

卒業論文

PSpiceによるアバランシェ・フォトダイオード
読み出し回路のシミュレーション

— *Simulation of the APD Readout Circuit by PSpice* —

広島大学理学部 物理科学科
高エネルギーハドロン実験室
1179058 D 平下 賢一

平成15年2月10日

概要

高エネルギー物理実験に於いて、粒子衝突から生成放出される様々な粒子を精度良く測定することは、粒子物理学の研究を進めるために不可欠である。その測定器の一例として、最近世界中で注目を集めているタングステン酸鉛 (PWO) 結晶電磁カロリメーターがある。この検出器は PWO 結晶にシグナルとしての光子や電子などの電磁粒子が入射した際、粒子のもつエネルギーに応じて結晶から放出される発光量を測定する事で、粒子の全エネルギーを測定するものである。この透明な無機結晶から放出される微弱な可視光を通常は光電子増倍管で読み出す。しかし、磁場中で使用する場合、新しい光素子である APD (Avalanche Photo Diode) が候補として考えられる。APD 読み出しによる結晶電磁カロリメーターは、研究レベルの試作評価機を除いて、大型実験や科学機器に搭載された実績はない。さらに、汎用の高分解能 APD 読み出し回路系が完成すると、高エネルギー物理実験以外にも、最新の PWO 結晶と組み合わせた医療機器への応用など、社会的なニーズも期待できる。本研究では、この APD を用いて測定する為の基礎研究として、APD 素子からの電気信号を読み出す回路に対し PSpice という電子回路シミュレーターを導入してシミュレーションを行った。特に、APD から得られる信号を増幅するプリアンプを中心とした回路に対し、PSpice を用いて回路の各素子ごとの動作のシミュレーションを試みた。

目次

第1章 序論	1
第2章 LHC (Large Hadron Collider)	2
第3章 電磁カロリメーター	4
3.1 放射線と検出器	4
3.2 タングステン酸鉛結晶	5
3.3 光電子増倍管	7
第4章 APD	9
4.1 フォトダイオード	9
4.2 アバランシェ・フォトダイオード	12
第5章 PSpiceによるシミュレーション	15
5.1 PSpice	15
5.2 プリアンプシミュレーション	16
第6章 結論	22

目 次

2-a	LHC (Large Hadron Collider)	2
2-b	ALICE 検出器	3
2-c	Lead-tungstate	3
3-a	タングステン酸鉛結晶	5
3-b	対生成	7
3-c	γ 放出(1)	7
3-d	γ 放出(2)	7
3-e	入射粒子による電磁シャワー	7
3-f	光電子増倍管	8
3-g	PWO 電磁カロリメーター	8
3-h	PWO 電磁カロリメーターの原理	8
4-a	n 型	10
4-b	p 型	10
4-c	順バイアス	10
4-d	逆バイアス	10
4-e	フォトダイオード(1)(1)	11
4-f	フォトダイオード(2)	11
4-g	APD(1)	12
4-h	APD(2)	12
4-i	S8664-55	13
5-a	OrCAD Capture	15
5-b	OrCAD PSpice	15
5-c	プリアンプ本体	16
5-d	プリアンプ回路図	17
5-e	JFET 周囲	18
5-f	JFET 周囲の解析	19
5-g	増幅部	20
5-h	増幅部の解析	21

第1章 序論

高エネルギー重イオン衝突実験において生成放出される光子のエネルギーを精度よく測定することは物理現象を捕らえる上で非常に重要である。高エネルギーの重イオン同士が衝突すると、高温高密度の物質相が生成され、この物質相より光子が放出される。この放出光子を測定することにより、衝突の初期状態や高温高密度の物質相の内部構造を知ることが出来る。特に、物質相内部のクォークやグルーオンから放出される光子を測定することはクォーク・グルーオンプラズマ (QGP) 生成の証拠の一つとなることが期待されている。また、現在、ヨーロッパ原子核研究機構 (CERN) で計画されている大型ハドロン加速器 (LHC) における重イオン衝突実験では、より高温高密度状態からの光子信号を得ることが可能となる。

一方、光子の検出器としては、最近 CERN で開発され、世界中で注目を集めているタングステン酸鉛 (PWO) 結晶を用いた電磁カロリメーターがある。PWO 電磁カロリメーターは PWO 結晶にシグナルとして光子や電子のような電磁粒子が入射すると、入射粒子のエネルギーに応じた光が放出される。この結晶の発光量を測定することにより入射粒子の全エネルギーを測定するものである。現在、結晶の発光量を測定する方法として光電子増倍管が頻繁に使用されている。しかし、磁場中で発光量の測定を行うにあたっては、光電子増倍管の代わりに新しい光素子であるアバランシェ・フォト・ダイオード (APD) の使用が考えられる。現在のところ APD により発光量を測定する電磁カロリメーターは研究レベルの実験評価機以外、大型実験や科学機器に搭載された実績はなく、汎用の高分解能 APD 読み出し回路系が完成すれば高エネルギー物理実験以外にも様々な分野での応用が期待できる。

本研究では、APD を用いて PWO 結晶の発光量を測定するための基礎研究として、APD 素子から得られる微弱な電気信号を読み出す回路に対して PSpice という電子回路シミュレーターを導入し、解析を試みている。特に、APD 素子からの信号を増幅する一段階目の回路に対して各素子の操作を検証するため、PSpice によるシミュレーションを試みた。

第2章 LHC (Large Hadron Collider)

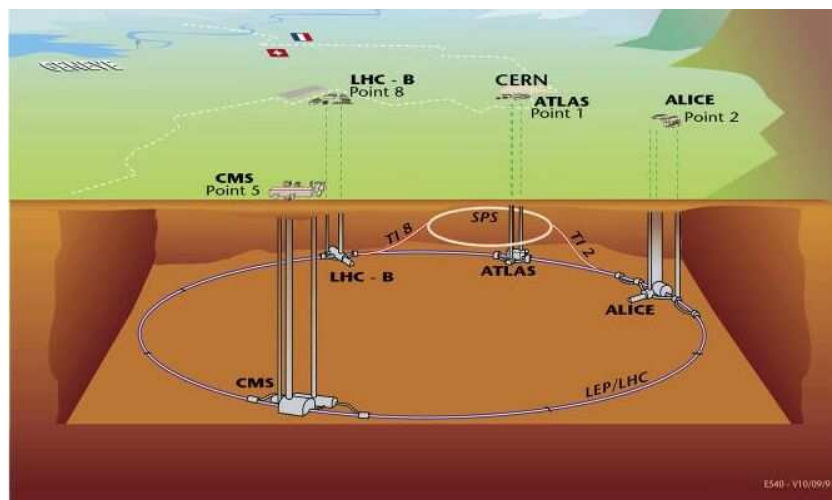


Fig 2-a: LHC (Large Hadron Collider)

