

HP-Ge半導体検出器による γ 線の位置検出

東北大学 原子核物理
関 陽子

平成14年4月

目次

1	目的	3
2	原理	4
2.1	位置測定の原理	4
2.2	HP-Ge半導体検出器	4
3	simulation	5
3.1	検出器中の電界	5
3.2	信号の波形	6
4	測定方法	10
4.1	測定の Setup	10
4.2	測定回路	12
5	γ 線の collimation の結果	13
6	測定結果	14
6.1	エネルギー分解能	14
6.2	パルス波形測定結果	14
6.3	位置の変化とパルス波形	16
6.4	simulation との比較	20
6.5	解析	21
7	まとめ	26

目次

1	原子核の静止系	3
2	実験室系	3
3	Ge検出器への γ 線の入射	4
4	Ge検出器の有感体積中の電界	6
5	パルス波形を導出するための図	7
6	電界強度とキャリア速度の関係	8
7	$V_d = 1600V, V = 2000V$ として計算した場合の出力パルス波形	9
8	$V_d = 900V, V = 2000V$ として計算した場合の出力パルス波形	10
9	測定の Setup	11
10	測定回路	12
11	collimateした γ 線による位置変化	13
12	^{137}Cs のエネルギースペクトル	14
13	パルス波形データ	15
14	Ge2-2($V_d = 1600V, V = 2000V$)のパルス波形測定結果	16
15	Ge1-1($V_d = 900V, V = 2000V$)のパルス波形測定結果	17
16	Ge2-1($V_d = 1600V, V = 2000V$)のパルス波形測定結果	17
17	Ge2-2のパルス波形測定結果	18
18	Ge1-1のパルス波形測定結果	19
19	Ge2-1のパルス波形測定結果	19
20	simulationとの比較	20
21	simulationのパルス波形($V_d = 1600V, V = 2000V$)	21
22	パルス波形のfitting(Ge2-2:10mmのデータ)	22
23	パルス波形のfitting結果(Ge2-2: $V_d = 1600V, V = 2000V$)	23
24	パルス波形のfitting結果(Ge1-1: $V_d = 900V, V = 2000V$)	24
25	パルス波形のfitting結果(Ge2-1: $V_d = 1600V, V = 2000V$)	24
26	パルス波形のfitting結果	25

1 目的

速い速度 ($\beta \geq 0.4$) で飛ぶ励起した原子核の状態を知りたいと思っても、その原子核はすぐに γ 線を放出して安定なものへ変わってしまう。最初の原子核励起状態を調べる為には、 γ 線放出後の原子核と放出 γ 線を調べることになる。放出された γ 線のエネルギー E_C を測定するとき、ドップラー効果 ((1) 式) により γ 線の放出方向 θ_C によって実験室系で測定されるエネルギー E_L が変化する。

$$E_L = \frac{E_C}{\gamma(1 - \beta \cos \theta_L)} \quad (1)$$

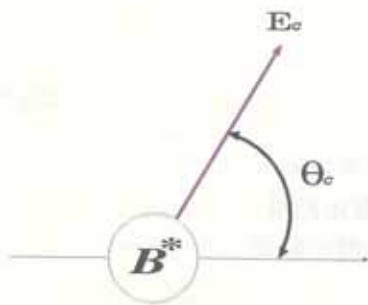


図 1: 原子核の静止系

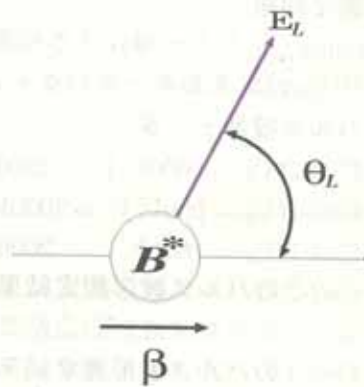


図 2: 実験室系

この変化はかなり大きく、

$$E_L = \begin{cases} \frac{E_C}{\gamma(1-\beta)} & (\theta = 0^\circ) \\ \frac{E_C}{\gamma} & (\theta = 90^\circ) \\ \frac{E_C}{\gamma(1+\beta)} & (\theta = 180^\circ) \end{cases} \quad (2)$$

となる。 γ 線のエネルギー E_C を求めるには、実験室系での γ 線のエネルギー E_L と粒子の運動方向に対する放出角 θ_L の両方を測定する必要がある。

θ_L の測定精度とエネルギー分解能の関係は

$$\left(\frac{\Delta E_C}{E_C}\right)^2 = \left(\frac{\beta \sin \theta_L}{1 - \beta \cos \theta_L}\right)^2 (\Delta \theta_L)^2 \quad (3)$$

であり、 $\theta_L = 90^\circ$ では

$$\frac{\Delta E_C}{E_C} = \beta \Delta \theta_L \quad (4)$$

$\beta = 0.4$ の時、1MeV の γ 線に対して $\Delta E_C = 10\text{keV}$ (FWHM) とするとこれを活かすには $\sigma_\theta \sim 10\text{mrad}$ となり、ターゲットから 50cm 離して置いた場合、 $\sigma_x \sim 5\text{mm}$ の位置分解能が必要となる。

γ 線の位置検出に関しては、いろいろな試み (GRETA、NSU方式、CNS方式など) がなされている。今回は高エネルギー陽子測定のために製作された Stack型の PlanarHP-Ge検出器を用いて、 γ 線の位置検出を試みた。

2 原理

2.1 位置測定の原理

Ge半導体検出器では出力パルスの立上り部分の波形が、有感体積中に電子正孔対が作られる場所 (つまり γ 線の入射位置) によって、変化する。特に平板型検出器では、次に述べるように厚さ方向の位置 x によってパルス波形の立上りの部分が変わる。そこでパルス波形を観測することによって γ 線の入射位置を測定する。位置測定は一方向のみなので、実際には平板型 Ge結晶の側面から γ 線を入射し、平板の厚さ方向の位置 x を測定することにより γ 線の放出角 θ_L を測定する。

