

卒業論文
シリコンストリップ検出器
(SSD)の特性の研究

東北大学理学部 物理学科 原子核物理
渡辺 極之

平成12年5月19日

目次

1	序論	3
1.1	本論文の目的	3
1.2	この SSD の基本構造とその特徴	3
2	放射線に対する耐性	5
2.1	目的	5
2.2	放射線損傷について	5
2.3	実験	7
2.3.1	照射	7
2.3.2	放射線損傷を特徴付ける諸量とその解析方法	9
2.4	結果	13
2.5	まとめと考察	17
3	金の放射化分析	22
3.1	目的	22
3.2	放射化分析について	22
3.3	解析方法	22
3.3.1	文献による反応断面積の推定	22
3.3.2	実験による反応断面積の解析方法	26
3.4	実験	29
3.4.1	放射化と測定	29
3.4.2	Ge 検出器の efficiency 測定	29
3.5	結果	29
3.6	まとめと考察	31
4	今後の対放射線耐性実験について	34
A	SSD の諸情報	35
A.1	Si-Detector の一般的な特性	35
A.2	Tohoku SSD specification	36
A.3	TEKZ	42
A.4	その他	42

B	電源の内部抵抗とその周辺	42
B.1	内部抵抗の測定	42
B.2	電圧の補正と電流値の決定方法	45
C	データの所在	46

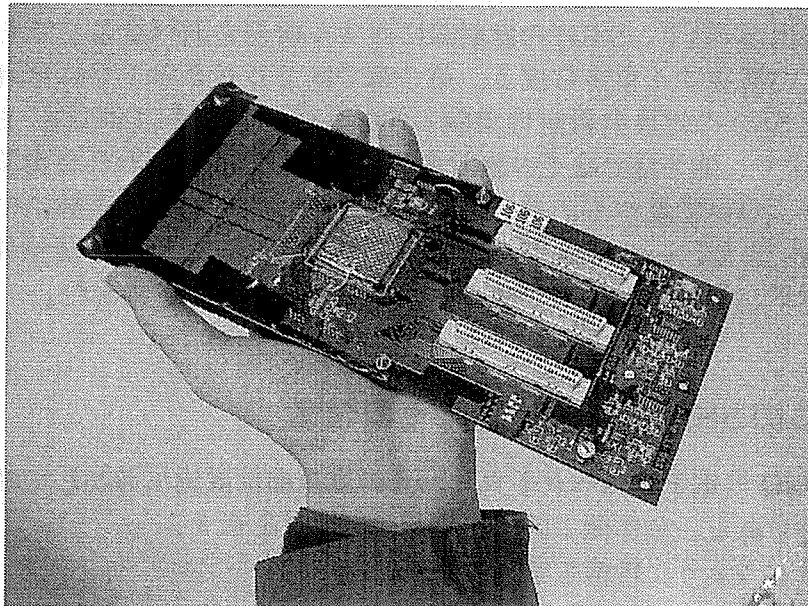


図 1: SSD 全体写真

1 序論

1.1 本論文の目的

本論文の主な目的は、Jefferson Lab. において行われた(～2000年4月)高分解能 Λ ハイパー核分光実験のために開発された、シリコンストリップ検出器(以下、SSD)の放射線に対する耐性を調べることである。

本論文の構成は4章から成る。第2章では2000年1月に核理研で行われたSSDの対放射線耐性実験(200MeVの電子を150K Gyまで照射)について、第3章ではその放射量を見積もるために行われた金箔の放射化分析について述べる。第4章では今後の対放射線耐性実験について考察する。また、appendixには今後の実験のために、SSDの諸情報、電源について、そして本論文で使った実験データの所在を載せた。

1.2 このSSDの基本構造とその特徴

このSSDは電子線スペクトロメータの焦点面位置検出器として開発されたものである。全体像：図1と断面図：図2を示す。

また以下のような特徴を備えている。

- 144ch, 0.5mm 刻み, 厚さ $325\mu\text{m}$ (図2)
- p-n Diode type Strip Detector
- 有感領域は $7.2\text{cm} \times 5\text{cm}$
- 信号の読み出しはダメージに強い AC coupling read-out(図3)
- 基板-F.E.B.(Front End Bord)上に、プリアンプ・シェイパー・ディスクリミネータを含んだChip、「TEKZ」3つが取り付けられている
- 酸化膜 SiO_2 の帯電の影響を小さくするため、 p^+ のストリップをグランドに落している。

詳しくは Appendix A を参照。

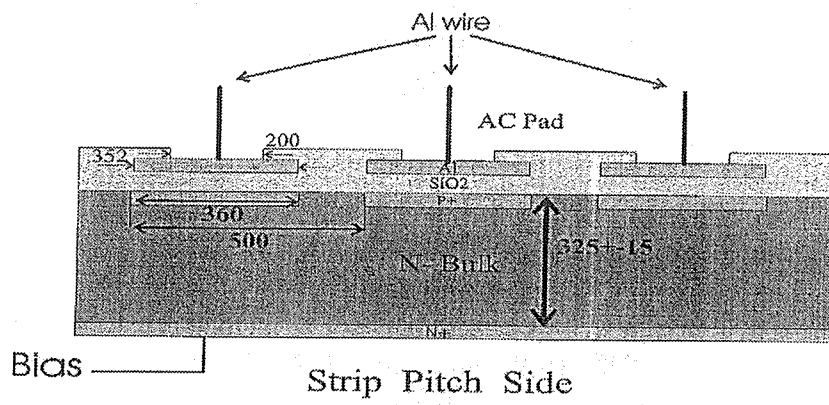


図 2: 断面図

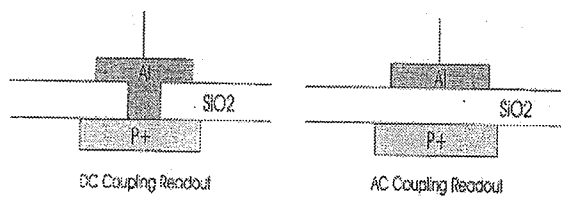


図 3: 読みだし方法

2 放射線に対する耐性

2.1 目的

この章の目的は、SSD の放射線に対する耐性を調べることである。この SSD は電子の位置検出のために作られているので、電子ビームによって損傷を与え、リークカレント・ノイズレベル・efficiency の変化を測定した。

2.2 放射線損傷について

SSD の放射線損傷については、2 種類あることが知られている。1 つは、結晶そのものへの損傷 (Bulk damage)、もう 1 つがシリコン結晶を覆っている表面不活性層 (SiO_2) への損傷 (Surface damage) である。

Bulk damage[9][12]

シリコン結晶全体に対する放射線損傷の原因として主要なものは、Non Ionizing Energy Loss(NIEL) による displacement damage である。NIEL によりシリコン結晶格子の一部が損傷を受け、点欠陥が生じたり不純物で補われることにより結晶の性質が一部変化したりする。また、放射線により原子が散乱を受け、『Cluster』と呼ばれる部分的に無秩序な領域も生じる。図 4 は、シリコン結晶内での電子、中性子、陽子の NIEL の入射粒子のエネルギー依存性を示している。電子の NIEL はハドロン の NIEL と比べて一桁以上小さい。従って電子によるシリコン結晶の放射線損傷は小さいことがわかる。

Surface damage[10] [5]

シリコン結晶全体に対する放射線損傷とは対照的に、表面損傷には、表面不活性層である SiO_2 層内と $Si-SiO_2$ 界面の両方に起こる、あらゆる放射線損傷効果が影響している。結晶全体の損傷と表面損傷はその効果の起こる場所以外に、その原因によっても区別される。結晶損傷は NIEL によるものであるが、表面損傷の原因は不活性層内での電離と、不活性層やその界面に捕獲された電荷である。また、不活性層内での displacement

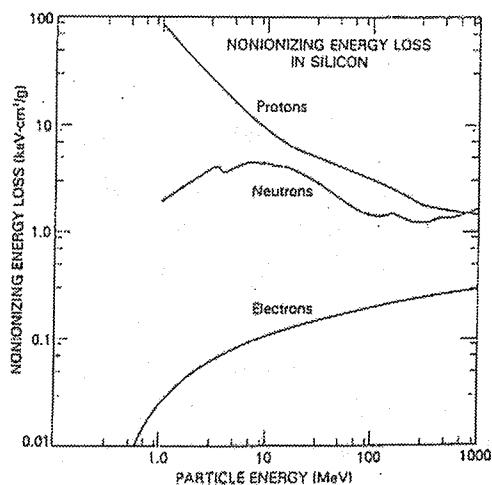


図 4: NIEL [12]

damage による効果は無視され得るほど小さい。

放射線が表面不活性層を通過するとき電離相互作用によって作られた電子・ホール対は、特に電場をかけていない場合、高確率ですぐに再結合する。電場を強くしていくに従って自由電荷の数が増加していく。電子は移動度が大きいので、移動度の小さいホールを残して、ほとんど瞬間的に掃出される。電場の向きによっては、いくつかのホールは $Si-SiO_2$ 界面に向かって移動し、そこで捕獲される。これは2つの基本的な表面損傷効果をもたらす。一つ目は酸化膜トラップ電荷の増加、二つ目はより高い表面再結合速度(割合)の原因である、表面生成-再結合中心(界面トラップ電荷)の導入である。生成-再結合中心が増加すると、再結合割合が大きくなり、界面生成電流が大きくなる。

まとめ

今回の照射実験では電子ビームを使用するので、放射線損傷としては Surface damage の効果が主であると考えられる。

2.3 実験

2.3.1 照射

2000年1月に核理研で行った実験では、200MeVの電子のパルスビームを鉛コリメータによって8 mm ϕ の断面積のビームにし、150K Gyまで照射した。ここでいう150K Gyとは、最小電離粒子(200MeV, e^-)が電離相互作用によって電子1個あたり2 [MeV/(g/cm²)]のenergyを落としていくとして求めたものである。またbeam-spotは8 mm ϕ で、ハローは無いと仮定した。また、照射量はFaraday-Cup(以下F.C.)で全ての電子を止めて、その電荷量を測ることによって測定した(関連章：第3章金の放射化分析)。計算は以下の通り。

まず、照射電荷量 $F.C.[C]$ と吸収線量 $Bom.[Gy]$ の関係を、

$$Bom.[Gy] = Const.[Gy/C] \times F.C.[C] \quad (1)$$

と、定義する。energy deposit: E は、

$$E = dE_{min} d\rho [MeV/e] = dE_{min} d\rho \times 10^6 [J/C] \quad (2)$$

で表される。但し、 $dE_{min} [MeV/e/(g/cm^2)]$ は電子を最小電離粒子としたときの1個あたりのエネルギー損失、 $d[cm]$ はSi結晶の厚さ、 $\rho[g/cm^3]$ はSi結晶の密度である。その部分の重さ: m は、

$$m = \rho S d \times 10^{-3} [Kg], \quad S = \pi r^2 [cm^2] \quad (3)$$

である。ここで、 $S[cm^2]$ はビームの断面積、 $r[cm]$ はその半径である。よって、比例係数: $Const.$ は、

$$Const. = \frac{E[J/C]}{m[Kg]} = \frac{dE_{min}}{S} \times 10^9 [Gy/C] \quad (4)$$

となる。 $dE_{min} = 2 [MeV/e/(g/cm^2)]$ 、 $S = 0.4^2 \times \pi [cm^2]$ を代入すると、 $Const. = 4 \times 10^9 [Gy/C]$ になる。

また、ジオメトリを図5と図6に、run-numberと照射量を7に示す。

照射中はBias電圧を70V(目盛の読み)かけていた。損傷による影響(関連章：2.3.2.)の測定は、各照射ごとにビームを止めて行った。ランダムノイズスキャン(関連章：2.3.2.-2-a)は時間の都合上、4回だけ行った。

