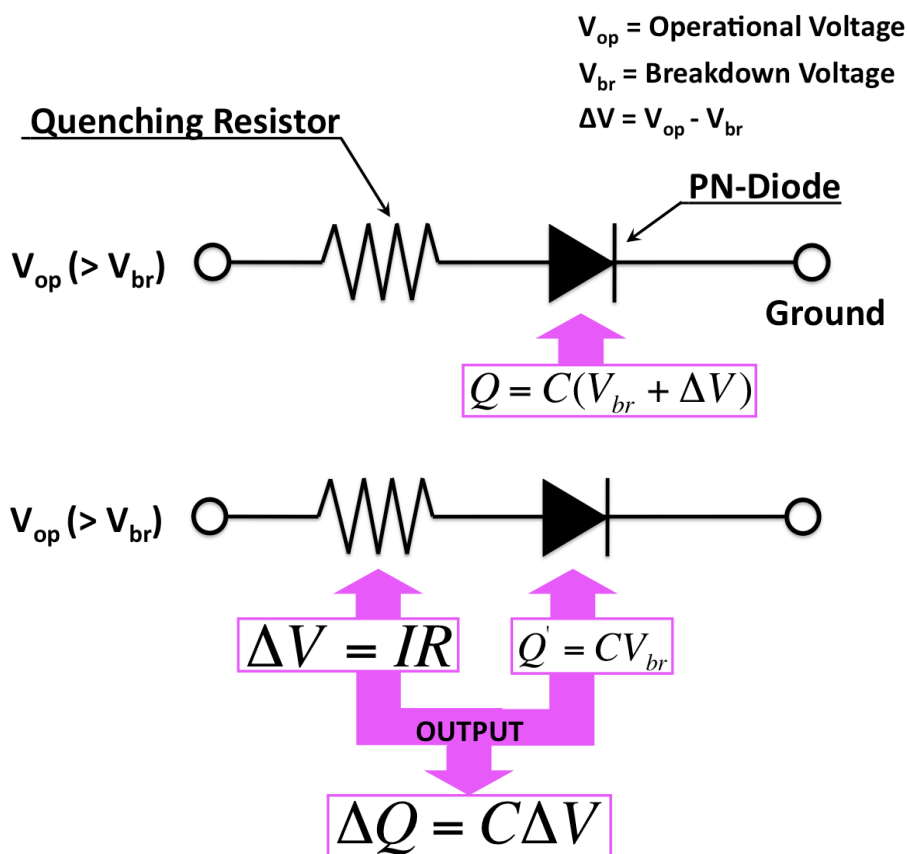


図 2.11: パッシブクエンチング機構

アクティブクエンチ

これはトランジスタなどのような素子を用いてクエンチを行う手法である。これは PPD に印加している電圧を PPD の出力に呼応して外部回路から強制的に降伏電圧まで印加電圧を落とす手法である。この手法は、パッシブクエンチのように抵抗を付加するだけでなく機能を持った外部回路を必要とするため、その行程は複雑であり、各ピクセルに載せると開口率も大きく低下させてしまう。しかし強制的にクエンチさせる事ができるためクエンチのコントロールは行い易いとされる。

2.2.5 フォトンカウンティング

もう一つ PPD が APD とは大きく異なる点としてガイガーモード領域でのアバランシェ増幅による高い増幅率だけでなく、それら G-APD をピクセル化する事により入射光子数を計測する事が可能という点が挙げられる。これはどのピクセルも一定出力を出す事を条件に、それらを並列化する事で可能となる。理論的に入射光子数を完全に数えられる訳ではなく、各ピクセルの面積を十分に小さくし同一ピクセルに入る光子を抑制する事で、より 1 photon-1pixel の関係が成立し易くなる。そのため開口率を上げつつ増倍率も高め、さらにピクセルサイズを小さくする事が理想的な PPD を目指す上で望ましい。図 3.1.3 は 100 ピクセルの場合の入射光子数と励起ピクセル数の関係を示めた図である [8]。

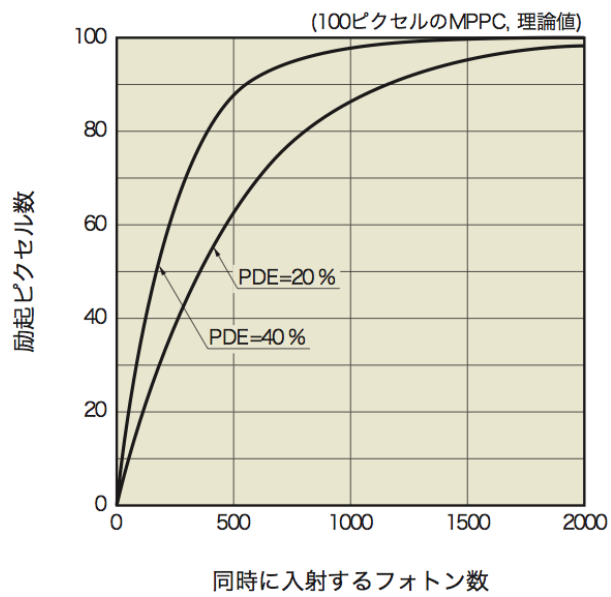
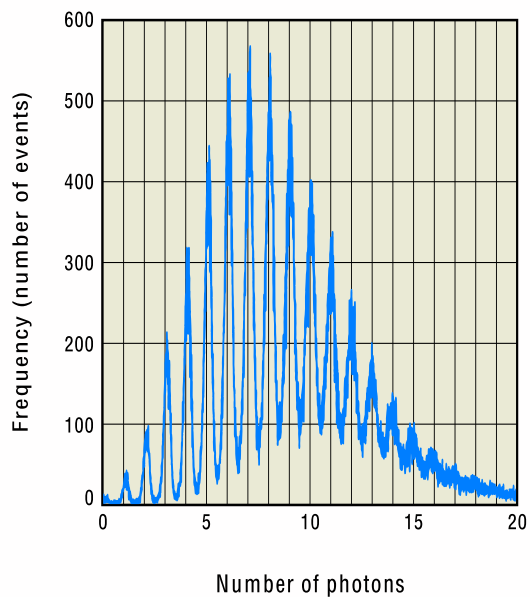


図 2.12: フォトンカウンティングの線形性と光パルスを入射した際の MPPC の検出光子数と頻度分布

第3章 PPDの開発目的とその状況

3.1 開発の目的

PPD 開発における最終目的は物性物理に基づいた PPD デバイスの性能向上手法とその現実的な製造プロセスを確立をする事にある。その性能向上に関しては大きく分けて次の3つに分けられる。

1. 高増倍率化
2. 大面積化と開口率の向上
3. フォトンカウンティング性能の向上に向けてピクセルの小型化

今後、これら3つを克服するような新たな PPD をデザイン設計し製造していく必要がある。

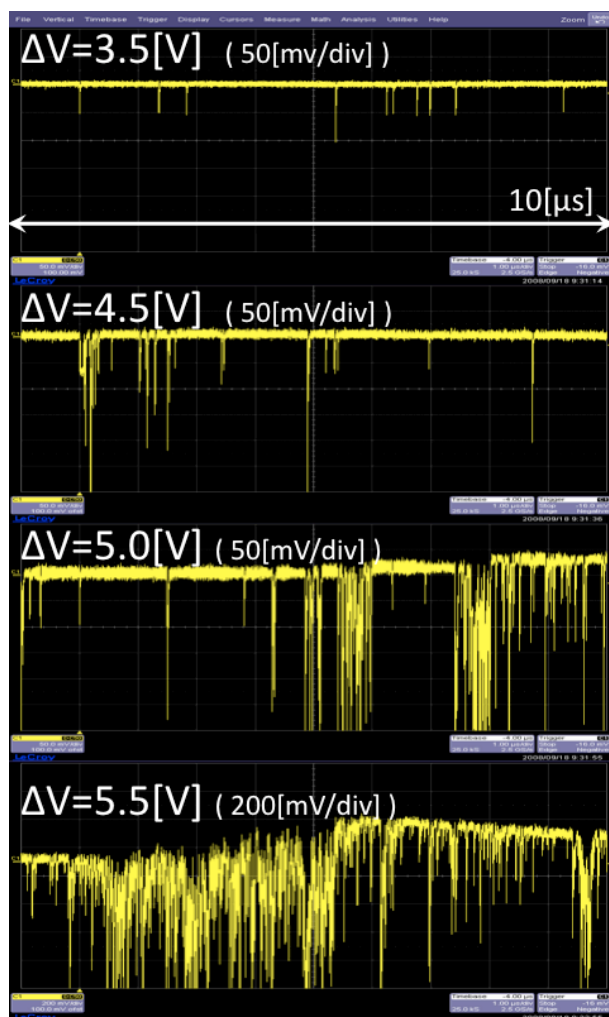


図 3.1: 光源のない暗箱内において ΔV に対する波形の変化 ($\Delta V = 5.5[V]$ の縦軸のレンジが他の電圧に比べて4倍大きい事に注意されたし)

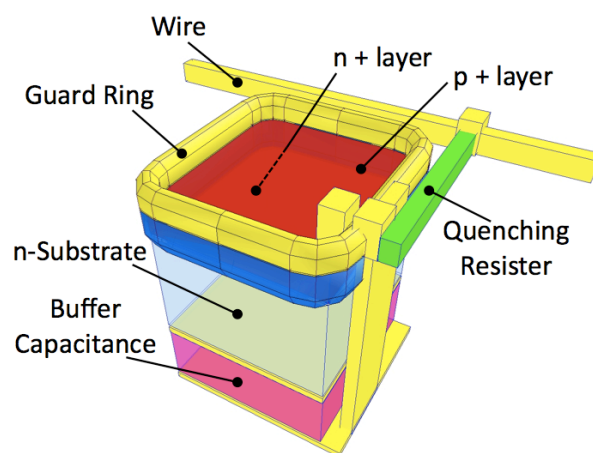


図 3.2: キャパシタンスを各ピクセルに並列配置した改良版 PPD のイメージ (Buffer Capacitance を現在基盤のある場所に配置する構造だが、垂直に配線を形成する技術が現在発展途上のため、技術的にもコスト的にも困難と思われる)

3.1.1 高増幅率化

高増幅率化に関して一般的な解決方法は式 (2.1) より動作電圧をあげる、もしくはキャパシタンスを増加させる方法の2通りである。動作電圧をあげる方法に関しては図 3.1 に示す通り ΔV の増加によりノイズは爆発的に増加するため、この手法にはノイズ抑制が必須となってくる。またキャパシタンスを増加させるためにピクセルサイズを大きくしてしまうと単位面積あたりのピクセル数を減らす事になるため、これは後節で述べるがフォトンカウンティングを向上を妨げる事となる。さらに図 3.2 のようにキャパシタンスを各ピクセルに並列に配置する事でキャパシタンスを得る方法 [3] はコスト面やプロセス的に現在の技術では困難な点が多い。この改良案に関してはプロセス技術の向上が必要となり本研究の枠を超えている。さらに内部のプロファイルを変えてキャパシタンスを増加させる手法は、PPD のメカニズムが未だ未解明な上に非線形現象を利用したデバイスのため、より一層の動作メカニズムの理解を必要とする。従って高増幅率化においてはノイズ抑制および、PPD の動作メカニズム解明が早急の課題となる。

3.1.2 大面積化と開口率の向上

大面積化の向上を実現するには半導体製品における歩留まりおよび、ノイズとの闘いとなる。1枚のシリコンウェハから大面積の PPD を製造するには製造歩留まりの向上が必須となる。また PPD のノイズレイトはチップの面積に比例して増加するため、ノイズレイトを抑制する工夫が必要となる。現在浜松ホトニクス社では大面積化への対応としては既存の MPPC を並べると言うアレイ型を採用している。これにより歩留まり問題を回避しているが、アレイ化した分だけ読み出し回路を取り付ける必要がある上に根本的にはノイズレイトの増加の問題は解決してはいない。従って大面積化に関してもノイズの抑制は重要な課題と言える。また開口率に関しては現在 PPD の表面に表面にアルミニウム配線やポリシリコン抵抗が張り巡らされ開口率を大きく低下させ、結果的にはピクセル数の向上までも妨げている。そこで近年取り上げられるようになった裏面照射型の加工が PPD でも採用される事となれば開口率およびピクセル数の一層の向上が期待できる (図 3.3)。

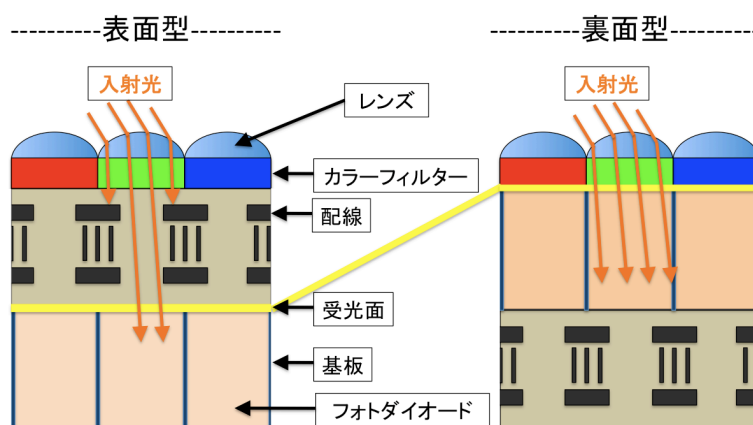


図 3.3: 表面照射型と裏面照射型の比較

3.1.3 フォトンカウンティング性能の向上

フォトンカウンティング向上に関しては単位面積あたりのピクセル数を上げる事が重要となってくる。図 2.10 を見て分かる通り、各ピクセルは受光面、ポリシリコン抵抗、アルミニウム配線をワンセットとして成り立っている。基本的にはピクセルサイズの小型化は端子間容量の低下につながり、時定数を維持するために外部抵抗を大きくする必要性からポリシリコン抵抗は長く配線しなくてはならない。この事により、ピクセルサイズの小さい MPPC の開口率は低くなっている (表 2.2)。ピクセル数を向上するにあたり開口率の維持、もしくは向上は避けては通れない。そして開口率が関わってくる以上、ノイズ抑制もフォトンカウンティング向上には避けては通れない課題として付きまとう事となる。

3.2 開発の方向性

第 3.1 節のように、どの課題においてもノイズレートの抑制は今後 PPD を改良する上で重要なポイントとなっている。そのためまずは既存の PPD である MPPC におけるノイズ発生メカニズム、およびノイズの種類比率を詳細に理解する必要があった。そのため本研究に先立ち、既にノイズ種類別独立精密測定を行なっている [3]。

3.2.1 各種ノイズの説明

まずノイズへの理解を深めるため、本研究の前段階として MPPC におけるノイズの精密測定を行なった。MPPC には室温で 3 種類のノイズが含まれている事が既に確認されている (図 3.4)。その 3 種類はランダム・ノイズ、アフターパルス、クロストークであり、その詳細を次に説明する。

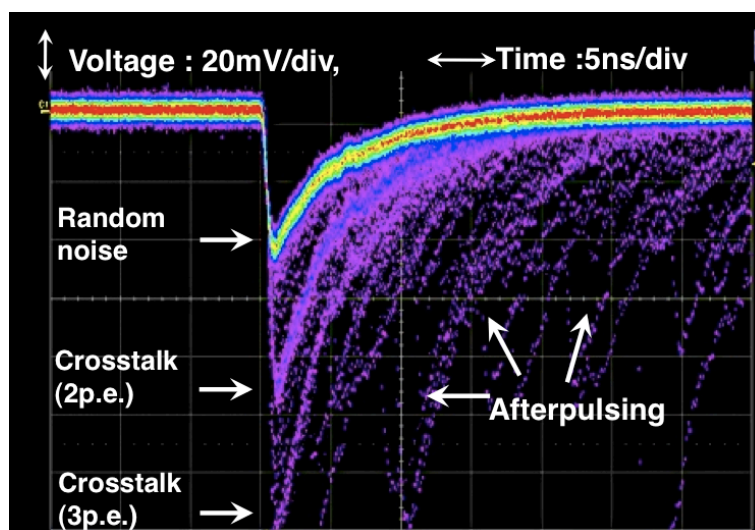


図 3.4: MPPC のノイズ

ランダム・ノイズ

ランダム・ノイズは他のノイズとは無関係に不規則に発生をするノイズであり、後述に説明する残りの 2 つのノイズを発生させるきっかけともなる。

< 熱励起ノイズ >

物質が熱を持っていれば、その熱からの黒体放射により電子はエネルギーを受けとり、価電子帯から伝導帯へ励起される。その励起エネルギーは、室温 300K の場合 0.026eV 程度である。価電子帯の電子は非常に多いため、その一部が伝導帯と不純物の間に遷移し自由キャリアを空乏層内で生成する。常温においてはこの熱励起ノイズが支配的であり、次に示すトンネル効果によるランダム・ノイズはほぼ無視できる。そのため熱励起の発生確率 $r_{thermal}$ は単純に申請キャリア濃度と自由電子の有効寿命を使って以下のように書き表す事ができ、温度変数 T が *exponential* の肩に乗っているため、非常に温度に敏感な式である。

$$r_{thermal} = \frac{n_i}{\tau_e} = \frac{2}{\tau_e} \left(\frac{kT}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} (m_e m_h)^{3/4} \exp\left(-\frac{\phi_g}{2kT}\right) \quad (3.1)$$

n_i	:	真性キャリア濃度
m_e, m_h	:	電子・ホールの有効質量
τ_e	:	自由電子の有効寿命
ϕ_g	:	バンド間エネルギー

<トンネル効果によるノイズ>

逆バイアスの印加されたダイオードにおいて空乏層が十分薄く（10 nm 以下）、電場が 10^6V/cm 以上と高電場の場合に価電子帯の電子が伝導体に確率的に移る事ができる。これにより電子ホールペアが生成されノイズに成長する。このトンネル効果は温度に依存する事はなく電場の強度に依存するため、常温中でも起こっている。しかしその確率が低すぎるため、常温中では熱励起ノイズに埋もれ観測する事はできない。ただし低温中では熱励起によるノイズが抑制され観測が可能となる [9][10]。

アフターパルス [11][12]

アフターパルスはPPDの3種類あるノイズの中で他のノイズに付随して発生するタイプのノイズの一つであり、この現象は同一ピクセルで起こるとい特徴がある。デバイスに使用するシリコンには必ず欠陥が存在し、そこにアバランシェ増幅中のキャリアがトラップされ、ある時定数で解放される事でそれが種となり新たなノイズへ成長する。そのためアフターパルスは必ず何らかのノイズの後方に現れる事となるが、そのトリガーとなったノイズとアフターパルスは同型のため出力波形から見分ける事はできない。しかしアフターパルスは主パルスからタイムラグを持って現れ、それラグはシリコン欠陥によりいくつかの時定数を持っていると考えられている。そのアフターパルスの時定数はおよそ $10 \text{ns} \sim 100 \text{ns}$ の間にあるとされ、 $1 \mu\text{s}$ 程度の時定数を持つ熱励起ノイズとは区別する事ができる。これにより各動作電圧におけるアフターパルスの発生頻度を算出する事は可能である。

クロストーク

クロストークはアフターパルスと同様に他のノイズに付随して発生するタイプのノイズである。このノイズは光学クロストークと呼ばれアバランシェ増幅中の制動放射や再結合の際に発生する二次光子が隣接するピクセルに入り込み、そのピクセルにおいてもアバランシェ増幅を起こしノイズへと成長してしまう現象の事である。またこの過程は 1ns 程度と非常に短いと予想されており、測定では主パルスとほぼ同時に出力され通常のシングルフォトンの波高の整数倍として観測される（図 3.1）。

ノイズの相乗効果

これら上記に上げたランダム・ノイズ、アフターパルス、クロストークは互いに密接に関連しており、その相乗効果によって ΔV によるノイズレートの急激な増加を説明する事ができる（図 3.5）。基本的にはランダム・ノイズを種としてアフターパルス、およびクロストークが副次的に発生し、さらにそのアフターパルスとクロストークは互いに互いを生み出すという構図である。この相乗効果を引き起こす関係がノイズレートの電圧に対する急激な増加を説明する基本的な仕組みである。

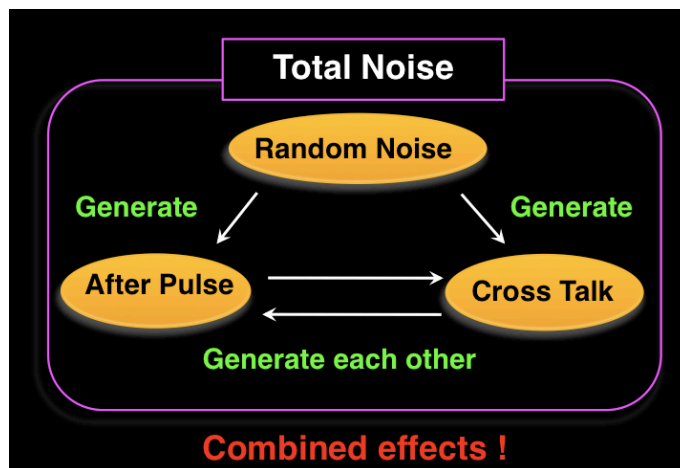


図 3.5: 各種ノイズの相乗効果の関係

3.3 各種ノイズの独立な測定結果

本研究に先立ち、PPDのノイズ理解の重要性から各種ノイズの独立測定を試みた。その結果、アフターパルス、クロストーク、ランダム・ノイズの3種類を独立して測定する事に成功した [3]。

3.3.1 アフターパルスの測定

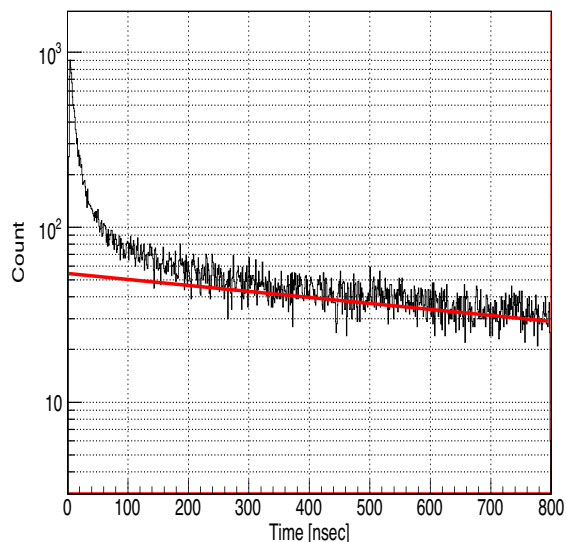


図 3.6: 典型的なアフターパルスの度数分布 (赤線下位がランダム・ノイズ、赤線上位の超過分がアフターパルス:それぞれの割合を示している)

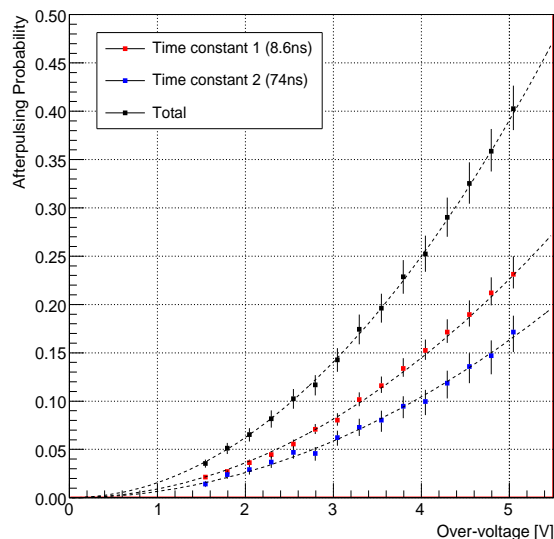


図 3.7: アフターパルス発生確率の ΔV 依存性 (2つの時定数でフィッティングした場合)