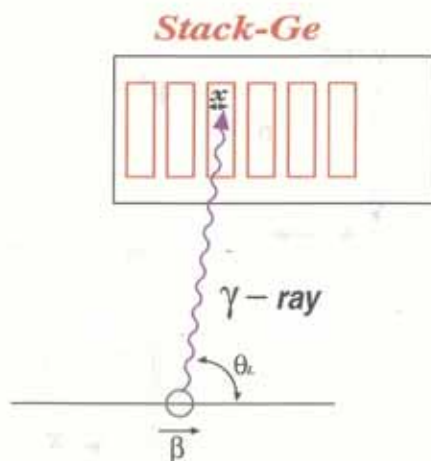


図 3: Ge検出器への γ 線の入射

2.2 HP-Ge半導体検出器

半導体検出器は p型半導体と n型半導体を結合して、そこに逆バイアス電圧をかけることによって、空乏領域 (有感領域) をひろげて透電離箱として動作させる検出器である。荷電粒子 (1次放射線あるいは2次粒子) が検出器を通過する際、電子と衝突して電子正孔対をつくり、生成された電子と正孔は結晶にかけられた電界によって電極にあつめられ、パルス信号を出力する。HP-Ge半導体検出器は不純物濃度が低いので空乏層が広くなり、過力の大きな粒子 (高エネルギー荷電粒子や γ 線) も検出できる。Geの性質を表1に示す。

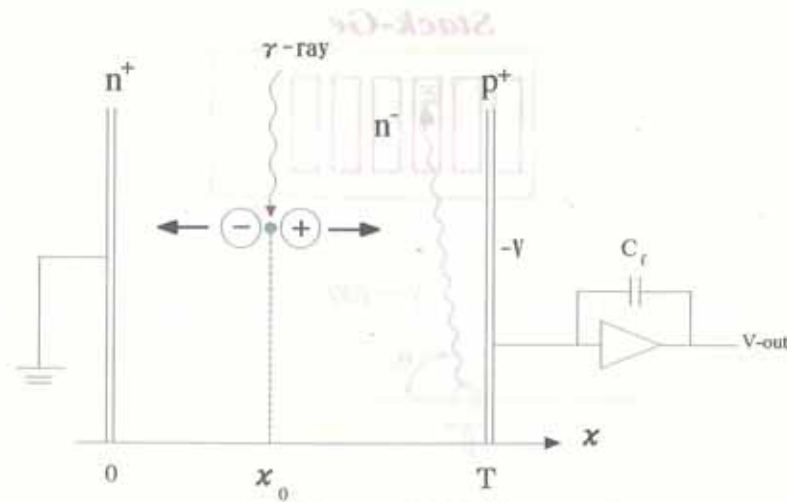
原子番号	32
密度 (300K)	5.32 gcm ⁻³
比誘電率	16
電子正孔対あたりのエネルギー (77K)	2.96 eV

表 1: ゲルマニウムの性質文献 [1]

3 simulation

文献 [1]

3.1 検出器中の電界



ブレナ型 (平板) 検出器の電界 $E = -\frac{d\varphi}{dx}$ は電荷密度 ρ 、誘電率 ϵ として

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (5)$$

を境界条件

$$\varphi(d) - \varphi(0) = -V \quad (6)$$

で解いて求めると

$$\mathbf{E}(x) = \frac{\rho}{\epsilon}x + \frac{V}{d} - \frac{\rho d}{2\epsilon} \quad (7)$$

となる。 d は空乏層の厚さ、 V はバイアス電圧である。ちょうど検出器全体が空乏層化する電圧を V_d 、検出器の厚さを T とすると

$$V_d = \frac{\rho T^2}{2\epsilon} \quad (8)$$

なので

$$E(x) = \frac{2V_d}{T^2}x + \frac{V - V_d}{T} \quad (9)$$

実際に使用した検出器の場合で計算すると図4となる。

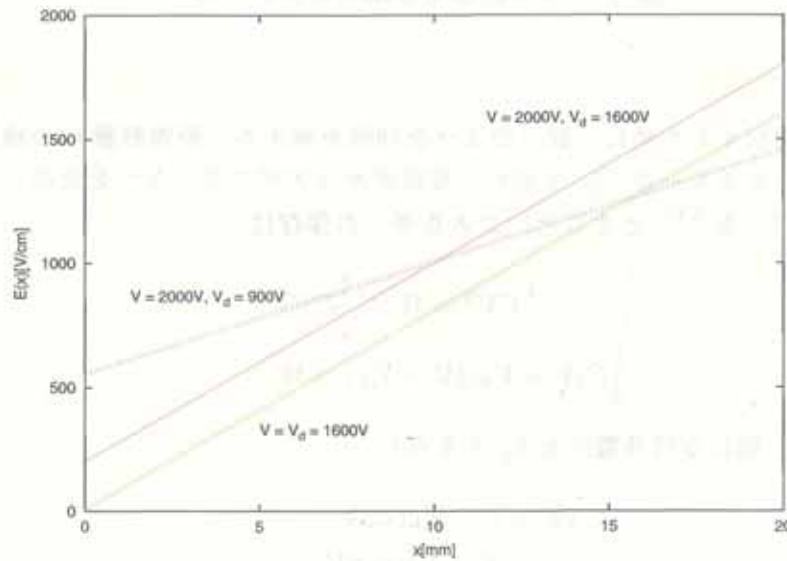


図 4: Ge 検出器の有感体積中の電界

3.2 信号の波形

図 3.1 のように入射した γ 線が $x = x_0$ で相互作用して $\pm q$ の電荷を持つ hole-electron 対ができたとする。正電荷 q が電位差 $d\phi$ の間を運動したときに吸収するエネルギー dW は

$$\frac{dW}{dx} = -q \frac{d\phi}{dx} = qE(x) \quad (10)$$

であり、 x_0 から x までの運動で吸収するエネルギーは

$$\begin{aligned} W &= \int_{x_0}^x dE \\ &= q \left\{ \frac{V_d}{T^2} (x^2 - x_0^2) + \frac{V - V_d}{T} (x - x_0) \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