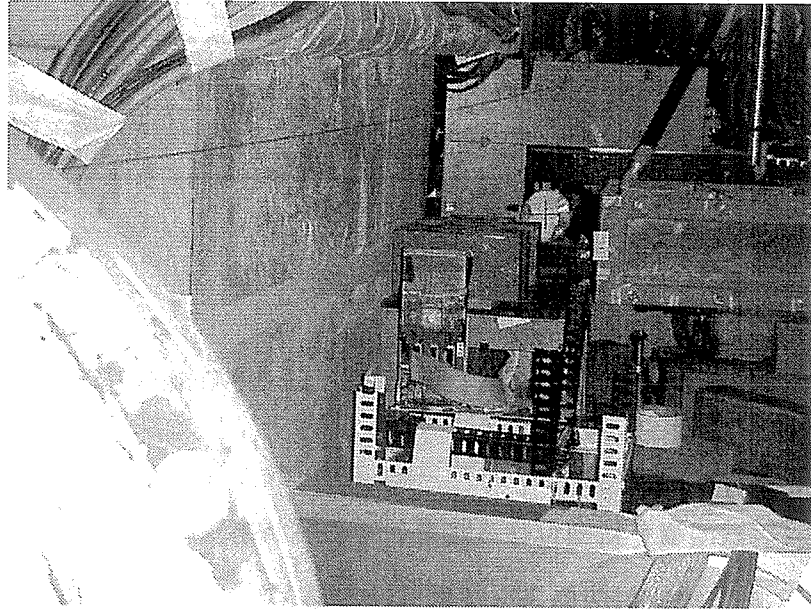


図 5: 照射写真

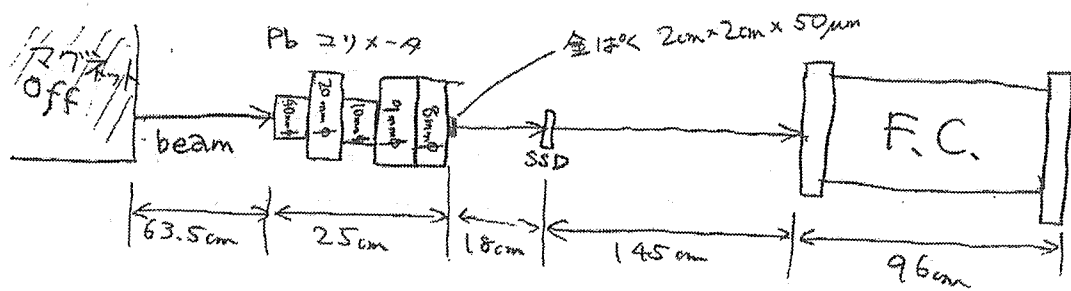


図 6: ジオメトリ

run#	F. C. の値(10^{-10} C)	各runごとの照射量(kGy)	照射量の合計(kGy)
1	12560	4.99888	4.99888
2	10014	3.985572	8.984452
3	12526	4.985348	13.9698
4	12500	4.975	18.9448
5	27537	10.959726	29.904526
6	25003	9.951194	39.85572
7	24995	9.94801	49.80373
8	56366	22.433668	72.237398
9	68088	27.099024	99.336422
10	124876	49.700648	149.03707

図 7: 照射量

また、この実験の前に準備実験を行ったのでおよそ 0.8kGy のオフセットがあることを付記しておく。

2.3.2 放射線損傷を特徴付ける諸量とその解析方法

今回の実験では放射線損傷を特徴付ける量として、以下の量を計測した。また、コンピュータを使う計測では KODAQ(Kakuken On-line Data Acquisition System) を用いた。

1. リークカレント

既に述べたように、電子の照射によって起こるリークカレントの増加の原因は主に、 $Si-SiO_2$ 界面が損傷により低抵抗化し、本来の絶縁膜としての役割を果たさなくなることでありと考えられる。.... 考え中..... また、この電流が流れる回路を図 8 に示す。

リークカレントは、図 8 のカレントモニタ用の $1\text{ M}\Omega$ の抵抗間の電圧を計測することによって求めた。計測にはデジタルマルチメータ CDM-28 を使用した。このデジタルマルチメータの内部抵抗は $10\text{ M}\Omega$ のオーダーであると推定されるので、リークカレントの大きさには 10% 程度の系統誤差がある。今回使用した電源は、ORTEC の Detector Bias Supply (Model:428) である。(別途測定したこの電源の内部抵抗は appendix B.1 に載せた) また、リークカレントの増加にともなう内部抵抗による電圧降下を考慮する必要があったので補正を行った。そのために、Bias 電圧(目盛の読み)とリークカレントの相関を各照射ごとに計測し(その典型的な形を図 9 に示す)、電

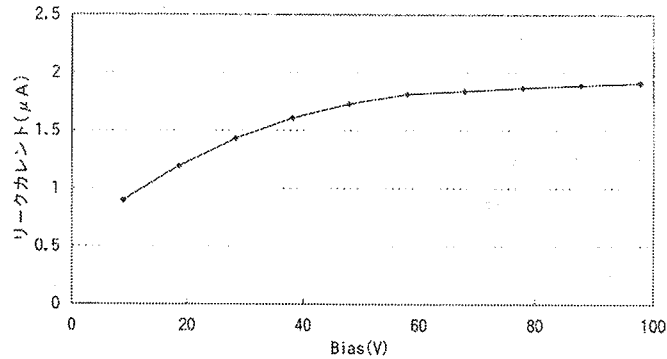


図 10: Bias vs. リークカレント (補正後、run#2)

るノイズパルス数をプロットしガウシアンでフィットさせた、その σ をランダムノイズレベルと定義した。そして、4通りの照射量の時にランダムノイズレベルを測定した。

ランダムノイズレベルは、SSDの本来の目的である位置検出の実験において、thresholdをいくりにするか決定する時に、用いられる値である。

この計測の回路図を図 11 に示す。(scaler は visual-scaler を用いた)

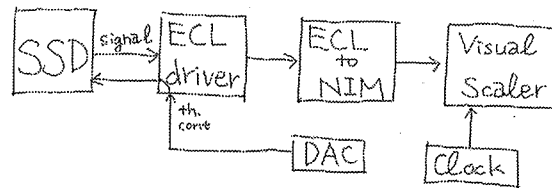


図 11: 回路図 (概略): ランダムノイズ測定

また、フィッティングの典型的な例を図 12 に示す。(フィットの際には 3 つの変数全てを毎回 free にした)

σ の単位はアンプのゲインを 160mV/fC と仮定して変換した。
[appendix A.4]

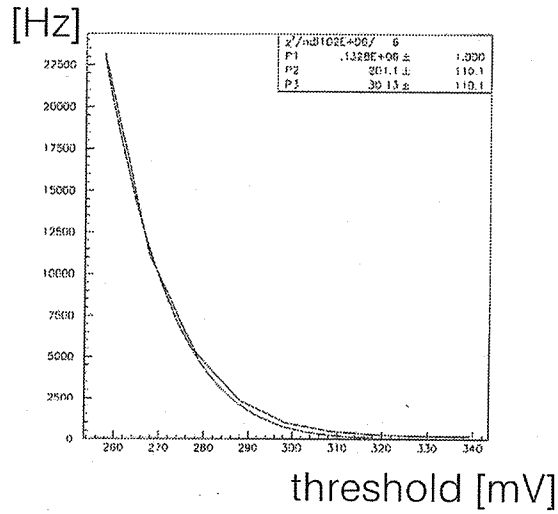


図 12: フィッティングの例：ランダムノイズ測定

(b) test-pulse-input によるノイズレベル

test-pulse-height を一定に保っておき、threshold を DAC で変化させて得られる occupancy-curve を積分ガウシアンでフィットさせたその σ を、この方法でのノイズレベルと定義した。そして各照射ごとに、この方法でノイズレベルを測定した。

この計測の回路図を図 13 に示す。(使用した pulser は ORTEC の Research Pulser (Model:448, output-impedance:100 Ω) である。TDC には LeCroy の 4291B, 4298, 4299 を用いた。)

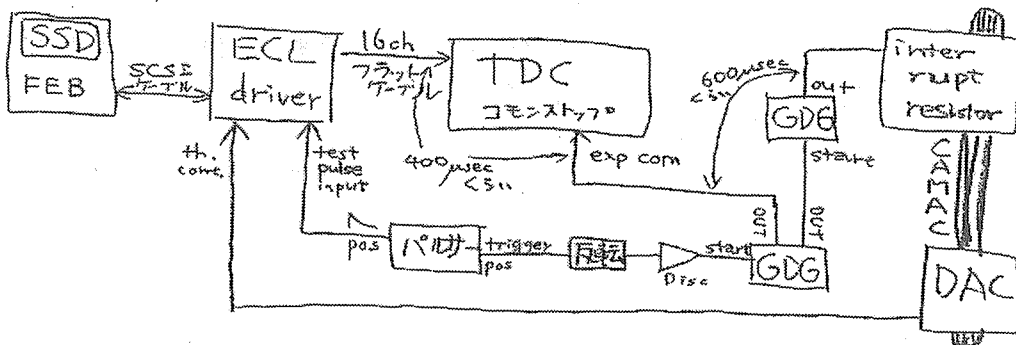


図 13: 回路図 (概略)：テストパルスによるノイズ測定

また、フィッティングの典型的な例を図14に示す。(フィットの際には入力パルス数のみ固定した。)

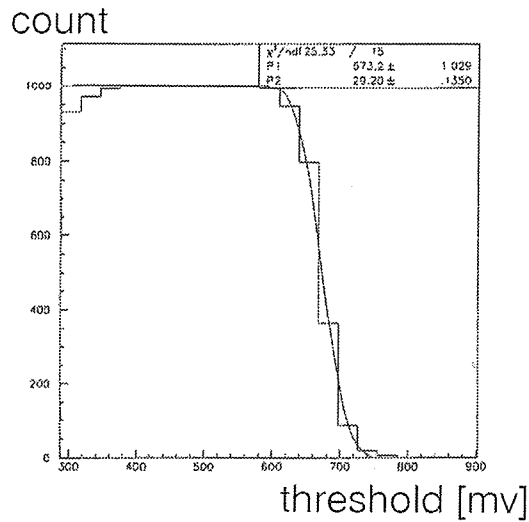


図 14: フィッティングの例：テストパルスによるノイズ測定

σ の単位はランダムノイズの場合と同様に、アンプのゲインを 160mV/fC と仮定して変換した。[appendix A.4]

3. efficiency(宇宙線による)

照射から 10 日後、照射した辺りのチャンネルと照射していない辺りのチャンネルで efficiency に違いが見られるかどうか、宇宙線で 4 日間データをためて、測定した。

ジオメトリを図 15 に、回路図を図 16 に示す。(TDC には LeCroy の 4291B, 4298, 4299 を用いた。)

但し、図 15 を見てわかるように、この実験で測定できる量は、相対的な efficiency である。

2.4 結果

1. リークカレント前述のように補正した、リークカレントの照射量に対する変化を図 17 に示す。

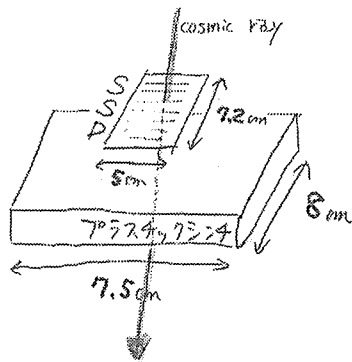


図 15: ジオメトリ : 相対 efficiency の測定

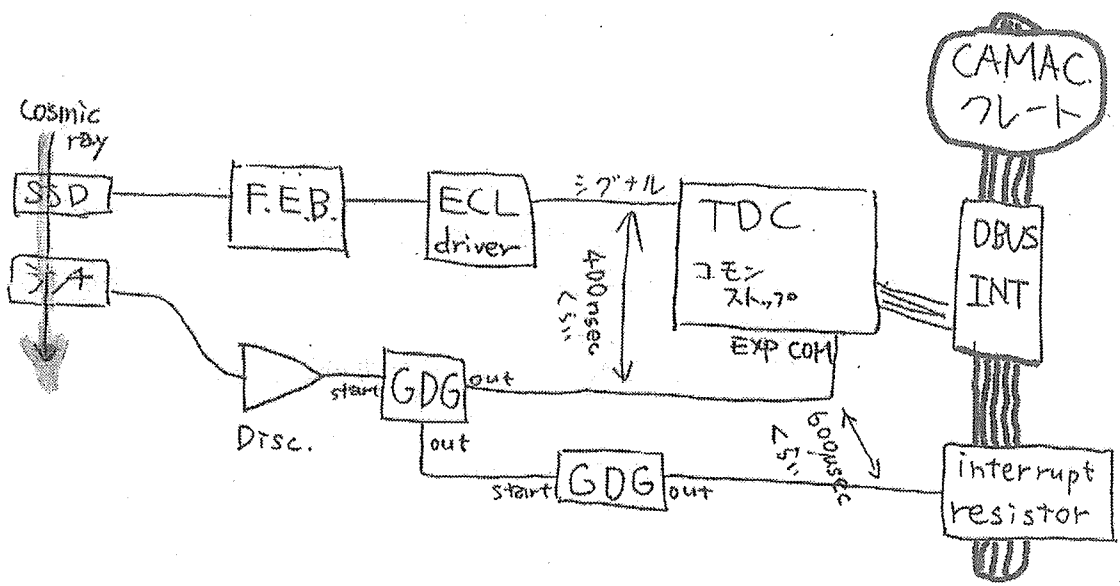


図 16: 回路図 (概略) : 相対 efficiency の測定

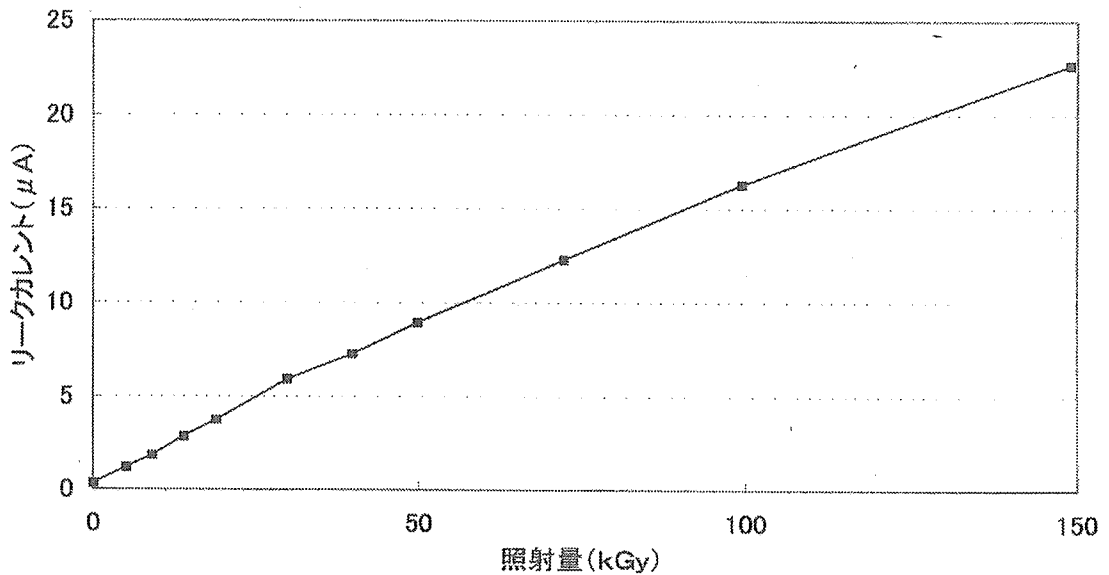


図 17: 照射量 vs. リークカレント (Bias70V : 補正後)