図 3.6 は横軸にトリガーパルス (ランダム・ノイズ) からのタイムラグをとり、ある電圧下のアフターパルスとランダム・ノイズの度数分布の和を描いた図である (10 ns 以下に関しては不感時間や収集効率を考慮していないため度数分布は意味を持たないと考え除いている)。この図から分かるようにアフターパルスはトリガーパルスの近くで多数発生し、約 300ns 程度経過するとそのほとんどがランダム・ノイズと考える事ができる。そのためこの図よりアフターパルスの ΔV に対する発生確率を求める事ができる。その確率を図示したものが図 3.7 であり、これは $(\Delta V)^2$ で比例する曲線によくフィットする事ができる。

3.3.2 クロストークの測定

また図 3.8 は横軸をゲインとして、ある ΔV での度数分布を示している。一番左の山はシングルフォトンカウントした物であり、その右にある山はクロストークにより2つのピクセルでアバランシェが起こった事を示している。さらにその右の山は3つのピクセルで増幅が起こったケースである。従ってこの度数分布からクロストークの割合を導く事で ΔV に対するクロストークの発生確率を示す事ができる (図 3.9)。クロストークの発生確率に関しては $\Delta V = 3.5[V]$ あたりで折れ曲がりがあるなど適切にフィットする事は困難である。このようにクロストークの ΔV 依存性が単純にフィットはできない理由は MPPC のジオメトリなどを考慮する必要があるためと考えられる。

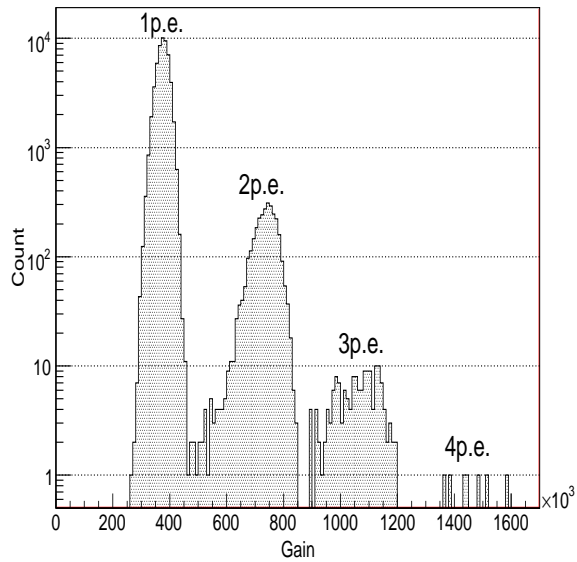


図 3.8: 典型的なクロストークによる増倍率分布

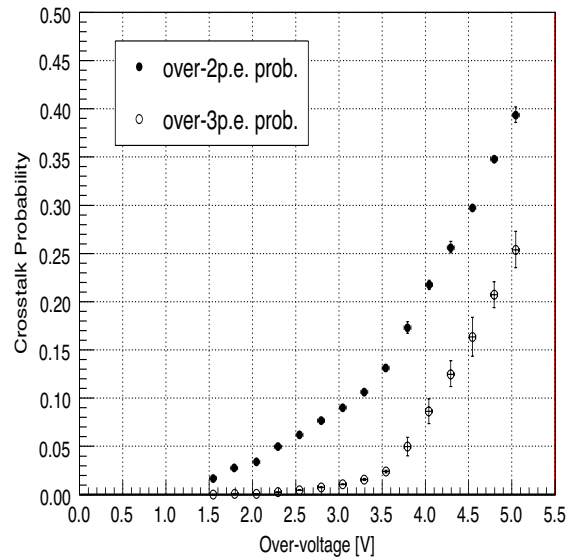


図 3.9: クロストーク発生確率の ΔV 依存性

3.3.3 ランダム・ノイズレートの測定

図 3.10 はランダム・ノイズレートの ΔV 依存性を示している。このノイズレートはあるパルスをトリガーした後、アフターパルスがほとんど見られなくなる $1\mu\text{s}$ 程度まで VETO 時間を設けてノイズレートを観測し VETO 時間の補正をしたものである。そのため可能な限りアフターパルスの効果は落とさされていると言える。事実 $\Delta V \leq 4.5[\text{V}]$ においてはランダム・ノイズレートは ΔV に線形に増加している事が確認できる。また $\Delta V \geq 4.5[\text{V}]$ において見られる線形からズレは単純に VETO を設けるだけではアフターパルスを落とすきれなかったためアフターパルスの効果が見えているものと考えられる。ランダム・ノイズの線形性の確からしきは、第 3.3.4 節で述べる再構成の所で説明する。

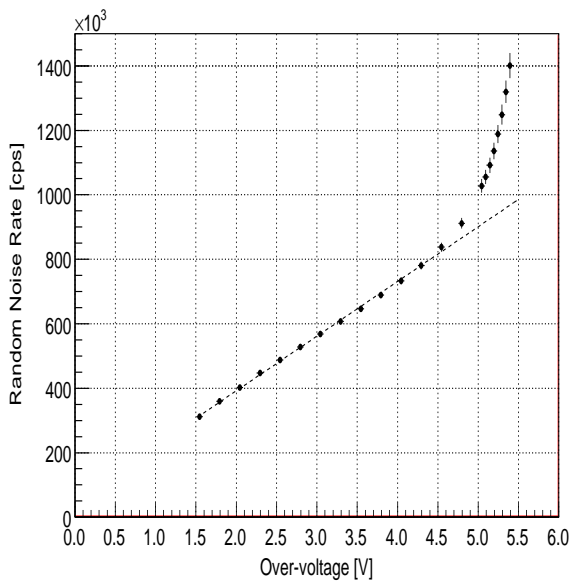


図 3.10: ランダム・ノイズレートの ΔV 依存性

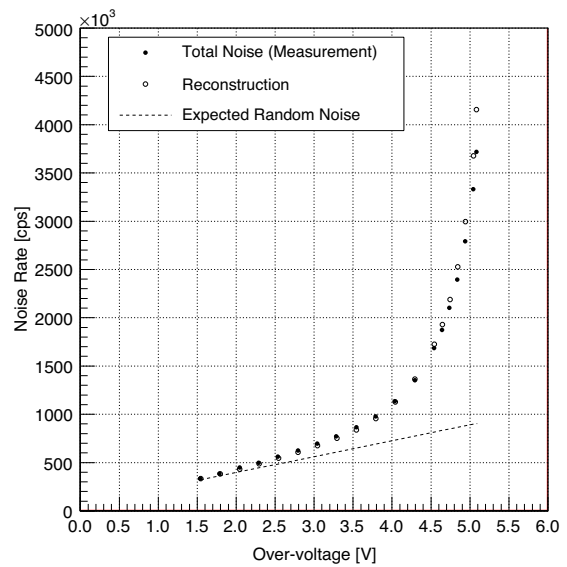


図 3.11: ノイズの再構成

3.3.4 総和ノイズと再構成

総和ノイズの実際の測定には測定器系の設定を VETO 時間が最小 (~13ns) になるようにして行なった。一方、総和ノイズの再構成にはアフターパルス、クロストークの ΔV に対する発生比率とランダム・ノイズの ΔV に対するノイズレートを組み算出した。その再構成の方法はモンテカルロ法などを使ったフルシミュレーションではなく、一つのランダム・ノイズを起源として生成される信号数の平均値を利用して統計的に総和ノイズを見積もっている。手順は次の通りである。

1. 各 ΔV に対して一つのランダム・ノイズを起源として発生するノイズの数を X_k と定義する (添字の k はアフターパルスを k 次まで含める事を示している)
2. 各 ΔV に対してランダム・ノイズを起源として発生するクロストークの平均数 q を見積もる
3. 同一電圧において一次のアフターパルスが発生する確率 p を求める
4. 1.,2.,3. より、一次のアフターパルスを考慮した物は以下のように書ける (この時の右辺の 1 は、トリガーパルスであるランダム・ノイズを示している)

$$X_1 = 1 + qp \quad (3.2)$$

5. 2 次のアフターパルスの場合は、次のようになる

$$X_2 = 1 + qp(1 + qp) = 1 + (qp) + (qp)^2 \quad (3.3)$$

6. 無限次までのアフターパルスを考慮した場合は、下記のように書き表せる

$$X_\infty = 1 + (qp) + (qp)^2 + (qp)^3 + \dots = \sum_{k=0}^{\infty} (qp)^k \quad (3.4)$$

7. 従って、総和ノイズレート N_{total} は、ランダム・ノイズのみのノイズレート N_{random} に X_∞ 掛け合わせた物となる

$$N_{total} = N_{random} \sum_{k=0}^{\infty} (qp)^k = \frac{1}{1-qp} N_{random} \quad (3.5)$$

8. 最後に総和ノイズの計測の際に VETO 時間が 13.5ns あるので、その補正項 $(1-\beta)$ を加え、 $qp = 1$ での発散を回避した総和のノイズレート $N_{total}^{(c)}$ は次のようになり、再構成したノイズレートを求める事ができる

$$N_{total}^{(c)} = \frac{1}{1 - (1-\beta)qp} N_{random} \quad (3.6)$$

この計算により算出した再構成による総和ノイズと実測による総和ノイズを比較したのが図 3.11 である。実測による総和ノイズは黒丸、一方、白丸は再構成によって見積もられたノイズレートとしてプロットしている。この図から再構成による総和ノイズが実測の総和ノイズをよく再現していることが分かる。これらの事から ΔV に対するノイズレートの急激な増加の要因を各種ノイズの独立測定および、その再構成により説明できたとと言える。

3.3.5 ノイズ抑制による効果検討

ここでランダム・ノイズ、アフターパルス、クロストークのそれぞれのノイズ成分から総和ノイズレートを再構成が成功した事により、それぞれのノイズを独立に抑制した場合の総和ノイズレートを数値的に見積もる事が可能となる。そこで以下の場合を試してみた。

1. ランダム・ノイズのみの場合（アフターパルス、クロストークを 100%抑制した場合）
2. アフターパルスを 50%抑制した場合
3. クロストークを 50%抑制した場合
4. アフターパルス、クロストークともに 50%抑制した場合
5. アフターパルスのみ 90%抑制した場合

それらの結果を示しているのが図 3.12 である。ただし測定範囲を超えたアフターパルスとクロストークに関しては、それぞれの測定データより確率を外挿して計算している。アフターパルスは $(\Delta V)^2$ に線形、クロストークは $\Delta V \leq 3.5[V]$ と $\Delta V \geq 3.5[V]$ で $(\Delta V)^2$ に線形となるようにフィットし、それぞれ外挿した値を採用した。

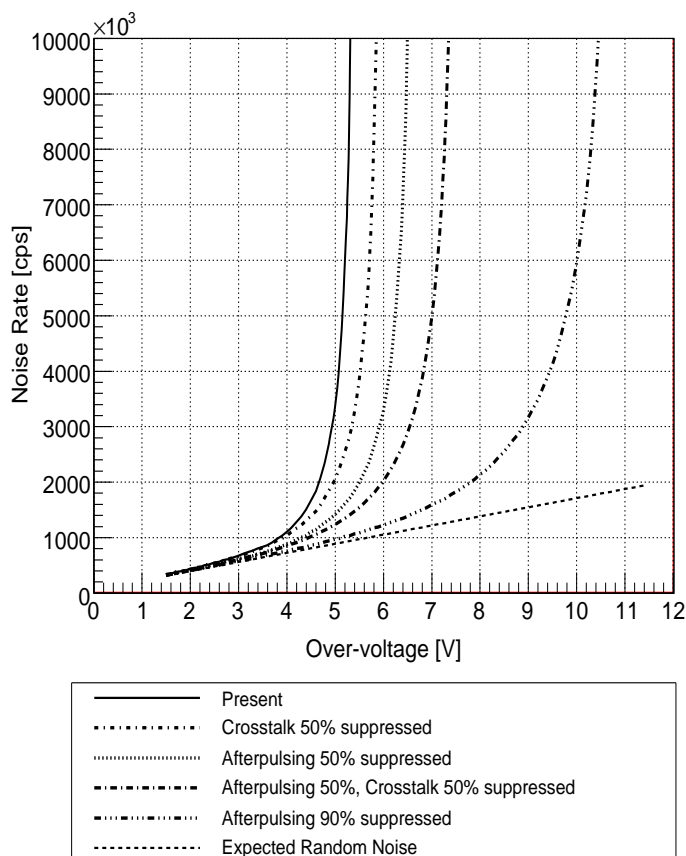


図 3.12: 各種ノイズを抑制した場合の予想されるノイズレート

この結果はクロストークによる削減よりもアフターパルスを削減した場合の方が良い性能を示す事を意味している。しかしアフターパルスはシリコンの欠陥を起源とするノイズでありプロセスの段階で必ず生まれてしまうため、欠陥を現在よりも減らす事は製作上困難である。またクロストークに関してトレンチなどを設ける事でクロストークを抑制する方法は提案されているが、今回のこの結果によればその効果は動作範囲 ΔV を僅か 0.5[V] 程度押し上げるだけであり製作コストに見合わないと考えられる。従ってノイズ抑制には PPD の内部構造に踏み込んださらなる改良が必要となる事をこの見積は示唆している。

3.3.6 光子検出効率 (Photon Detection Efficiency) の傾向分析

次に各種ノイズレートと同様に重要な指標となるのが、光子検出効率 (Photon Detection Efficiency, PDE) である。そのためノイズの独立測定と同じく本研究に先立ち、PDE の実測とシミュレーションの比較を行った [3]。

PDE は、起源となるキャリアがガイガーモードで増倍を引き起こす確率を「アバランシェ確率」と定義して次のように書く事ができる。

$$PDE = (\text{アバランシェ確率}) \times (\text{開口率}) \times (\text{光子吸収効率})$$

そして PDE を実測するにあたり、吸収長が $0.5 \mu\text{m}$ 程度である 470 nm の青色 LED を光源に用いて MPPC の PDE を測定した。その結果 3.13 のように PDE は、 ΔV に対して飽和して行く傾向を見せた。

一方、シミュレーションにおいてはインパクトイオン化係数と言うものを考慮して簡単なモンテカルロシミュレーションを組んだ。インパクトイオン化係数とは電場環境で電子とホールが単位時間あたりに衝突電離を起こし新しい電子・ホール対を生成する確率 $\alpha_e, \alpha_h [\text{cm}^{-1}]$ に強く関係しており、この衝突電離確率はそれぞれ次の式で書き表せる [13]。

$$\alpha_e(E) = \exp\left(A_e + \frac{B_e}{E}\right) \quad (3.7)$$

$$\alpha_h(E) = \exp\left(A_h + \frac{B_h}{E}\right) \quad (3.8)$$

A_e	1.35×10	$B_e [\text{V/cm}]$	-1.17×10^6
A_h	1.44×10	$B_h [\text{V/cm}]$	-1.95×10^6

表 3.1: 衝突電離確率の各係数値

この衝突電離係数を用いて、ある仮定した電場構造における ΔV に対するアバランシェ確率を見積もったものが図 3.14 となる。これによると電子起源とするアバランシェ確率が ΔV に対して飽和し、ホール起源とするアバランシェ確率が ΔV に比例して変化している事が分かる。また 3.3.6 の PDE の構成式より、実測の相対 PDE は開口率、光子吸収効率を一定としており ΔV に対する変化を見ているため、事実上アバランシェ確率の電圧依存性を見ている事と等価である。従って図 3.13、3.14 の ΔV に対する傾向は比較する事ができる。これを第 3.3.7 節で詳しく取り上げて説明する。

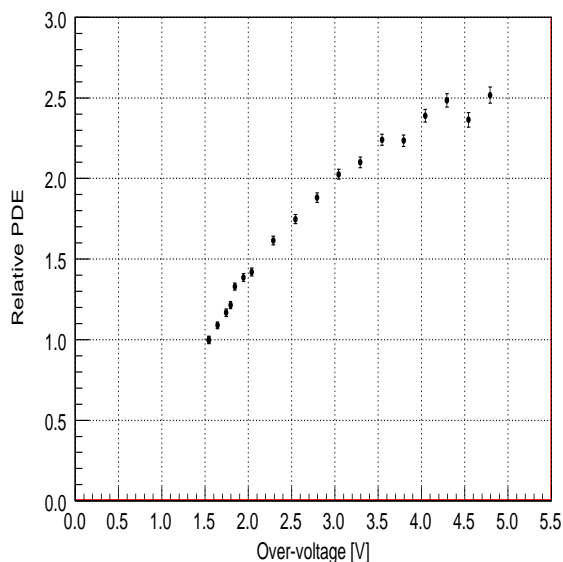


図 3.13: LED を光源とした時の MPPC の PDE

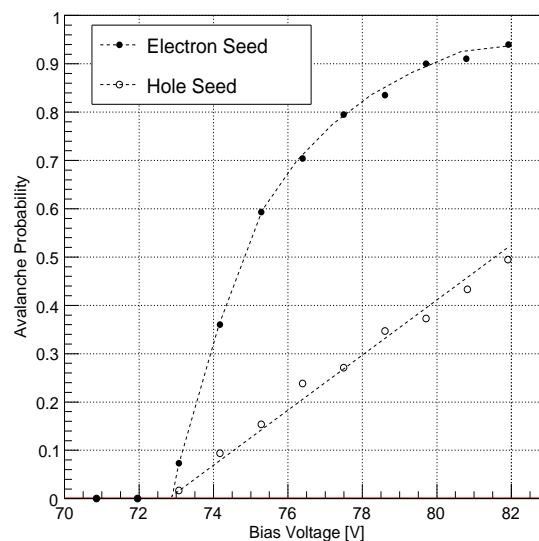


図 3.14: シミュレーションによるアバランシェ確率

3.3.7 アバランシェ確率とノイズの関係についての考察

3.3.6 節より、実測とシミュレーションによるアバランシェ確率を知る事ができた。その結果から実測の相対 PDE (つまり相対的なアバランシェ確率) と、シミュレーションによる電子起源のアバランシェ確率はどちらも ΔV に対して飽和する傾向を見せている (図 3.13 と図 3.14 を比較)。この理由を詳しく議論するため PPD の一般的な内部構造を示した図 3.15 を使う事にする。

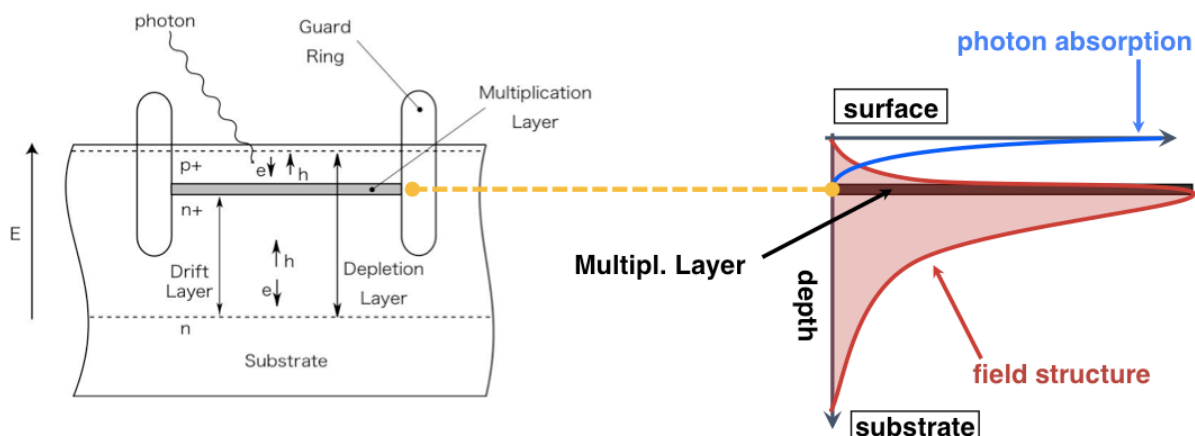


図 3.15: p-on-n 型 PPD の構造と内部物理量の分布

今回使用した MPPC は増倍層が受光面側からどの程度の深さにあるかは企業の内部情報上知ることはできない。しかし吸収長が $0.5\mu\text{m}$ の 470nm 程度の波長の青色の光に対しても感度を持つためには増倍層は入射面の表面よりも比較的近い場所にあると考えられる [14][15][16]。そのためおそらく MPPC においても $Depth \leq 1\mu\text{m}$ に増倍層があると予想される。従って受光面から入射した 470nm 程度の波長の青色の光は光電面側の p 層でほぼ吸収され、その近傍で電子ホールペアを生成し電子が増倍層へ向かってドリフトして行く事になる。一方、光源を使用していない場合のアバランシェ確率もランダム・ノイズレートから求める事ができる。それはランダム・ノイズが光源により電子ホールペアを生成した場合と比較して、ペア生成後は基本的には光源なしの場合でも同一メカニズムをとる事に由来する。ランダム・ノイズレートは開口率、光子検出効率と関係はなく同一電圧では同じレートを示す。従ってランダム・ノイズレートの ΔV 依存性を調べる事はアバランシェ確率の ΔV 依存性を見ている事に等しい。そのランダム・ノイズは常温中では主に空乏層中のキャリアが起源となるため、空乏層中で多くの体積を占める n 層のホールが主な起源であると予想される。

それを裏付けるように図 3.13 と 3.14 を比較すると受光面で吸収され電子が増倍の役割を果たす青色 LED の PDE は実測およびシミュレーション共に ΔV に対して飽和する傾向がある。そして一方、n 層のホールが主な起源となるランダム・ノイズレートとホールのアバランシェ確率は共に ΔV に対して線形である。

以上の事からランダム・ノイズは主に基盤側の n 層キャリアであるホール起源による物が支配的である事と考えられる。また現在 MPPC が採用している p-on-n 型の PPD はアバランシェ確率が電子に比べ相対的に低いホールがランダム・ノイズの起源となる構造のため、n-on-p 型に比べてランダム・ノイズが低減する構造と予想される。

第4章 プロセス・デバイスシミュレーターを用いたPPDの開発

本研究は、プロセス・デバイスシミュレーションである *TCAD*(正式名称：*Technology Computer Aided Design*)を用いる事で、これまで PPD 開発の主な手法として採用されて来た莫大なコストと時間をかけた「条件出し」と呼ばれる手法からの脱却を図る。従って *TCAD* に要求する事柄は開発の効率化と低コスト化に加え、これまでの「条件出し」手法により理解が進まなかった PPD の動作メカニズムの解明が挙げられる。そして最終的には現在の PPD を凌駕する新型デバイスのデザイン、およびその動作確認、更には詳細な性能評価までを *TCAD* 上で行なう事を目指す。

4.1 *Technology Computer Aided Design* について

TCAD(正式名称：*Technology Computer Aided Design*) はプロセスシミュレータ、デバイスシミュレータ、回路シミュレータの3つを統合したシミュレーターを意味している。*TCAD* は半導体デバイスを製造する際の製造過程や電気伝導に関する物理・化学現象を表す方程式を解く事でデバイスの特性をシミュレーションする事を可能にした。これにより計算機上で半導体デバイスの製造プロセスをも含めた最適条件を低コストかつ効率的に洗い出す事が可能となる。現在も新型デバイスの開発競争が激化する各国において、*TCAD* 開発の重要性は増している [17]。本研究では *TCAD* の中でも半導体先端テクノロジーズ社の開発する国産の *TCAD* である「*ENEXSS*(エネックス)[18][19]」の使用して開発・検討を進める。

4.2 *ENEXSS* の概要

この節では *ENEXSS* について簡単な概要を説明する(コードの詳細については付録 B.1 に載せた。またさらなる詳細については半導体テクノロジーズ社のマニュアルを参照の事 [18][19])。