フランスとスイスの国境に位置するヨーロッパ原子核研究機構 (CERN) において現在建設中の大型ハドロン衝突型加速器 (LHC¹) は、非常に高いエネルギーにまで荷電粒子を加速することが期待されており、周囲が 27km という世界最大の粒子加速器となる。

LHCにおける実験

LHCには計4つのビーム交差点があり、そこでは各実験グループによりヒッグス粒子の探索や超対象性理論の検証、OGP探索といった様々な実験が行われる。LHCで行われる代表的な実験は汎用検出器を用いるATLAS (A Troidal LHC Apparatus) とCMS (Compact Muon Solenoid)、重イオン衝突実験のためのALICE (A Large Ion Collider Experiment)、B-PhysicsのためのLHC-Bである。この中でも本研究と非常に関連があるのはALICEである。この実験では高エネルギーの重イオン衝突に

¹ Fig 2-a(参考文献 [6])

より QGP の生成が期待されており，放出される様々な粒子を測定することによりこの物質相の内部構造が解明でき得る．また，標準的な宇宙論によると，ビッグバンからおおよそ $10[\mu s]$ 後の宇宙は非常に高温高密度の状態であり QGP が存在していたと考えられている．このため，QGP を生成しその構造を解明することは宇宙誕生の謎を解明する上でも非常に興味深いものと言える．

ALICE における検出器²

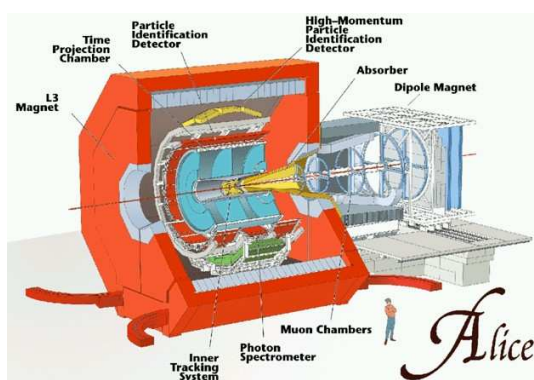


Fig 2-b: ALICE 検出器



Fig 2-c: Lead-tungstate

Fig 2-b に示すのは ALICE 実験に用いられる検出器の概要である．この検出器群のなかでも本研究と密接な関係があるのは，QGP 生成の有効なシグナルとなる直接光子を測定するための Photon Spectrometer (PHOS) である．PHOS はタングステン酸鉛結晶 (Fig 2-c) を発光体とした電磁カロリメーターである (タングステン酸鉛や電磁カロリメーターについては後に述べる)．また，PHOS はビーム軸に対して単独で存在し，衝突による直接光子だけでなく， π^0, η^0 が崩壊してできた光子も捕らえる．

² 参考文献 [6] より

第3章 電磁カロリメーター

高エネルギー物理実験を行う上で、衝突粒子から生成放出される放射線を検出する放射線検出器は非常に重要な役割を担っている。また、現在使用されている放射線検出器の大部分は原子核・素粒子実験の分野から生み出されている¹。この章では特に衝突粒子から放出される放射粒子のエネルギーを測定する電磁カロリメーターについて述べる。

3.1 放射線と検出器

一般に放射線には、荷電粒子による放射線(荷電粒子性放射線)と非荷電粒子によるもの(非荷電性放射線)があり、大別すると以下のようなになる²。

$$\begin{array}{l} \text{荷電粒子性放射線} \left\{ \begin{array}{l} \text{高速電子} \\ \text{重荷電粒子} \end{array} \right. \\ \text{非荷電性放射線} \left\{ \begin{array}{l} \text{電磁放射線} \\ \text{中性子線} \end{array} \right. \end{array}$$

それぞれの放射線にどのようなものが含まれているかを述べると、

高速電子 原子核の崩壊により生成される、正・負の電荷を持ったベータ粒子(β^+ , β^-)や他の過程で生成されるエネルギーをもった電子線(e^+ , e^-)。

重荷電粒子 核反応により生成されるアルファ粒子(α)、陽子(p)およびその他の電荷を持った重粒子。

電磁放射線 原子核自体の遷移、核子同士の反応により放出されるガンマ線(γ)。

中性子線 原子核反応により放出されるエネルギーを持った中性子(n)。

のようなものがある。放射線検出器はこれらの粒子の数、位置、全エネルギーを測定する目的で様々な種類のものが開発されている。

これらの放射線の中で、高エネルギー粒子衝突実験においては高温高密度の物質相内部の構造を知る上で重要なシグナルである γ , e^- , e^+ の全エネルギーが積極的に測定されている。このような放射粒子のエネルギー測定を行うには発光現象

¹ 参考文献 [1](p24) ² 参考文献 [2]

を利用した検出器(シンチレーション検出器)が適している. この章では粒子衝突において生成される放射粒子の全エネルギーを測定するための電磁カロリメーターについて述べる.

シンチレーション検出器の概要³

発光現象を利用した検出器は放射線によって生み出された光子を光子検出器に集め, 最終的に電気信号として取り出すものである. まず, 放射線を光子に変換する部分であるが, 放射粒子が物質中を通過するとそのエネルギーの一部を失い, 失ったエネルギーに応じて光子が放出される. このようにエネルギーが発光現象として観測できる物質をシンチレーターと呼ぶ. このシンチレーターとしてよく用いられる物質にはNaI(Tl), CsIのようなハロゲン化アルカリ結晶からなる無機シンチレーターやプラスチックを利用した有機シンチレーターがある. 次に, シンチレーターから放出される光子を観測する方法であるが, 1944年に光電子増倍管(Photomultiplier Tube, PMT)が開発され, 発光量を電気的な信号として観測できるようになった. これより, シンチレーターと光電子増倍管を組み合わせることで放射粒子のエネルギー測定が行われている.

3.2 タングステン酸鉛結晶

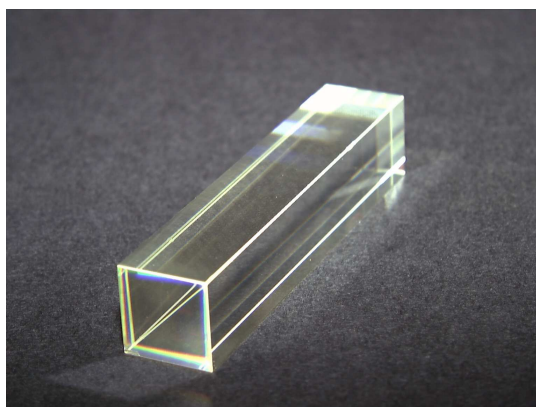


Fig 3-a: タングステン酸鉛結晶
体積: $20[mm] \times 20[mm] \times 200[mm]$

前節で述べた放射線を光子に変換する発光体として, 最近開発されたタングステン酸鉛結晶 ($PbWO_4$) がある. Fig 3-a のように PWO 結晶は透明な無機結晶である.