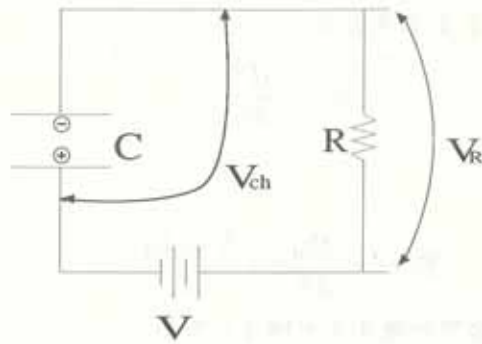


図 5: パルス波形を導出するための図

である。

パルス波形を導出するために、図 5 のような回路を考える。静電容量 C の検出器に最初蓄えられていたエネルギーは $\frac{CV^2}{2}$ であり、電荷キャリアがエネルギーを吸収したあとの残りの貯蔵エネルギーを $\frac{CV_{ch}^2}{2}$ とすると、エネルギーの保存は

$$\frac{1}{2}CV^2 = W + \frac{1}{2}CV_{ch}^2 \quad (12)$$

$$\frac{1}{2}C(V + V_{ch})(V - V_{ch}) = W \quad (13)$$

ここで R の両端に現れる信号電圧を V_R とすると

$$V_R = V - V_{ch} (\ll V) \quad (14)$$

$$V + V_{ch} \simeq 2V \quad (15)$$

であるので、(13) 式に代入して

$$V_R = \frac{W}{CV} \quad (16)$$

誘導電荷を Q_h とすると

$$\begin{aligned} Q_h &= (\text{最初にたまっていた電荷}) - (\text{残りの電荷}) \\ &= C(V - V_{ch}) \\ &= CV_R \\ &= \frac{W}{V} \end{aligned} \quad (17)$$

誘導電荷には electron の運動によるものと hole の運動によるものがあるので、パルスの発達はそれらの重ね合わせで書ける。

$$Q(t) = Q_e + Q_h \quad (18)$$

よって、電荷積分型 PreAmp からの出力パルスは

$$V_{\text{out}} = -\frac{Q(t)}{C_f} \quad (19)$$

となり、 t_e, t_h をそれぞれ electron と hole が電極に到達するまでの時間とすると

$$V_{\text{out}}(t) = \begin{cases} -\frac{q}{C_f V} \left\{ \frac{V_d}{T^2} (x_h^2 - x_e^2) + \frac{V-V_d}{T} (x_h - x_e) \right\} & (t < t_e, t < t_h) \\ -\frac{q}{C_f V} \left\{ \frac{V_d}{T^2} x_h^2 + \frac{V-V_d}{T} x_h \right\} & (t_e < t < t_h) \\ -\frac{q}{C_f V} \left\{ \frac{V_d}{T^2} (T^2 - x_e^2) + \frac{V-V_d}{T} (T - x_e) \right\} & (t_h < t < t_e) \\ -\frac{q}{C_f} & (t > t_e, t > t_h) \end{cases} \quad (20)$$

ここで x_e, x_h は electron と hole のある位置であり、時間の関数である。
電界強度とキャリア速度には図 6 の関係があるのでこれを (21) 式で fit して速度を決める。

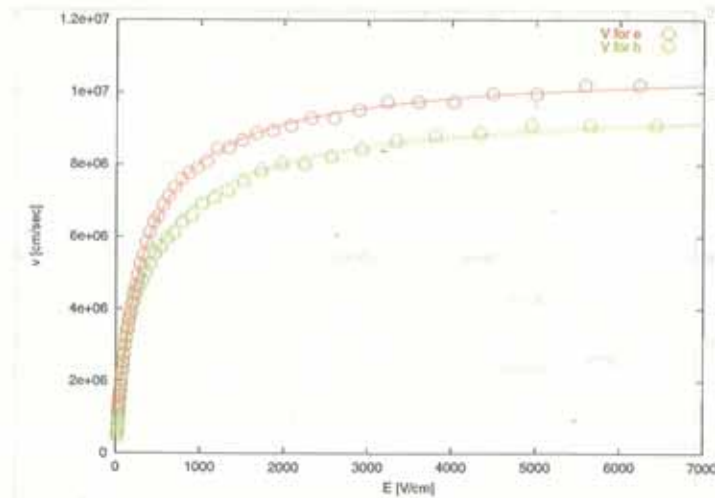


図 6: 電界強度とキャリア速度の関係

$$v = \frac{a}{(1 + bE^c)} \quad (21)$$

	Value	Error
a_e	1.076×10^7	39798
b_e	184.83	6.1642
c_e	-0.91142	0.0070891
a_h	9.8141×10^6	1.149×10^5
b_h	127.37	11.84
c_h	-0.83036	0.019816

微分方程式

$$\frac{dx_e(t)}{dt} = -v_e(\mathbf{E}) \quad (22)$$

$$\frac{dx_h(t)}{dt} = v_h(\mathbf{E}) \quad (23)$$

を解いて (20) 式に代入して計算する。

出力パルス波形は $V_d = 1600V, V = 2000V$ の場合で計算すると図 7、 $V_d = 900V, V = 2000V$ の場合で計算すると図 8 となる。 γ 線の入射位置 x_0 をいろいろ変化させた。