リークカレントは照射量に対して線形的に増加していることがわかる。

2. ノイズレベル

(a) ランダムノイズレベル

ランダムノイズレベルに対する結果を図 18 に示す。

また参考として、Bias 電圧が目盛で 70 V の時のデータを載せておく。(図 19)

ランダムノイズは 50K Gy の辺りまで増加し、その後飽和していることがわかる。

(b) test-pulse-input によるノイズレベル test-pulse-input によるノイズレベルは、図 20 のようになった。

test-pulse によってノイズレベルを測定する方法では、照射量とノイズレベルの相関が見られないことがわかる。

3. efficiency(宇宙線による) 宇宙線による相対 efficiency の計測結果は、図 21 の通り。但し、もともと 4 つの抜けチャンネルがあり、また、1 本

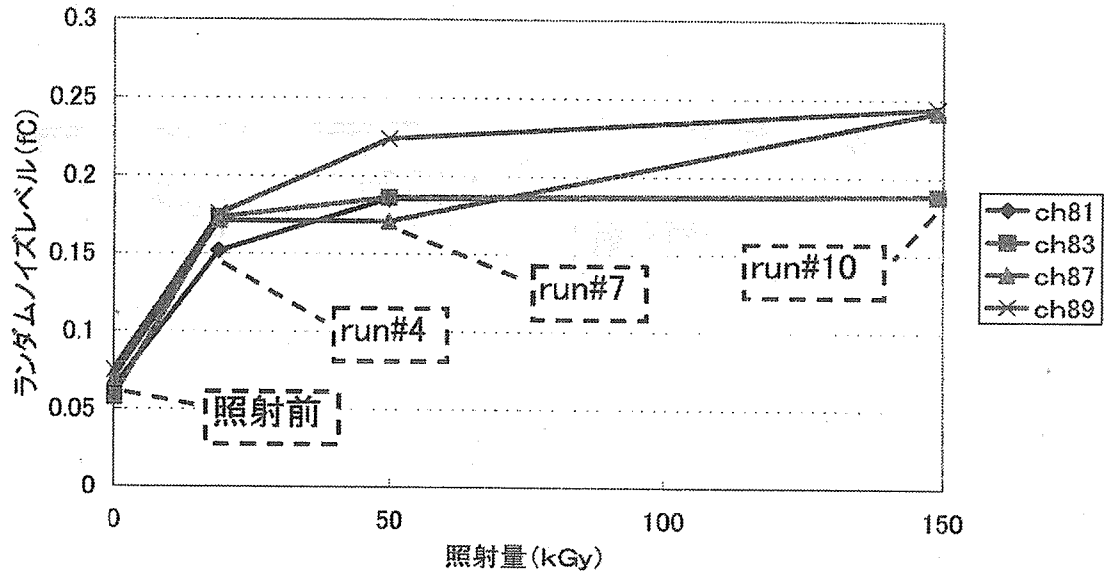


図 18: 照射量 vs. ランダムノイズレベル (Bias は目盛で 70V)

run#	照射量の合計 (kGy)	true Bias [V]	leak [μ A]
照射前	0.000	70	0.344
1	4.999	69	1.209
2	8.984	68	1.840
3	13.970	67	2.830
4	18.945	66	3.680
5	29.905	63	5.690
6	39.856	62	7.050
7	49.804	60	8.520
8	72.237	57	11.540
9	99.336	52	15.180
10	149.037	47	19.900

図 19: Bias 電圧が目盛で 70 V の時のデータ

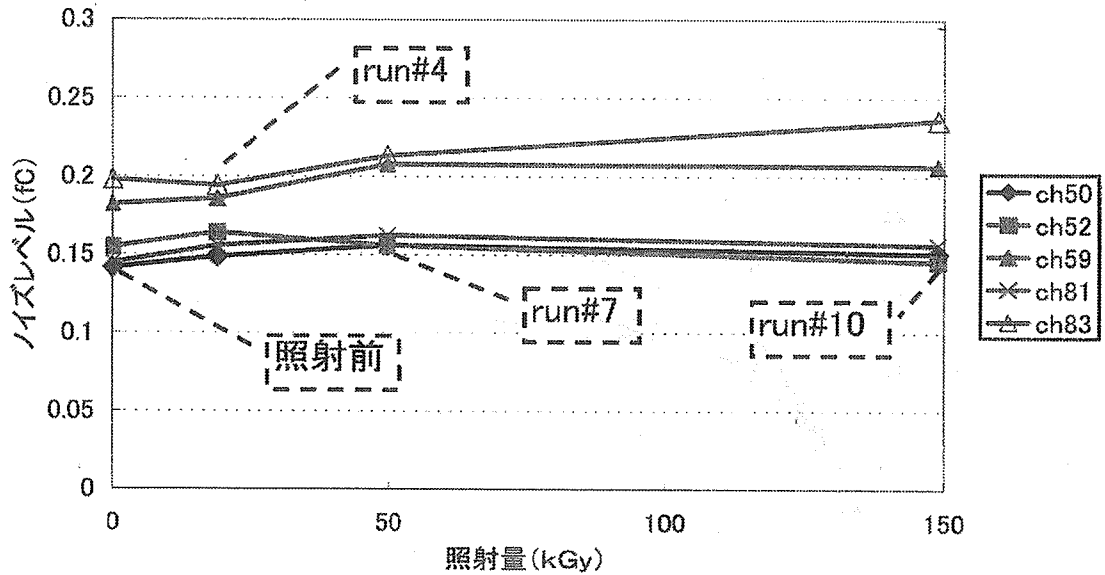


図 20: 照射量 vs. test-pulse-input によるノイズレベル (Bias は目盛で 70V)

立っているピークは TDC が壊れているところである。端の efficiency が低くなっているのは、プラスチックシンチレータの大きさと SSD の有感領域の大きさとが比較的近いからであろう。また、TDC によるカットはかけていない。

efficiency は目立った変化が見られないことがわかる。

2.5 まとめと考察

以上より、放射線ダメージを計測するもっとも簡便かつ適した方法は、リークカレントを見ることであるといえる。そして位置測定時の threshold を決めるときには、ランダムノイズスキャンの方が、test-pulse による方法よりも適していることがわかった。当初、test-pulse による方法でも放射線損傷のチェックや、threshold の決定が可能であると思われていたが、これらの目的に対しては適さないことがわかった。また、ここまでリークカレントなどが増加したにも関わらず、efficiency に目立った変化が見られなかったことは、この SSD の放射線に対する強さを表しているよう

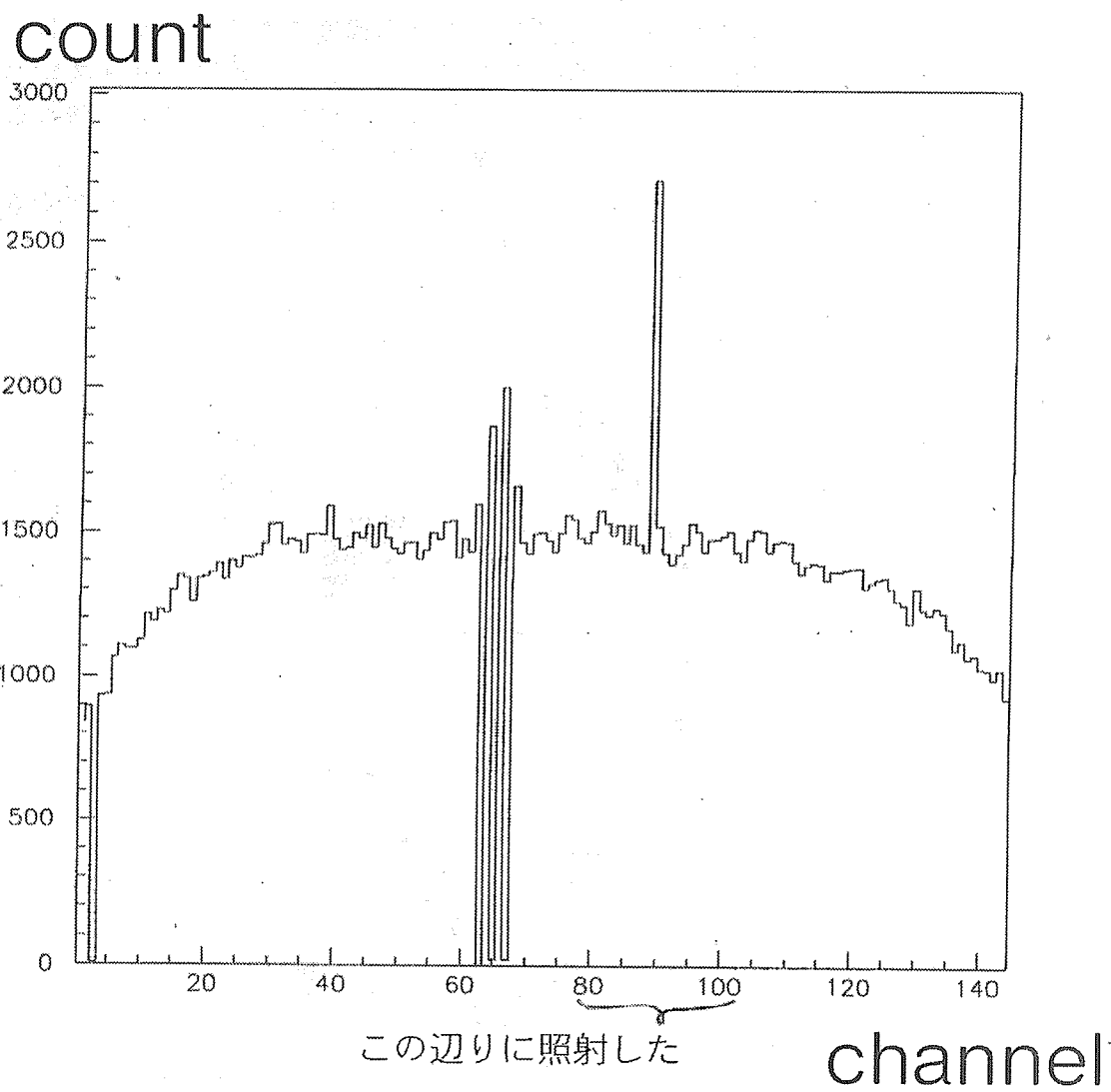


図 21: efficiency の変化 (相対的な)

にもみえる。しかし、照射した部分はもっと小さい範囲なので、今後その部分にしぼった efficiency の測定をするべきだと思われる。

ランダムノイズスキャンについては、チャンネル数も照射量に対するデータ数も少ないので、照射量 0kGy の時のそのチャンネルのノイズレベルがプリアンプの既知のノイズレベルと同程度であることから、特にそのときそこだけ何かおかしいことが起こっていたために、ノイズレベルが小さく見えていたと考えることもできる。これはなんとも見積もることができないので、今後の研究の課題であろう。