³ 参考文献 [1](p35), 参考文献 [3](p82)

	PbWO ₄	NaI(Tl)	BGO	CsI(Tl)
密度 [g/cm^2]	8.28	3.67	7.13	4.53
相対発光量	1	100	15	10~40
減衰時間 [ns]	5~15	250	300	565
放射長 [cm]	0.89	2.59	1.12	1.85
モリエル半径 [cm]	2.2	4.5	2.4	3.8

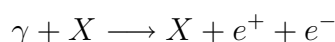
Table 3-A: シンチレーターの特性

特徴

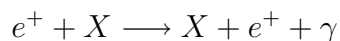
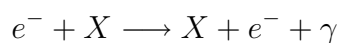
Table 3-A は、よく用いられる無機シンチレーターの密度、相対発光量、減衰時間、放射長、モリエル半径を示したものである。無機シンチレーターは有機シンチレーターに比べると密度が高く、原子番号の大きな元素からなるので、物質中でのエネルギー損失が大きいのが特徴である。この中でも PWO 結晶は得に密度が $8.28[g/cm^2]$ と高くより多くのエネルギーを光子として捕らえることが出来る。また、放射長が $0.89[cm]$ 、モリエル半径が $2.2[cm]$ と他の物資に比べて小さいためエネルギーを小さな領域に閉じ込める事ができる。減衰時間も非常に短い。欠点として発光量が NaI(Tl) の $\frac{1}{100}$ と小さいことである。このため、PWO 結晶から放出される光子をより精度よく測定することが重要である。

発光の原理

Fig 3-b に示すように、高エネルギーの γ が PWO 結晶に入射すると



のように電子陽電子対が生成 (対生成) され、 γ のエネルギーは電子・陽電子の質量と運動エネルギーに変換される。また、Fig 3-c, Fig 3-d にあるように対生成された電子や陽電子のような荷電粒子は物資中で制動放射により



のように γ を放出しながらエネルギーを失っていく。PWO 結晶中では荷電粒子の制動放射と荷電粒子から発生した γ による対生成が交互に繰り返され、多数の γ, e^+, e^- が生成される (Fig 3-e)。この現象はカスケードシャワーと呼ばれる。さらに、入射した γ のエネルギーが生成された粒子に分配されるため、1 粒子あたりのエネルギーが低くなると、粒子は電子の電離やコンプトン散乱によってエネルギーを失っていき、失ったエネルギーをシンチレーション光として観測することが出来る。

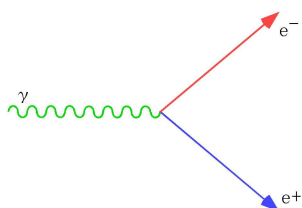


Fig 3-b: 対生成

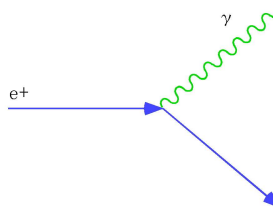


Fig 3-c: γ 放出 (1)

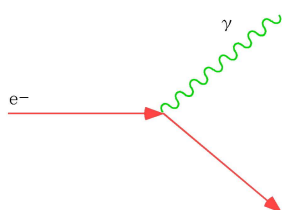


Fig 3-d: γ 放出 (2)

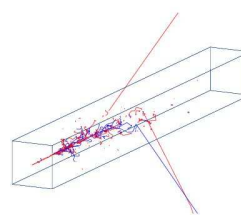


Fig 3-e: 入射粒子による電磁シャワー

3.3 光電子増倍管

Fig 3-f は PWO 結晶から光子を読み出すために用いられる光電子増倍管の写真である。光電子増倍管の内部は光電面と増幅部からなっており、入射した光子が光電面に当たると光電効果により電子が放出される。また、増幅部には高電圧がかけられており、この部分で電子が加速され、電子数が増倍していく。最終的にこの増幅された電子が負のパルス電圧として出力されるものである。

PMT を用いた電磁カロリメーター

Fig 3-g はこれまでに述べた PWO 結晶と光電子増倍管を組み合わせた電磁カロリメーター試作機の写真である。

電磁カロリメーターは PWO 結晶に入射した粒子によって放出された光子を光電子増倍管によって電気信号として取り出すものである。PWO 結晶は入射した粒子のエネルギーに応じて光子を放出し、光電子増倍管によってパルス電圧に変換される。このパルス電圧の電荷量は増倍管に入射した光子量に依存しているためこれを測定することで入射した粒子のエネルギーを求めることができる。



Fig 3-f: 光電子増倍管



Fig 3-g: PWO 電磁カロリメーター

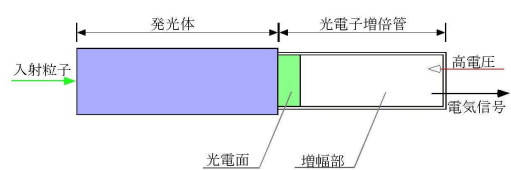


Fig 3-h: PWO 電磁カロリメーターの原理

第4章 APD

前の章で述べた電磁カロリメーターの読み出しには光電子増倍管が用いられているが、磁場の中で使う場合、通常の光電子増倍管では正確な読み出しができない。そのため、磁場中でも使用できる読み出し方法が必要となり、候補の一つとして考えられるのが入射した光子を電気信号に変換するフォトダイオードである。フォトダイオードの中でも我々は新しい光素子であるアバランシェ・フォトダイオード (Avalanche Photo-Diode, APD) を選択した。この章では光子を電気信号として取り出す仕組みについて述べる

4.1 フォトダイオード

まず、はじめに光子信号を電気信号に変換するための素子であるフォトダイオードの一般的な原理について述べたい。

n 型半導体・p 型半導体¹

族半導体である Si や Ge の結晶はダイヤモンド型結晶構造をしており、s 軌道に 2 個、p 軌道に 6 個、計 8 個の電子で共有結合の軌道が満たされ、これらの外殻電子は閉殻構造となっている。

この半導体結晶にごく少量の 族不純物 (例えば P) を 族結晶の一部と置き換えた場合を考える。Si は 4 個の価電子を有するのに対し P は 5 個の価電子を持つため、P の価電子のうち 4 個は隣り合う Si との共有結合に使われるが残りの 1 個は結合価電子となることなく取り残される。よって残された価電子に対する束縛は弱く、自由に動き回ることのできる伝導電子となる (Fig 4-a)。このように 族の不純物を加え負の電荷を持つ電子を電気伝導の主体とした半導体を n 型半導体という。逆に 族半導体に 族の不純物を加えると、不純物のまわりで結合を完成させるためには 1 個の電子が不足する。このため、不純物は 族元素の価電子を切り離して結合を完成しようとする。よって電子が切り離された場所は正に帯電してホールが生じ、これが電気伝導の主体となる。(Fig 4-b) このように 族不純物が電子を受け取ることにより生じるホールが電気伝導の主体となる半導体を p 型半導体という。