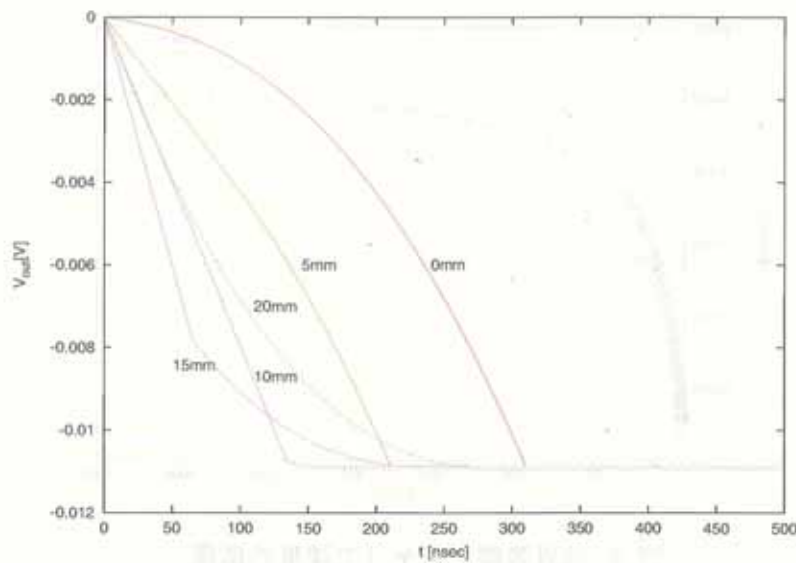


図 7: $V_d = 1600V, V = 2000V$ として計算した場合の出力パルス波形

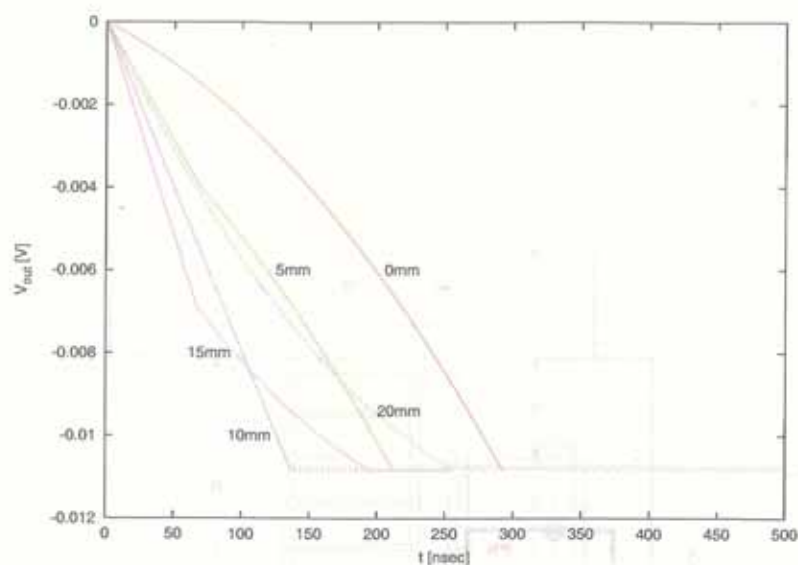


図 8: $V_d = 900V, V = 2000V$ として計算した場合の出力パルス波形

4 測定方法

4.1 測定の Setup

Ge 検出器に collimate した γ 線を図 9 のように入射させた。Pb block の点線のところに直径 2.5mm の穴を開けた。Pb block は x 方向に 1mm の精度で自由に移動できるようにした。Ge 結晶は円柱形をしており、その中心に collimator を合わせた。

- source : ^{137}Cs ($E_\gamma = 662\text{keV}$)
- detector : Stack 型の HP-Ge 検出器

TELESCOPE	POSITION	IMPURITY(cm^{-3})	DEPLETION VOLTAGE	H.V.VALUE
1	1	$0.19 - 1.00 \times 10^{10}$	900V	2000V
2	1	$0.64 - 0.90 \times 10^{10}$	1600V	2000V
2	2	$0.85 - 0.95 \times 10^{10}$	1600V	2000V

表 2: Ge 結晶の不純物濃度

- collimator : Pb block

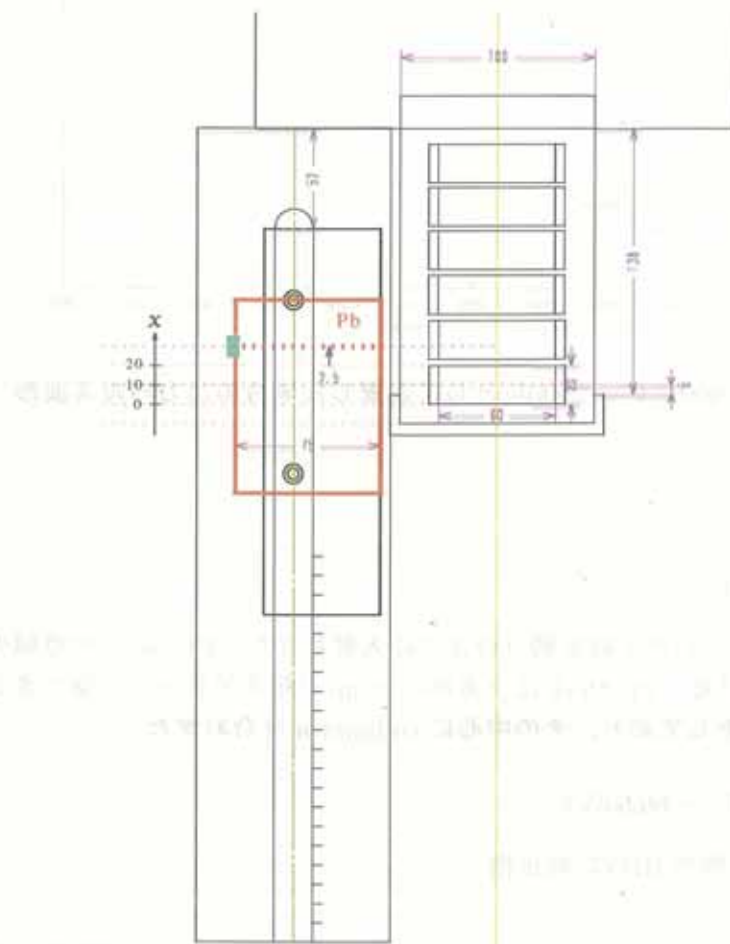


図 9: 測定の Setup

4.2 測定回路

測定に用いた回路は図 10 である。

今回の実験では波形測定に Flush-ADC を用いた。80MHz の clock で (つまり 12.5nsec 毎に)、信号電圧を測るようにした。電圧は -1.5V から 1.5V のうちのどこかの 1.5V 範囲 (例えば -1.5V~0V, -1.0V~0.5V) を測定できる。1.5V/1023ch である。