また、文献 [10] [13] によるとリークカレントは 50kGy 辺りで飽和することになっている。このグラフを図 22 に示す。

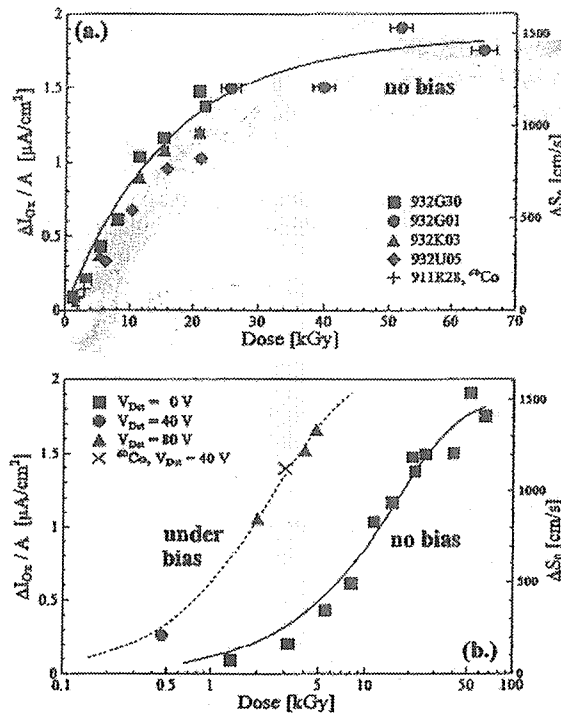


図 22: 表面生成電流の照射による変化 (Bias 電圧をかけて照射したものとかけずに照射したものがプロットしてある。左の軸は単位面積辺りの酸化膜損傷による表面生成電流の、右の軸は再結合速度のスケールである。)[13]

今回の実験結果との違いについては 2つの原因が考えられる。1つは

SSD の構造の違いである。文献 [12] の場合 n-type の MOS 構造検出器 (表面障壁型) に対する実験であるのに対し、今回の実験では p-n Diode 検出器を用いているからである。構造の違いは $SiO_2 - Si$ 界面 を流れる直流リークカレントの経路の違いをもたらす。文献 [12] で用いられた構造を図 23 に載せておく。これを見ると、高い Bias 電圧をかけるにしたがって空乏領域が MOS 構造の部分の下まで広がってくるのがわかる。この状態になって初めて $SiO_2 - Si$ 界面 の深い準位が生成-再結合中心として働くようになり、リークカレントに寄与してくるのである。このように文献 [12] で用いられた検出器では、リークカレントと $SiO_2 - Si$ 界面 の深い準位の関係やその生成理由が非常に明らかであるが、我々の p-n Diode 検出器ではその相関が明らかでない。

もう 1 つの原因として考えられるのは、このグラフの横軸が、酸化膜 (厚さ 220nm) に対する吸収線量でプロットしてあることであるが、Appendix A.1 より、 Si と SiO_2 の密度はほぼ等しいので、吸収線量には大きく影響しないであろう。

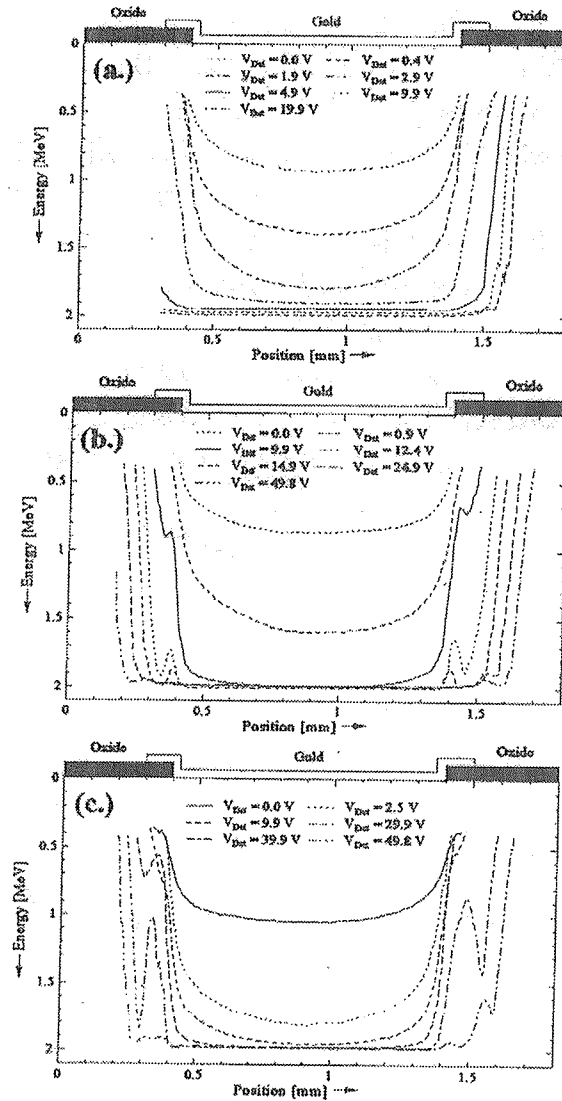


図 23: 表面障壁型の構造と照射による空乏領域の変化 [(a.) は照射前、(b.) は Bias 電圧をかけずに照射したもの、(c.) は Bias 電圧 70V をかけて照射したもの][13]

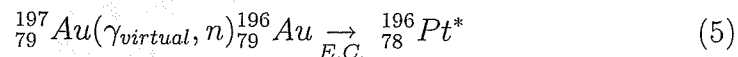
3 金の放射化分析

3.1 目的

2000年1月に核理研で行った、SSDの対放射線耐性実験では、F.C.を用いて放射線量を計測した。そのとき同時に金箔をビームライン上に置いて放射化し、別室でゲルマニウム検出器を使って γ 線を計測した。この実験の目的はF.C.での測定と放射化分析での測定が、矛盾しないでもっともらしいか確かめることである。

3.2 放射化分析について

放射化させたのは、Au-foil $2\text{cm} \times 2\text{cm} \times 50\ \mu\text{m}$ である。各照射ごとに金箔を取り換えて、Ge検出器で γ 線の数を計測した。注目する γ 線は、355.684[KeV]である。その反応式と崩壊図を図24に示す。[3]



また、文献によって反応断面積を推定し、実験によって求めた反応断面積と比較する。以下その方法を述べる。

3.3 解析方法

3.3.1 文献による反応断面積の推定

バーチャルフォトンフラックス [2]

バーチャルフォトンフラックスは以下の式で定義される。

$$\frac{\delta^3\sigma}{\delta E_e' \delta \Omega_e' \delta \Omega_n} = \Gamma \left[\frac{\delta\sigma_T}{\delta\Omega_n} + \varepsilon \frac{\delta\sigma_L}{\delta\Omega_n} + \varepsilon \frac{\delta\sigma_P}{\delta\Omega_n} \cos(2\phi_n) + \sqrt{2\varepsilon(1+\varepsilon)} \frac{\delta\sigma_I}{\delta\Omega_n} \cos(\phi_n) \right] \quad (6)$$

$$\Gamma = \frac{\alpha}{2\pi^2 Q^2} \frac{E_\gamma}{1 - \varepsilon} \frac{E_e'}{E_e} \quad (7)$$

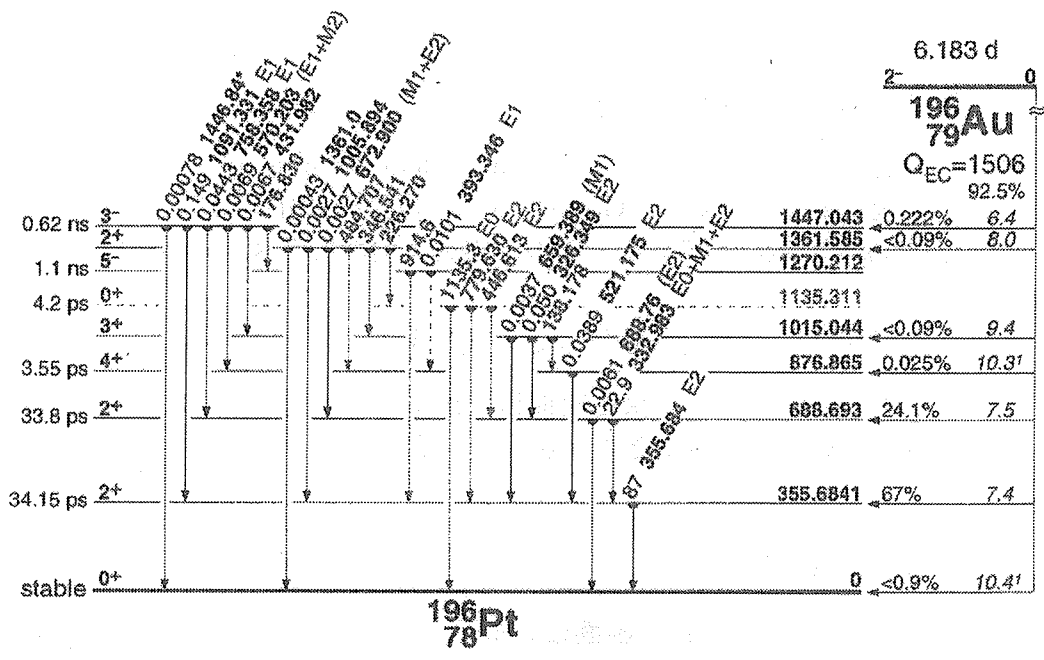


図 24: Au の崩壊図 [3]

$$\varepsilon = \frac{1}{1 + \frac{2|q|^2}{Q^2} \tan^2\left(\frac{\theta_e}{2}\right)} \quad (8)$$

ここで各変数は図 25 に示されている量である。また、cross section σ は、散乱後の電子のエネルギー E'_e と立体角 Ω'_e 、散乱された中性子の立体角 Ω_n に関しての三重微分断面面積を計算し、T,L,P,I の 4 つの項の和とバーチャルフォトンフラックス Γ の積で表される。T,L,P,I はそれぞれ、横、縦、分極、干渉を表す。

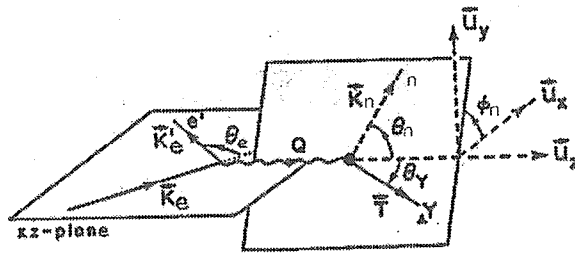


図 25: (γ, n) 散乱とその変数 [2]

ここで $K_e(K'_e)$ は入射 (散乱) 電子の運動量である。また、 Q は 4 元移行運動量である。

また、バーチャルフォトンフラックスの m_e^2 の 1 次の項の近似は、

$$\Gamma = \frac{\alpha}{4\pi^2\omega} \left[\frac{E^2 + E'^2}{2E^2} \left(\frac{m_e^2\omega^2}{4E^2E'^2} + \sin^2\frac{\theta_e}{2} \right)^{-1} - \frac{E'}{E} \frac{m_e^2\omega^2}{4E^2E'^2} \left(\frac{m_e^2\omega^2}{4E^2E'^2} + \sin^2\frac{\theta_e}{2} \right)^{-2} - \frac{(E + E')^2}{4E^2} \left(\frac{\omega^2}{4EE'} + \sin^2\frac{\theta_e}{2} \right)^{-1} \right] \quad (9)$$

この角度分布を図 26 に示す。

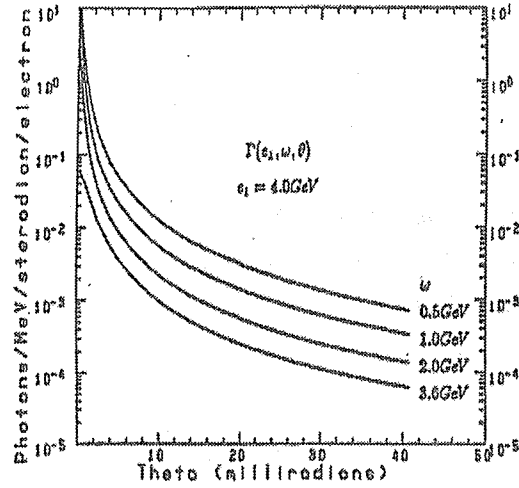


図 26: バーチャルフォトンフラックスの角度依存性 [2]

(γ, n) 反応の反応断面積 (実光子)[1]

B.L.Berman らの実験によって、金の原子核の (γ, n) 反応の反応断面積 (実光子について) のエネルギー依存性がわかっている。(図 27)

反応断面積の推定

以上の二つをもとに、金の原子核に 200MeV の電子が入射したときの全断面積を推定する。前述のように実光子の反応断面積のデータしかないので、今回は、バーチャルフォトンフラックスの定義式の第 1 項のみを使って、

$$\frac{\delta^2 \sigma}{\delta E'_e \delta \Omega'_e} = \frac{\delta^2 \sigma}{\delta E' \delta \Omega'} = \Gamma \sigma_T \quad (10)$$

$$\omega = E - E' \quad (11)$$

という関係式を用いた。積分すると、

$$\sigma = \int \int \delta E' \delta \Omega' \Gamma(\omega, \theta_e) \sigma_T(\omega) \quad (12)$$

$$= \int_{\omega=0}^{\omega=\infty} \int_{\theta_e=0}^{\theta_e=\pi} \delta \omega \delta \theta_e 2\pi \sin \theta_e \Gamma(\omega, \theta_e) \sigma_T(\omega) \quad (13)$$