¹ 参考文献 [4](p25-27)

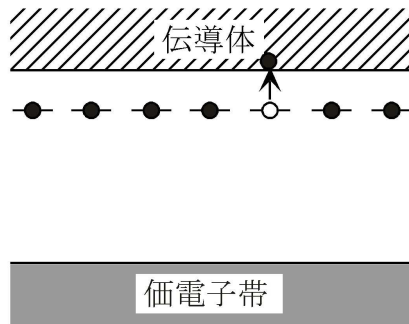


Fig 4-a: n型

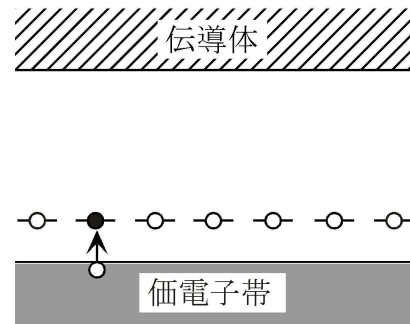


Fig 4-b: p型

ダイオード²

先に述べた p 型半導体と n 型半導体を接合 (pn 接合) した半導体デバイスについて考える。まず, pn 結合デバイスの両端に電圧が全くかけられおらず熱平衡状態にある場合, p 型領域にはホールが, n 型領域には電子が存在する。pn 接合付近の領域においてはホールも電子も存在しない空乏層領域が生成される。また, p 型領域と n 型領域の間には電位障壁があり pn 接合面を通しては電流が流れない。

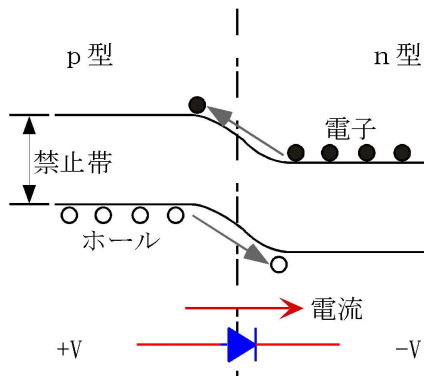


Fig 4-c: 順バイアス

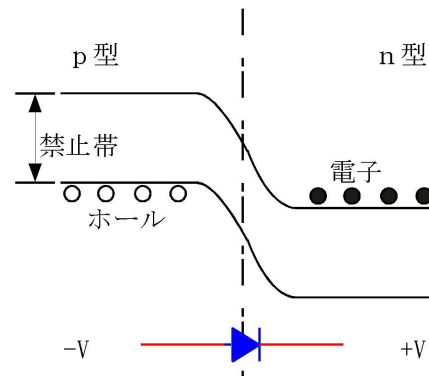


Fig 4-d: 逆バイアス

次にこのデバイスに pn 結合の p 型領域が正, n 型領域が負となるように電圧を加える場合, 電子やホールは印加電圧により Fig 4-c のように電位障壁を越えてホールは p 型領域から n 型領域へ, 電子は n 型領域から p 型領域へと注入される。この結果注入されたホールや電子により p 型領域から n 型領域に電流が流れる。このように p 型から n 型に向けて電流を流すような電圧印加の事を順方向バイアスという。

² 参考文献 [4](p60-64)

逆に、このデバイスにpn結合のp型領域が負、n型領域が正とするような電圧を印加すると Fig 4-d のようにホールは電圧の低い方(左)に、電子は電圧の高い方(右)に引かれて電子やホールの存在しない空乏層領域の幅が増えるのみで、熱励起されたほんの少量の電子やホールによる電流以外は流れず飽和する。このような方向の電圧印加の事を逆方向バイアスという。以上のように順方向バイアスでは電流を流すが、逆方向バイアスでは電流を流さないpn結合の素子をダイオードという。

フォトダイオードの原理³

ここでは一般的なフォトダイオードの原理について述べる。フォトダイオードはダイオードの一種であり、使用にあたっては逆方向バイアスで使用される。ダイオードの場合、pn結合の部分に禁止帯幅(ϵ)よりも大きなエネルギー($\hbar\omega > \epsilon$)の光子が入射すると電子は伝導帯へ励起され価電子帯にはホールが生成される。この電子とホールは互いに空乏層の電界によってホールはp型領域に、電子はn型領域に加速され電流を生じる。

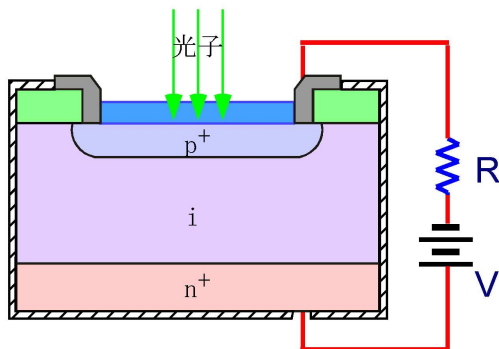


Fig 4-e: フォトダイオード (1)(1)

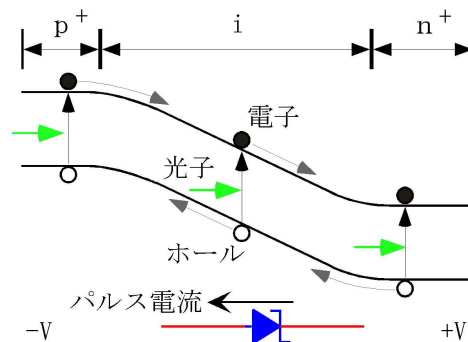


Fig 4-f: フォトダイオード (2)

一般的にはフォトダイオードとしてよく用いられる Fig 4-e に示すような pin 構造をもつ PIN フォトダイオードがある。(i 領域は半絶縁体の領域である。) このフォトダイオードの表面に光子が入射すると薄い p^+ 層と i 層で吸収されながら内部に侵入していく。この時の光子の吸収は吸収係数を α 、表面からの深さを x とすると、

$$\sim e^{-\alpha x}$$

に従い、距離 $1/\alpha$ 程度まで光子は吸収されながら進むと考えられる。この光吸収によって Fig 4-f のように主に i 層の付近で電子が伝導帯に励起され、ホールと電

³ 参考文献 [4](p136-137)

子の対が生成される。また、フォトダイオードは逆方向バイアスをかけて使用されるので、i層領域内部に生じている大きな電界によってホールは p^+ 層方向へ、電子は n^+ 層方向へそれぞれ加速される。よって、ホールと電子が再結合してしまうことなく、外部に電流信号として現れる。この外部信号の向きは n^+ から p^+ 向きである。以上が一般的なフォトダイオードが光子を電気信号として出力する原理である。