4.2.1 *ENEXSS* の解析手法

ENEXSS はポアソン方程式、電子の電流連続方程式、正孔の電流連続方程式の3本で構成される Drift-Diffusion(DD) モデルと熱伝導方程式の計4つを支配方程式として半導体デバイスの振る舞いをシミュレーションする事ができる。今回はこの中でも DD モデルの3つの式を利用して定常解析と過渡解析と呼ばれる2種類の解析手法を利用した。

ポアソン方程式(式 4.1)

半導体内部の電磁場を記述する Maxwell 方程式から導出された式で、場の誘電率と電荷密度から電位を求める基本式

電子及び正孔の電流連続式(式 4.2,4.3)

熱統計力学の Boltzmann 輸送方程式から導出された式で、それぞれ電子密度と正孔密度を求める基本式

熱伝導方程式(式 4.4)

Fourier 則から導出した式で、デバイス内部で発生した熱がどのように伝わるかを含めて格子温度を求める基本式

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla \psi) = -q(N_D - N_A + p - n) - \rho_{fix} - \rho_n - \rho_p \quad (4.1)$$

$$U = \frac{\partial n}{\partial t} - \frac{1}{q} \cdot \frac{\partial \rho_n}{\partial t} - \frac{1}{q} \nabla \cdot \mathbf{J}_n \quad (4.2)$$

$$U = \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{1}{q} \cdot \frac{\partial \rho_p}{\partial t} + \frac{1}{q} \nabla \cdot \mathbf{J}_p \quad (4.3)$$

$$Q_L = \rho c \frac{\partial T_L}{\partial t} - \nabla \cdot (\kappa_L \nabla T_L) \quad (4.4)$$

記号	変数名	単位
ψ	電位	V
q	素電荷 (=1.6×10 ⁻¹⁹)	C
ϵ	誘電率	F/cm
N_D	ドナー密度	cm ⁻³
N_A	アクセプタ密度	cm ⁻³
n, p	電子及び正孔密度	cm ⁻³
$\mathbf{J}_p, \mathbf{J}_n$	電子及び正孔の電流密度	A/cm ²
U	キャリアの生成・再結合レート	cm ⁻³ /s
κ	格子の熱伝導率	W/cmK
T_L	格子温度	K
Q_L	発熱項	W/cm ³
ρ_{fix}	固定電荷	C
ρ_n	電子介在型トラップ準位の電荷	C
ρ_p	正孔介在型トラップ準位の電荷	C

表 4.1: 支配方程式の変数名

1. 定常解析 … 時間が十分経過したという仮定のもとで計算を実行する解析。従って支配方程式の時間項を無視した式を利用して計算を行う。
2. 過渡解析 … 予め定常解析を行った後、その結果を利用して今度は支配方程式の時間項を無視せず計算する解析。どの程度の時間ステップで解析するかの設定が必要となる。

またこれら解析方法に加えて次元別に解析方法を選ぶことができる。本研究では pn 接合半導体ダイオードを利用し、このダイオードは図 4.1 のように p 型半導体と n 型半導体を接合した構造となっている。1 次元解析とは pn 接合半導体ダイオードの深度方向にのみメッシュをいれ内部構造や濃度分布を考慮し解析を行う。また 2 次元解析とはこの深度方向に加え光電面に水平な方向の次元を 1 つ加える。さらに 3 次元は実際の構造をそのまま解析した物となる。ただし 1 次元解析、2 次元解析は残された次元では構造が考慮されないがそれぞれ面積、奥行きを指定できるため、3 次元解析と同様の体積で計算する事が可能である。

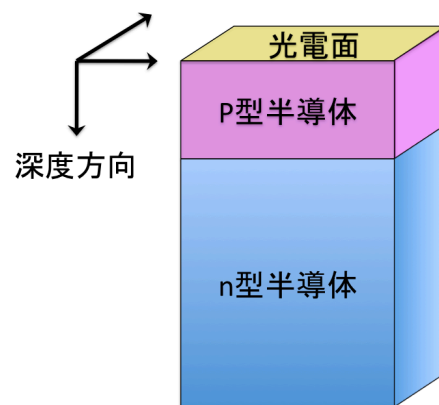


図 4.1: pn 接合半導体ダイオードの構造図とその次元方向

今回のオリジナルプロファイルは深度方向にのみ不純物濃度が変化を持った構造となっているため、基本的には次元により解析結果が大きく異なる事は考えられない。しかし各次元で解析結果に大きな違いがないか確認作業を行っている。そして1次元と2次元の解析結果が同程度であれば解析時間の都合上、1次元で解析行なった。また1次元解析によっては解析不可能なパラメータが存在し、特に本研究で鍵を握る電子・ホールペアを発生させた過渡解析は2次元以上の高次の次元解析を必要とする。そのため過渡解析は全て2次元解析のみで解析を行った。ちなみに3次元解析は本研究では行っていない。

4.2.2 ENEXSS のソースコード

ソースコードは大きく分けて3セクターに別れており、その構成は下記のとおりになっている。

1. プロセスシミュレーションを行なうセクター（プロセスを設定する事で不純物の濃度分布を作成）
→「プロセスコード」と呼ぶ事にする
2. デバイスシミュレーションの詳細な設定をするセクター（メッシュ、電子ホールペアの生成設定、電極指定など）
→「設定コード」と呼ぶ事にする
3. デバイスシミュレーションによる定常・過渡解析を実行するセクター（物理モデル指定、計算方法の指定など）
→「解析コード」と呼ぶ事にする

本研究においてはプロセスコードはオリジナルプロファイルのみを利用したため変更はない。設定コード、および解析コードに関してはいくつか変更可能なパラメータが存在するため、その中でも重要度の高いパラメータに関しては付録 B.1 中のソースコード内で解説文の#の後に「@」を付けて、必要があれば後章で詳しく解説している。

4.3 従来の TCAD シミュレーションと本研究の内容

本研究に先立ち、TCAD を用いた PPD のシミュレーションに関しては生出氏の修士論文 [20] で既に行なわれている。ここでまず生出氏が行なった解析をまとめる。生出氏は主に PPD の一種である SiPM 開発 [21] を行なうイタリアの ITC-irst¹ チームが採用する Silvaco 社製の TCAD (ATHENA, ATLAS) のプロセスと電気特性の結果を元に半導体テクノロジーズ社製の ENEXSS で以下の点について動作確認を行なっている。

- 上記のイタリアチームの濃度分布、電場分布のプロファイルを ENEXSS のプロセスシミュレータにより再現
- 同プロファイルの IV カーブから降伏電圧の算出と再現
- エッジ起伏を回避するために用いられるガードリングの効果検討（2次元解析）

以上のように濃度分布、電場分布、そして降伏電圧の計算を ENEXSS のプロセス設計にて実行できる事を確認済みである。さらにガードリングのような3次元の構造物を組み込んだ解析も可能であり、基本的な定常（静的）解析に付いては基本的には確認された事になる。

そこで本研究は次なる段階として PPD の中でも浜松ホトニクス社が製作する MPPC に照準を当て、TCAD を有効性を確認して行く方針である。これは我が研究室が MPPC に関して既に多くの実測データを保持しており、理解も進んでいるためである。しかし MPPC の内部プロファイルの詳細は公開されてなく、再現する事は現段階では極めて困難である。そこで ITC-irst チームの SiPM のプロセスを元に MPPC のこれまでの実測から内部プロファイルを予測し、MPPC と同程度である ~ 65V 付近に降伏電圧を持つようなプロ

¹ Instituto Trentino di Cultura, Il Centro per la Ricerca Scientifica e Tecnologia

ファイルを作成した(以後これを「オリジナルプロファイル」と呼ぶことにする)。そして本研究は、このオリジナルプロファイルに対して定常解析と過渡解析と呼ぶ2つの解析手法を使い研究を進めた。各解析では主に次の事を行った。

1. 定常解析(第6章)

- (a) CV 特性と IV 特性の計算
- (b) 空乏層の電圧依存性
- (c) 温度依存性 (CV 特性, IV 特性, 飽和電流, 降伏電圧)

2. 過渡解析(第7章)

- (a) アバランシェ増幅の時間変化
- (b) クエンチング抵抗によるクエンチング効果の検討
- (c) 電流値および時定数の電圧依存性
- (d) シミュレーションと MPPC の波形の比較
- (e) 初期に生成される電子・ホールペア数による諸特性の変化
- (f) 熱励起レートの場所依存性と温度依存性

生出氏による研究からの発展としては、まず定常解析におけるより詳細な解析、つまり手計算との比較や各種特性の温度依存性、そして空乏層のような内部の状態の計算を行った点である。これらについては第6章で報告する。さらに今回日本で始めて行われた過渡解析による PPD の動的な振る舞いと PPD の内部物理量の時間変化についての報告を第7章で行う。本研究が従来の TCAD シミュレーションから大きく前進している点として、ガイガーモード領域で動作するダイオードに対して過渡解析による考察を可能としている点が挙げられる。ガイガーモード領域で起こるアバランシェ増幅は非線形領域の衝突電離によるものであり、解析が非常に不安定である。このため詳細なチューニングを必要とし、これまで研究が進んでこなかった。そこを本研究は数多に及ぶチューニング試験を行い、安定動作する適切なチューニングを施すことで、TCAD を用いた PPD の動的解析を行なう事を可能としている。以上のように本研究は TCAD による PPD の解析手法を確立し、そのシミュレーションの結果の信憑性を実在する PPD である MPPC(浜松ホトニクス社製)と比較する事で評価している。そして TCAD が PPD の開発において製造プロセスまでを含めたシミュレーターとして耐えうるものであるかを報告する。

4.3.1 オリジナルプロファイルの基本データ

本研究で使用するオリジナルプロファイルについての基本データを紹介します。図 4.2 は深度方向に対する不純物濃度および電場の分布を示している。カソード側に p 型の B(ボロン)をドーピングし、アノード側には n 型の P (リン)をドーピングしており、この 2つの不純物分布のピークの境界である PN 接合面は $0.4\mu\text{m}$ あたりに存在する。そして接合面あたりに鋭い電場のピークを持つ構造となっている。

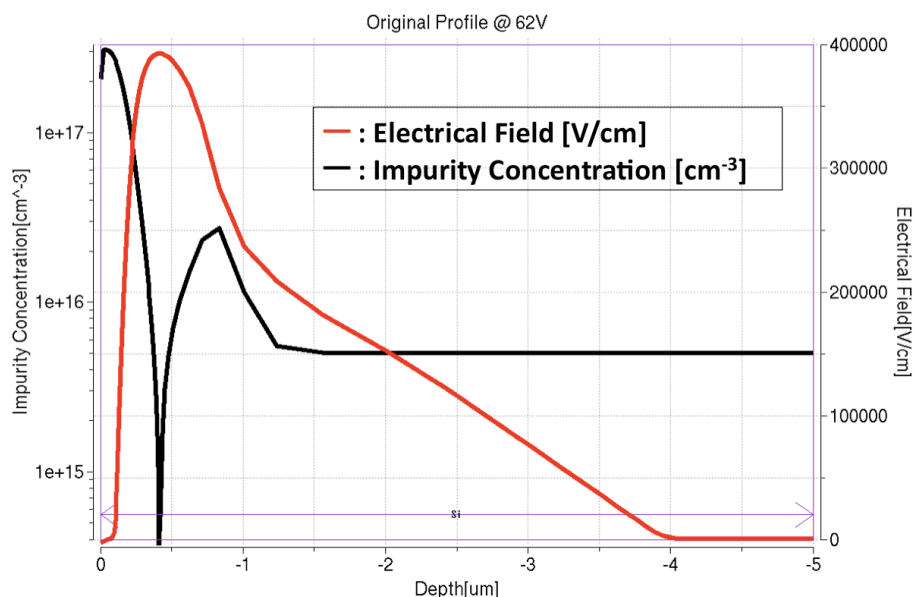


図 4.2: オリジナルプロファイルの深さ方向に対する不純物濃度分布と降伏電圧付近の電場分布 (深さ $Depth = 0\mu\text{m}$ を p 型半導体、 $Depth = 5\mu\text{m}$ を n 型半導体)

またオリジナルプロファイルの 3次元構造を図 4.3 に載せた。構造としては厚さ $0.01\mu\text{m}$ の仮想電極の間にシリコンをベースとした単純な pn 接合を持つダイオードを挿入している。pn 接合を持ったダイオードの厚みは $5\mu\text{m}$ とした。これは浜松ホトニクス社の MPPC をモデルとしているため、空乏層の厚さが波長 470nm である青色の光の吸収長である $0.5\mu\text{m}$ に比べ十分大きく、赤色の光にも十分な感度を持たせた構造にするためである (この構造が実際の MPPC と同じという訳ではない)。今後この pn 接合を持ったダイオードを仮想電極で挟んだ物に外部回路を付け加える事で PPD の 1 ピクセルを完成させる事になる。そのため以後この仮想電極を含めたこの単純な pn 接合ダイオードを単に「pn 接合ダイオード」と呼び、これに外部抵抗を付けたワンセットを 1-PPD と呼ぶ事にする。今後このオリジナルプロファイルを使用して定常解析、および過渡解析を行なう。

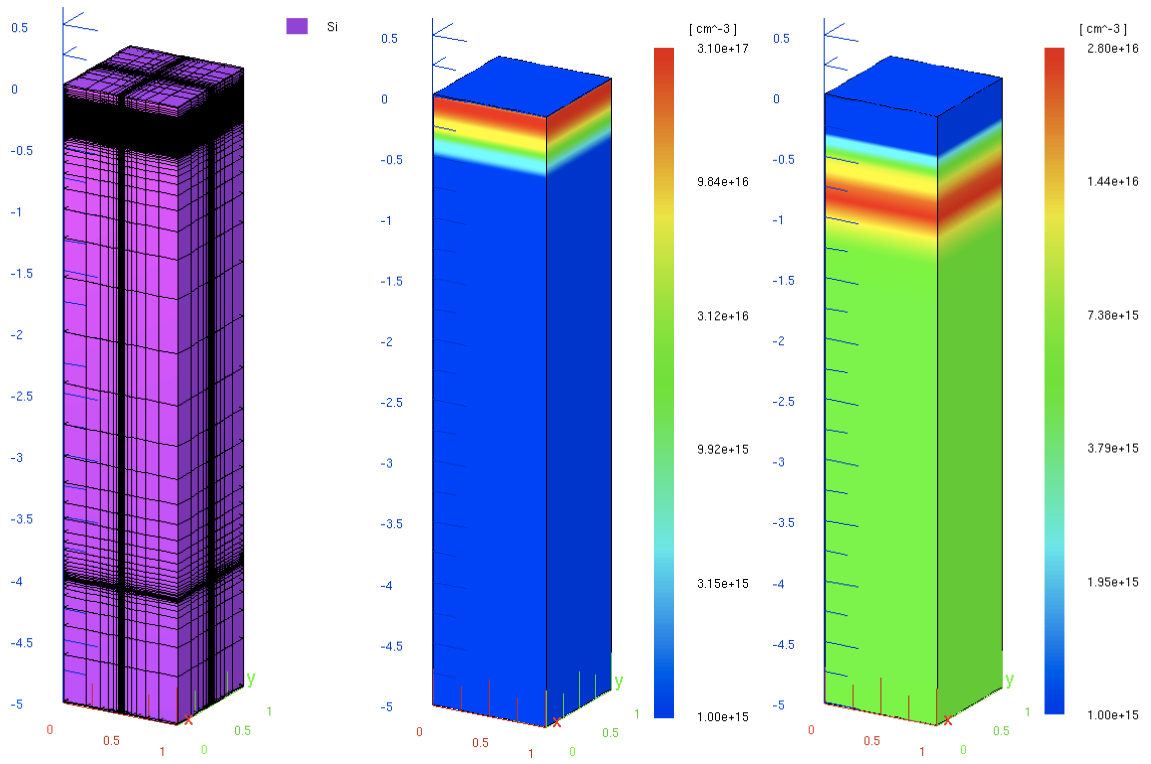


図 4.3: オリジナルプロファイルの 3 次元構造 (左: 基本構造 (メッシュ表示), 中央: B(ボロン) の濃度分布, 右:P(リン) の濃度分布の場所依存性)

第5章 物理モデル

半導体デバイスの動作はデバイス内部でのキャリアの運動を表すモデルが非常に重要となってくる。キャリアはエネルギーバンド構造における禁止帯中の局在準位から放出・捕獲を繰り返しており、その振る舞いを表すモデルは環境によっても様々であり多数存在する。これらのモデルのうち何れを採用するかはそのデバイスの不純物濃度、電場強度、キャリアの注入量などから絞る事ができる。本研究で使用する pn 接合ダイオードはその内部で強い電場を形成させ非線形現象を利用する事で動作をさせるという特殊なタイプのダイオードであり ENEXSS でもこれまで検討されてこなかった領域での使用となる。そのため特にダイオード内部でのキャリア生成・再結合モデルについては特に正しい理解が必要であり、本研究で必要と考えられる Impact Ionization モデル、Shockley-Read-Hall モデル、Auger モデルの3つについては以下で詳しく解説する事にする。

5.1 キャリア生成・再結合 モデル

まずキャリアの生成・再結合項である $U_{\text{Generation-Recombination}}$ は Impact Ionization 項 U_{IMPACT} 、Shockley-Read-Hall の生成・再結合項 U_{SRH} 、Auger 再結合項 U_{AUG} の和で書き表す事ができる (式 5.1)。本研究によるシミュレーションは特に断りがない限り、常にこの3つのモデルを採用する事にする。キャリアの生成・再結合項 U の単位は $[\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}]$ であり、1 秒間に 1cm^{-3} の体積中で生成・再結合するキャリアの個数を表している。

$$U_{\text{Generation-Recombination}} = U_{\text{IMPACT}} + U_{\text{SRH}} + U_{\text{AUG}} \quad (5.1)$$

5.2 Impact Ionization モデル

電場が非常に強い場合 ($|E| \gtrsim 10^5 [\text{V}/\text{cm}]$) のホットキャリア効果の一つにインパクトイオン化現象 [22] と呼ばれる現象がある。インパクトイオン化とはバンドギャップより高い運動エネルギーをもったキャリアが結晶格子の結合に寄与している価電子と相互作用を起こし電子・正孔対を生成する現象の事である。ENEXSS ではこのインパクトイオン化の係数は式 5.3, 5.4 で書き表し、その電場依存性は図 5.1 のようになる。これの係数より式 5.2 の U_{IMPACT} 項を決定している。

$$U_{\text{IMPACT}} = \alpha_n n v_n + \alpha_p p v_p \quad (5.2)$$

$$\alpha_n = \alpha_{n0} [1 + \beta_{n0}(T_L - T_{L0})] \exp\left(\frac{E_{n0}(1 + \beta_{n1}(T_L - T_{L0}))}{|E_n|}\right) \quad (5.3)$$

$$\alpha_p = \alpha_{p0} [1 + \beta_{p0}(T_L - T_{L0})] \exp\left(\frac{E_{p0}(1 + \beta_{p1}(T_L - T_{L0}))}{|E_p|}\right) \quad (5.4)$$

$$|E_n| = \frac{|\mathbf{J}_n \cdot \mathbf{E}_n|}{|\mathbf{J}_n|} \quad (5.5)$$

$$|E_p| = \frac{|\mathbf{J}_p \cdot \mathbf{E}_p|}{|\mathbf{J}_p|} \quad (5.6)$$

T_L	:	格子温度
T_{L0}	:	周辺温度
$\mathbf{J}_n, \mathbf{J}_p$:	電子/ホール電流ベクトル
v_n, v_p	:	電子/ホールの速度
残りの変数	:	モデルパラメータ (全て標準値を採用した)

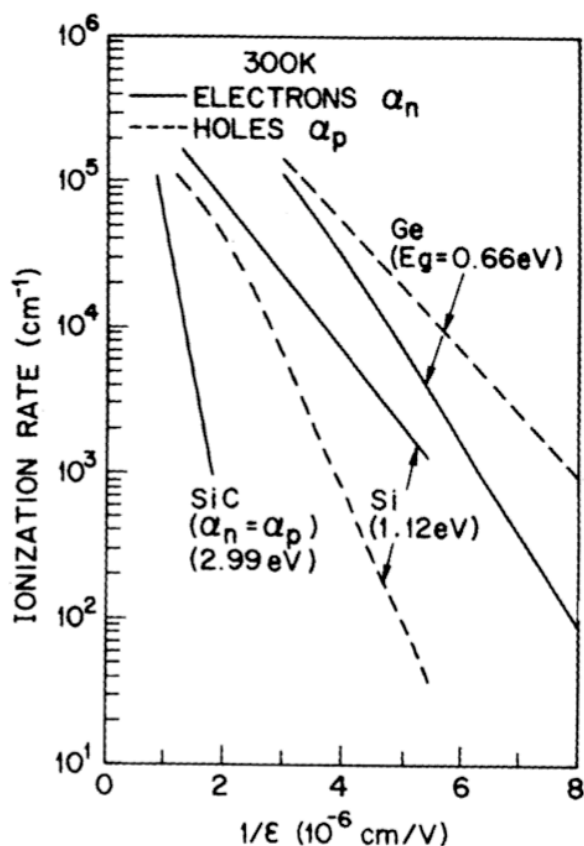


図 5.1: インパクトイオン化係数の電場依存性 [23]

5.3 Shockley-Read-Hall モデル

熱励起に関するモデルとも言える Shockley-Read-Hall モデル (SRH モデル [24][25]) は、半導体中での電子・正孔の生成・再結合率を表すモデルである。シリコン中のキャリアの寿命は主に格子欠陥や不純物原子などを介した間接的な再結合過程に依存する。このような格子欠陥を介したキャリアの間接遷移は、電子の捕獲と放出、正孔の捕獲と放出の4つのステップから構成されると仮定できる。従ってこの4つのステップを考慮することで Shockley-Read-Hall の生成・再結合項 U_{SRH} は式 5.7 として書き表す事ができる。

$$U_{SRH} = \frac{n_i^2 - pn}{\tau_p(n + n_i) + \tau_n(p + n_i)} \quad (5.7)$$

$$\tau_{n,p} = A_{n,p} \left(\tau_{\min}^{n,p} + \frac{\tau_{\max}^{n,p} - \tau_{\min}^{n,p}}{1 + (N/N_t)^{B_{n,p}}} \right) \quad (5.8)$$

- n_i : 真性キャリア濃度
 n, p : 電子/ホール濃度
 N : 不純物濃度 (ドナーとアクセプターの和)
 残りの変数 : モデルパラメータ (全て標準値を採用した [18][19])

ただしこの SRH モデルは電場が存在する場合には修正を受ける事となる。通常の SRH モデルの電子の生成機構は電子がフォノンなどと相互作用する事で伝導帯に熱励起されることに起因する。しかし pn 接合部のような電場が存在する場所、特に本研究のような逆バイアスを印加している場合は SRH モデルは修正されトラップ補助トンネルモデル (TAT モデル [26][27]) を採用すべきである。電場はトラップから伝導帯

へ熱励起を促進する働きを持つため、結果として補正された SRH モデルである TAT モデルの生成・再結合項 $U_{SHR+TAT}$ は式 5.9 と書き直される。

$$U_{SHR+TAT} = \frac{n_i^2 - pn}{\frac{\tau_p}{1+\Gamma_p}(n + n_i \exp(\delta E_t/kT_L)) + \frac{\tau_n}{1+\Gamma_n}(p + n_i \exp(\delta E_t/kT_L))} \quad (5.9)$$

$$\tau_{n,p} = A_{n,p} \left(\tau_{\min}^{n,p} + \frac{\tau_{\max}^{n,p} - \tau_{\min}^{n,p}}{1 + (N/N_i^{n,p})^{B_{n,p}}} \right) \quad (5.10)$$