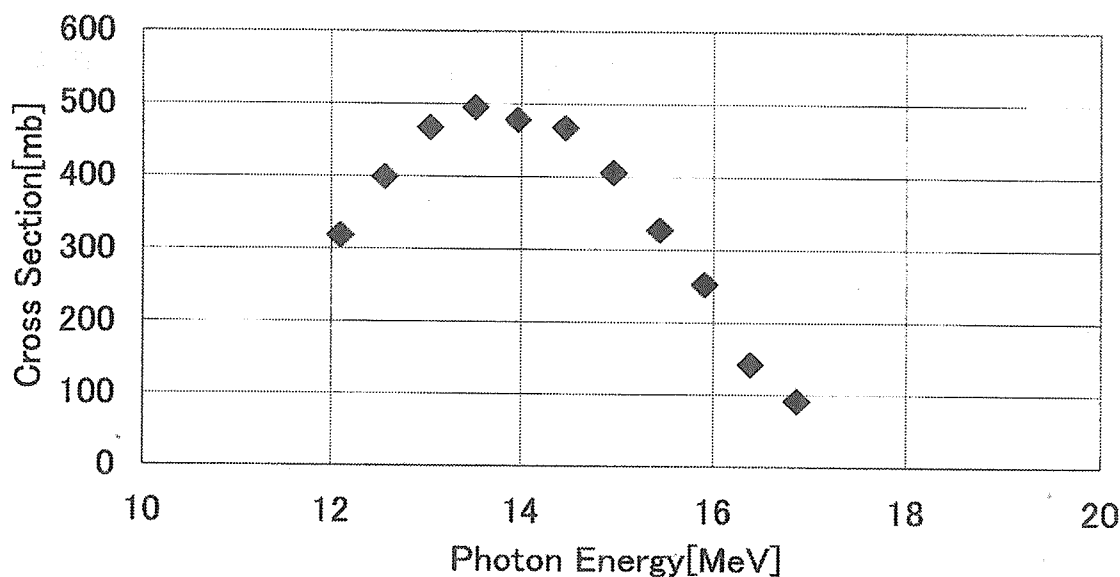


図 27: 実光子での (γ, n) 反応断面積の実験値 [1]

となり、全反応断面積が求まる。 $\sigma_T(\omega)$ は、図 27 をブライト・ウィグナー共鳴公式でフィッティングを行ってエネルギー依存性を求めた。積分は区分求積法によって行った。角度は $0 \sim \pi$ rad \cdot 1000 分割、移行エネルギーは $0 \sim 40$ MeV \cdot 4000 分割で積分した。結果は

$$\sigma = 0.0814 [\text{mb}/e] \quad (14)$$

であった。

3.3.2 実験による反応断面積の解析方法

実験によって直接出てくるデータは、照射してからある時間たった後に一定時間 Ge 検出器で計測したときのエネルギースペクトルと、F.C. によって測られた照射量である。また、このスペクトルから、355KeV 付近に注目してバックグラウンドを引くと、Ge 検出器が検出した目的の γ 線の数 (N_{exp}) がわかる。この作業は自動化されているものを利用した。エネルギースペクトルの典型的な例を図 28 に示す。

以下、これらのデータから反応断面積を求める解析方法を述べる。

2000/01/30 00:41:56

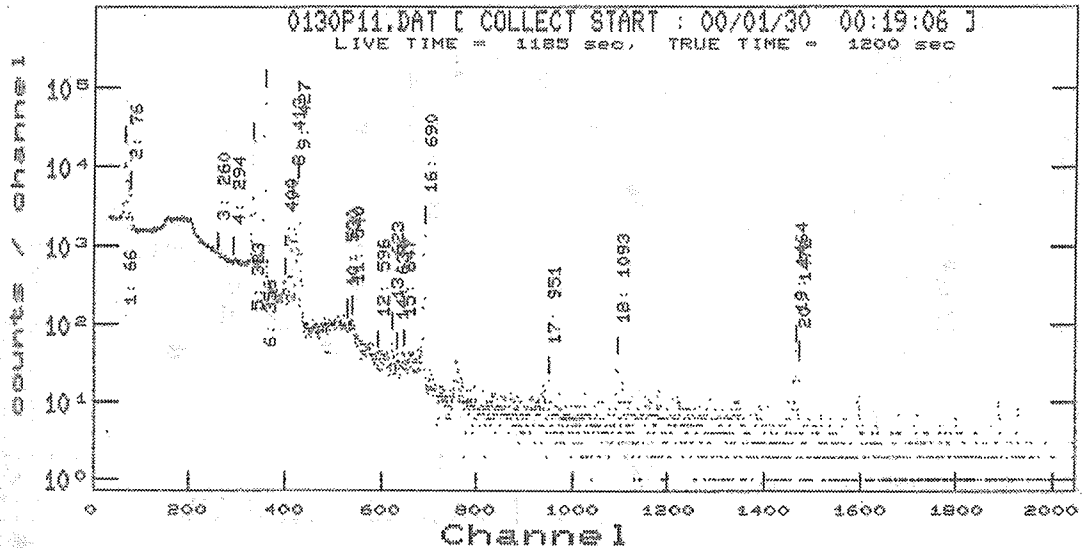


図 28: エネルギースペクトル

照射によって出来た ${}^{196}_{78}\text{Pt}$ の数 N は、

$$N = N_0 \exp\left(-\frac{t}{T_{1/2}} \ln 2\right) \quad (15)$$

で表される。ここで t は照射直後を原点とする時間、 $T_{1/2}$ は ${}^{196}_{78}\text{Pt}$ の半減期、 N_0 は照射直後の ${}^{196}_{78}\text{Pt}$ の数である。 γ 線の数を一統して扱うために、照射直後に 1 時間 Ge 検出器で計測したときの γ 線の計測数に補正をする。補正後の個数 N_{cal} は、

$$N_{cal} = \varepsilon \{N(0) - N(1[\text{hour}])\} \quad (16)$$

$$= \varepsilon N_0 \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{1[\text{hour}]}{T_{1/2}} \ln 2\right) \right\} \quad (17)$$

$$\varepsilon N_0 = \frac{N_{exp}}{\left\{ \exp\left(-\frac{t_1}{T_{1/2}} \ln 2\right) - \exp\left(-\frac{t_2}{T_{1/2}} \ln 2\right) \right\}} \quad (18)$$

但し、 ε を検出効率 (別途測定)、 t_1 を計測開始時、 t_2 を計測終了時とする。

次に、F.C. で計測された照射量と N_{cal} をプロットし比例係数を求める。

$$N_{cal}[\text{count}] = \alpha[\text{count}/C]F.C.[C] \quad (19)$$

すると反応断面積は、

$$\sigma_{(e,n)}[\text{cm}^2/\text{e}] = \frac{N_n[n]}{N_{Au}[\text{Au}/\text{cm}^2]N_e[\text{e}]} = \frac{N_0}{N_e}/N_{Au} \quad (20)$$

$$= \frac{\alpha[\text{count}/C]}{\varepsilon} \frac{e[C/\text{e}]M[\text{g}/\text{mol}]}{\left\{1 - \exp\left(-\frac{1[\text{hour}]}{T_{1/2}[\text{hour}]} \ln 2\right)\right\} \rho[\text{g}/\text{cm}^3]l[\text{cm}]N_A[\text{count}/\text{mol}]} \quad (21)$$

但し、

$$N_{Au}[\text{Au}/\text{cm}^2] = \frac{\rho[\text{g}/\text{cm}^2]l[\text{cm}]N_A[\text{count}/\text{mol}]}{M[\text{g}/\text{mol}]} \quad (22)$$

$$\frac{N_0}{N_e}[n/\text{e}] = \frac{\alpha[n/C]e[C/\text{e}]}{\varepsilon \left\{1 - \exp\left(-\frac{1[\text{hour}]}{T_{1/2}[\text{hour}]} \ln 2\right)\right\}} \quad (23)$$

ここで、 N_n はたたき出された中性子の数、 N_{Au} は単位面積辺りの金原子の数、 N_e は入射電子の数である。また、金の密度 $\rho = 19.3[\text{g}/\text{cm}^3]$ 、金箔の厚さ $l = 0.005[\text{cm}]$ 、アボガドロ数 $N_A = 6.02 \times 10^{23}[\text{count}/\text{mol}]$ 、質量数 $M = 197[\text{g}/\text{mol}]$ 、素電荷 $e = 1.6 \times 10^{-19}[\text{C}/\text{e}]$ 、半減期 $T_{1/2} = 6.183 \times 24[\text{hour}]$ である。

これらを代入すると全断面積は、以下のようにになる。

$$\sigma_{(e,n)}[\text{cm}^2/\text{e}] = \frac{\alpha[\text{count}/C]}{\varepsilon} \times 1.164 \times 10^{-37}[(\text{cm}^2/\text{e})/(\text{count}/C)] \quad (24)$$

$$\sigma_{(e,n)}[\text{mb}/\text{e}] = \frac{\alpha}{\varepsilon} \times 1.164 \times 10^{-10}[\text{mb}/\text{e}] \quad (25)$$

この α と ε を実験で求めて反応断面積を計算し、推定されたものと比較する。

3.4 実験

3.4.1 放射化と測定

金箔は $2\text{ cm} \times 2\text{ cm} \times 50\mu\text{m}$ のものを利用した。200 MeV の電子を $8\text{ mm}\phi$ の面積に照射し、照射量は F.C. で測定した。その他、ジオメトリや照射量の詳細は、2.3.1. を参照。

照射後4日間、別室で4度 γ 線を計測した。計測時間は各試料ごとに10分(または20分)である。 γ 線の計測には、n-type, プレナ型の Ge 検出器(相対検出効率 30%)を使用した。金箔は5 mm 四方程度の大きさになるように折り畳んで小さくした。また、立体角が最も大きくなるように Ge の結晶に金箔を出来るだけ近づけた。また、 γ 線の計測には自動化されたシステムを利用した。

3.4.2 Ge 検出器の efficiency 測定

efficiency の測定には標準線源を使用した。ジオメトリは金箔の場合と同じである。注目した γ 線は、 ^{137}Cs から出る 661.7 KeV と、 ^{60}Co から出る 1173 KeV, 1333KeV の3本である。この標準線源の情報を図 29 に示す。

この3本の γ 線について、半減期を考慮してエネルギー校正曲線を求め、355.684 KeV での efficiency を求める。

3.5 結果

F.C. で計測した照射量と補正された放射化量 N_{cal} (3.3.2. 式 (16),(17) 参照) をプロットすると、図 30 になった。

$\alpha = 7.8859 \times 10^{10} [\text{count}/C]$ であった。(誤差?)