4.2 アバランシェ・フォトダイオード

前節までに述べた事に基づいて本節ではアバランシェ・フォトダイオードの原理や特徴について述べていく。

光子検出の原理⁴

これまでに述べたフォトダイオードは入射した光子によって生成されたホールと電子の対をいかに効率よく取り出せるかという事にその性能が大きく依存している。しかしながら、素子内で生成されたホールや電子を100%取り出すのは不可能である、さらに、入射する光子の数が少ない場合には、外部回路に出力される信号と素子自身に生じている暗電流の区別がつかない場合がある。そこで、光電子増倍管のように増幅作用を持ち、微弱な光でも検出できるようにした半導体デバイスがアバランシェ・フォトダイオード (APD) である。

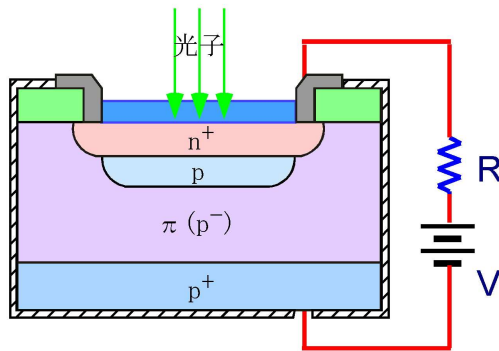


Fig 4-g: APD(1)

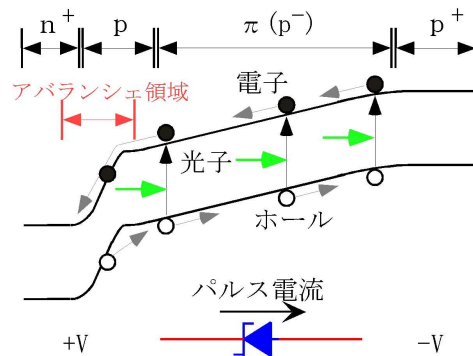


Fig 4-h: APD(2)

まず、Fig 4-g に代表的なシリコンAPDの構造を示す。APDの内部は光の入射面側から $n^+p\pi p^+$ という構造になっている。ここで、 n^+ 層は n 型不純物が多く含まれる領域、 p^+ 層は p 型不純物が多く含まれる領域、 p 層は p 型半導体、さらに π 層 (p^- 層) は p 型不純物がごく少量だけ混入された領域である。

⁴ 参考文献 [4](p137-139)

Fig 4-h は APD 内部の電子のポテンシャルを表したものである。APD は逆方向バイアスで使用するため、薄い n^+p 結合領域では高電界が生じる。一方、 πp^+ 結合領域においても大きな逆方向バイアス電圧をかける事で完全に空乏化した高電界領域となっている。

この APD に光子が入射すると n^+p 結合領域は非常に薄いので光子の吸収は少なく、大部分の光子は π 層で吸収されホールと電子の対を生成する。 π 層で生成された電子は電界によって加速され n^+p 結合部の高電界領域へと入る。この領域に入った電子は次々に衝突電離を起こしてホールと電子の対を生成する。生成された電子も高電界によって加速されるため、この領域ではなだれ的にキャリアが増大する。よって、入射する光子の数が少ない場合でもこのキャリアの増幅によって外部回路に電流信号として取り出す事が可能となる。この、なだれ的にキャリアの増大が起こる領域の事をアバランシェ領域という。

S8664-55 ⁵



Fig 4-i: S8664-55

有効蛍光面サイズ	5 × 5 [mm]
受光面積	25 [mm ²]
動作温度	-20 ~ +60 [°C]
保存温度	-20 ~ +80 [°C]

Table 4-A: S8664-55 の概要

我々は APD を用いて PWO 結晶より放出される微量の光子を測定するにあたり、シリコン APD 素子 (Si-APD) である S8664-55 ⁶ を選択した。Fig 4-i は S8664-55

⁵ 参考文献 [7] ⁶ S8664-55 は浜松ホトニクス株式会社 (<http://www.hamamatsu.com>) より発売されている Si-APD である。

の写真である。また、Table 4-A にこの素子の概要を示す。この素子の特徴として受光面積が $25 [mm^2]$ と浜松ホトニクス株式会社より発売されている他の Si-APD の受光面積 (Table 4-B) より大きいことである。よって PWO 結晶より放出される光子をより多く検出する事が期待される。さらに、Table 4-C に S8664-55 の主な特性をまとめた。

Si-APD 型名	有効受光面サイズ $[mm]$	受光面積 $[mm^2]$
S8664-02K	$\phi 0.2$	0.03
S8664-05K	$\phi 0.5$	0.19
S8664-10K	$\phi 1.0$	0.78
S8664-20K	$\phi 2.0$	3.14
S8664-30K	$\phi 3.0$	7.0
S8664-50K	$\phi 5.0$	19.6

Table 4-B: その他の APD の受光面積

パラメーター:	値:
感度波長範囲 (λ)	320~1000 $[nm]$
最大感度波長 (λ_p)	600 $[nm]$
降伏電圧	Typ.:400 $[V]$,Max.:500 $[V]$
暗電流 (I_D)	Typ.:5 $[nA]$,Max.:50 $[nA]$
遮断周波数 (f_c)	40 $[MHz]$
端子間容量 (C_t)	80 $[pF]$
増倍率 ($\lambda = 420[nm]$)	50

Table 4-C: S8664-55 の主な特性

第5章 PSpiceによる シミュレーション

APD素子から得られる電気信号を制度良く読み出すためには専用の読み出し回路系を設計する事が必要となる。しかし、このような読み出し回路系はアナログ回路とデジタル回路が混在した複雑なものとなる事が予想される。また、設計段階で回路がどのように動作をするかという事を解析するにあたっては大掛かりな回路になればなるほど困難となってくる。このような場合、コンピューターによる回路の動作確認は実際に回路を作らなくともその回路の特性を調べる事ができるため、目的の回路を設計する時間を短縮し、この章では本研究の目的である、読み出し回路に対してのPSpiceというシミュレーターの導入について述べる。

5.1 PSpice

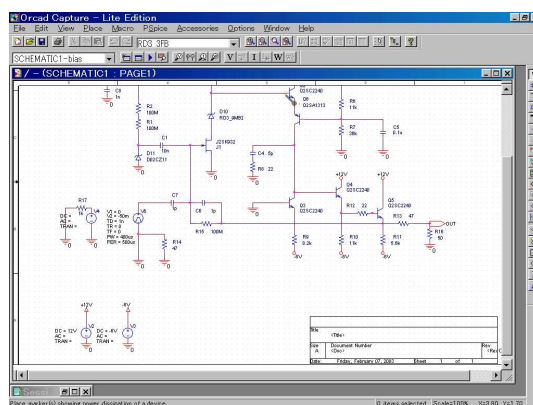


Fig 5-a: OrCAD Capture



Fig 5-b: OrCAD PSpice

PSpice は、SPICE といわれる回路シミュレーターのバージョンの一つであり、電気回路や素子の動作を確認するために学術的な分野、あるいは工業界で広く使われている。SPICE はもともと 1970 年代にカリフォルニア大学バークレイ校において開発¹されたもので、その後、様々な企業やグループによって開発が進められている。これらの中で本研究では Cadence 社より入手できる²OrCAD 評価版に