$\Gamma_{n,p}$:	電子生成確率の増加分
E_t	:	トラップレベル
E_i	:	真性フェルミレベル
δE_t	:	$E_t - E_i$
残りの変数	:	モデルパラメータ (全て標準値を採用した [18][19])

5.4 Auger モデル

高濃度にドーパされたシリコン基板におけるキャリアの再結合過程として Auger 過程 [28] という物がある。この過程には (1) 伝導電子が価電子帯の正孔と再結合して発生するエネルギーを伝導帯中の他の電子に与えて高エネルギーの電子を生ずるプロセス、(2) 再結合エネルギーを軽い価電子帯の電子に与えて重い電子に励起するプロセス、そして (3) 再結合エネルギーをスピン軌道分裂帯の電子に与えてその電子を価電子帯に励起するプロセスの 3 つが存在する。これら過程から分かるように基本的には Auger モデルは Impact Ionization モデルの逆過程と言え、Auger モデルによる再結合項 U_{AUG} は式 (5.11) のように書き表される。

$$U_{AUG} = (n_i^2 - pn)(c_n n + c_p p) \quad (5.11)$$

n_i	:	真性キャリア濃度
n, p	:	電子/ホール濃度
残りの変数	:	モデルパラメータ (全て標準値を採用した [18][19])

第6章 定常解析

定常解析では次の3点について報告する。

1. CV 特性 (階段接合型 pn 接合ダイオードにおける CV 特性を手計算と ENEXSS で比較、オリジナルプロファイルの CV 特性を計算)
2. IV 特性 (オリジナルプロファイルの IV 特性と降伏電圧を調査)
3. 温度依存性 (CV 特性, IV 特性, 飽和電流, 降伏電圧)

6.1 CV 特性

pn 接合ダイオードの基本特性の一つに CV 特性と言われるものがある。pn 接合ダイオードは逆バイアスを加える事で、キャリア濃度の低い半導体側に空乏層領域が主に広がり一種のコンデンサーを構成する。この pn 接合ダイオードの端子間容量 C の印加電圧 V に対する変化を CV 特性と呼ぶ。そのためこの CV 特性は pn 接合ダイオードを特徴づける一つの指標となる。

まず ENEXSS のシミュレーションと手計算による CV 特性の結果が一致するかを確認する。そのため単純な階段接合型の pn 接合ダイオードの端子間容量について ENEXSS と手計算を温度 300K の環境下において比較する。手計算による端子間容量 C は空乏層の厚さ W_{dep} と内部電位 ϕ_{bi} から導出する事ができる。それらは階段接合の場合はそれぞれ式 6.1, 6.2, 6.3 のように表す事ができる。今回使用した各パラメータの数値は表 6.1 に記した。

$$C = \frac{\epsilon_{Si}}{W_{dep}} \quad (6.1)$$

$$W_{dep} = \sqrt{\frac{2\epsilon_{Si}(N_d + N_a)(\phi_{bi} - V)}{q N_d N_a}} \quad (6.2)$$

$$\phi_{bi} = \frac{k_B T}{q} \ln \frac{N_d N_a}{n_i^2} \quad (6.3)$$

Si の真性キャリア濃度 [1/cm ³]@300[K]	$n_i \sim 1.45 \times 10^{10}$
ドーパント濃度 [1/cm ³]	$N_d = 1.0 \times 10^{15}, N_a = 1.0 \times 10^{18}$
Boltzmann 定数 [eV/K]	$k_B = 8.6171 \times 10^{-5}$
素電荷量 [C]	$q = 1.6 \times 10^{-19}$
Si の誘電率 [F/cm]	$\epsilon_{Si} = 11.7\epsilon_0 [F/cm], \epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-14}$

表 6.1: 端子間容量導出に伴う各係数値

階段接合型の pn 接合ダイオードは光電面の面積 $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$ となるように設計し、プロファイルは図 6.1 のように n 型半導体はリン [P] をドナーとして濃度 $N_d = 1.0 \times 10^{15} [\text{cm}^{-3}]$ で厚さ $8\mu\text{m}$ 、p 型半導体はボロン [B] をアクセプタンスとして濃度 $N_a = 1.0 \times 10^{18} [\text{cm}^{-3}]$ で厚さ $2\mu\text{m}$ という設計を行った。ENEXSS ではこの階段接合型の pn 接合ダイオードに逆バイアスを加え、その電圧を微小変化 δV させた際に変化する

電荷量 δQ を調べる事で $C = \delta Q / \delta V$ の関係式から端子間容量を導出している。このような手法により導出した ENEXSS の端子間容量と手計算による端子間容量を図 6.2 で比較した。

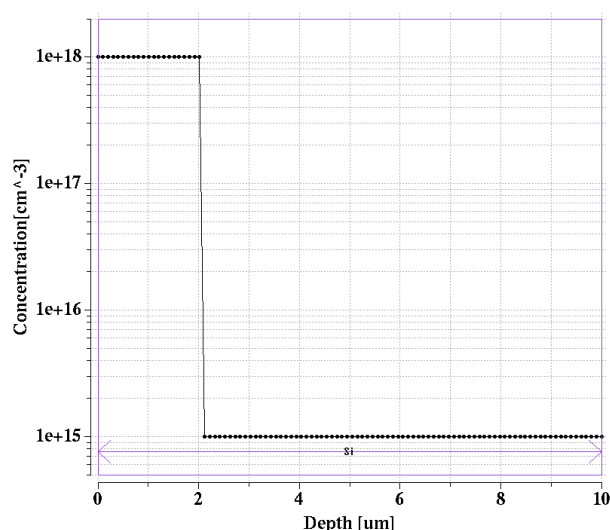


図 6.1: 階段接合型の pn 接合ダイオードのプロファイル

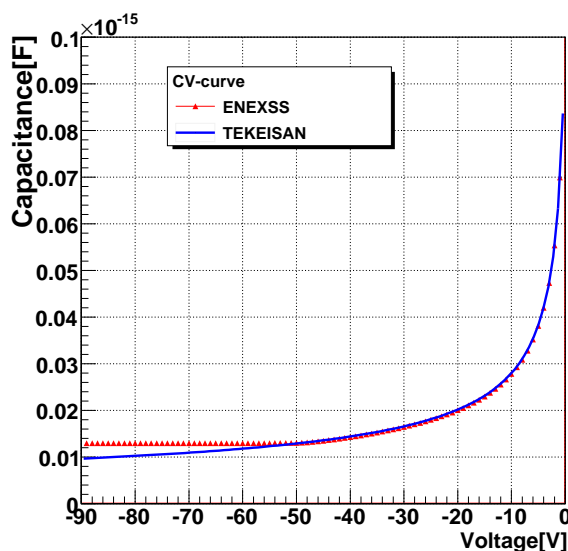


図 6.2: 階段接合型の pn 接合ダイオードの CV 特性における ENEXSS と手計算の比較

図 6.2 の $V \leq 50[V]$ において ENEXSS の端子間容量が手計算の物よりも全体的に僅かに低いのは、手計算による式が空乏層内部でのキャリア生成を考慮していないためである。また電圧が $V \sim 50[V]$ においては ENEXSS の端子間容量が手計算の値から乖離し、一定の値を取っている。これは ENEXSS ではデバイスに有限の厚さが存在し、空乏層の稼働領域に限りがあるためである。事実 $V = 50[V]$ 時の空乏層の厚さは手計算から $W_{dep} = 8.17[\mu m]$ となっており、空乏層厚さのほとんどが小数キャリア側に広がる事を考慮すると今回のプロファイルの場合では $8\mu m$ 積層した n 型半導体の方に空乏層が広がりきっている事が分かる。以上の事より、単純な階段型 pn 接合ダイオードにおいて ENEXSS による端子間容量の値と手計算が十分一致したことが確認された。以下では ENEXSS の端子間容量の計算は信頼に値すると考えた上で、より複雑なオリジナルプロファイルの端子間容量を計算する。

オリジナルプロファイルである pn 接合ダイオードは光電面サイズ $1\mu m \times 1\mu m$ として端子間容量を 1 次元および 2 次元解析により計算した。従って今回は深さ方向以外はもともと一様分布であるため 1 次元と 2 次元の解析で結果が基本的には異なる事はない。事実 1 次元解析による CV 特性と 2 次元解析による CV 特性である図 6.3 はそれを裏付ける結果となっている。詳細な値としても 1 ~ 2% 以内の違いで収まっている事が見て取れる。この事から次元が違う解析においても特性を見極める事のできる程度の精度で一致していることが確認された。

次にこのオリジナルプロファイルの CV 特性の結果について詳しく見ていく。オリジナルプロファイルは階段状のドーパント分布ではないため、単純に式 6.1 から単純に端子間容量を求める事はできない。特に $V \leq 10V$ では空乏層が $1.0\mu m$ 以下であり、不純物濃度分布の勾配が激しい領域であり、CV 特性の傾向を読み解く事は非常に難しい。しかし今回設計したオリジナルプロファイルの降伏電圧付近での端子間容量は、実際の MPCC の端子間容量 $3.5 \times 10^{-17} F / \mu m^2$ (表 2.2 参照) に非常に近い値を持っており信頼できると言える。また図 6.4 より、印加電圧 $V \approx -10V$ 付近で小数キャリア側の不純物濃度分布が一定となり始める深さ $1.2\mu m$ に空乏層が達する事が分かる。この不純物濃度分布が一定となり始めるあたりから式 6.1 で予想されるような $C \propto 1/\sqrt{V}$ の電圧依存性をオリジナルプロファイルにおいても確認することができた。さらに図 6.4 より、空乏層が少数キャリア側に大きく広がっている事実とともに、このオリジナルプロファイルにおいては降伏電圧に達しても空乏層はまだ広がり続けていることが読み取れる。

また降伏電圧以上 ($V \geq 62V$) においては無視できない程度の電流が流れるため、電流を流しているキャリアの濃度分布に依存する「拡散容量」と呼ばれる成分が端子間容量に関わり CV 特性はより複雑さを増す。シミュレーションでは電流値が5桁急激に上昇する降伏電圧の地点で端子間容量が単調減少から単調増加へと移行している事が判明した。しかしその効果は端子間容量を2~3%押し上げる程度で収まっており、このオリジナルプロファイルは降伏電圧付近において端子間容量はほぼ一定と言える。

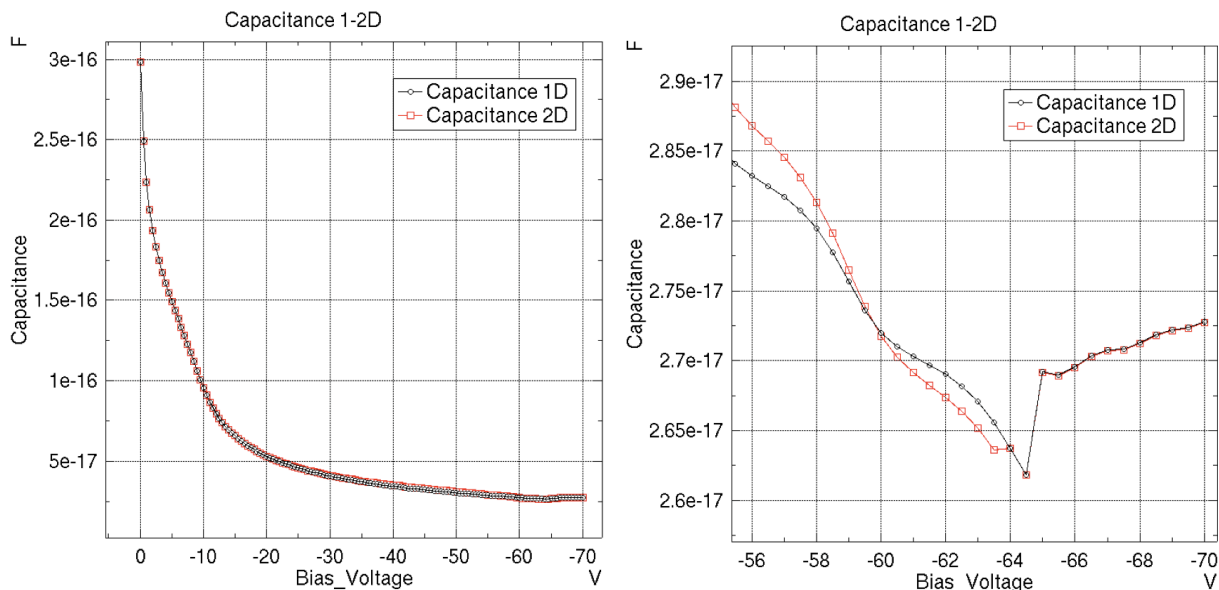


図 6.3: オリジナルプロファイルの CV 特性の 1次元解析と 2次元解析の比較 (左) とその拡大図 (右)

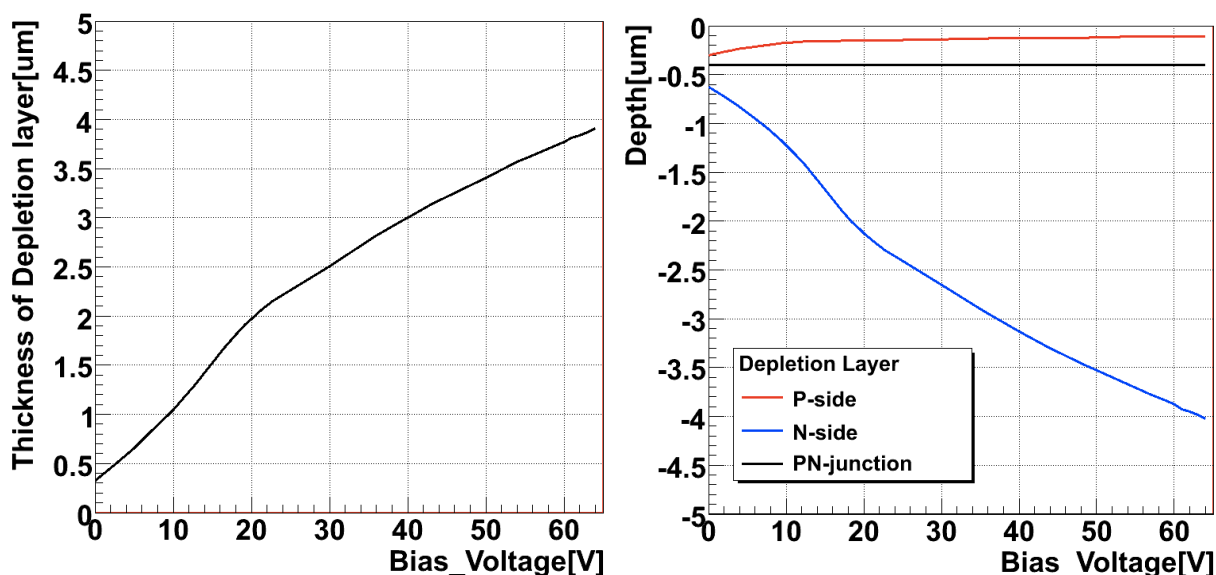


図 6.4: オリジナルプロファイルにおける空乏層の厚さ (左) および空乏層領域の電圧依存性 (右)

6.2 IV 特性

次にダイオードの最も基本的な特性の一つである IV 特性について計算を行なった。オリジナルプロファイルにおける IV 特性を計算した結果が図 6.5 である。この図では Impact Ionization (II) モデルを採用した場合とそうでない場合を比較した。Impact Ionization モデルを組み込んだ側の IV 特性は $V \approx 60V$ 付近から急激な電流の上昇が確認できる。これは降伏電圧がこの電圧付近に存在している事を示唆しており、次章

に述べる過渡解析ではこの降伏電圧付近と予想される電圧のあたりを集中的に内部の物理量の時間変化を調査して行く。

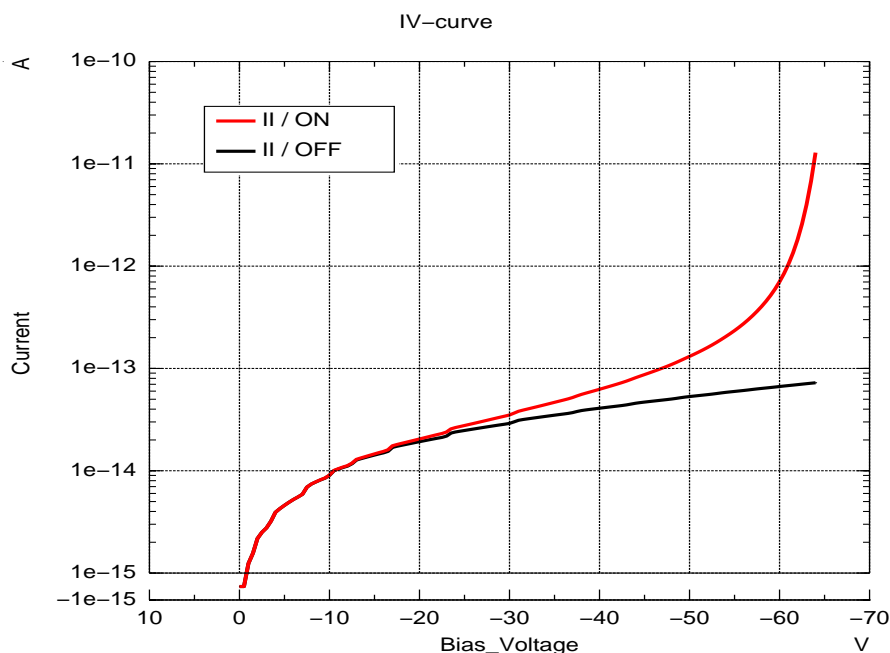


図 6.5: オリジナルプロファイルの IV 特性

6.3 温度依存性

ここまで常温である 300K で計算を行ってきた。そこで次に CV 特性と IV 特性が温度に対してどのように振舞うのかを計算した。採用したモデルは、Impact Ionization モデル、Shockley-Read-Hall モデル (TAT モデル)、Auger モデルである。一般的に低温中で顕著となるトンネリングモデルを採用していないのは、空乏層の厚さ $W_{dep} \leq 10\text{ns}$ 、電界 $E \geq 10^8\text{V/m}$ 程度の時であるとされるため今回はその条件に該当しない事、またその効果が現れ始めるのは今回計算する温度領域よりも十分低いところ [10] という事で除外した。

6.3.1 IV 特性と降伏電圧の温度依存性

まずオリジナルプロファイルの IV 特性の温度依存性を温度 290K~ 360K の範囲で計算した。図 6.6 は $T = 290\text{K}$ (常温) と、そこから $\pm 30\text{K}$ である 320K および 260K の IV 特性をプロットした物である(その他の温度に関する IV 特性の図は省く)。降伏電圧に至る手前で微弱に流れている電流は「飽和電流」と言い n 型半導体側から p 型半導体側へ流れる電流である。この飽和電流は n 型半導体の領域で熱的に価電子帯に励起されるホールと、p 型半導体の領域で熱的に伝導帯に励起される電子に頼っている。この電流は、主にバンドギャップを超えて励起されるキャリアの数によって決まるため温度に強く依存する。そして Shockley Read Hall モデルで予想される過程に従い、これによるキャリア生成電流 I_s (飽和電流) は式 6.4 で与えられる。

$$I_s = eW_{dep} \times r_{thermal} = eW_{dep} \times \frac{n_i}{\tau_e} = \frac{eW_{dep}}{\tau_e} \times 2 \left(\frac{kT}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} (m_e m_h)^{3/4} \exp\left(-\frac{\phi_g}{2kT}\right) \quad (6.4)$$

τ_e : 自由電子の有効寿命
 ϕ_g : シリコンのバンドギャップ (1.12eV@300K)

実際にシミュレーションで得られた飽和電流の値を温度に対してプロットすると図 6.7 を得る。このプロットに対して式 6.4 で得た $I_s \propto (kT)^{3/2} \exp(\phi_g/2kT)$ でフィットすると非常に良い一致をしている事が分かる。

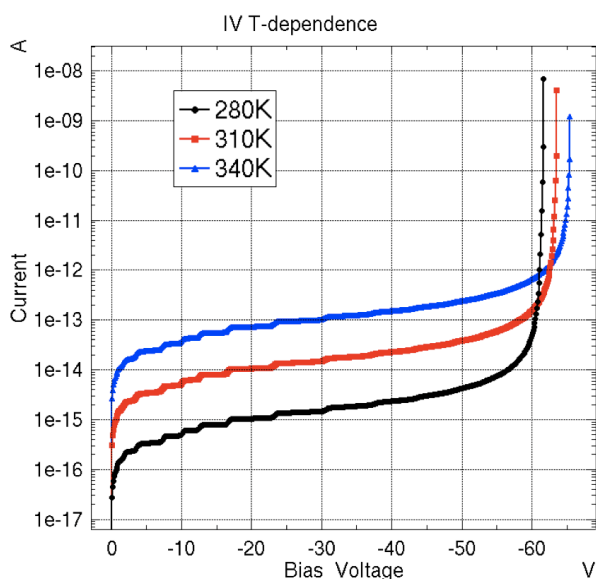


図 6.6: オリジナルプロファイルの IV 特性における温度依存性

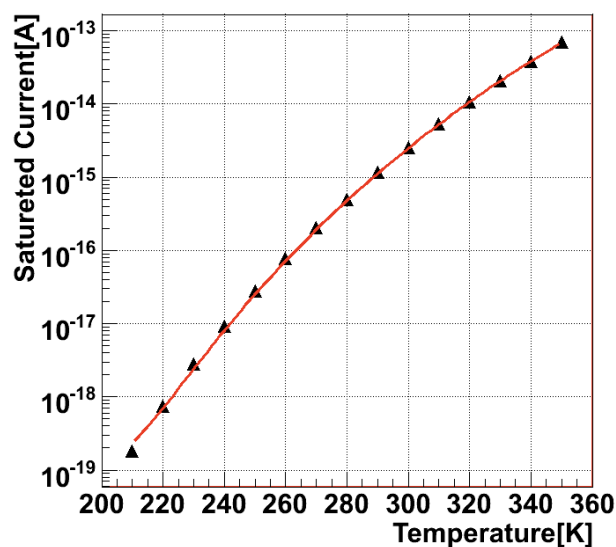


図 6.7: 飽和電流の温度依存性 (黒▲: $V = -10V$ の時の電流値、赤線はフィット [フィット関数に関しては本文参照])

また図 6.8 には降伏電圧の温度依存性をプロットした。ここでいう降伏電圧とは電流値 $I = 1.0 \times 10^{-10} A$ に達した時の印加電圧の値を指している。このグラフから降伏電圧の温度依存性が「正」である事がまず読み取れる。実在する PPD である MPPC の降伏電圧の温度依存性も図 6.9 のように「正」の温度依存性を示している。さらにそれぞれの温度依存性はシミュレーションにおいては $\sim 60mV/K$ であり、実際の MPPC においては $\sim 50mV/K$ という極めて良い一致をしている。従って ENEXSS の解析はアバランシェ増幅過程を含んだ解析において実際のデバイスに近いシミュレーションを行えていると言える。ちなみにこの降伏電圧の温度依存性が正であるのは、温度の増大に従って激しくなった格子振動がキャリアの移動度を押し下げ、アバランシェ増幅を起こしにくくしているためである。