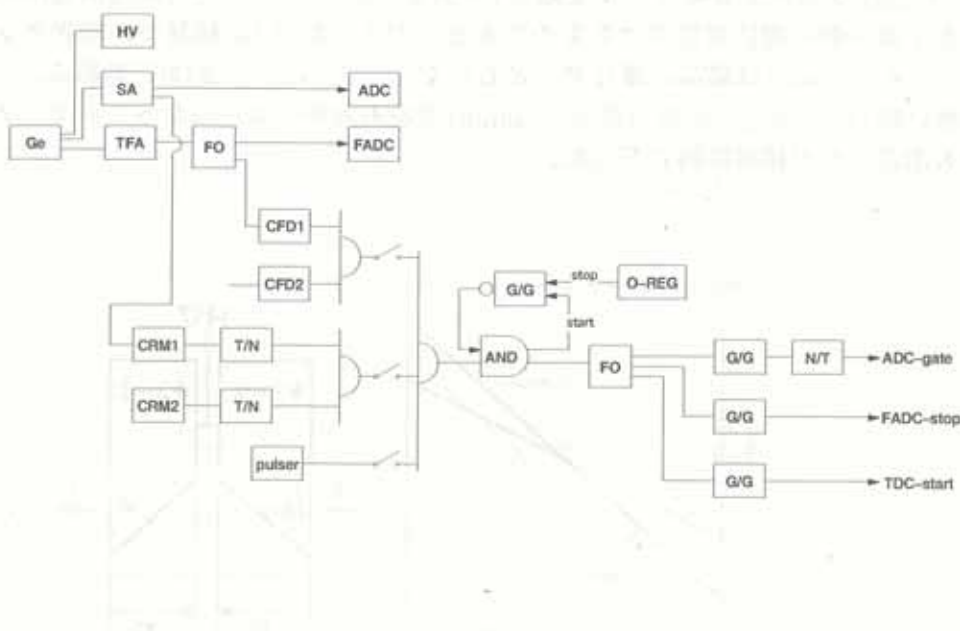


図 10: 測定回路

その他の測定機器は次のとおりである。

- SA : ORTEC 671 Amplifier
shaping time = $6\mu\text{sec}$
- TFA : LeCroy 474 TimingFilterAmp
integral=Out, differentiation=Out, gain = 8×10
- FO : LeCroy 428F Linear FanIn/Out, LAS 429 Logic FanIn/Out
- CFD : ORTEC 935 Quad CFD
delay = 150nsec
- ADC : ORTEC AD413 Quad8KADC
- TDC : LeCroy 2228A

- FADC : LeCroy 2262 WaveRec
sampling clock = 80MHz, bi-phase, 632ch

5 γ 線の collimation の結果

collimate した ^{137}Cs ソースからの γ 線的位置を変え、検出器での光電ピーク数 (SA の出力に SCA で gate をかけて光電ピークを選ぶ) を測定した (図 11)。左上は検出器中の電界のグラフを γ 線入射位置に対応させたものである。右上の絵は Ge 結晶で、電界と x の方向を示した。#2-1、#2-2 は結晶の番号で、ともに $V_d = 1600\text{V}$, $V = 2000\text{V}$ である。

電場の強い側 ($x = 20\text{mm}$) と弱い側 ($x = 0\text{mm}$) で左右対称にならなかったため、2 つ目の結晶でも測定したが傾向は同じだった。