¹ 参考文献 [5] ² 参考文献 [8] の URL 参照

含まれる PSpice を利用した。

このシミュレーションソフトは、Fig 5-a に示すような Capture というソフトのよって解析をしたい回路図を入力し、PSpice によりその回路の任意の点の電圧、電流、消費電力、またそれらの時間変化も解析できる。また、シミュレーションの結果は Fig 5-b に示すように、オシロスコープで回路を観察しているかのように表示され確認できるのが特徴である。

5.2 プリアンプシミュレーション

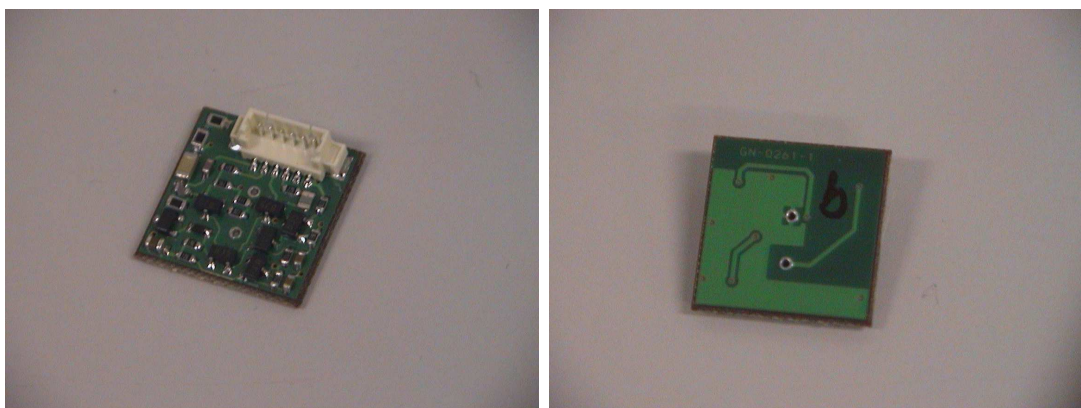


Fig 5-c: プリアンプ本体

プリアンプ

Fig 5-c に示すのは現在、我々が APD 素子から信号を読み出すために用いている。プリアンプの写真である (左側が素子を実装した面、右側が APD 素子取り付け面)。このプリアンプは一辺が約 $2[cm]$ で、 $2[cm]$ 角の PWO 結晶の後ろの部分にちょうど収まるように作られている。

動作原理 (JFET の周囲)

Fig 5-d に示すのは、このプリアンプの回路図である。まず、回路図したがってこのプリアンプ回路の動作について述べる。APD 素子である S8664-55 は逆方向バイアスとして接続されている。この状態で APD に光子の入射がなければ、APD には電流が流れない。光子が APD に入射すると S8664-55 の端子 2 から端子 1 の方向へ電流が流れ、端子 2 では抵抗に電流が流れた事による電圧降下が生じる。

よって、流れた電荷量の情報は、流れた電荷に相当する負のパルスとしてコン

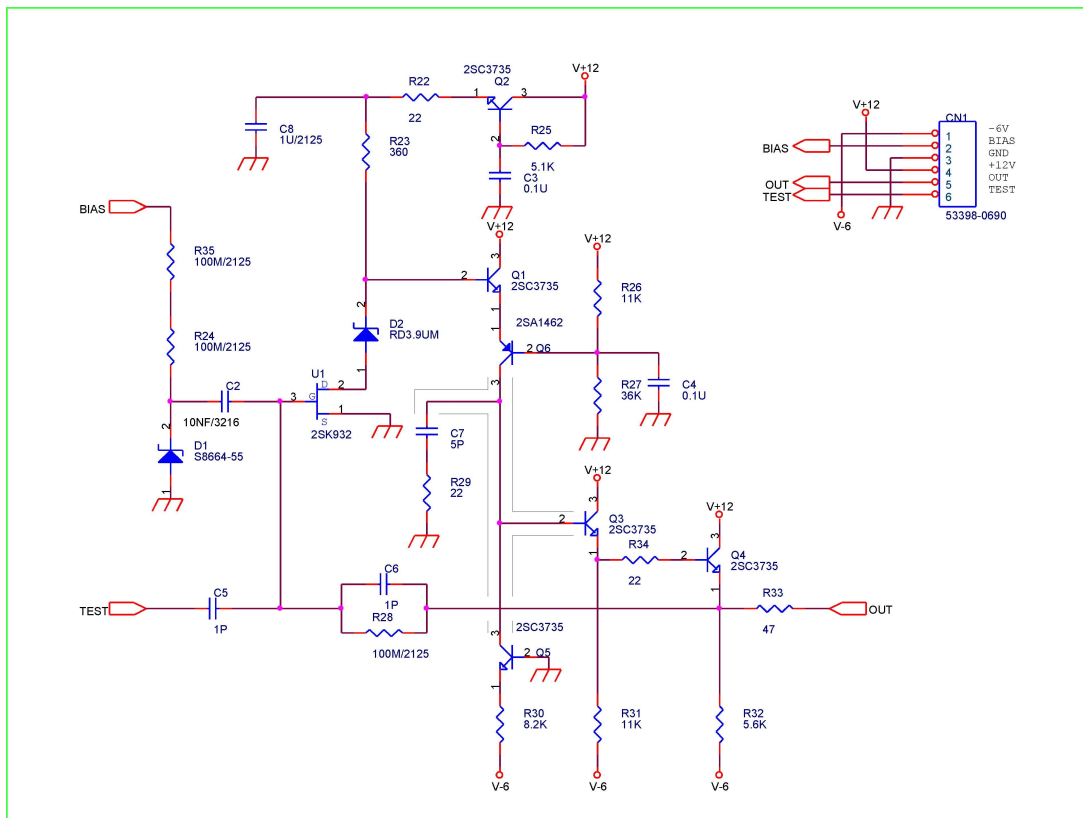


Fig 5-d: プリアンプ回路図

デンサ C_2 を通して JFET (U_1) の端子 3 に入力され端子 3 の電位が下がる．そのため，JFET の端子 1 と端子 2 の間の抵抗が急激に増加し JFET の端子 2 の電圧が上昇する．また，RD3.9UM はツェナーダイオードであるため逆方向バイアスのときは端子間の電位差が 3.9[V] に保たれる．ゆえに，RD3.9UM の端子 2 の電位は JFET の端子 1 の電位に 3.9[V] 加えたものとなる