また、検出効率のエネルギー依存性は [graph: 校正曲線] になった。縦軸は検出効率を ln スケールで、横軸は γ 線のエネルギーを ln スケールで

Reference time: 1200 GMT on 1 November 1992

Parent radionuclide	Gamma-ray energy (keV)	Gamma-rays per second	Random uncertainty	Systematic uncertainty	Overall uncertainty
Cadmium-109	88.03	758	± 0.2 %	± 3.5 %	± 3.7 %
Cobalt-57	122.1	705	± 0.1 %	± 2.1 %	± 2.2 %
Cerium-139	165.9	875	± 0.2 %	± 1.4 %	± 1.6 %
Mercury-203	279.2	2304	± 0.1 %	± 2.3 %	± 2.4 %
Tin-113	391.7	2395	± 0.1 %	± 4.6 %	± 4.7 %
Strontium-85	514.0	4633	± 0.5 %	± 1.8 %	± 2.3 %
Caesium-137	661.7	2878	± 0.2 %	± 2.4 %	± 2.6 %
Yttrium-88	898.0	7280	± 0.1 %	± 3.8 %	± 3.9 %
Cobalt-60	1173	3962	± 0.3 %	± 0.6 %	± 0.9 %
Cobalt-60	1333	3966	± 0.3 %	± 0.6 %	± 0.9 %
Yttrium-88	1836	7715	± 0.1 %	± 3.7 %	± 3.8 %

图 29: 標準線源

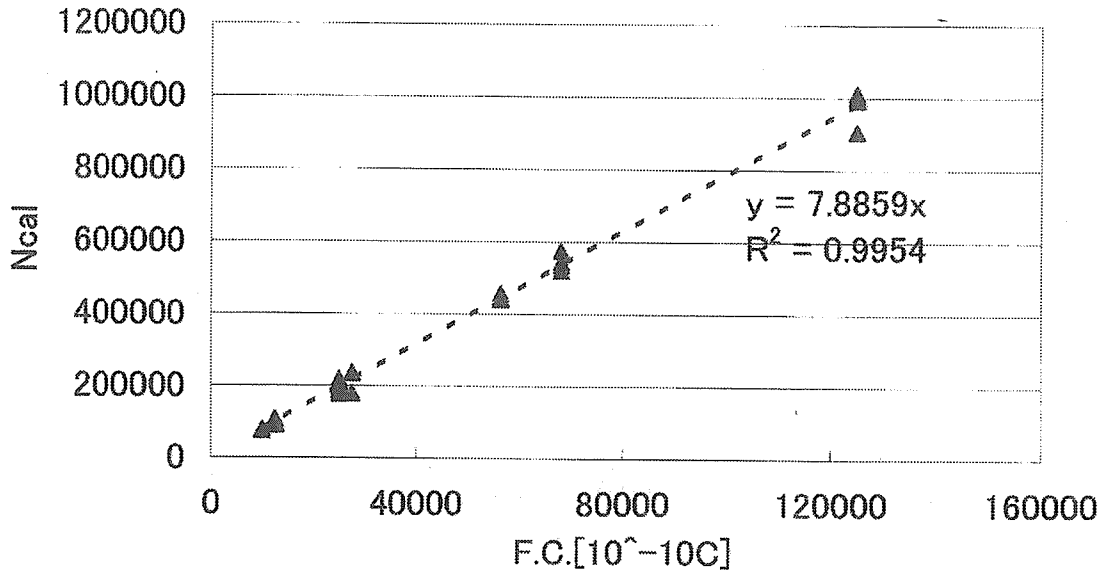


図 30: F.C. vs. Au-Ncal

とっている。

よって、355.684 KeV において、検出効率 ϵ は 5.355 % (誤差?) であることがわかった。

以上より、式 (25) を適用すると反応断面積は、171.328[mb/e](誤差?) になった。

3.6 まとめと考察

まとめると、反応断面積の推定値が 0.0814[mb/e]、実験値が 171.328[mb/e] である。この 2000 倍程の差について考察する。

まず、一番大きな原因として考えられることは、鉛のコリメータで電子が全てカットされていてハローが無いと仮定したことによると思われる (2.3.1. 参照)。実際は電磁シャワーによって電子の数が増えていて、コリメータの直後に張った金箔にその電子が当たっていると思われるからである。また、この電子の多くは F.C. に到達しない。この効果は実験による断面積を過大に見積もらせる。

次に考えられる原因は、推定値を計算するときにバーチャルフォトンフラックスの仮想項を無視したことである。この効果は推定値を小さく

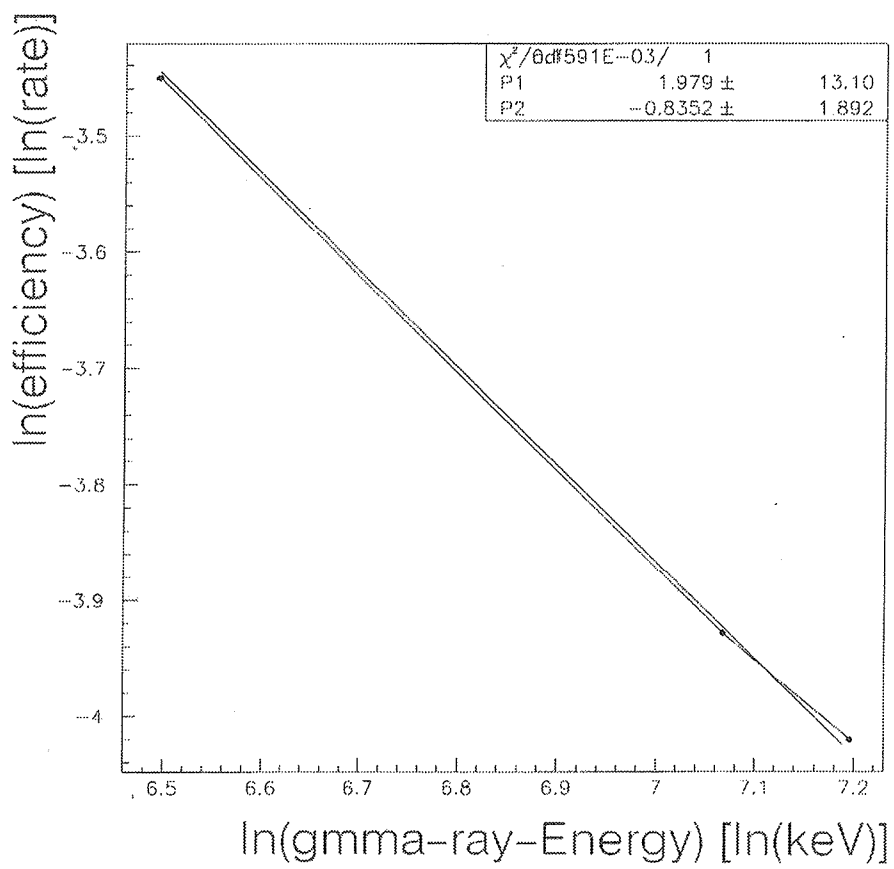


図 31: Ge 検出器の efficiency-energy 校正曲線 $\ln \epsilon = p1 + p2 \times \ln E$

見積もらせる。

これらの効果によって、推定値と実験値は近付くがその効果の大きさを見積もるまでは解析が至らなかった。矛盾はしていないが、正しい照射量が F.C. によって測られていたかどうかの確認には至らなかった。

以上より、金箔による放射化分析はこの実験のセットアップで SSD への照射量を確認することに対しては向いていないことがわかった。また、SSD に対する損傷を考える際、電磁シャワーによるハローも考慮に入れるべきであると言えるだろう。

4 今後の対放射線耐性実験について

if enable to write...

現在、考え中...

必要か？ 不必要か？ 行うなら何を調べるべきか？ 実験の実現可能範囲と、その注意点は？

電源の内部抵抗を考慮して電圧をかける、内部抵抗の大きいデジボルの用意、ランダムノイズスキャンがたくさんできるか？、ハローの影響と見積もり、光洩れに注意、リークカレントの不安定さを考慮にいたしたリークカレントの測定方法(目盛を合わせてからの時間など)、efficiencyの変化を実験の前後で絶対値で測るべき、セルフアニールも見えるとよい、etc.

A SSDの諸情報

A.1 Si-Detector の一般的な特性

* Si の特性 [5] [6] [7]

Atomic number Z : 14

Atomic weight A : 28.1

Density : 2.33[g/cm^3]

Dielectric constant(relative) : 11.9

Intrinsic resistivity(300K) : 230000[Ωcm]

Energy gap(300K) : 1.1[eV]

Energy gap(0K) : 1.21[eV]

Intrinsic concentration : 1.45×10^{10} [cm^{-3}]

Average energy for creating an e-h pair : 3.6[eV]

Electron mobility (300K) : 1350[cm^2/Vs]

Hole mobility (300K) : 480[cm^2/Vs]

Work function : 4.85[V]

Electron Affinity : 4.05[V]

* Al の特性 [5]

Work function : 4.28[V]

* SiO_2 の特性 [14]

密度 : 2.2[g/cm^3]

結晶構造 : アモルファス

比誘電率 : 3.9

バンドギャップ : 9[eV]

* ダイオード型検出器の空乏層の厚さ [8]

$$d = 0.55 \times \sqrt{\rho V_B} \quad (26)$$

ここで、 $d[\mu m]$ は空乏層の厚さ、 $\rho [\Omega cm]$ はシリコンの Intrinsic Resistivity、 $V_B [V]$ はバイアス電圧である。

* ENC(equivalent noise charge) [8]
アンプをつけて読みだした時のノイズは次式で表される。

$$ENC = \sqrt{K \times \tau + \frac{k \times T}{2 \times g_m} C^2 \frac{1}{\tau}} \quad (27)$$

ここで、 C は検出器自体の容量 C_g ($C_g = \epsilon S/d$ 、 S は面積、 d は空乏層の厚さ、 ϵ は誘電率) とアンプの入力容量 C_i と浮遊容量 C_o の総和である。 K は温度の増加につれて大きくなりリーク電流に比例する。 g_m はアンプのコンダクタンス、 k はボルツマン定数、 T は絶対温度である。 τ はアンプの時定数であり、ENC が最も小さくなるように選ばれる。また、ENC は 1000 以下が望ましい。

A.2 Tohoku SSD specification

- * strip pitch : 0.500[mm]
- * effective area : 72[mm] × 50[mm]
- * number of channels : 144
- * thickness : 0.325[mm] ± 0.015[mm]
- * SiO_2 thickness of coupling: 220[nm]
- * p_+ strip width : 0.360[mm]
- * Al electrode width : 0.352[mm]
- * Load capacitance : leq 20[pF]

- * AC coupling capacitance : ≤ 100 [pF] (will be about 2000[pF])
- * Bias resistor polySiO₂ resistor : $10M \pm 5$ [Ω]
- * Maximum bias voltage : 150[V]max (full depletion voltage will be 100[V]max)
- * Hamamatsu wire-bonds the SSD to the PCB on which preamp chips and connectors are mounted.
- * The PCB will be supplied through the Houston group.
- * The etalaze condition for the PCB is,
 18micron copper
 Ni thicker than 5 micron
 soft Au gilt thicker than 0.5 micron or use bondable PCB which we will provide to Hamamatsu.
- * All the proses for radiation-hardness described in NIM 383('96) 166 will be included as far as they can be done in the standard proses.(Guard rings around the SSD will be included.)
- * Both AC couple and DC couple pads required. Wire bonding is only for the AC pad.
- * NG channel should be less than 1 % for each SSD.Hamamatsu tells us which channel is missing, if any.
- ** Abobe specification is based on the strip width of 350 micron.
- ** Definision of NG channel : AC coupling capacitance cannot hold 20V, AC Al electrode short circuit or disconnection