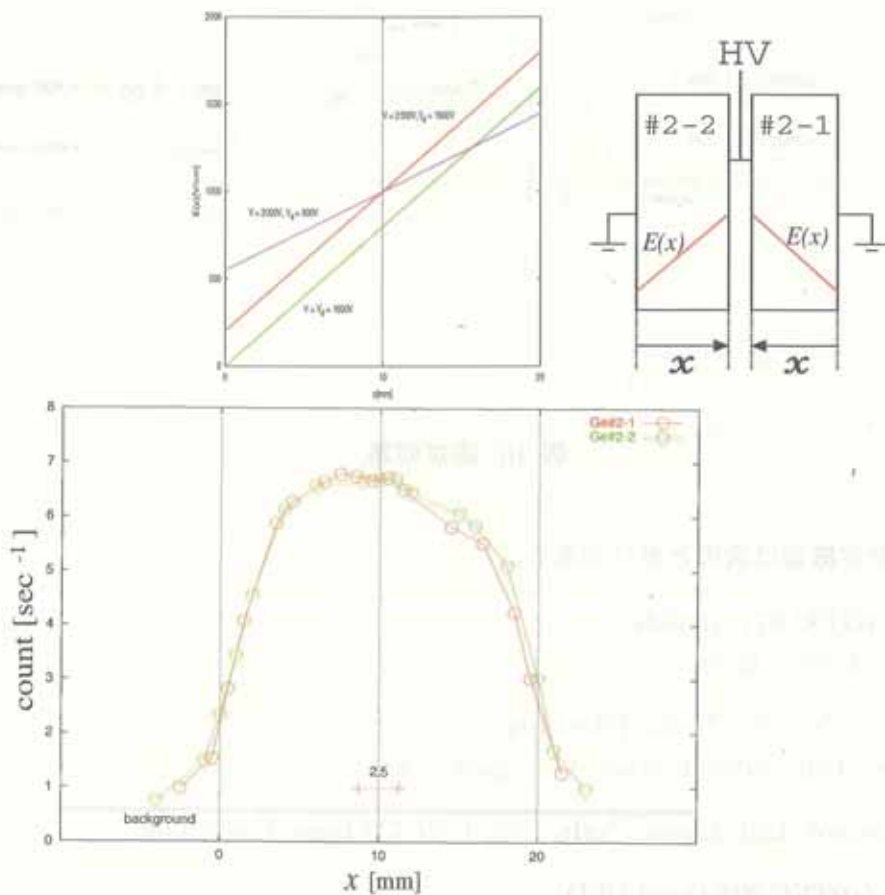


図 11: collimate した γ 線による位置変化

直径 2.5mm の穴で 5mm 以下には collimate 出来ている事がわかった。

6 測定結果

6.1 エネルギー分解能

まず検出器のエネルギー分解能を測定した。

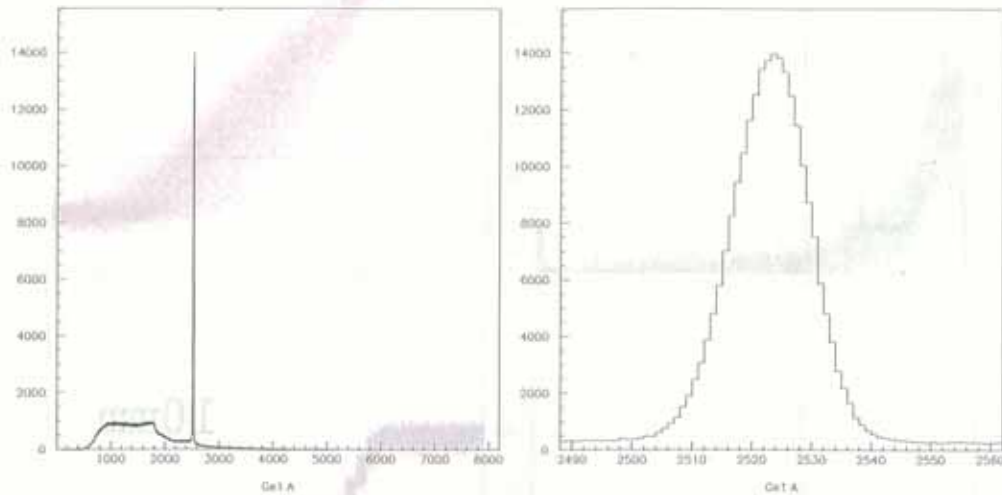


図 12: ^{137}Cs のエネルギースペクトル

分解能は 4.26keV (FWHM) @ 662keV であった。

マニュアルでは 3.44keV (FWHM) @ 1173keV となっている。

6.2 パルス波形測定結果

^{137}Cs の光電ピークに $\pm 2\sigma$ の範囲で gate をかけ、パルス波形を測定した (図 13)。右側がパルス波形のデータで横軸は $12.5\text{nsec}/\text{ch}$ 、縦軸は TFA からの出力 $V_{\text{out}}[\text{ch}]$ である。左側は γ 線のエネルギースペクトルである。エネルギーが低いほうに山があるのは、パルスが立ち上がるタイミングを出来るだけ揃える為に、CFD の threshold を低く設定しているからである。

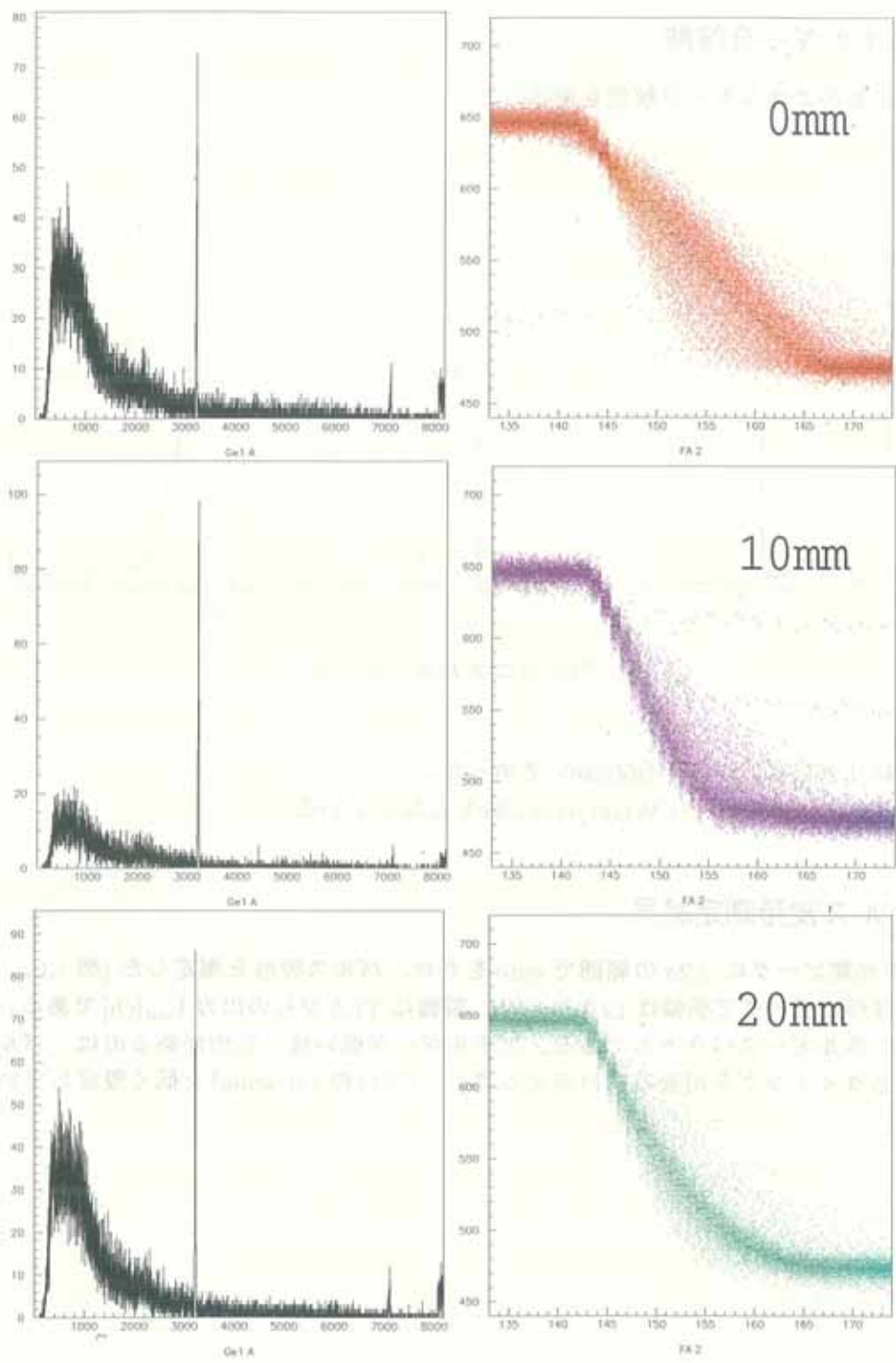


図 13: パルス波形データ

6.3 位置の変化とパルス波形

Ge#2-2($V_d = 1600V, V = 2000V$)で collimator の位置を変えて測定した。各時間ごとに $V_{out}[ch]$ をガウス型で fit し、その中心値を plot した。横軸は 12.5 nsec/ch である。