JFET 周囲の回路シミュレーション

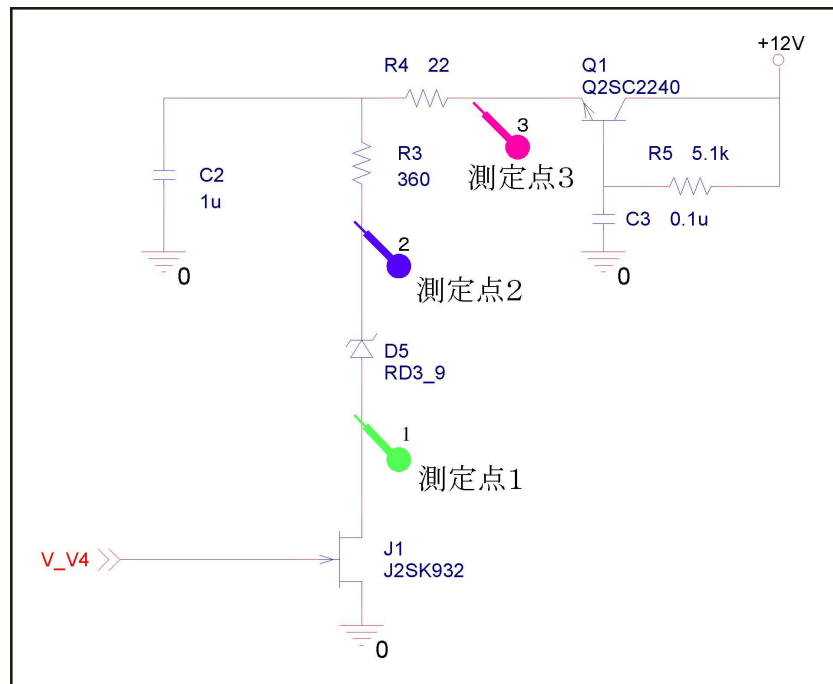


Fig 5-e: JFET 周囲

これまでの述べたプリアンプの動作原理を確認するため OrCAD Capture により Fig 5-e に示すような回路を作り PSpice によるシミュレーションを行った．なお，このシミュレーションでは実際のプリアンプで使用されているトランジスタと性質が同じ物で代用した．

シミュレーションの内容は Fig 5-e の V_V4 にかかる電圧を変化させたとき，測定点 1～3 の電位がどのように変化するかというものである．その結果は¥図 SB23 になった．この図の横軸は V_V4 にかかる電圧，縦軸は各測定点の電位である．また，下側のグラフは変化の V_V4 が 0[V] 付近の場合を詳しく見たものである．

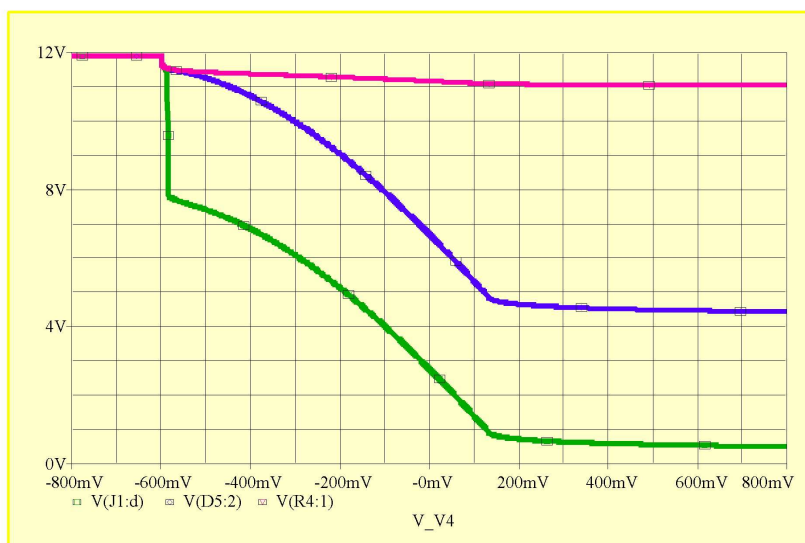
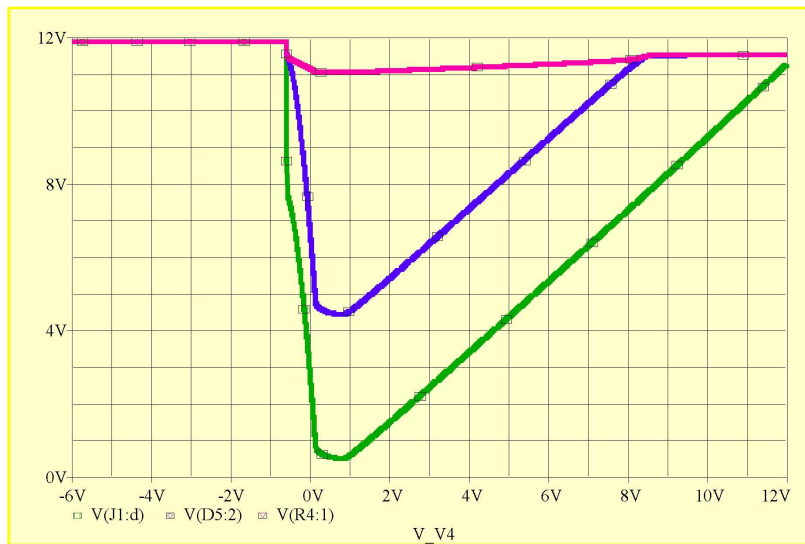


Fig 5-f: JFET 周囲の解析

動作原理 (増幅部)

次に、増幅部分の動作原理について述べる。まず、PNPトランジスタである2SA1462はベース接地となっており、ベース(端子2)には9.2[V]程度のバイアスがかけられている。このため、トランジスタの端子間電位差が0.6[V]であると考えればトランジスタ Q_1 の端子2の電位が10.4[V]を越えると、トランジスタ Q_6 の端子3の電位が急激に高くなる、この電圧信号はトランジスタ Q_3 、 Q_4 によって出力インピーダンスを調整され出力される。