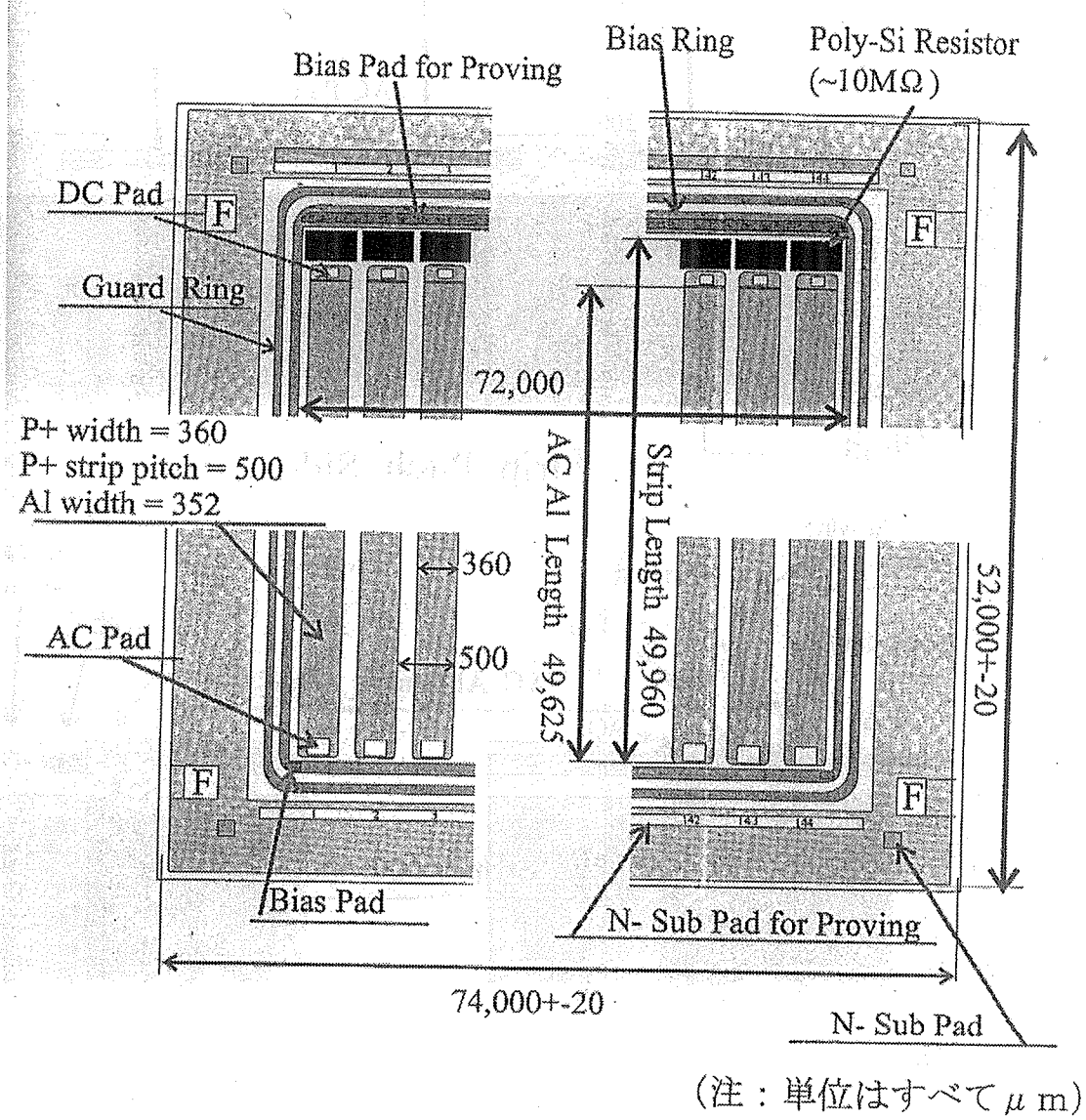
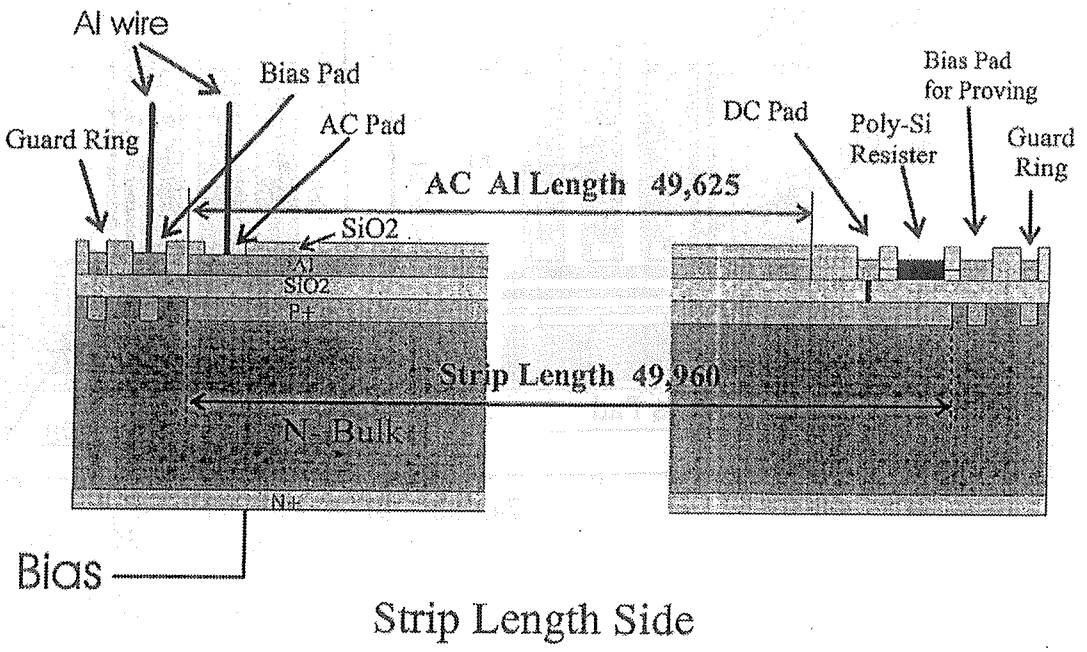
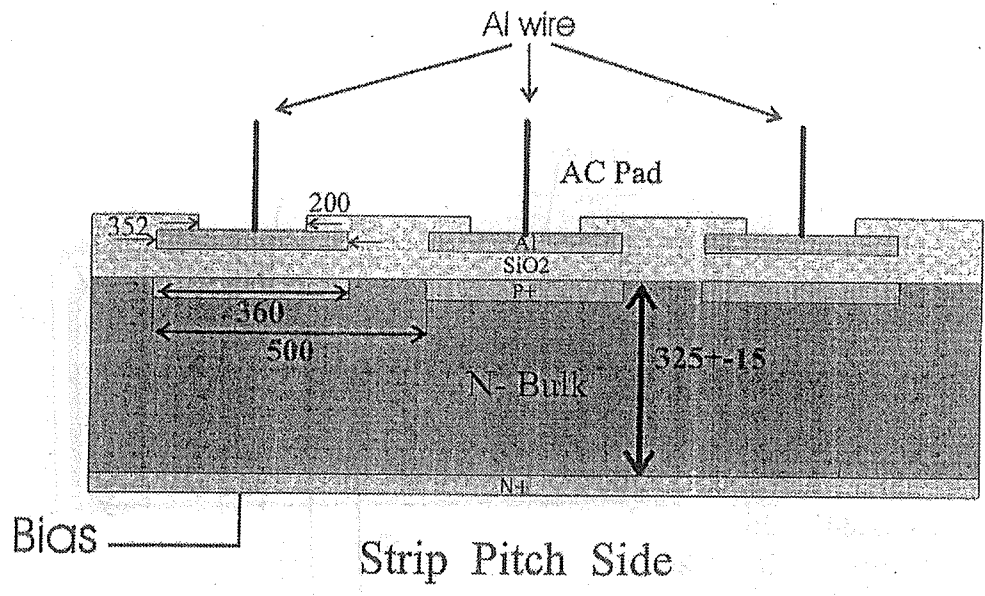


図 32: SSD 全体図 [9]



(注：単位は全て μm)

図 33: SSD 側面図 [9]

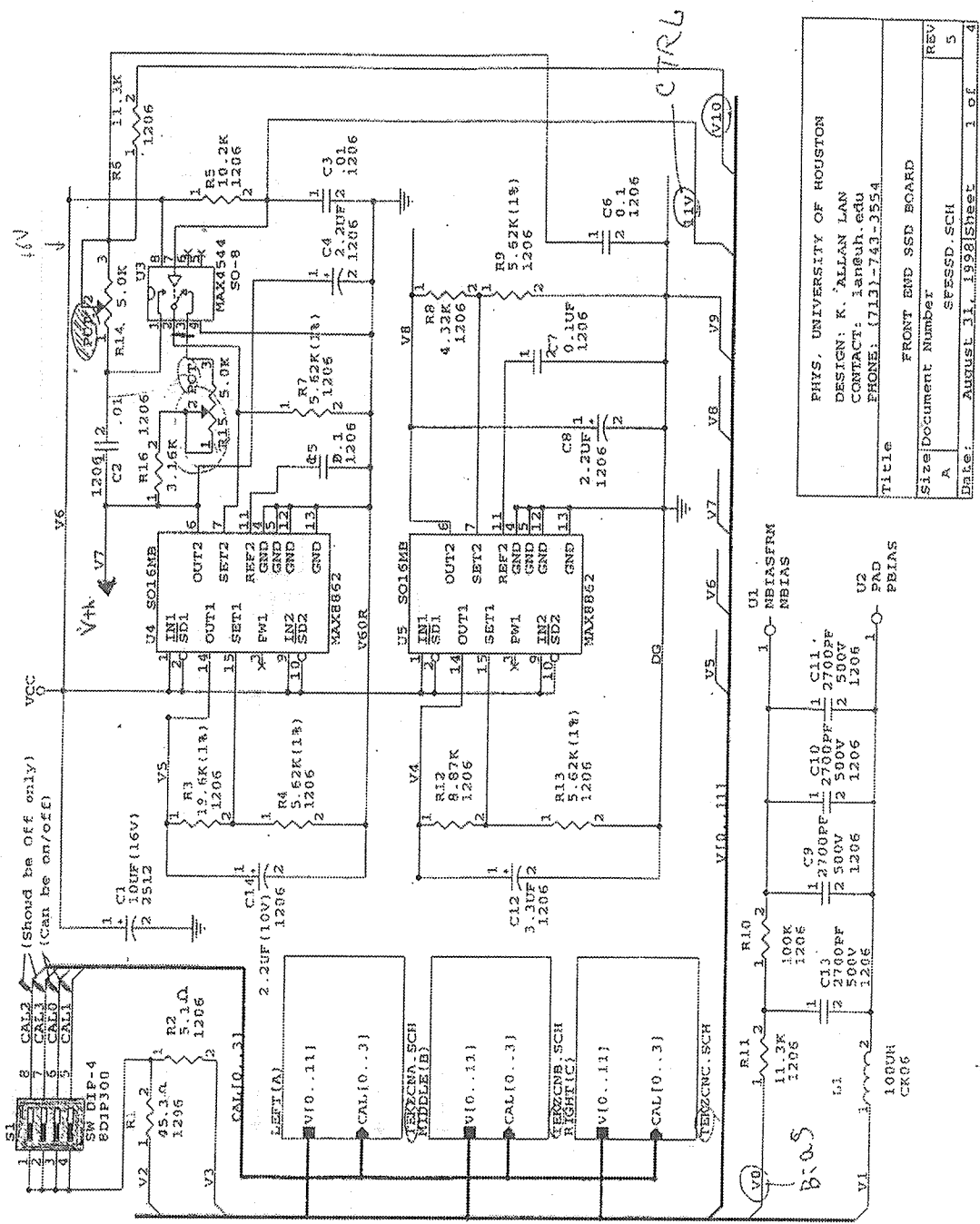


図 34: FEB 回路図 プロトタイプ C

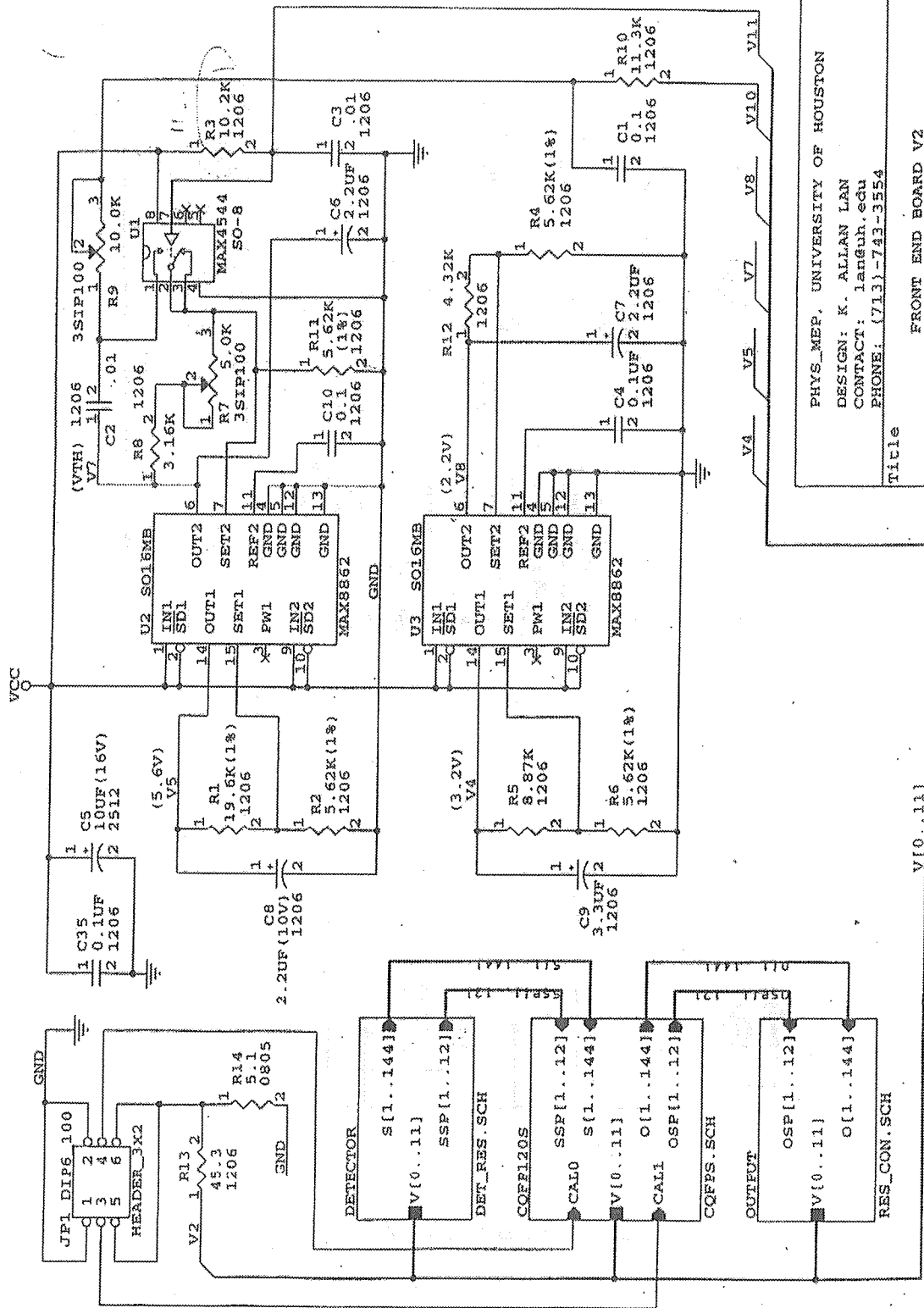


図 35: FEB 回路図 最新バージョン

PHYS_MEP, UNIVERSITY OF HOUSTON DESIGN: K. ALLAN LAN CONTACT: languh.edu PHONE: (713)-743-3554
Title
Size Document Number
FRONT END BOARD V2
REV

A.3 TEKZ

TEKZは64チャンネルのプリアンプ、シェイパー、ディスクリミネータを1つのチップに含んだ、高密度集積回路である。

TEKZ 1チャンネルの回路図を図36に載せる。[11] この回路が1個のTEKZに64個入っていることになる。

また、シェイピングタイムは32[ns]、出力パルス幅は40[ns]、出力パルスの高さは800[mV]、消費電力は2.5[mW/ch]である。簡略化した回路図を図37に載せた。[9]

A.4 その他

if enable to write...