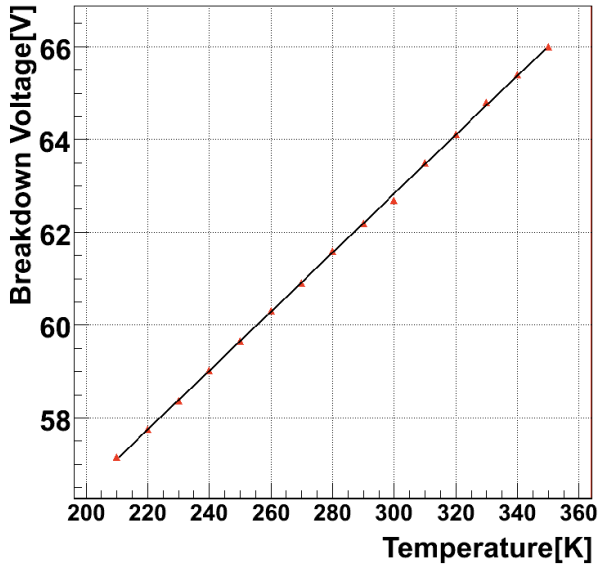


図 6.8: オリジナルプロファイルの降伏電圧における温度依存性 ($I = 1.0 \times 10^{-10}$ A に達した電圧を降伏電圧とした)

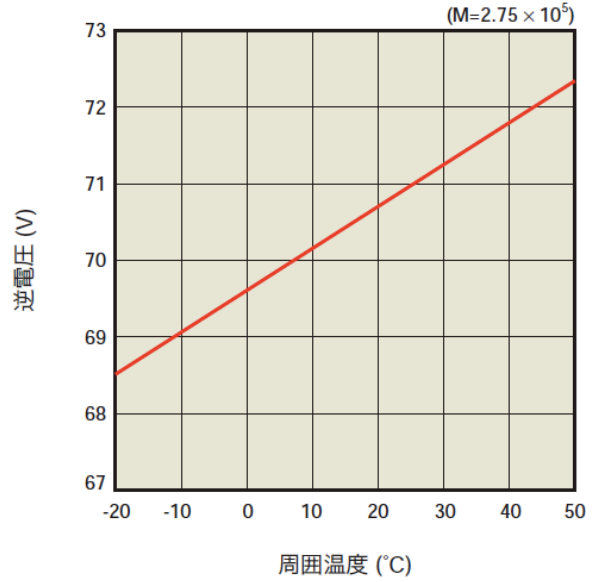


図 6.9: MPPC の降伏電圧における温度依存性 (浜松ホトニクス社データシートより)

6.3.2 CV 特性の温度依存性

次に CV 特性の温度依存性について IV 特性と同じく温度 290K~ 360K の範囲で計算した。CV 特性は温度依存性は式 6.3 を見て分かるように内部電場のみに影響を及ぼす。 $\Delta T = 120$ K 程度の温度変化による内部変化量は印加電圧 V に対して極めて小さく CV 特性はほとんど温度に依存しない。図 6.10 は CV 特性の温度依存性であるが、この計算結果も実際に降伏電圧に達するまで端子間容量に大きな温度依存性は見られない事が確認できる。拡大図の方で途中から突如として温度依存性を示すのは降伏電圧の値自体が温度依存性を持つ事ためであり、拡散電流の寄与が現れるためである。しかしその差は 0.016×10^{-17} F/K と比較的的低く、1K 上昇しても 0.1% 程度の変化に収まっており、CV 特性の温度依存性は比較的小さいものと言える。この結果は音野氏が修士論文 [9] でまとめた端子間容量の温度特性の結果と一致している。

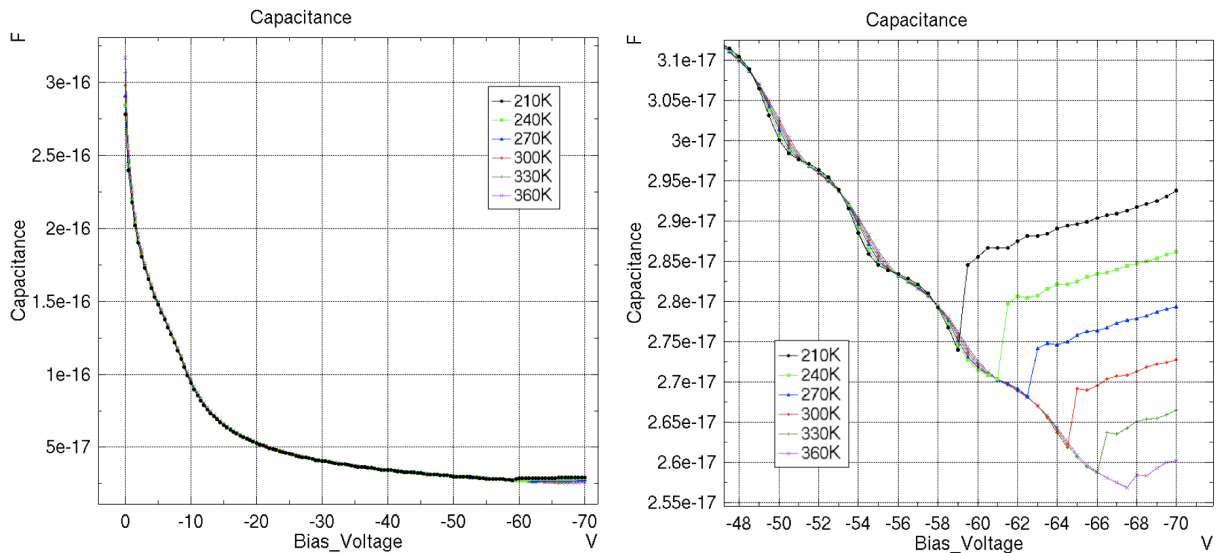


図 6.10: オリジナルプロファイルの CV 特性における温度依存性 (左) とその拡大図 (右)

6.4 定常解析の議論のまとめ

本章では *ENEXSS* の定常解析において以下のことが判明した。

1. 単純な階段接合型 pn 接合ダイオードにおける CV 特性において、手計算と *ENEXSS* の計算の結果が一致する事を確認した (図 6.2)。
2. オリジナルプロファイルにおいて 1 次元解析と 2 次元解析の一致、および降伏電圧付近において端子間容量は 2 ~ 3% の変化で収まっており比較的一定と言える (図 6.3)。
3. 印加電圧に応じて空乏層が不純物濃度の低い側に広がっており、降伏電圧付近でも空乏層は飽和していない (図 6.4)。
4. オリジナルプロファイルの IV 特性に見られる急激な電流値の上昇は Impact Ionization によるものであることが確認された (図 6.5)。
5. 飽和電流 I_s の温度依存性が熱励起モデルから予想される $I_s \propto (kT)^{3/2} \exp(\phi_g/2kT)$ に従っている事を確認した (図 6.7)。
6. 降伏電圧の温度依存性は実際の PPD である MPPC の値に近い結果を得ることができた (図 6.8 と図 6.9)。
7. CV 特性の温度依存性は 1K で 0.1% と非常に小さいものであり端子間容量が温度依存しないことを確認した (図 6.10)。

これらの事から *ENEXSS* の定常解析において次のことが言える。

- *ENEXSS* は Impact Ionization モデル、Shockley-Read-Hall モデル、Auger モデルを採用時の CV 特性、IV 特性、およびこれらの温度特性について十分な計算が可能である。
- 1 次元解析と 2 次元解析ではほぼ同様の結果を得ており、この事から必要に応じて解析手段を選び開発速度を早める事が可能である。

第7章 過渡解析

過渡解析では大きく分けて以下の事について報告をする。

1. アバランシェ増幅の時間変化 (*II* モデル採用/非採用の比較・APD/G-APD の比較)
2. 内部物理量の時間変化 (Impact Ionization 値の時間変化)
3. クエンチング抵抗によるクエンチング効果 (*ENEXSS* が抱えるバグによる定常電流の問題)
4. 最大電流値および時定数の電圧依存性 (過渡解析時の *IV* カーブ)
5. オリジナルプロファイルと MPPC の波形の比較
6. 生成ペア数による諸特性の変化
7. 熱励起レートの場所依存性と温度依存性

7.1 過渡解析の手順

過渡解析はオリジナルプロファイルに関してのみ行なった。また特に断りがない限り定常解析と同様に Impact Ionization モデル、Shockley-Read-Hall モデル (TAT モデル)、Auger モデルを採用し、一部を除いて全て常温中 (300K) で計算を行なった。*ENEXSS* の過渡解析は定常解析の *IV* 特性などの結果を利用して過渡計算を行なうという手法である。従って過渡解析の原点時間 t_0 から指定した一定の外部電圧 (V_{op}) を印加する事ができる。本研究ではこの外部電圧を pn 接合ダイオードとクエンチング抵抗をセットとした 1 ピクセルの PPD (以下では「1-PPD」と呼ぶ) の両電極に印可している (図 7.1)。また本来ならばこのクエンチング抵抗は実在する PPD で使用されるポリシリコン抵抗などを特定の種類の物質で構造を持たせて pn 接合ダイオードに付加するべきなのだが、今回はその前段階としてクエンチング抵抗は外部回路として取り付ける事とした。

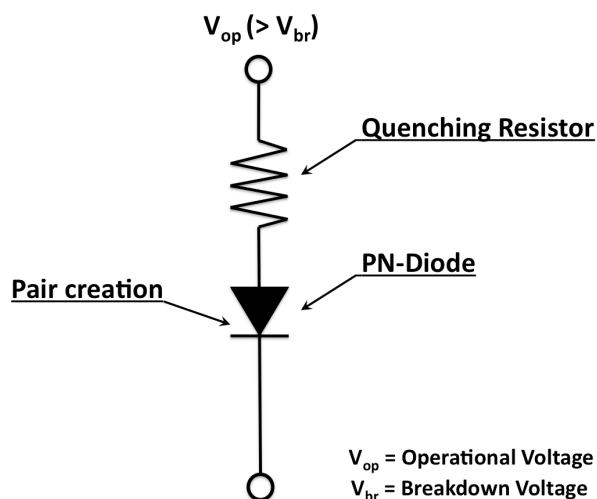


図 7.1: 過渡解析で用いたセットアップの概念図

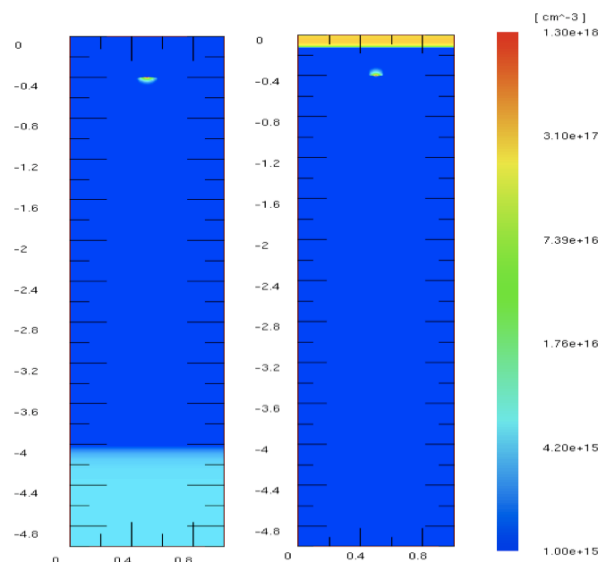


図 7.2: 電子・ホールペアを時刻 $t = 10^{-11}\text{s}$, 深さ $= -0.4\mu\text{m}$ に生成 [電子 (左)、ホール (右) の密度分布]

7.1.1 電子・ホールペアの生成

過渡解析で最も重要となるのが PPD の出力パルスの時間変化である。しかしこの出力である信号は単純に 1-PPD(pn 接合ダイオードにクエンチング抵抗を付加したもの)に電圧をかけただけではシミュレーション中では発生しない。そのため信号の種となる物を ENEXSS 中で擬似的に作り出す必要がある。そこで過渡解析では電極に一定電圧をかけた後、しばらく後に pn 接合ダイオード内で電子・ホール 1 ペアを生成させている。これは ENEXSS が LSI やトランジスタの故障原因を解析するために、デバイスの指定した場所に指定した量の電荷を指定した時間分布で発生させるという機能を利用している。この機能により局所的な領域 (5nm×5nm×5nm の立方体) 中に、1 電子・ホールペア分の電荷に相当する量を過渡解析開始から $t = 10\text{ps}$ で生成する事でアバランシェの種を疑似的に作り出す事ができる。図 7.2 は光電面から深さ $0.4\mu\text{m}$ の地点に存在する pn 接合面に電子・ホールペアを生成させた時の様子を電子とホールの密度分布から確認した。この図から指定した時刻に電荷が指定した場所に生成されている事が分かる。本研究では特に断りが無い限り、デフォルトで電子・ホールペアは pn 接合面で生成させているものとする。

7.1.2 各種パラメータの値

本研究の過渡解析では、オリジナルプロファイルを用いて主に波形の時間変化および各種物理量の電圧依存性を計算した。この時使用したオリジナルプロファイルの変数のデフォルト値は表 7.1.2 とし特に断りが無い限り、このデフォルト値を採用する。

変数	デフォルト値
ピクセルサイズ	$1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$
抵抗値 [Ω]	$35 \times 10^6 @ 300\text{K}$
電子・ホールペア数	1 pair @ $t = 10\text{ps}$
電子・ホールペア生成場所	pn 接合面 : 深さ $0.4\mu\text{m}$
印加電圧 [Ω]	0V ~ -64.0V
過渡解析時間 [μs]	1.0
採用モデル	<i>Impact Ionization, Shockley Read Hall(TAT), Auger</i>
周辺温度 [K]	300

表 7.1: 過渡解析に使用した基本的なオリジナルプロファイルの各種パラメータ (デフォルト値)

7.2 アバランシェ増幅の時間変化

7.2.1 Impact Ionization モデルの効果

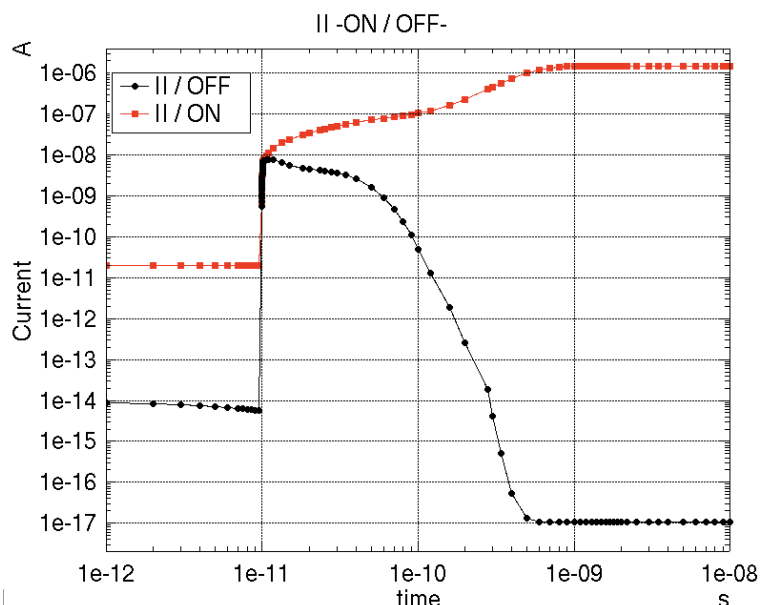


図 7.3: アバランシェ増幅の時間変化 (印加電圧 63.5V における II モデルの ON/OFF の比較)[横軸：時間ログスケール、縦軸：電流ログスケール]

まず最初に 1-PPD の抵抗値を $0[\Omega]$ とした 1-PPD の場合において、抵抗値以外をデフォルト値として採用した場合に電流が時間的にどう変化するかを計算した。図 7.3 は同一電圧下における電流の時間変化の様子を Impact Ionization モデル (以後、「II モデル」と呼ぶことにする) を採用した場合としてない場合と比較している。この図から II モデル採用の場合は非採用に比べ、ペアが生成された直後から急激な電流の増幅が見られる。これは II モデルを採用した事によりアバランシェ増幅が引き起こされ急激な増幅が起こっていることを示唆している結果と言える。この増倍過程には $V = 63.0V$ において $0.7 \sim 0.9ns$ 程度の時間を必要としている事が分かる。また II モデルを採用していない場合は増倍機構を備えていないため電流の時間積分は生成させた電荷量にほぼ一致している。ちなみにこのような II モデルを採用した際の時間後方の $I \sim 1\mu A$ 程度の定常電流は、アバランシェ増幅をクエンチするためのクエンチング抵抗を解析では付加していないためである。

7.2.2 APD と G-APD の比較

次に APD と G-APD に対応する電圧下での電流の時間変化を比較した。図 7.4 は II モデルを採用し降伏電圧と予想される電圧の前後の電流の時間変化の様子である。この降伏電圧前後の比較は単純に一般的な動作電圧下の APD とクエンチング抵抗を付加していない G-APD を比較した事となる。この図を見て分かる通り印加電圧に対して $\sim 1\%$ 程度の差である $\sim 0.5V$ の違いで波形の増倍傾向の大きな違いが確認される。これはアバランシェ増幅が印加電圧に非常に敏感であることを意味しており、この事は定常解析で計算した IV 特性の降伏電圧付近での急激な電流の上昇と一致している。ちなみに前節の Impact Ionization モデルの効果と同様に G-APD の波形が時間が経過しても収束していないのはクエンチング機構を設けていないためであり、この場合は印加電圧に応じた定常電流が流れる事となる。

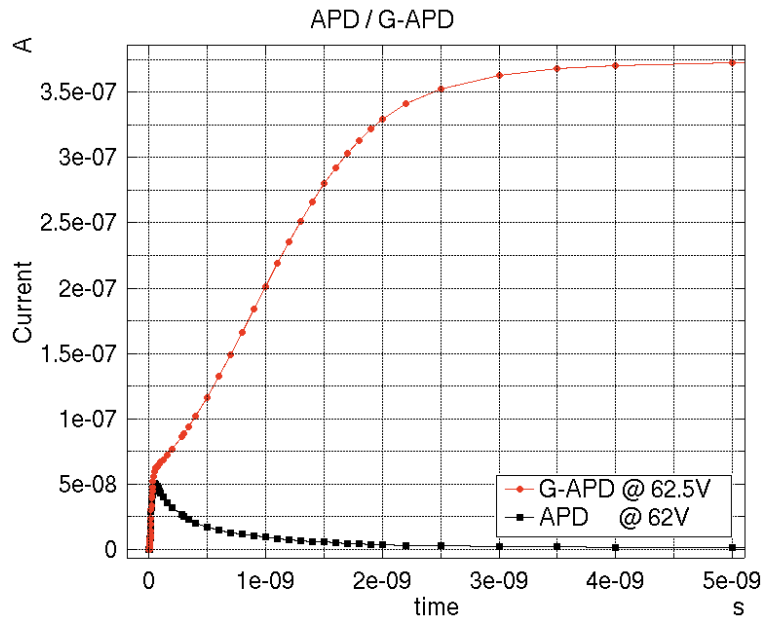


図 7.4: APD と G-APD の増倍の時間変化の比較 [V=62V - 62.5V の比較]

7.2.3 アバランシェ増幅中の内部物理量の時間変化

図 7.3 と 7.4 を見て分かるようにオリジナルプロファイルはガイガーモード領域に達すると考えられる電圧で大きな増倍率を確かに得ることができている。このアバランシェ増幅は Impact Ionization により引き起こされるわけであるが、この PPD 内部での Impact Ionization の時間変化を ENEXSS は衝突電離による生成されるキャリア量として観察することが可能である。この生成レート (以後、II レートと呼ぶことにする) は単位が $[s^{-1}cm^{-3}]$ であり、1 秒間に 1 立方センチメートルあたりいくつ II モデルによりペアが生成されたかを表している。その変化の様子を時間的に表した図 7.5 であり、電子ホールペアを生成した 10ps あたりから急激に II レートの数値が上昇し最終的に空乏層内全体に広がっている事がはっきりと確認できる。変化の時間間隔も $\sim 1ps$ という非常に速い速度で II レートの数値が電子・ホールペアを生成した周辺に急激に広がっている様子が確認できる。このセットアップでは印加電圧の向きから深度方向が浅い方向に電気力線が向いているため電子はより深度の深い方へと進む。ホールはその逆に深度の浅い側、つまり光電面側へと拡散して行く。電子とホールの拡散はシリコン中のドリフト速度が速い電子の方が素早く広がっていく事が予想され、実際にこの図を見て分かるように II レートは深度の深い側へ進む方が拡散が速い。また II レートは時間が経つに連れて増倍層といわれる電場の非常に強い領域に一樣に分布する。さらに時刻 $t = 1\mu s$ に至っても II レートの値が衰えることはなく、これは図 7.3 と図 7.4 に見られる定常電流の起源と言える。この状態のままでは実際のデバイスとして使用する事はできないため、第 7.3 節で報告するように外部抵抗による電圧降下を利用して、この定常電流を収束に向かわせる。

また図 7.6 と図 7.7 は、II レートと同様の条件下で計算した各点における電子とホールの電流密度の時間発展である。電子・ホールペアを生成させた深度方向 $0.4\mu m$ を境界として電子とホールは全体的にそれぞれ逆方向にドリフトしている様子が見て取れる。ここで注目すべきは、電子ならば深度方向が $0.4\mu m$ よりも浅い領域、ホールならば $0.4\mu m$ よりも深い領域で僅かながら分布を持つことである。これらの領域について電子の電流密度である図 7.6 を例にとって説明すると、深度方向 $0.4\mu m$ より浅い領域の電子の電流密度分布は衝突電離により生成されたホールが電子とは逆方向にドリフトし、衝突電離によって電子を生成したものであると考えられる。逆にホールの電流密度分布である図 7.7 の深度方向 $0.4\mu m$ より深い領域は電子が衝突電離により生成したホールの密度である。これはまさに図 2.7 の G-APD の増倍過程の様子が pn 接合面付近の電場が強い領域で起こっていることを示していると言える。またこの 2 つ分布を比較すると電子による衝突電離の方が盛んに行われている事までが見て取れる。このように ENEXSS は内部物理量の時間変化を測定不可能な時間スケールで調査することが可能である。