増幅部のシミュレーション

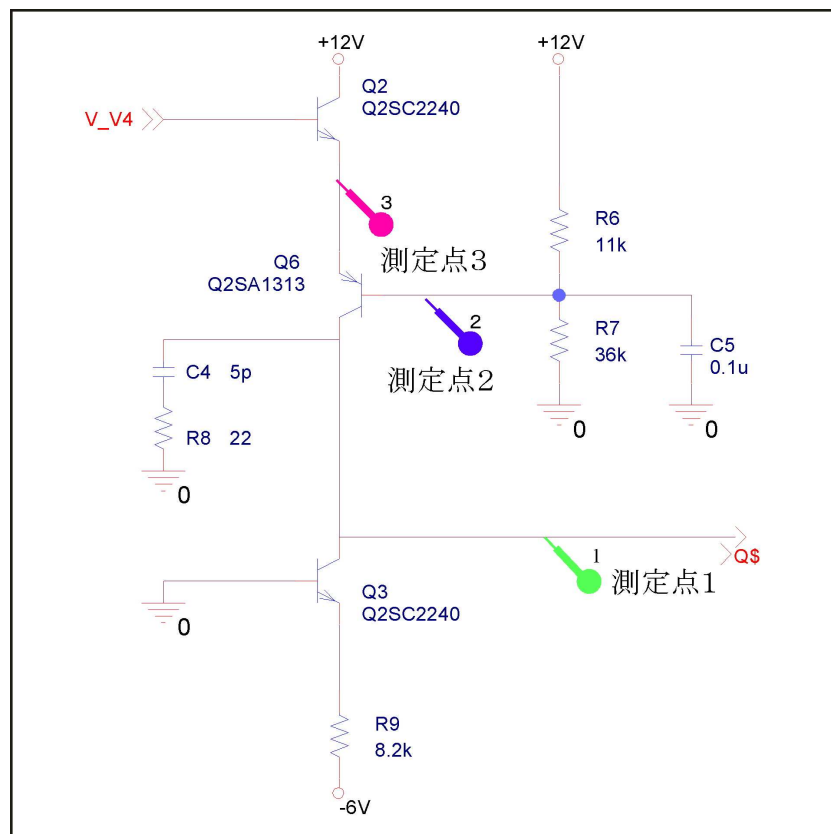


Fig 5-g: 増幅部

増幅部においても Fig 5-g のような回路を作り、トランジスタにかかる電圧を変化させてシミュレーションを行った。先ほどと同様に Fig 5-g の V_V4 にかかる電圧を変化させたとき、測定点1~3の電位がどのように変化するか調べると Fig 5-h のように先に述べた事がよく再現する。この結果、増幅部だけで使用するとトランジスタ自体の特性により非常に増幅率の高いものとなる事がわかる。

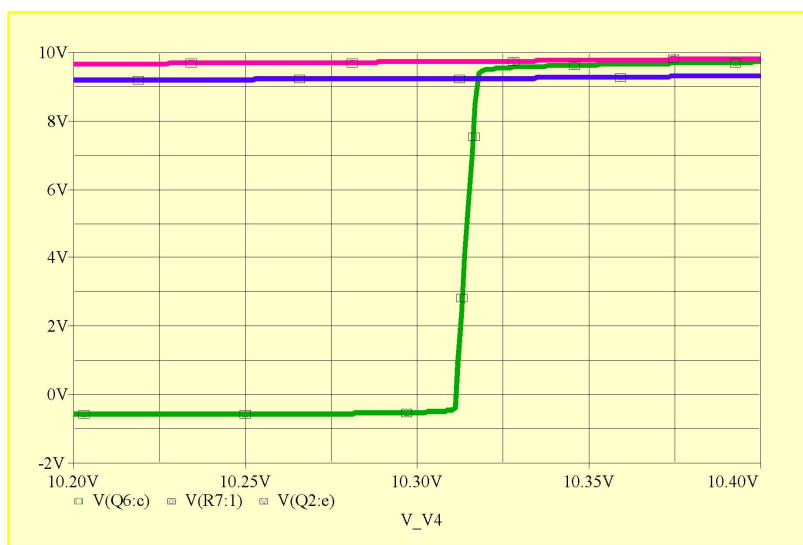
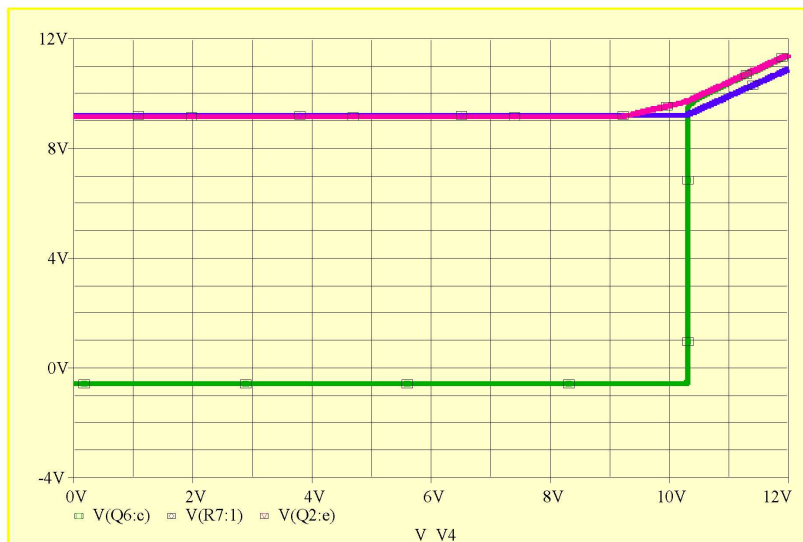


Fig 5-h: 増幅部の解析

第6章 結論

本研究においては、光素子の特性を良く理解した上で PSpice という電子回路シミュレーターを導入してアバランシェ・フォトダイオードから光子を読み出すためのプリアンプ回路の主要部分に対して解析を試みた結果、PSpice の解析は十分信頼できるものであり、高エネルギー衝突実験において新たな物理現象をどのように捉えるべきか考え、その方法を実現していく上で非常に有効であるという結論を得た。また、本研究は多くの課題も残った。まず、シミュレーションを行う上で本研究では性質の近い素子を代用したが、精度の良い読み出し回路になると解析を行う際にそれぞれの素子の特性を理解して使用する素子のモデリングを行う事が必要となる。また、現在は、APD から信号を読み出す回路はプリアンプしかなく、プリアンプからの出力を整形する回路、及び、それをデジタル化する回路を作成する必要がある。さらに、様々な場所で使用する事を考えると回路の温度依存性やノイズ解析に必要である。これらの事は今後さらに PSpice を用いて解析を進めていく上での大きな課題となる。

謝辞

この論文を作成するにあたって数多くの助言をして頂いた杉立先生および本間先生に心より感謝致します。また、その他のお世話になった方々にもお礼申し上げます。

参考文献

- [1] 日本物理学会 著, 『加速器とその応用』 (日本物理学会 1981 年)
- [2] Glenn F. Knoll 著, 木村逸郎・坂井英次 訳 『放射線計測ハンドブック 第2版』 (日本工業新聞社 1991 年)
- [3] 永江知文・永宮正治 共著, 『原子核物理学』 (掌華房 2000 年)
- [4] 浜口智尋・谷口研二 著, 『半導体デバイスの物理』 (朝倉書店 1992 年)
- [5] Andrei Vladimirescu, 『THE SPICE BOOK』 (1994 by Jhon Wiley & Sons, Inc.)
- [6] ALICE-A Large Ion Collider Experiment
URL: <http://arice.web.cern.ch/>
- [7] 浜松ホトニクス
URL: <http://www.hpk.co.jp/Jpn/products/ssd/ssdnews.htm>
- [8] Cadence
URL: <http://www.cadencepcb.com/products/downloads/default.asp>