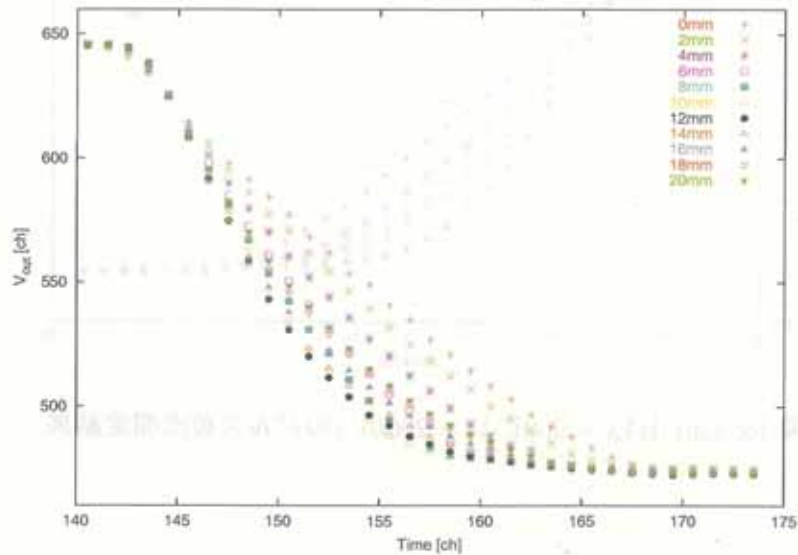


図 14: Ge2-2($V_d = 1600V, V = 2000V$) のパルス波形測定結果

γ 線の入射位置によりパルス波形が変化していることがわかる。

次の図は Ge#1-1($V_d = 900V, V = 2000V$) と Ge#2-1($V_d = 1600V, V = 2000V$) で同様に測定したものである。all は入射位置が偏らないように Ge 結晶の底面の方から γ 線を入射して測定した結果である。