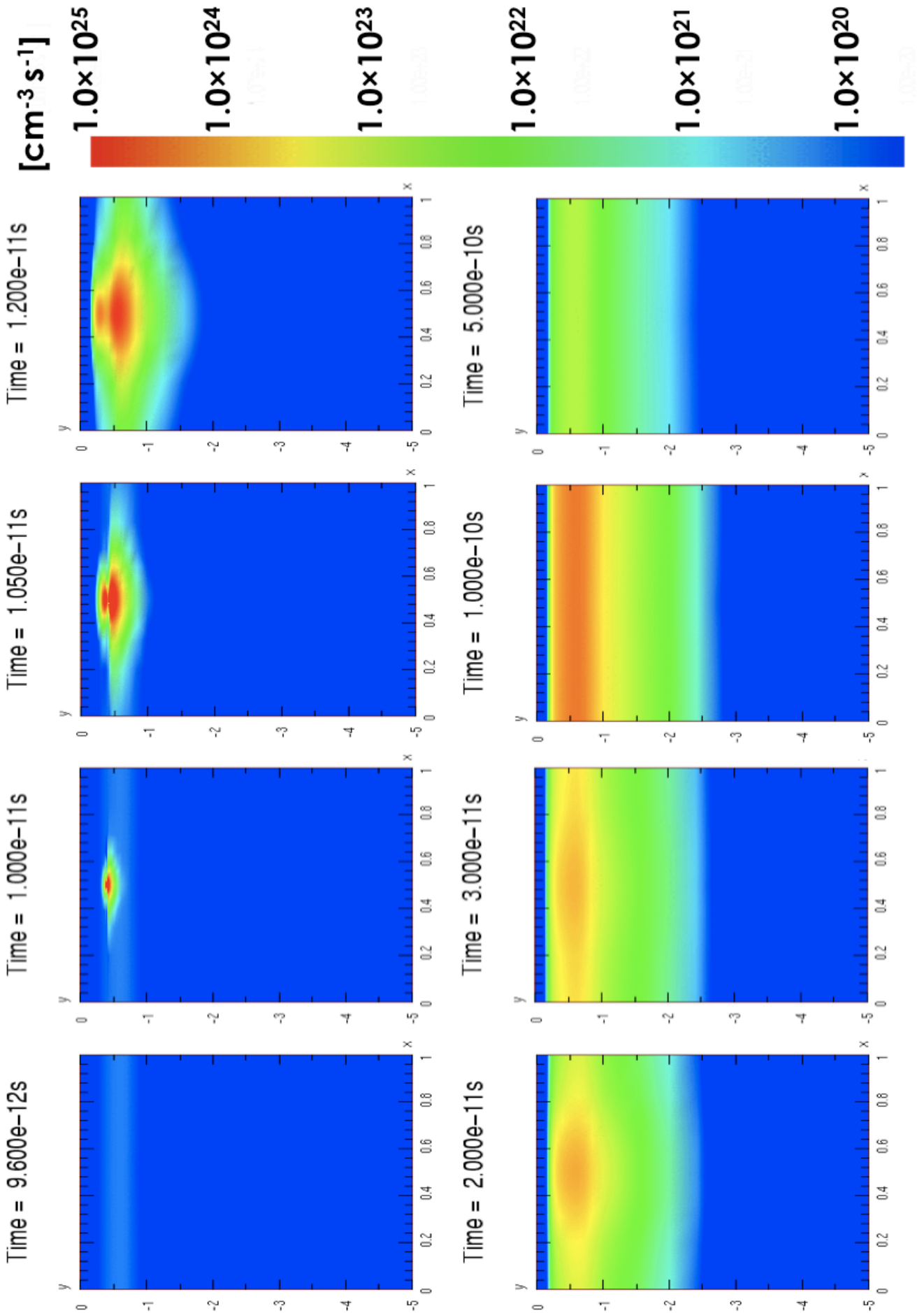


図7.5: インパクトイオン化現象の時間変化(縦軸:深度方向、横軸:光電面水平方向、カラー:Impact Ionization rate、時刻 10ps で電子・ホールペア生成)

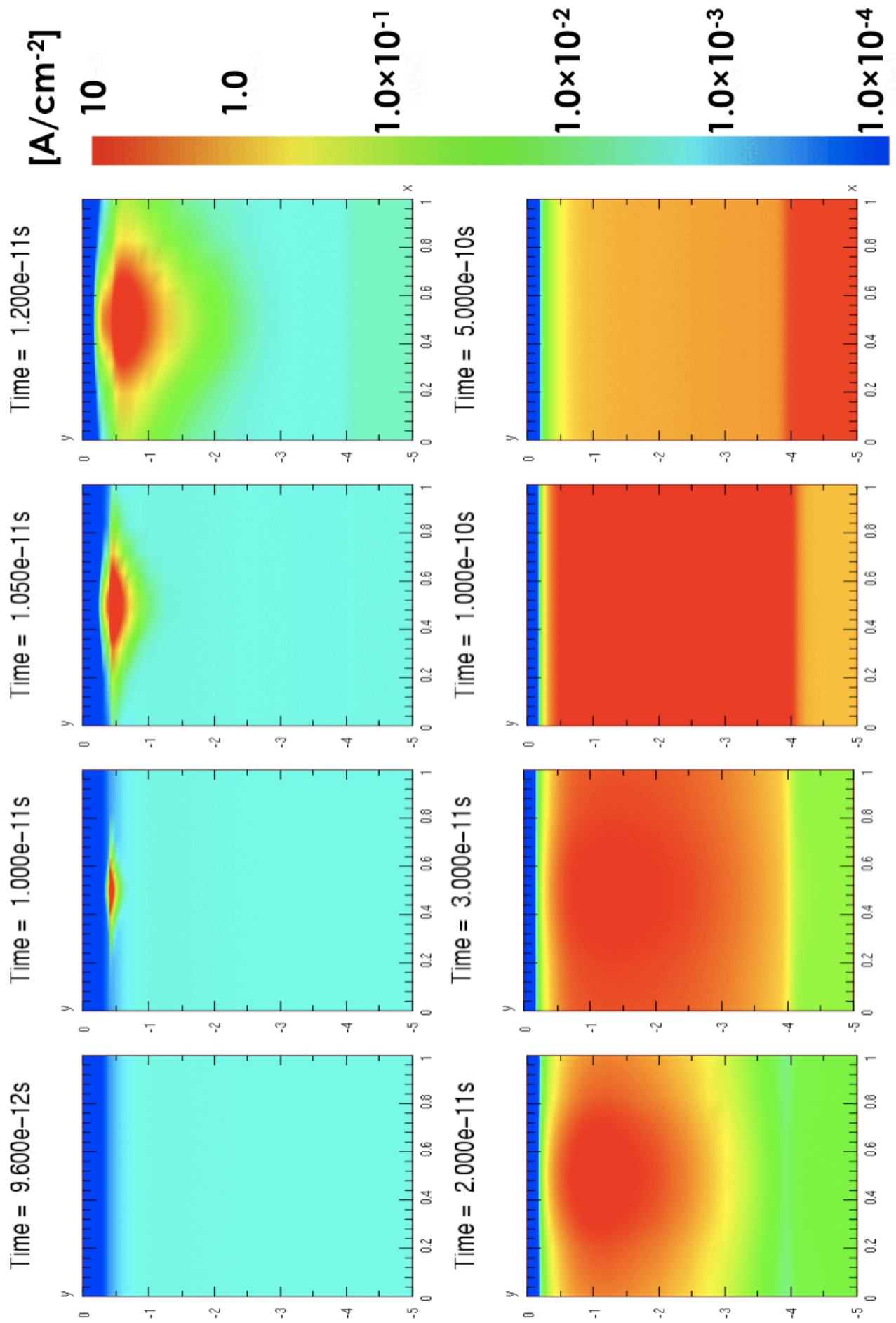


図 7.6: 電子の電流密度の時間変化

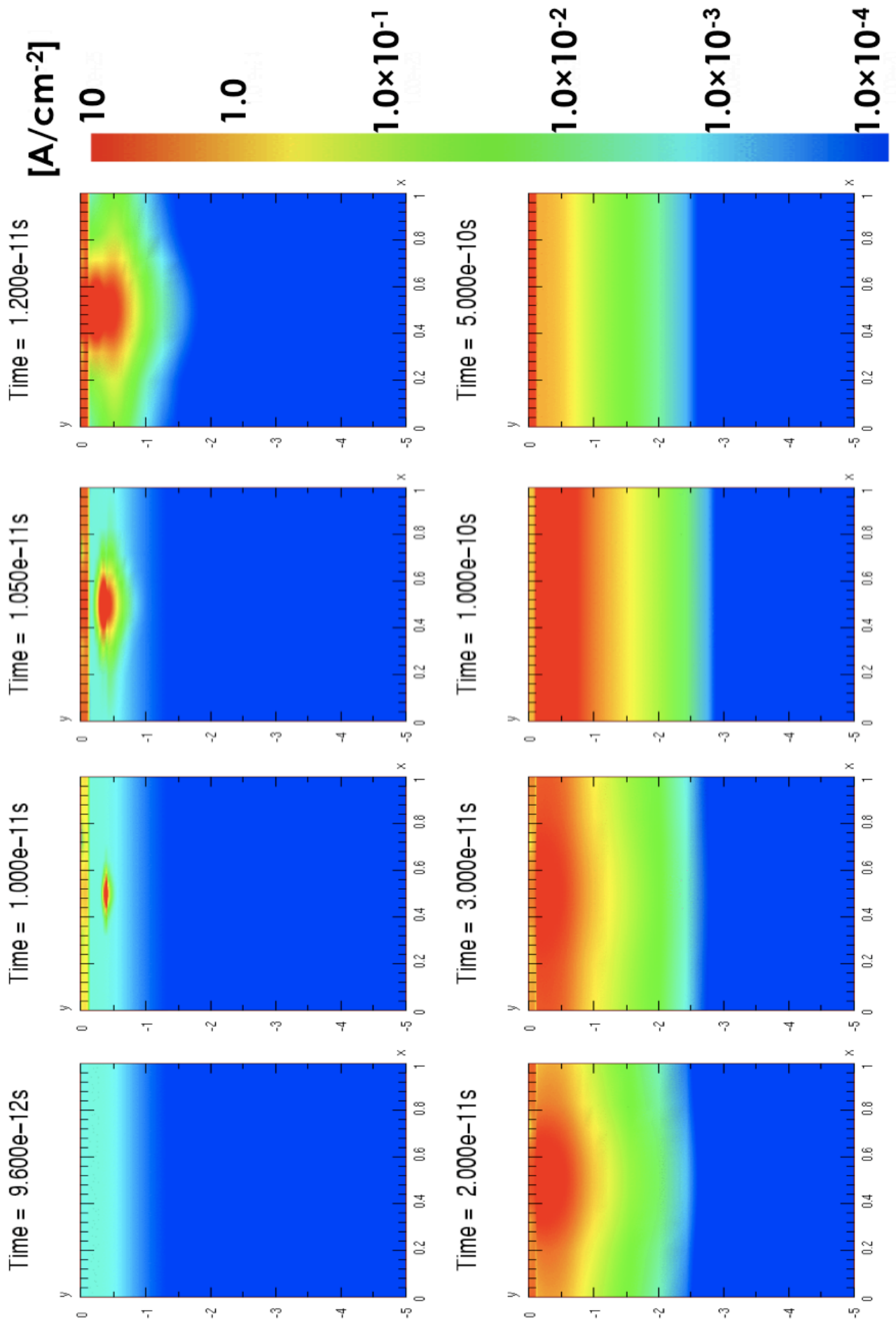


図 7.7: ホールの電流密度の時間変化

7.3 ケンチング抵抗による効果

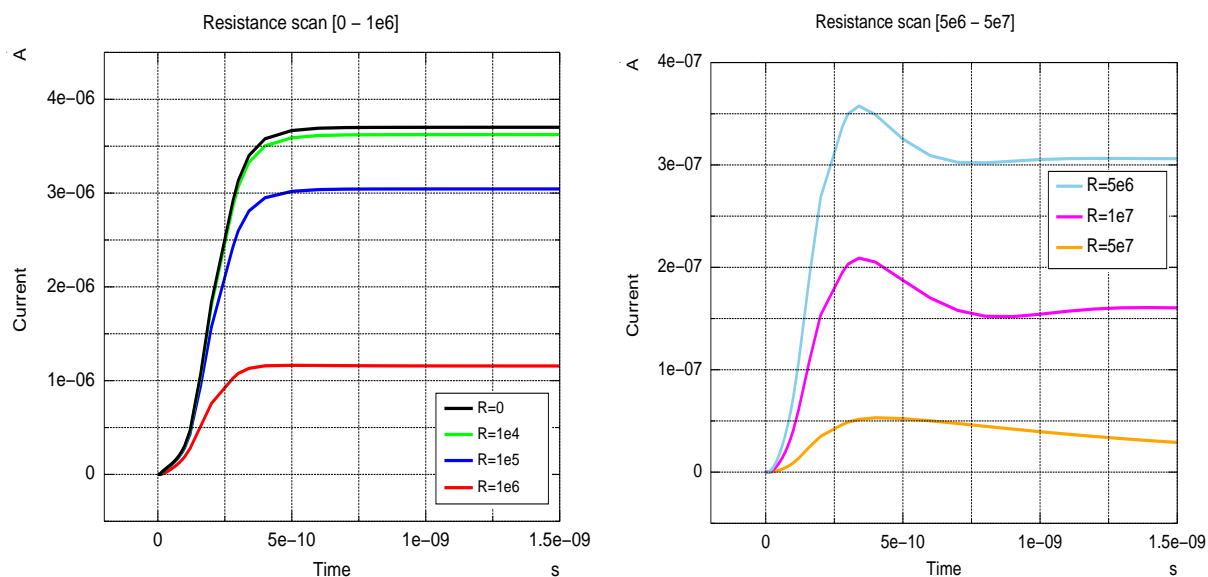


図 7.8: 各抵抗値における波形の時間変化 ($V = 64V$)

前節 7.2 はケンチング機構を設けていなかったため、アバランシェ増幅は収束することなく過剰な電流が流れ続けた。この節ではケンチング抵抗を外部に取り付けることで電流の収束を過渡解析で試みた。

現在、ケンチング抵抗の値の最適な値を求める手法と言うものは確立されていないため、まず抵抗別に波形の時間変化を調べた (7.8)。その結果、ケンチング抵抗が大きくなるに連れて定常電流値が収束に向かう傾向を見せた。一方で電子・ホールペアを生成させてから電流がピークに達する時刻が遅くれ、同時に電流値自体にも低下が見られた。pn 接合ダイオード内で電子・ホールペアを生成させると、それと同時に誘導電流が流れ始め基本的にはケンチング抵抗の大きさに比例した電圧降下を即座に起こす。これによりケンチング抵抗の値が大きい時は同じ電流量でも電圧降下が大きく、アバランシェ領域から抜け易くなるためと考えられる。その一方でより大きな抵抗の場合は電流が増幅するのに時間を必要とするため、十分な電圧降下を得るまでに時間がかかる。以上のような2つの要因から最終的に各抵抗値により波形の時間変化および印加電圧に対する変化はこのようになったものと推測される。

これ以後のシミュレーションは解析可能な電圧領域が広く、より大きくケンチング機構が機能する抵抗値 $R = 35 \times 10^6 [\Omega]$ に限定して詳しい解析を行っていくものとする。

7.4 ケンチング抵抗付加時の定常電流発生 of 課題

ここで第 7.3 節の図 7.8 の $1.0 \times 10^7 \sim 5.0 \times 10^7 [\Omega]$ の波形において、一時的に電流値が収束に向かうがその後の時間後方で定常電流が流れ始めている。これは ENEXSS が現在抱えている課題であることが判明している。これに関しては現在解決に向け調査を進めている。

この問題は本来ならば pn 接合ダイオード内で電子・ホールペアを発生させなくては波形の種となるものがないため電流は変化しないのだが、II モデルを採用した場合に限り時間とともに II レートの数値が微量ながら上昇蓄積するという問題によるものであることが分かっている。この蓄積が電子・ホールペアの代わりに波形を生み出す種となり $\sim 2ns$ 程度でアバランシェ増幅を起こしてしまう。現在の所、 $\sim 2ns$ 後のこの増加は本来の電子ホールペアを生成させた波形が電流がピークに達する時刻 $\sim 200ps$ では特に問題とはならない。しかしその後、ケンチングが正常に機能しない事と大きく関わっていると考えられるため、時間積分による事で増幅率を算出する事は信頼性に欠ける。また本来ケンチング抵抗を付加したセットアップ (図 7.1) は、pn 接合ダイオードを理想的なキャパシタと見立てれば直列の RC 回路であるため特定の時定数を持つはずである。しかしこれに関しても II レートの数値蓄積により引き起こされる定常電流の

問題により値が正しく評価出来ない。そのため现阶段では電流値が最大になる時刻程度までの各種物理量の値は信頼できるものとして利用し議論して行く。ただし II モデルを採用していない場合においては、この問題の影響はなく、全ての時間に関して信頼できる物理量を取得できる。(この問題が大きな課題であることに間違いはなく、当面は最重要課題に位置づけ解決を模索する必要がある。)

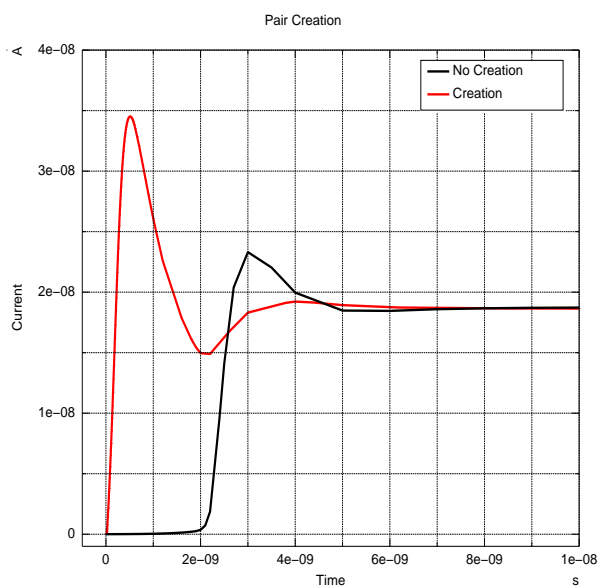


図 7.9: 電子・ホールペアを生成しなかった場合の波形の時間変化 (印加電圧 63V)

R=35[MΩ] の時の諸特性

この節ではクエンチング抵抗をデフォルト値である $R_q = 35 \times 10^6 [\Omega]$ に関して、より詳しく諸特性を調べていく。この抵抗値を採用したのは第 7.3 節で報告した通り印加電圧に対して広範囲にわたって調査することができ、かつクエンチング機構が他の抵抗値に比べて機能しているためである。

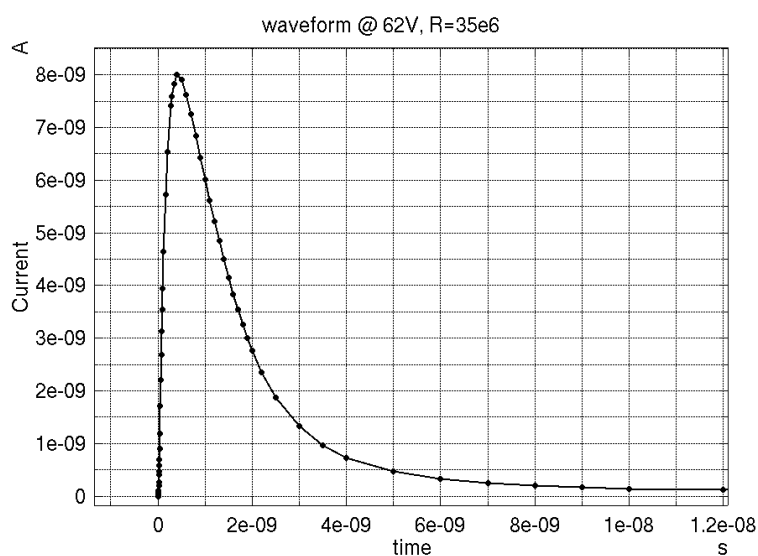


図 7.10: オリジナルプロファイルでクエンチング抵抗 $R = 35M\Omega$, $V = 62V$ の波形

R=35[MΩ] の時の時定数の電圧依存性

まずオリジナルプロファイルの電流の増倍過程は図 7.3 を見て分かる通り、500ps ~ 1ns 程度を必要としている。従って光電面サイズ $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$ の端子間容量 (降伏電圧付近) $C_{diode} \approx 2.6 \times 10^{-17}\text{F}$ とクエンチング抵抗 $R_q = 35 \times 10^6[\Omega]$ の場合、RC による時定数は $\tau = 0.91\text{ns}$ となるので増倍過程は今回シミュレートした PPD の時定数に比べて同程度となり、RC による時定数と波形の時定数の一致を確認する事はバグによる定常電流の問題がなくとも困難である。

そこでシミュレーションでは II モデル非採用の場合の時定数を計算した。II モデル非採用の場合はその波形の増倍は比較的小さく短時間 (~ 1ps) で増幅過程が終了するため $\tau = RC$ の時定数を得ることが期待される。実際にオリジナルプロファイルに関して II モデルを非採用の状態の時定数を調べたものが図 7.11 となる。結果は II モデル非採用の場合は降伏電圧付近で $\tau = RC \approx 0.9\text{ns}$ 程度の時定数を持っていることが確認できる。ちなみに降伏電圧手前まで時定数が単調減少しているのは pn 接合ダイオードの端子間容量が定常解析で説明した通り $C \propto 1/\sqrt{V}$ の電圧依存性を持つためである。実際、図 7.11 に関しても端子間容量 C を $1/\sqrt{V}$ で綺麗にフィットできている。

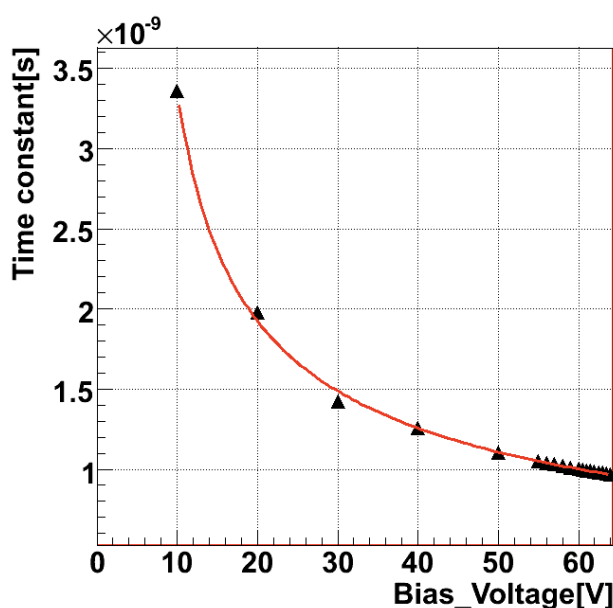


図 7.11: Impact Ionization の OFF 時の時定数の電圧依存性

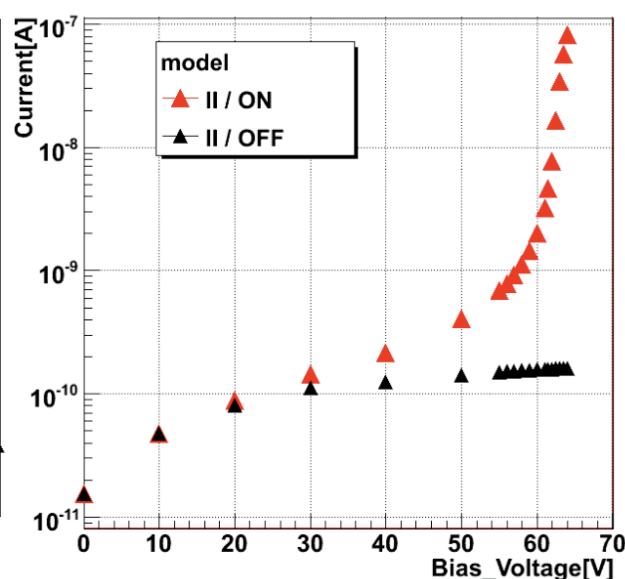


図 7.12: Impact Ionization の OFF 時の最大電流値の電圧依存性

R=35[MΩ] の時の最大電流値の電圧依存性

次に波形の最大電流値の電圧依存性について調べた。この解析に関しては II モデルを採用した場合とそうでない場合についての最大電流値の電圧依存性を比較した (図 7.12)。この図を見て分かる通り、II モデル非採用の場合は印加電圧を上げてても全く増倍しない事が読み取れる。一方で II モデル採用側の最大電流値の電圧依存性は指数関数的増倍をする領域と線形的増倍をする領域に別れている事が分かる。これは定常解析で得た IV 特性の結果と一致する。