It's almost unable to write this section. Probably, this will be cut.

アンプのゲイン

光洩れによる影響

Bias 電圧をかけてからリークカレントがしばらくの時間、不安定であることについて

セルフアニール効果

Bias v.s. Noise-Level

B 電源の内部抵抗とその周辺

B.1 内部抵抗の測定

今回使用した電源、ORTECのDetector Bias Supply (Model:428)の内部抵抗を測定した。測定には、 $1M\Omega(\pm 0.1\%)$ の抵抗器とKEITHLEYのDigit Multimeter 2001を用いた。使用したレンジは10Vで、INPUT-RESISTANCEは $10G\Omega$ 以上である。以下に測定結果と回路図を示す。

図39のg-b、g-wはある目盛での測定量であり、それぞれグラウンドと黒端子間、グラウンドと白端子間の電位差である。また、g-wは外部 $1M\Omega$ 抵抗器にかかっている電圧でもある。その他の量は目盛とg-bとg-wの3つの量から計算したものである。計算式は以下の通り。

白端子と黒端子間の電位差: diff.

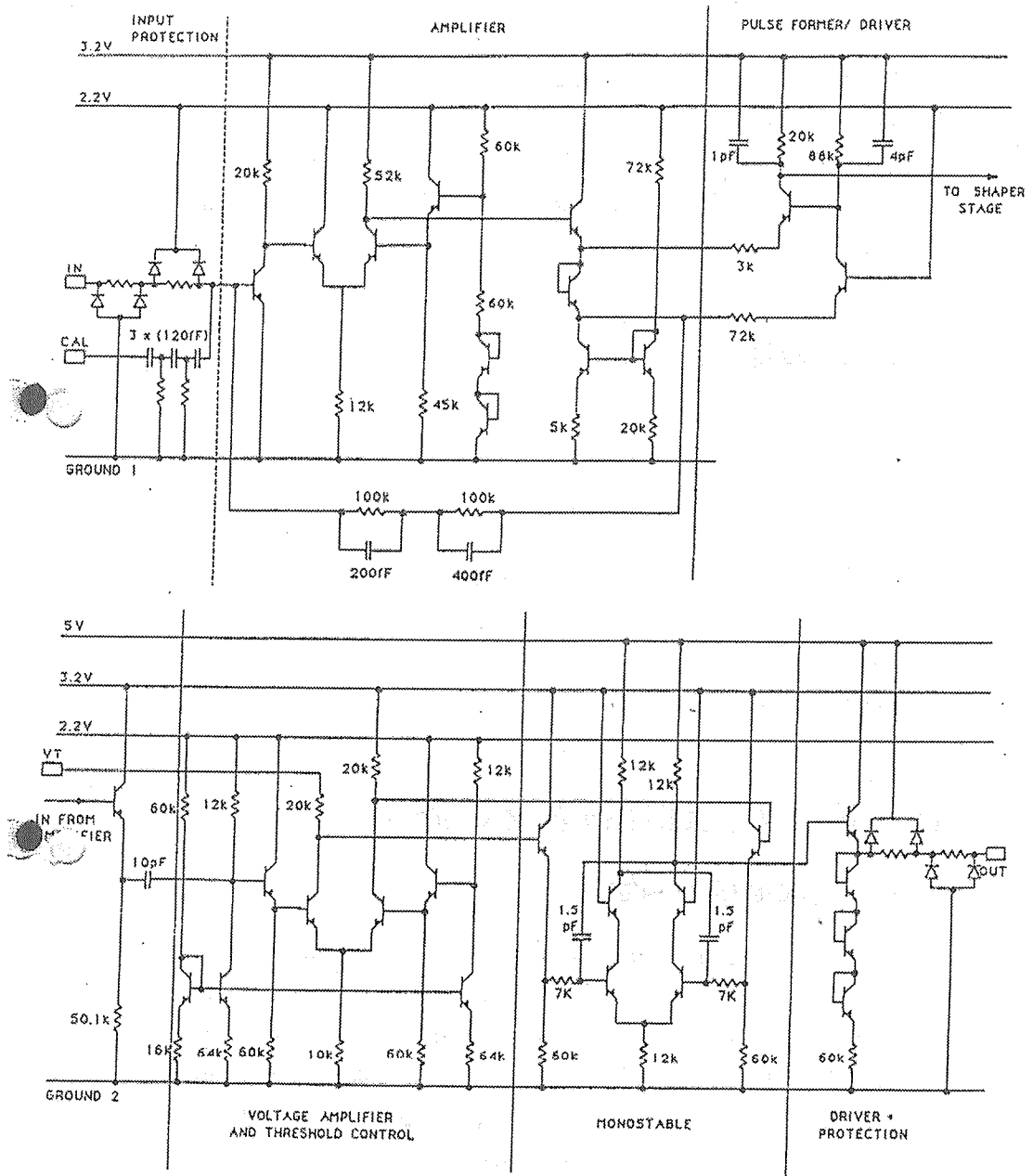


図 36: TEKZ 1 チャンネルの回路図 [15]

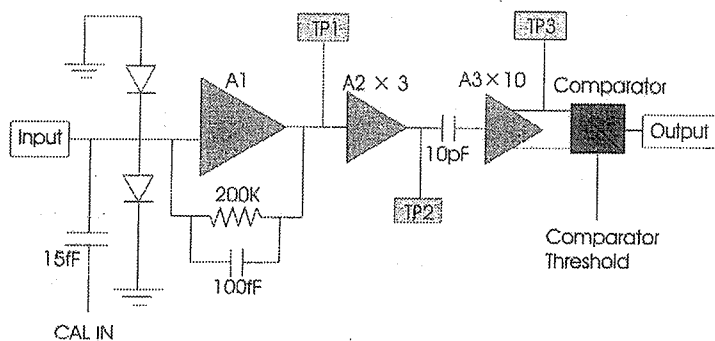


図 37: TEKZ 1 チャンネルの簡略化した回路図 [9]

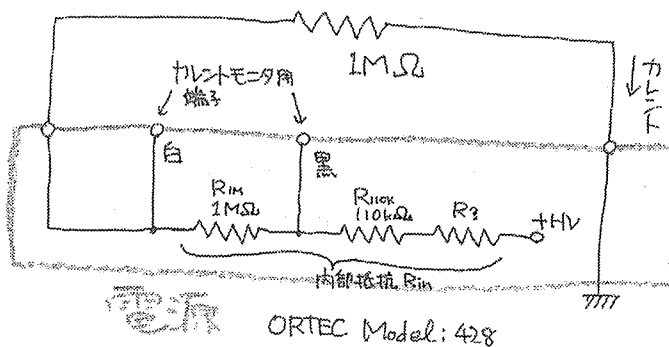


図 38: 電源の内部抵抗測定回路図

目盛り [V]	4	6	8	10
g-b [V]	3.654	5.644	7.458	9.278
g-w [V]	1.828	2.824	3.719	4.642
diff. [V]	1.826	2.82	3.739	4.636
I [A]	1.83E-06	2.82E-06	3.74E-06	4.64E-06
V-Rin [V]	2.172	3.176	4.281	5.358
Rin [ohm]	1189485	1126241	1144959	1155738

図 39: 測定結果

$$\text{diff.}[V]=(g-b)[V]-(g-w)[V]$$

回路を流れる電流: I

$$I[A]=\text{diff.}[V]/1000000[\Omega]$$

内部抵抗 R_{in} にかかっている電圧: $(V-R_{in})$

$$(V-R_{in})[V]=(\text{目盛り})[V]-(g-w)[V]$$

内部抵抗 R_{in} : R_{in}

$$R_{in}[\Omega]=(V-R_{in})[V]/I[A]$$

以上より 4,6,8,10V での R_{in} を平均すると、内部抵抗は $1154k\Omega$ であることがわかる。これは、既知の、黒端子-白端子間の抵抗 $1M\Omega$ と それと直列に入っている抵抗 $110k\Omega$ を足すと、 $1110k\Omega$ となり適度な値である。

つまり洩れ電流が十分に小さいことを仮定して作られた電源であることがわかる。逆に、洩れ電流が大きくなると電源の内部抵抗を考慮しなければならないと言える。

B.2 電圧の補正と電流値の決定方法

今回の実験のバイアス電圧の補正には上記の Appendix B.1 で求めた、電源の内部抵抗 ($1154k\Omega$) を用いることにした。つまり以下の式によって電源の目盛の値と実際に SSD にかかっている電圧の値の補正を行った。

$$V_{true} = V_{scale} - R_{in} \times I \quad (28)$$

$$I = \frac{V_{monitor}}{R_{monitor}} \quad (29)$$

ここで、 V_{true} は実際に SSD にかかっている電圧、 V_{scale} は電源の目盛の値、 R_{in} は電源の内部抵抗 ($1154k\Omega$)、 I はそのときに回路に流れている電流値、 $V_{monitor}$ は電流測定用端子間電圧、 $R_{monitor}$ は電流測定用端

子間抵抗 ($1M\Omega$) である。ただし、この計算では電流測定用端子間電圧を測るときの電圧計の内部抵抗は無大であると仮定している。実際は内部抵抗は $10M\Omega$ 程度であると推測されるので、求められた電流値には 10% 程度の誤差がある。

またある照射量に対しての洩れ電流値の決定は次のようにして行った。まず、各照射ごとに測定した、 V_{scale} に対する I の変化を使い、上記の方法で V_{true} に対する I の変化 (下に典型的なグラフを示す) に補正する。次に、各照射ごとに $V_{true} = 70V$ の点での I を求め、その照射量での洩れ電流値とした。この決定にはそれぞれ 70V に最も近い 2 点を選び線形近似を行った。

C データの所在

if enable to write...

CAMAC-scaler を使ってランダムノイズスキャンを行うプログラム etc.

謝辞

橋本研の皆さん、核理研の皆さん、小林研の皆さん、いろいろとありがとうございました。(あとでしっかり書き直すべし)

卒論提出遅くなってすみません。

参考文献

- [1] B.L.Berman and R.E.Pywell and S.S.Dietrich and M.N.Thompson and K.G.McNeill and J.W.Jury
Absolute photoneutron cross sections for Zr,I,Pr,Au,and Pb
Physical Review C, vol.36, num.4
- [2] Ed V. Hungerford
Experimental Consideration in Electromagnetic Production of Hypernuclei
Progress of Theoretical Physics Supplement No.117, 1994
- [3] Richard B. Firestone
Table of Isotopes
A Wiley-Interscience Publication
- [4] Glenn F. Knoll
放射線計測ハンドブック 第2版
日刊工業新聞社発行
- [5] 岸野 正剛
半導体デバイスの物理
丸善株式会社
- [6] G. Lutz and A. S. Schwarz
Silicon Devices for Charged-Particle Track and Vertex Detection
Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 1995. 45:295-335
- [7] W. R. Leo
Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments 2nd Edition
Springer-Verlag
- [8] 丹羽 公雄
固体位置検出器
放射線 Vol. 20, No.2(1994)
- [9] 三好 敏喜
修士論文 (e,e'K+) 反応によるハイパー核分光用シリコン・ストリッ

プ検出器の開発
平成10年 東北大学

- [10] R. Wunstoff et al.
Radiation Hardness of Silicon Detectors: Current Status
IEEE NS 44 (1997)806.
- [11] E.Barberis et al.
A Fast Shaping Amplifier-Comparator Integrated Circuit for Silicon Strip Detectors
IEEE Nuclear Science Symposium, Orlando, FL, October 27-31,1992
- [12] Cheryl J. Dale et al.
HIGH ENERGY ELECTRON INDUCED DISPLACEMENT DAMAGE IN SILICON
IEEE NS 33 (1988) 1200
- [13] R. Wunstoff et al.
Damage-induced surface effects in silicon detectors
Nucl. Instr. and Meth. A377 (1996) 290
- [14] 山本 晃永、齊藤 憲一、中村 光廣、丹羽 公雄 他
両面ストライプ型シリコン半導体放射線検出器の開発
名古屋大学離学部／先端技術共同研究センター 平成元年～3年度
- [15] E. Barberis et al.
A Low Power Bipolar Amplifier Integrated Circuit for the ZEUS Silicon Strip System
Nucl. Phys. B(Proc. Suppl.) 32 (1993) 513