また概算ではあるが、このオリジナルプロファイルに関して増倍率を計算してみる。今この光電面サイズ $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$ の RC より導かれる時定数は $\tau \sim 1\text{ns}$ とすると、印加電圧 $V = 63.5\text{V}$ (降伏電圧 $\Delta V \sim 1.5\text{V}$) 時の増倍率は最大電流値 (80nA) × 時定数 (1ns) で概算することができ増倍率は ~ 400 程度であることが分かる。ここで完全に同一プロファイルではないが実際の MPPC とオリジナルプロファイルの増倍率を同じ PPD の一例として比較した。実際に存在する PPD の一つである MPPC は最小光電面サイズが $25\mu\text{m} \times 25\mu\text{m}$ であり、オリジナルプロファイルのサイズの 625 倍のサイズとなる。増倍率は pn 接合ダイオードの端子間容量に比例するため光電面サイズが 625 倍ならば増倍率も 625 倍となり、基本的には光電面サイズに比例

した増倍率を得る事となる。従って増倍率は光電面サイズでスケールする事で様々な光電面サイズの増倍率を推測することが可能であり、例えばこのオリジナルプロファイルを $25\mu\text{m} \times 25\mu\text{m}$ のサイズまでスケールすると $\Delta V = 1.5\text{V}$ で $\text{Gain} \sim 2.5 \times 10^5$ となる。そして浜松ホトニクス社のピクセルサイズ $25\mu\text{m} \times 25\mu\text{m}$ の MPPC(S10362-11-25) の実測による Gain カurve (図 7.13) と比較すると、 $\Delta V = 1.5\text{V}$ 付近でおおよそ $\text{Gain} = 2.5 \times 10^5$ となっており比較的よい一致をしている事が伺える。そして増倍率が実際に存在する PPD のものに近い値を出している事は、今回使用しているオリジナルプロファイルのアバランシェ増幅が APD 領域でなく G-APD 領域のものといえる一つの根拠となりえる。

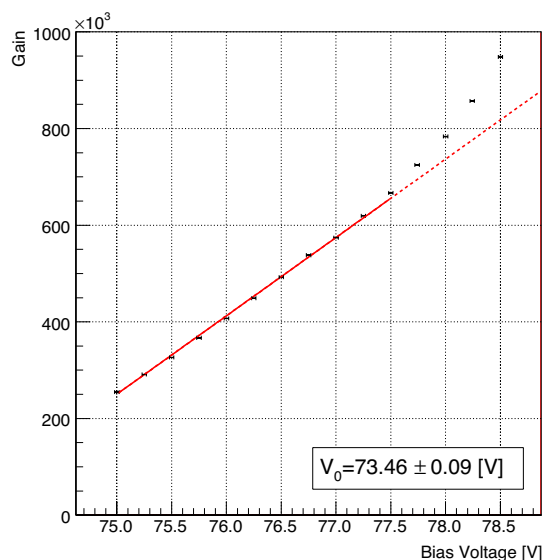


図 7.13: 実際の MPPC の増倍率の電圧依存性

オリジナルプロファイルと MPPC の波形の電圧依存性の比較

図 7.14 は浜松ホトニクス社製の PPD である MPPC (S10362-11-25) の波形の印加電圧依存性である。左の図は MPPC の各印加電圧下においてシングルフォトンレベルの出力波形を重ね描きした図である。この図を見ると分かるように印加電圧を上げることで最大電流値が上昇していることが分かる。そして右の図はこれらの波形を最大波高で規格化した時の図であるが、波形の形が印加電圧によらず一定に決まっている事が読み取れる。一方、オリジナルプロファイルについても同様の図を図 7.15 に載せた。この図からオリジナルプロファイルの波形が印加電圧に対して MPPC ほど相似性がないことが分かる。

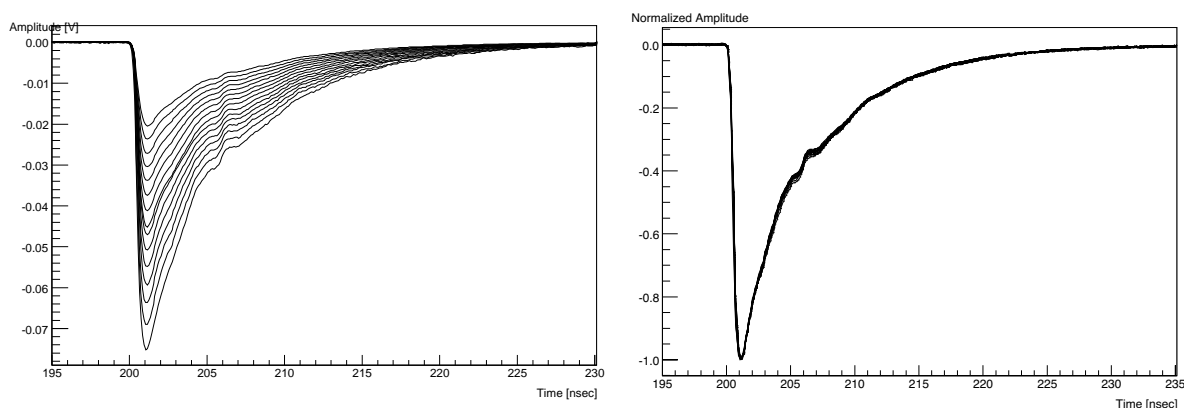


図 7.14: 降伏電圧付近の MPPC に対するシングルフォトンレベルの出力波形 (左) と各電圧の波高に対して規格化したもの (右)

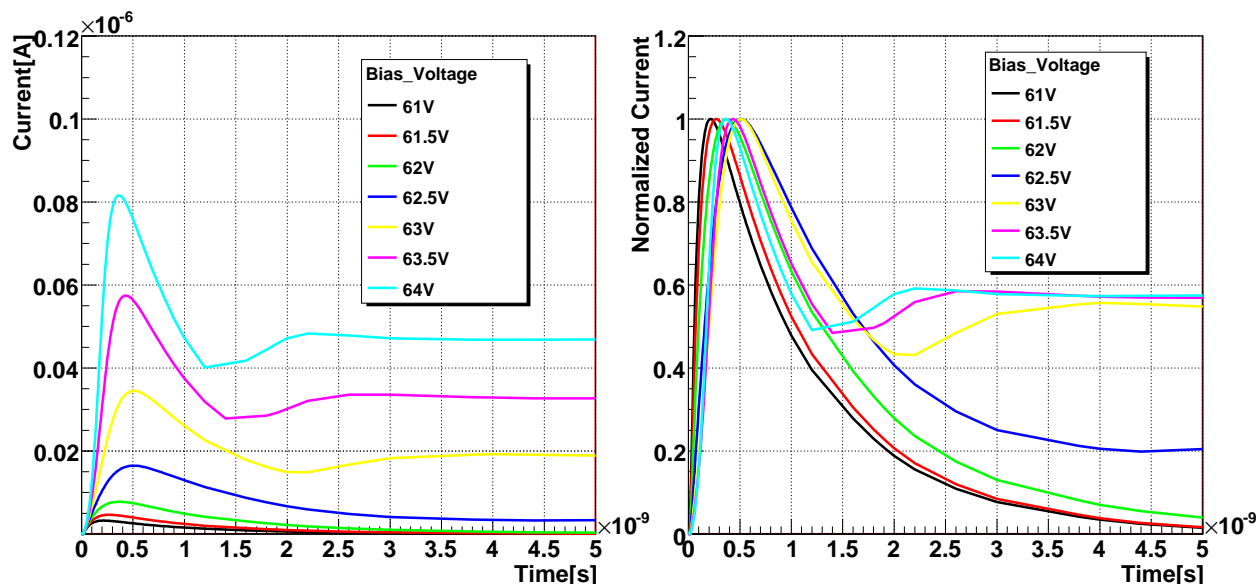


図 7.15: 降伏電圧付近の PPD に対するシングルフォトンレベルの出力波形 (左) と各電圧の波高に対して規格化したもの (右)

この最大の原因は现阶段で *ENEXSS* が高い印加電圧に対して解析できる抵抗値に上限を持っており *RC* による時定数と増倍過程に必要な時間が接近しているためである。それを裏付ける結果については第 7.5 節の電子・ホールペア数の依存性で触れているのでそちらを参照して頂きたい。そしてこの各印加電圧に対して波形が相似性を持つための解決方法としてはオリジナルプロファイルの増倍過程に必要とされる時間を *RC* より導かれる時定数に比べて十分短くなるようなプロファイルを作成する、もしくは *RC* から導かれる時定数に比べて十分大きなクエンチング抵抗を解析出来るような収束条件を調査するというものがある。この何れも今後の本研究の次なるステップと位置づけられる物である。(ちなみに図 7.14 と図 7.15 で時間後方に見られる定常電流は先程説明したバグによるものである。)

7.5 電子・ホールペア数の依存性

ここまでの解析は電子・ホールペアの数を 1 ペアのみでの生成で行なって来た。PPD は理論的には 1 ピクセル内でいくつ電子・ホールペアが発生しても、増倍により生成された全電荷量 (総合生成電荷量) は pn 接合ダイオードの端子間容量と印加電圧により一定であるとされている。一方、APD においては内部で発生したペア数、つまり入射した光子が生成したペアの数に比例して全電荷量は変化する。そこでこの事を *ENEXSS* で確認するために複数の電子・ホールペアがほぼ同時に発生した場合を仮定して、その時の波形の時間変化と総合生成電荷量を計算した。この計算では電子・ホールのペア数を 1 ~ 10 ペアまで変えて計算を行なった。また *ENEXSS* の都合上、ランダムにペアを発生させる機構は存在しないため、全て pn 接合面 (光電面より深さ $0.4\mu\text{m}$) で同時に発生させた。このように局所的に 1 ~ 10 個のペアを生成した場合の拡散による増倍過程への影響は最終的な出力のもとでは無視できると判断した。ちなみにペア数以外のその他のパラメータの値はデフォルトの値を使用している。

そして計算の結果、降伏電圧手前の電圧下では図 7.16 の様な波形の時間変化を得た。この図を見て分かるように降伏電圧手前では生成されたペア数に対して波高がほぼ線形に対応している事が確認できる。一方、降伏電圧を超える電圧下では図 7.17 という結果になり、こちらは生成したペア数によらず比較的同程度の大きさの波高を得ることが出来ている。これはまさに印加電圧 54V ~ 64V 付近に降伏電圧が存在し、*ENEXSS* において APD と G-APD の動作が確認された事となる。

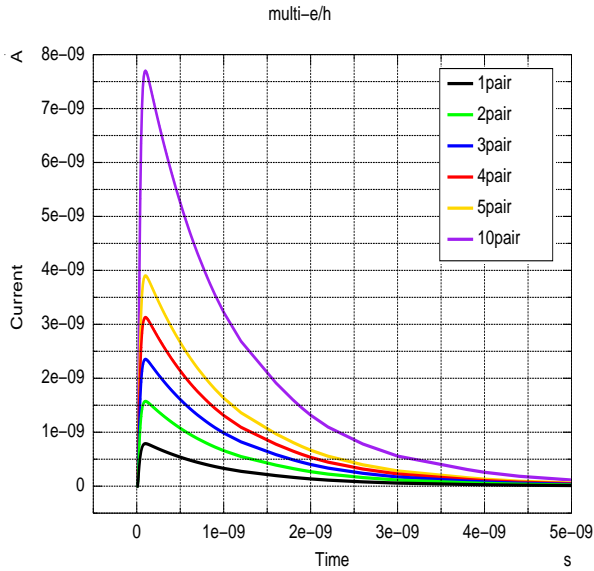


図 7.16: 降伏電圧手前 (56V) で生成ペア数変化させた場合における波形の時間変化

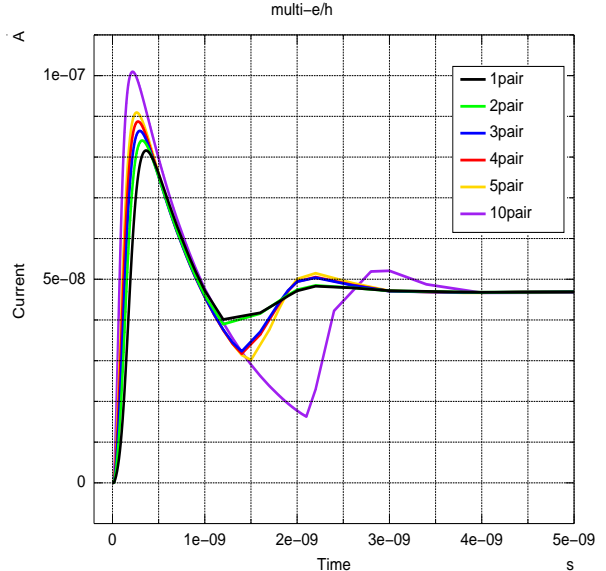


図 7.17: 降伏電圧以上 (64V) で生成ペア数変化させた場合における波形の時間変化

また図 7.18 は前節の図 7.14 と図 7.15 で解説したものと同様の図を電子・ホールペアの生成数を 5 ペアにしてプロットしたものである。電子・ホールペアが 1 ペアだった図 7.15 の時に比べて、5 ペアにした今回は増倍時間が短縮され印加電圧に対して波形が相似性が見られる。この事は図 7.14 で示した実際に測定された波形の電圧依存性の結果に近づいていると言える。これは初期に発生させられる電荷量が増加したことにより増倍過程が手助けされ、増倍時間が短縮される事で RC により導かれる時定数に比べ増倍時間が短くなり印加電圧に対する波形の相似性がより際立ったものと考えられる。この結果は増倍過程を RC による時定数に比べ短くするようなプロファイルが印加電圧に対する波形を相似形にする事に関して極めて有効であることを示していると言える。

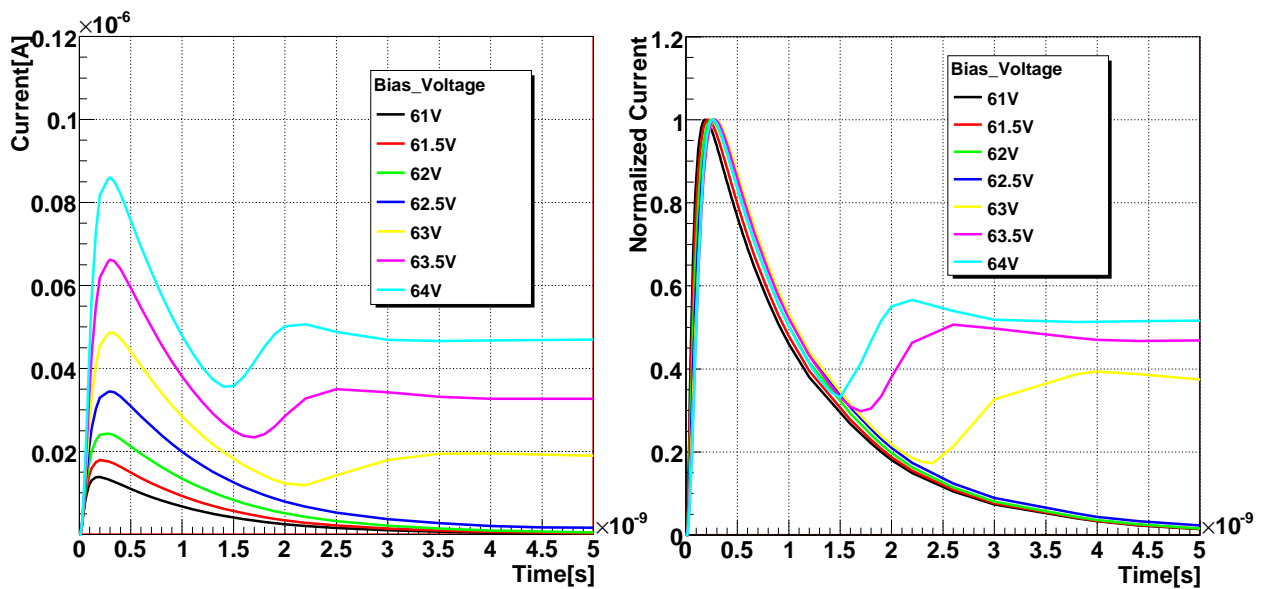


図 7.18: 降伏電圧付近の PPD に対する 5 フォトンレベルの出力波形 (左) と各電圧の波高に対して規格化したもの (右)

7.6 熱励起ノイズの温度依存性

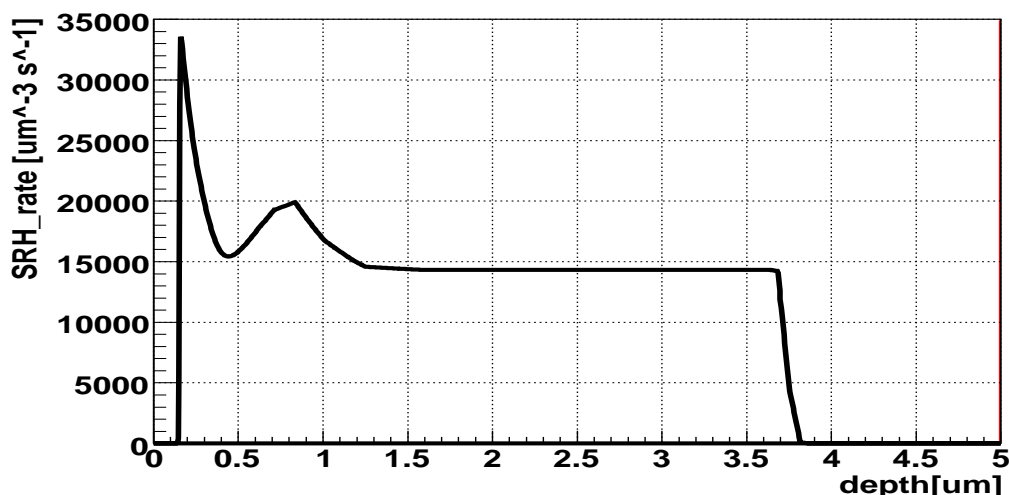


図 7.19: 深度方向における熱励起頻度分布 ($\Delta V \sim 1V$)

この節では Shockley-Read-Hall モデルによる熱励起が温度によってどの程度変化するかを計算した。 SRH の生成消滅量は式 5.9 より温度以外に pn 接合ダイオードの各場所での電場やキャリア濃度によって変化する。ここでは降伏電圧付近である 63V をクエンチング抵抗 $R = 35[M\Omega]$ を付加した pn 接合ダイオードに印加した時の SRH による熱励起の量の深度方向依存性を図 7.19 に載せた。この熱励起量の単位は $[\mu m^{-3} s^{-1}]$ であり単位体積 $1\mu m^3$ 中で 1 秒間に発生する熱励起の数を示している。この図を見て分かるように、主に空乏層領域で熱励起レートが大きくなっており、その外側では非常に小さいことが分かる。また不純物濃度が p 型半導に比べて 3 桁程度低い n 型半導体側でも p 型半導体側と比較して同程度のオーダーの熱励起レートが確認される。この事実は空乏層内で生成された電子・ホールペアが必ずアバランシェを起こすという仮定をした場合に、空乏層を薄くすることが熱励起ノイズを抑制するために極めて有効な手段である事を物語っている。

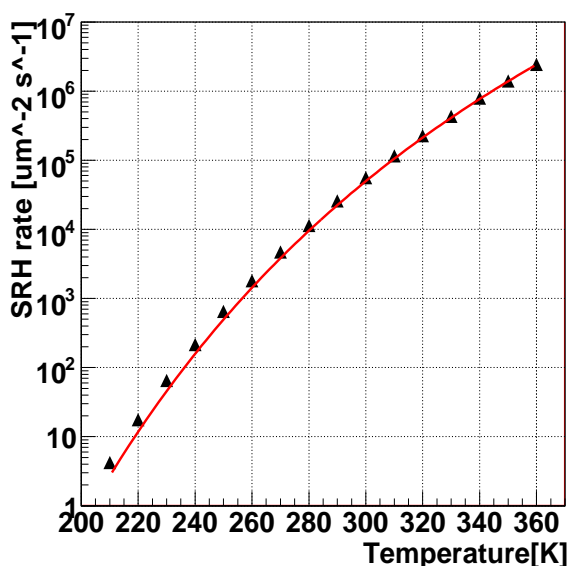


図 7.20: 熱励起モデルの温度依存性

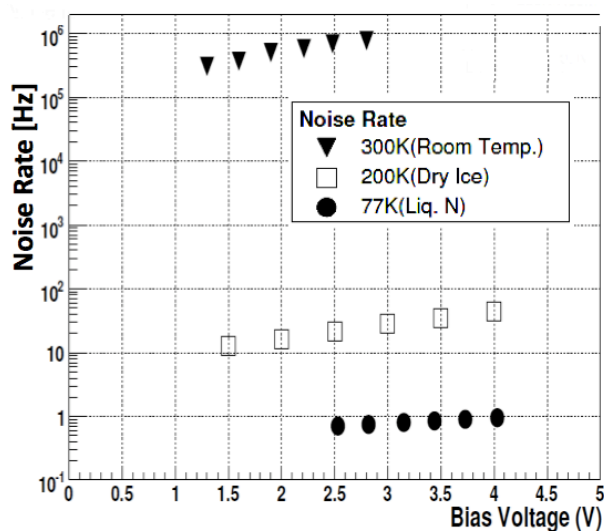


図 7.21: 実際の MPPC のノイズレートの温度依存性

次に図 7.20 はそれぞれの温度において、深度方向に熱励起レートを積分したオリジナルプロファイルの単位面積あたりの熱励起レートである。このプロットはトラップ準位からのトンネル効果を考慮しない単

純な熱励起レート $r_{thermal}$ の関係式 $r_{thermal} \propto (kT)^{3/2} \exp(\phi_g/2kT)$ でフィットする事が可能である。この事からトラップ準位からのトンネル効果による熱励起レートは常温付近では比較的小さく、低温付近ではその傾向が見え始めているためフィットよりも大きなレートを持つと考えられる。また同時に熱励起ノイズの起源となる熱励起量が温度の低下に伴って急激に低下していることも読み取れる。この結果はアバランシェ確率が温度に依存しないと仮定した場合、実際の MPPC で周辺温度を下げるとノイズが劇的に抑制される (図 7.21) という事実に一致している。また熱励起によるノイズであるランダム・ノイズは、この各点における熱励起レートにその点のアバランシェ確率をかけ体積積分することで求める事ができる。従ってアバランシェ確率を算出することでノイズレートまでも予測することが可能となる。

7.7 過渡解析の議論のまとめ

本章では ENEXSS の過渡解析において以下のことが判明した。

1. II モデル採用/非採用の波形の時間変化を比較し、II モデルの有無によりの急激に電流が増加する事が確認された (図 7.3)。
2. APD/G-APD の波形の時間変化を比較し、降伏電圧前後で増幅に大きな差がある事が確認された (図 7.4)。
3. II モデルを採用した降伏電圧付近の波形の電流の急激な増加が Impact Ionization によるものである事が判明した (図 7.5)。
4. クエンチング抵抗の値によってはクエンチングが十分に起こらないこと (図 7.8)、および ENEXSS が抱える定常電流の問題の早期解明が現段階で最重要課題であるという認識をした。
5. II モデルを非採用時の波形の時定数が RC の時定数に一致しており、端子間容量の電圧依存性と一致していることが確認された (図 7.11)。
6. 波形の最大電流値が IV 特性と同じ電圧依存性を示し、その依存性が指数関数的領域と線形領域があることを確認し降伏電圧付近においてはデバイスとして動作可能な線形となっていることがオリジナルプロファイルで確認された (図 7.12)。
7. 同じ PPD であるオリジナルプロファイルと MPPC の増倍率を等しい光電面サイズで比較したところ近い値を持つが判明した (7.13)。
8. 印加電圧に対する波形の相似性はオリジナルプロファイルに電子・ホールペアを 1 ペア生成した場合では十分とはいえないことが判明した (図 7.15)。だが電子・ホールペアを 10 ペア生成し RC の時定数に比べてアバランシェ増幅時間を十分短くするような操作を加えたところ十分な相似性を確保することができた (図 7.18)。
9. 電子・ホールペアの生成数を変化させ APD 領域の波形と G-APD 領域の波形を比較したところ、APD 領域ではその特徴である生成ペア数に比例した波高を得、G-APD 領域では生成ペア数によらずおおよそ一定の波高を得た (図 7.16 と図 7.17)。
10. 熱励起レートが空乏層領域に広がっており、その値は不純物濃度が桁違いな p 型半導体領域と n 型半導体領域に関わらず、ほぼ同じオーダーで引き起こっていることを確認した (図 7.19)。
11. 熱励起レートは温度低下とともに指数関数的に低減されて行く様子をシミュレーション中により再現した (図 7.20)。

これらの事から ENEXSS の過渡解析において次のことが言える。

- ENEXSS の過渡解析は Shockley-Read-Hall モデル、Auger モデルの採用時には終始問題なく計算が可能である。また Impact Ionization モデルを採用時には現段階では時間後方で定常電流が発生するという問題があり条件付きで計算が可能である。

- APD と G-APD の違いは明確であり、G-APD 領域のさらなる追求は定常電流の問題をクリアする、およびより高い抵抗値での解析を可能とする収束条件を調査する事でより急速に進むと考えられる。
- 本研究で使用したオリジナルプロファイルは増倍に必要な時間が実際に存在する PPD に比べて長い事が判明した。従って今後はより立ち上がりの早いプロファイルをデザインする必要がある。
- 熱励起によるノイズを抑制するためには空乏層領域を減らすことが比較的有効な手段である。

第8章 結論

本研究では TCAD International 社が開発したプロセス・デバイスシミュレーター *ENEXSS* を使用し、*ENEXSS* がガイガーモード領域のアバランシェ増幅を利用したフォトンディテクターである *Pixeled Photon Detector* の製造プロセスまでを含めた現実的な開発にどう活用出来るかを調査してきた。その結果、定常解析においては IV 特性、CV 特性、そしてこれらの温度特性について実際に存在する PPD と同程度の結果を示し実用性に耐えうることが確認された。また過渡解析においてはアバランシェ増幅の時間変化を $\sim 1\text{ps}$ 単位で計算する事で、波形の電流値、時定数、増倍率、増倍時間というマクロなパラメーターだけでなく、PPD 内部の現象である衝突電離による電子・ホールペアの生成数、電子ホールの電流密度、電場などの時間変化を追うことでミクロの視点から PPD の振る舞いを理解するツールとして *ENEXSS* が使用できる事を実証した。また外部抵抗をクエンチング機構として付加し、機能させる事を定常電流の課題を除いて実現し始めている。さらに生成される電子・ホールペア数によらず増倍率が一定であるという PPD の大きな特徴の一つを降伏電圧付近で再現した。そして熱励起によるノイズレートを *ENEXSS* が見積もる事も可能である事が本研究で判明した。

今後は、まず最重要課題である定常電流の課題を解決することを最優先として研究に取り組む必要がある。現段階では、この課題が時間的に II レートの修正量の蓄積によって引き起こされている事まで判明している。この課題に関しては TCAD International 社と共同で早急に解決していく。その後はより素早く増倍するプロファイルを検討し、その上で最適なクエンチング抵抗値を求める手法を確立する。そしてそれらの事実が3次元的な構造を持った解析時にも適応されるのか、そして外部抵抗でなく実際にポリシリコン抵抗を使用した場合も同様の結果を得ることが出来るのかを検討する。その後これらシミュレーションの結果と実測を一致させるため試作機を作成し、その整合性を調べる事で PPD 開発はさらに加速して行く予想される。行々は本研究で熱励起によるノイズレートを見積もる手段は確立したため、これを利用しノイズ抑制をしたデザイン、増倍率を上げるデザインなど改良を施した PPD の開発に本格的に着手することになる。PPD の夜明けは、すぐそこまで来ていると私は確信する。

付録A

A.1 光子の吸収

シリコンにおける光の吸収は輻射性再結合と呼ばれる過程によるものである。この過程はシリコン中の異なるバンド間で遷移する際に光子の吸収と再放出を伴う過程であり、直接遷移と間接遷移の2種類が存在する。直接遷移型の輻射性再結合は電子の運動量 \mathbf{k} の変化を伴わないものをいい、一方間接遷移型の輻射性再結合は \mathbf{k} の変化を伴うものである。シリコンはそのバンド構造から間接遷移による光吸収が主となる。図 A.1 にシリコン単結晶における光の吸収係数と光子エネルギーの関係を載せた。

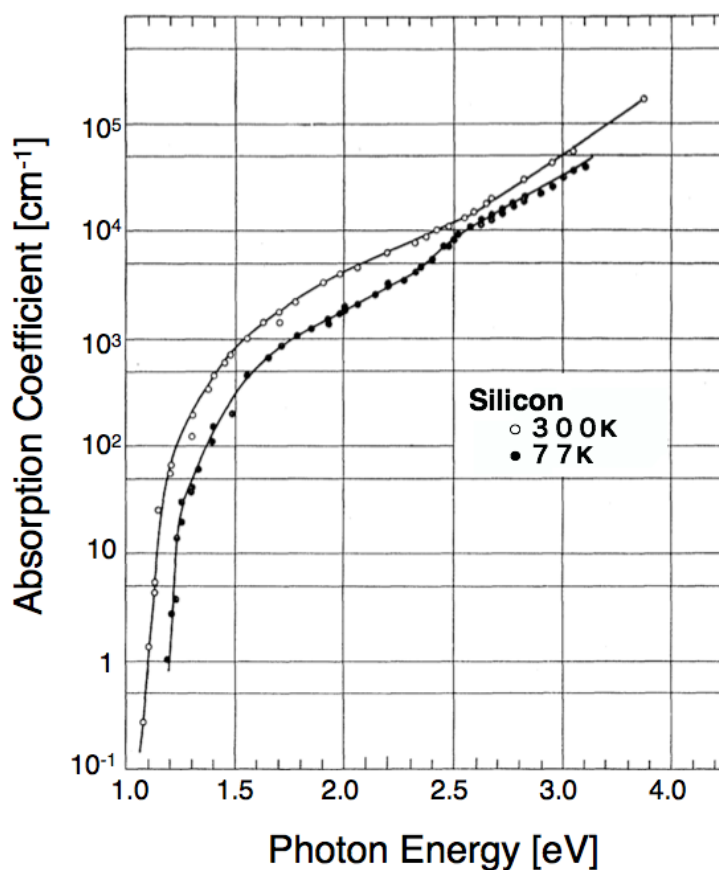


図 A.1: シリコン単結晶の 300K および 77K における光の吸収係数 [14]

付録B

B.1 オリジナルプロファイルのソースコードと各種解析コード

ENEXSS におけるオリジナルプロファイルのプロセスコード

```
# @Variables

x_width=1.00;
y_width=1.00;
z_width=5.00;
z_ini=-0.4000;
imp_energy1=300;
imp_energy2=1000;
imp_energy3=500;
imp_doze1=8.e11;
imp_doze2=0.e12;
imp_doze3=1.e13;
diffuse_temp1=700;
diffuse_temp2=700;
diffuse_time1=40;
diffuse_time2=40;
substrate_conc=5.e15;

# ジオメトリメッシュ (プロセスシミュレータ用のメッシュ)
grid.x.add ( loc = 0.0, tag = "left",);
grid.x.add ( loc = 0.49, tag = "center_left",);
grid.x.add ( loc = 0.51, tag = "center_right",);
grid.x.add ( loc = 1.0, tag = "right",);

grid.x.refine(from="center_left", to="left", start= 0.005, num=8);
grid.x.refine(from="center_left", to="center_right", num=4);
grid.x.refine(from="center_right", to="right", start= 0.005, num=8);

grid.y.add ( loc = 0.0, tag = "front",);
grid.y.add ( loc = 0.49, tag = "center_front",);
grid.y.add ( loc = 0.51, tag = "center_back",);
grid.y.add ( loc = 1.0, tag = "back",);

grid.y.refine(from="center_front", to="front", start= 0.005, num=8);
grid.y.refine(from="center_front", to="center_back", num=4);
grid.y.refine(from="center_back", to="back", start= 0.005, num=8);

grid.z.add ( loc = 0.01, tag = "+al",);
```



```

grid.z.add ( loc = 0.0, tag = "z0",);
grid.z.add ( loc = -0.1, tag = "p",);
grid.z.add ( loc = -0.4, tag = "pn",);
grid.z.add ( loc = -2.0, tag = "n",);
grid.z.add ( loc = -4.0, tag = "nn",);
grid.z.add ( loc = -5.0, tag = "z5",);
grid.z.add ( loc = -5.01, tag = "-al",);

grid.z.refine(from="z0", to="+al", num=1);
grid.z.refine(from="p", to="z0", start= 0.005, num=8);
grid.z.refine(from="pn", to="p", num=60);
grid.z.refine(from="pn", to="n", start= 0.005, num=15);
grid.z.refine(from="nn", to="n", start= 0.005, num=20);
grid.z.refine(from="nn", to="z5", start= 0.005, num=10);
grid.z.refine(from="z5", to="-al", num=1);

# 基盤の設定 (P[リン] を混ぜ込んだ n 型基盤を採用している)
region.substrate ( conc = substrate_conc, imp = "P", orient = "100", xmax = "right",
xmin = "left", ymax = "back", ymin = "front", zmax = "pn", zmin = "-al", );

init_sypros ( );

# 物理モデル・環境設定
diff_model.select ( model_name = "mulvaney_full", );
oxi_ctrl.native_oxide ( create = true, thick = 0.0003, );

# Process
# n 層注入
implant ( dose = imp_doze1, energy = imp_energy1, ion = "P", );
# エピタキシャル成長
deposit ( mat = "Si", thick = 1.0-z_ini, );
# p 層 (pn 接合側) 注入
implant ( dose = imp_doze2, energy = imp_energy2, ion = "B", );
# p 層 (受光面側) 注入
implant ( dose = imp_doze3, energy = imp_energy3, ion = "B", );
# 熱拡散
diffuse ( amb = "nitrogen", temp = diffuse_temp2, time = diffuse_time2, );
# エッチング
etch ( mat = "Si", thick = 1.0, );
deposit ( mat = "Si", thick = 0.01 );

# 出力ファイルの保存 (1次元、2次元、3次元)
save.sgraph ( file = "profile.sg3", );
save.deleos ( file = "profile_1D.geo", x = 0.5, y = 0.5,);
save.deleos ( file = "profile_2D.geo", posy = "min",);
save.deleos ( file = "profile_3D.geo", );

```

ENEXSS におけるオリジナルプロファイルの設定コード

```
# 2次元プロファイルの読み込み
```

```

#! structure
dimension ( dimension = 2, width = 1, );

region ( file_name = "profile_2D.geo", material = "all",);
doping ( file_name = "profile_2D.geo", type = "B",);
doping ( file_name = "profile_2D.geo", type = "P",);
# 再メッシュ設定 (デバイスシミュレーターの段階で再びメッシュを切り直すことも可能)
mesh ( file_name = "profile_2D.geo", );

#仮想電極領域の設定
electrode ( x_min = 0.0, x_max = 1.00, y_min = 0.00, y_max = 0.01, name = "cathode", );
electrode ( x_min = 0.0, x_max = 1.00, y_min = -5.01, y_max = -5.00, name = "anode", );

# @電子ホールペアを発生 (ペアの総合電荷量、発生場所を指定)
set_alpha ( ar0 = 1, x_start = 0.5, x_end = 0.5, adjust_total = false, r_max = 0.005,
y_start = -0.3975, y_end = -0.4025, pair = 3.145, );

# 設定ファイルを保存
outfile ( dst = "profile_2D_A1_1eh.dst", sgn = "profile_2D_A1_1eh.sgd", );
structure ( );

```

ENEXSS におけるオリジナルプロファイルの解析コード

```

# @Variables
bias_start = 0.0;
bias_end = -64.0;
bias_step = 0.5;
resistance = 2.0e5;

# 設定ファイルの読み込み
load_dst ( "profile.dst" );

# 初期値の計算方法を指定
initial_guess ( style = "Linear", );

# @物理モデルの設定
set_grrate ( ii = ON, srh = TAT, sur = OFF, btbt= OFF, aug = ON, );

# 計算方法を設定 (許容誤差、計算の反復回数の設定など)
set_method ( itr = 500, errpsi = 1.e-4, errele=1e-4, errhol=1e-4, minitr = 10,
ini_solver=SUPERNODAL, mtx_solver=SUPERNODAL, jacobian = false );

### 定常解析 ###
#定常解析ファイルの保存
set_output ( cur_filename = "DC.cur", );
# 印加電圧および、外部抵抗値の指定
set_bias ( v0 = bias_start, v1 = bias_end, dv = bias_step,name = "cathode",

```

```

resist = resistance,);
set_bias ( v0 = 0.0, name = "anode",);
# @定常解析の実行 (バイアスリセットの許容回数の設定、周辺温度の設定など)
run_dc ( reset = 10 , temp = 300);

### 過渡解析 ###
# 過渡解析ファイルの保存
set_output ( cur_filename = "TRAN.cur", );
# 印加電圧および、外部抵抗値の指定
set_bias ( v0 = bias_end, name = "cathode", resist = resistance, );
set_bias ( v0 = 0.0, name = "anode", );
# 内部物理量を可視化するためのファイルを保存
set_output ( dis_filename = "DIS.dis",
dis_vars = [Psi,E,Elec,Hole,Accep,Donor,Fix,IJI,Mn,Mp,Aug,SRH,Gtot,IEI,Net,J,Jn,Jp,II],
dis_times = [1.0e-12, 2.e-12, 3.e-12, .... , 1.0e-6], );
# @電子ホールペアの生成時間および、生成分布の決定
set_alpha ( sig_g_p = 1.0e-13, sig_g = 1.0e-13, name = "Alpha1", t0 = 1.0e-11, );
# 過渡解析時の打ち切り許容誤差を指定
lte_device ( erP = 1.e-3, eaN = 1.e+16, isV = false, isT = false, eaP = 1.e+16, erN = 1.0e-3, )
# @過渡解析の実行 (解析時間、時間幅、周辺温度の設定など)
run_tran ( auto = ON, dt = 1e-12, init = false, dt_max = 1e-10, t1 = 1.0e-5, );

```

※ set_grrate() に関しては第 6 章、set_alpha() に関しては第 7 章に詳しく説明する

参考文献

- [1] D. Renker, “Geiger-mode avalanche photodiodes, history, properties and problems.” NIMA 567 (2006) pp. 48-56.
- [2] http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/ The Nobel Prize in Physics
- [3] H. Oide, T. Murase, H. Otono, S. Yamashita., “Studies on multiplication effect of noises of PPDs, and a proposal of a new structure to improve the performance”, NIMA 613 (2010) pp. 23-28.
- [4] Hamamatsu Photonics K.K., S8664 Series Product Datasheet. Aug 2005.
- [5] Marius Grundmann. The Physics of Semiconductors - An Introduction Including Devices and Nanophysics. Springer, 2006.
- [6] K. Yamamoto, et al., “Newly Development Semiconductor Detectors.” Proceedings of PD07, PoS (PD07) 004.
- [7] S. Uozumi, et al., “Development and study of the multi pixel photon counter.”, NIMA 581 (2007) pp. 427-432.
- [8] Hamamatsu Photonics K.K., MPPC Catalog. Jun 2007.
- [9] 音野瑛俊 ガイガーモードで駆動するピクセル化された新型半導体光検出器の基礎特性に関する研究 修士論文、Feb 2008.
- [10] H. Otono, et al., “Study of MPPC at Liquid Nitrogen Temperature.”, Proceedings of PD07 , PoS (PD07) 007.
- [11] Sergio Cova, A Lacaíta, and G Ripamonti. Trapping phenomena in avalanche photodiodes on nanosecond scale. IEEE Electr Device L, Vol. 12, No. 12, pp. 685-687, Jan 1991.
- [12] Adam-Nepomuk Otte. Observation of VHE gamma-Rays from the Vicinity of magnetized Neutron Stars and Development of new Photon-Detectors for Future Ground based gamma-Ray Detectors. PhD Thesis, p. 243, Oct 2007.
- [13] W Maes, K De Meyer, and R Vanonerstraeten. Impact Ionization in Silicon - A Review and Update. Solid State Electron, Vol. 33, No. 6, pp. 705-718, Jan 1990.
- [14] WC Dash and R Newman. Intrinsic Optical Absorption in Single-Crystal Germanium and Silicon at 77-Degrees-K and 300-Degrees-K. Phys Rev, Vol. 99, No. 4, pp.1151-1155, Jan 1955.
- [15] S Gomi, H Hano, T Iijima, S Itoh, K Kawagoe, S. H Kim, T Kubota, T Maeda, T Matsumura, and Y Mazuka. Development and Study of the Multi Pixel Photon Counter. NIMA, Vol. 581, No. 1-2, pp. 427-432, Oct 2007.
- [16] D. Orme, et al., “Measurement of PDE of MPPC with different wavelengths of light.” Proceedings of PD09 , PoS (PD09) 019.
- [17] 2005 年度半導体製造装置技術ロードマップ報告書. (社) 日本半導体製造装置協会, 第4編, Feb 2006.
- [18] 半導体先端テクノロジーズ HySyProS ユーザーズマニュアル 2005.
- [19] 半導体先端テクノロジーズ 3次元デバイスシミュレータ HyDeLEOS ユーザーズマニュアル 2006.
- [20] 生出秀行 半導体光検出器 PPD の基礎特性の解明と、実践的開発に向けた研究 修士論文、Feb 2009.

- [21] Claudio Piemonte. A New Silicon Photomultiplier Structure for Blue Light Detection. NIMA, Vol.568, No.1, pp. 224-232, Nov 2006.
- [22] T.Rang, Redioelectron. Commun. syst., Vol.28, p.91, 1985.
- [23] Marius Grundmann. "The Physics of Semiconductors. An Introduction Including Devices and Nanophysics."
- [24] W.Shockley and W.T.Read, Jr., "Statistics of the Recombinations of Holes and Electrons", Physical Review, Vol.87, No.5, pp.835-842, 1952.
- [25] W Shockley. Problems Related to p-n Junction in Silicon. Solid State Electron, Vol. 2, No. 1, pp. 35-&, Jan 1961.
- [26] G.A.M.Hurkx, D.B.M.Klaassen and M.P.Knuvers, "A New Recombination Model for Device Simulation Including Tunneling.", IEEE Trans. on Electron Devices , vol 39, p331, 1992.
- [27] G.Vincent, A.Chantre, and D.Bois, "Electric field effect on the thermal emission of traps in semiconductor junctions.", J. Appl. Phys., vol 50, no.8, p5484, 1979.
- [28] S.K.Ghandhi, "Semiconductor Power Devices.", Wiley, New York, 1977.
- [29] J Bude, K Hess, and GJ Iafrate. Impact Ionization in Semiconductors - Effects of High Electric-Fields and High Scattering Rates. Phys Rev B, Vol. 45, No. 19, pp. 10958-10964, Jan 1992.
- [30] G Ottaviani, C Canali, and A Alberigiquiaranta. Charge Carrier Transport Properties of Semiconductor-materials Suitable for Nuclear Radiation Detectors. IEEE T Nucl Sci, Vol. NS22, No. 1, pp. 192-204, Jan 1975.

謝辞

本研究を進めるに当たり私は様々な事に感謝せねばなりません。まず何よりも研究をする環境を与えてくれた指導教員、山下さんに深く感謝します。山下さんは多忙極まりない中、いつもの確かなアドバイスと精神力を与えて下さいました。中でも私が心労で弱っていた際には「自分を過小評価するな」という名言を残して下さいました。また計画は最終的に予定の3.14倍の期間を欲するという「 π がけの理論」は私が研究を早期に着手する癖へとつながりました。これら山下さんの数々の助言と名言により、この2年間で心身ともに強くなった気がします。

また先輩である音野さんには山下研究室に進学するきっかけを作って頂きました。さらに出張授業という貴重な体験をさせて頂き、発信する事の大切さと奥深さを学ばせて頂きました。また生出さんには約1年近く研究の基礎となる考え方を徹底的に仕込まれました。私の理解が追い付かない時でも最終電車で帰宅することを放棄し指導にあたって頂きました。そしてこのような2人先輩方が築いた研究に本研究を積み重ねた事を光榮に思います。また田辺さんには国際学会での英語の指導を始めとし、本研究を共に進めてくださった事を感謝しています。彼はその後、本研究を引継ぎ、発展させる上でキーパーソンとなることは間違いないと確信しています。また末原さんには、本研究の提出間際に本研究に関するデータが全て消えるという一大アクシデントから私を救って頂きもう感無量です。そして吉岡さん、久保田さん、森田さん、末廣さん、高橋とは同じ山下研究室のメンバーとして、このような大切な時を共に過ごせた事を嬉しく思います。

そして同期の岡村には研究からプライベートまで掛け替えのない相談相手であり、また同時に共に突き進む事の出来る良き仲間です。彼の母校で共に授業をした際に彼が後輩に「向き不向きより前向き」という言葉を贈りました。この言葉は私の心に今なお響いております。また石田には物理に限らず学問の深さとその実用性を学びました。彼が発した「困難は乗り越える度、より困難になっていくのは必然である」というトリビアルな言葉は学会間際で衰弱していた私を、論理的に死の淵から呼び戻しました。また就職活動の傍らフランス語を勉強するという離れ業をこなした越前谷は、これまで一つの事に専念する事が美としてきた自分の考えを大きく突き動かしてくれました。武市には料理や基本作法といった研究以外のプラスアルファを心得ることの大切さと研究だけに染まらない人生観を新しく学びました。そしてマークには異文化交流の機会を与えてもらい世界観が広がりました。そして何よりも私のようなならず者に丁寧に接してくれた事に感謝しています。さらに同じ研究室の高橋には、生きることについて深く考える機会を頂きました。これからゆくりとその問と共生していきたいと思えます。

また高校時代からの付き合いで毎週我が家に泊まりにくる松村には、夜な夜な様々な話で盛り上がり、リフレッシュする機会を頂きました。また同じく高校時代からの付き合いで気の効いた連絡をくれる京都大学の宮川には、個々の大学が持つカラーに染まり切らないために客観的な視点を常に意識する事を気がつかせて頂きました。そして学部時代からの同期の田島、正木、そして名古屋大学の仲間たちが、私が東京大学に移ってからも変わらぬ関係でいてくれた事は私にとっては大きな支えでした。また昨年癌で亡くなった名古屋大学時代の同期である鈴木には、私がこの大学に進学するための試験勉強を指導してもらいました。彼なくして今の自分は全く語れません。彼の冥福をお祈りします。

そして国も年齢も生活スタイルも違う人々を繋ぎ、いつでもどこでも研究活動のできる環境を整えてくれた現代科学技術と、それを実現するために今日まで日夜研究を積み重ねてきた先代の研究者の方々に感謝の意を表したいと思えます。また現代の研究者である和田様をはじめとした TCAD International 社の皆様には本研究を支えて頂いた事を感謝いたします。

また私をここまで健康にそして自由に育ててくれた両親と、離れていても片時も忘れず私を見守り支え続けてくれた妻・絹子に心からの感謝と本論文の完成の喜びを分かち合いたいと思えます。さらに妻の論文制作に力を貸して下さいました皆様にも、この場を借りて感謝いたします。

最後にこの論文を次の世代に繋ぐために読んでいただいた貴方に感謝し、本論文の完結とさせて頂きます。それでは皆様、どうもありがとうございました。そしてこれからもどうぞよろしくお願ひいたします。

2010年2月1日 村瀬 拓郎