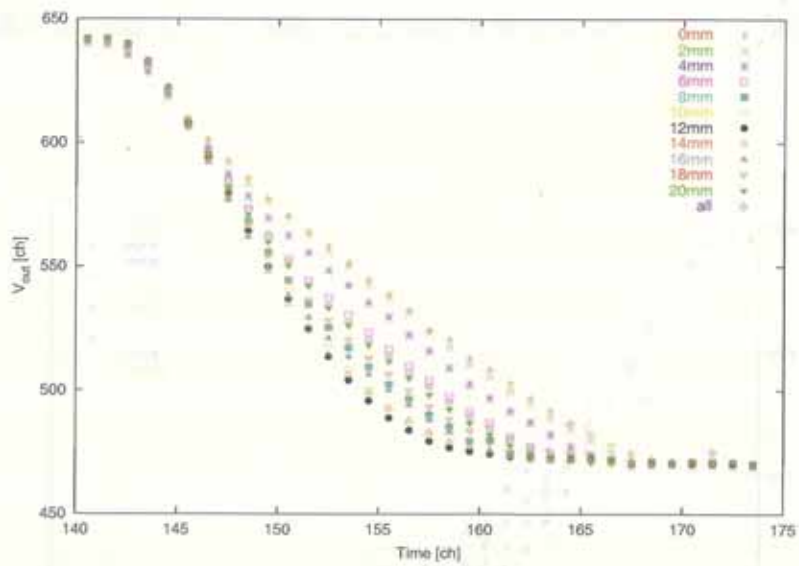


図 15: Ge1-1($V_d = 900V, V = 2000V$) のパルス波形測定結果

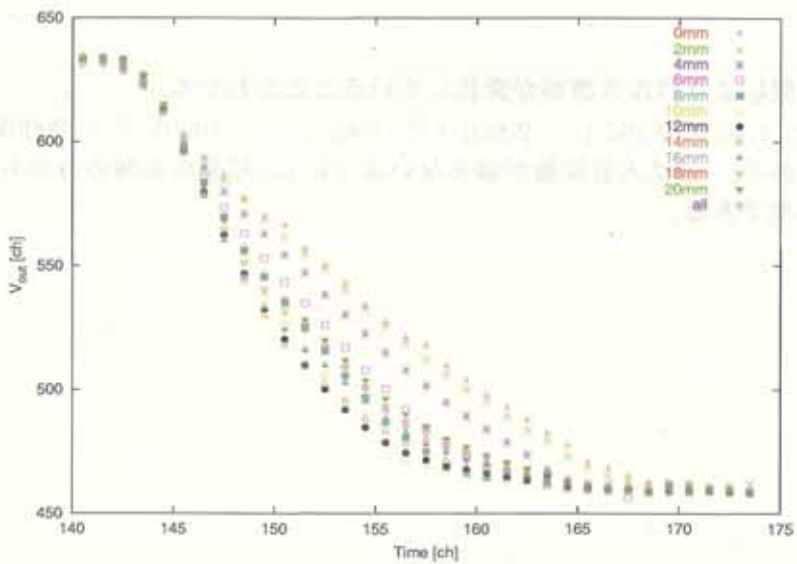


図 16: Ge2-1($V_d = 1600V, V = 2000V$) のパルス波形測定結果

横軸を時間 (nsec) になおした。

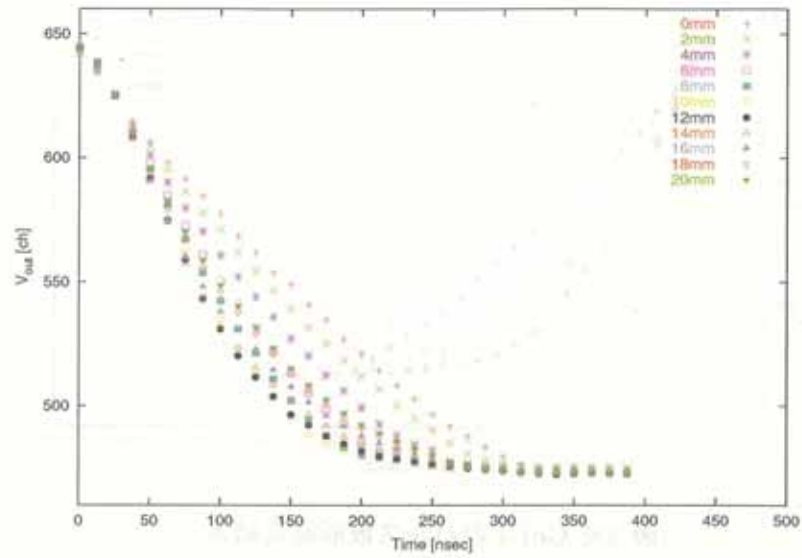


図 17: Ge2-2 のパルス波形測定結果

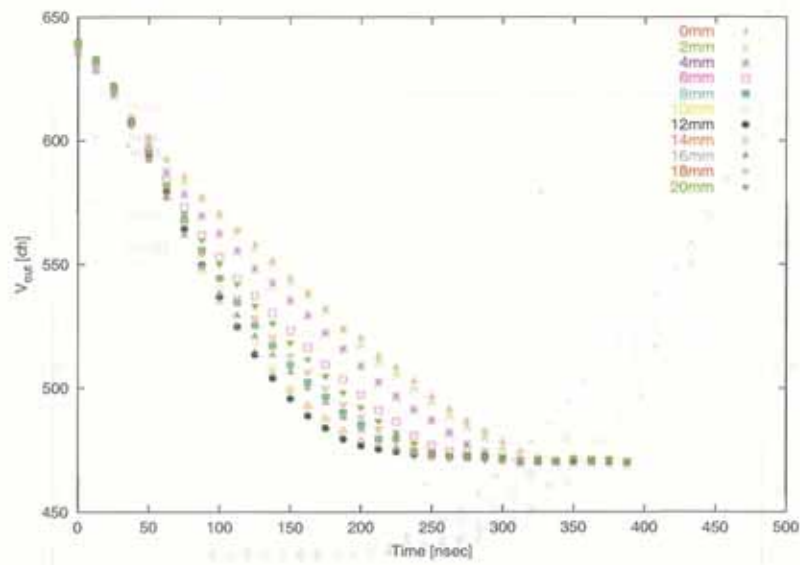


図 18: Ge1-1 のパルス波形測定結果

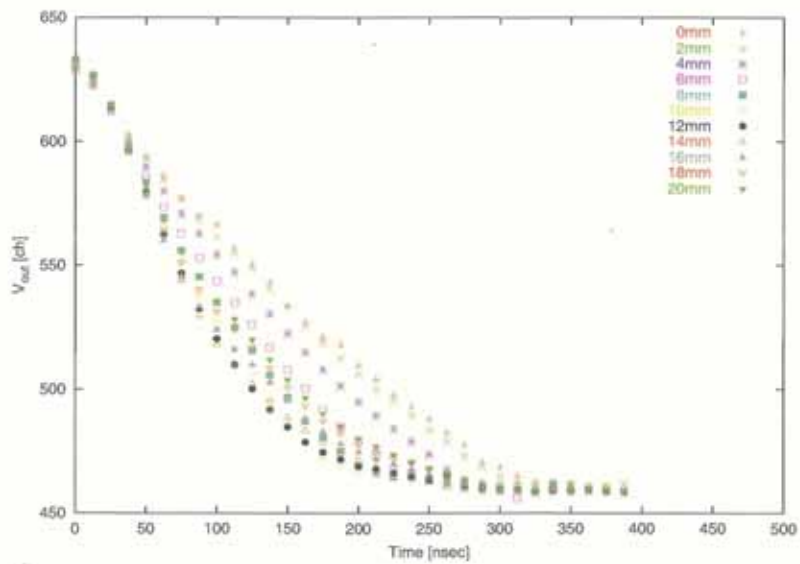


図 19: Ge2-1 のパルス波形測定結果

6.4 simulationとの比較

Ge#2-2($V_d = 1600V, V = 2000V$)の測定値($x = 0, 10, 20$ の場合)を計算と比べる。○は測定値でそれと同じ色の線が計算値である。

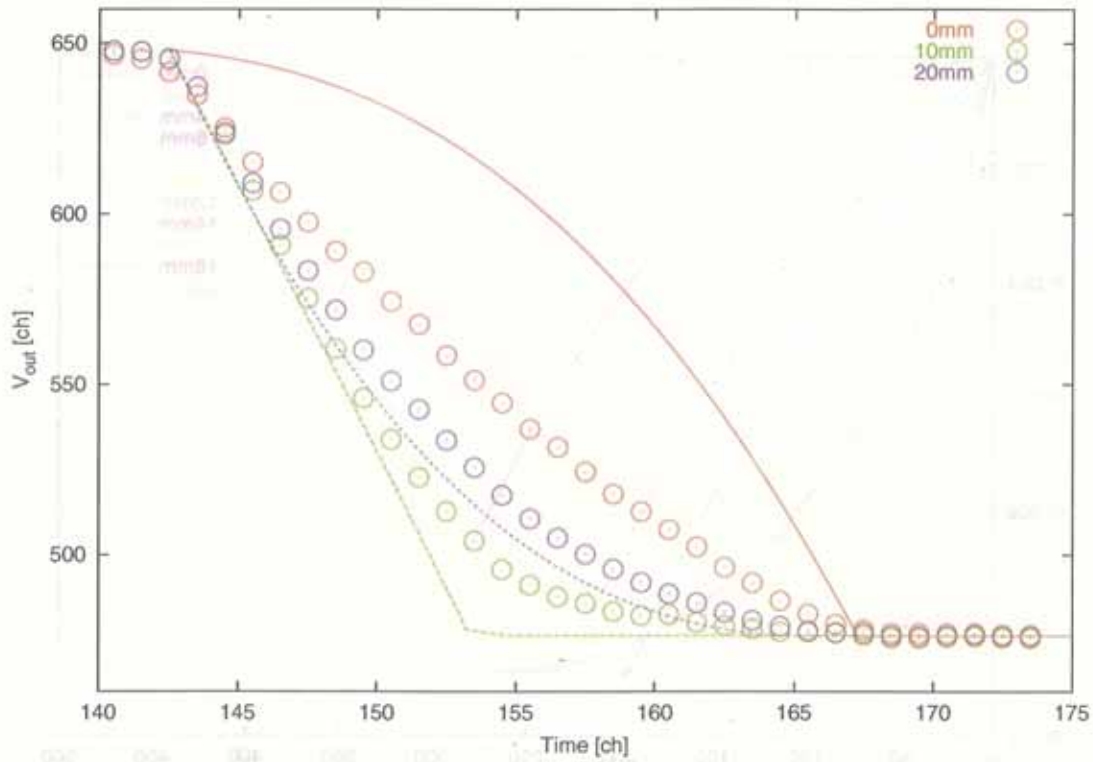


図 20: simulationとの比較

時間のスケールや波形の大まかな傾向はあっているが、実際は大きく違っている。特に $x=0\text{mm}$ はかなり計算値からずれている。

6.5 解析

ここで simulation をもう一度見て波形の区別の仕方を考える。最初の (立上りの) 部分はどれも直線に近くて後にカーブしていく。この立上り部分の傾きと直線からずれ始める点を使って区別出来そうだと考えた。

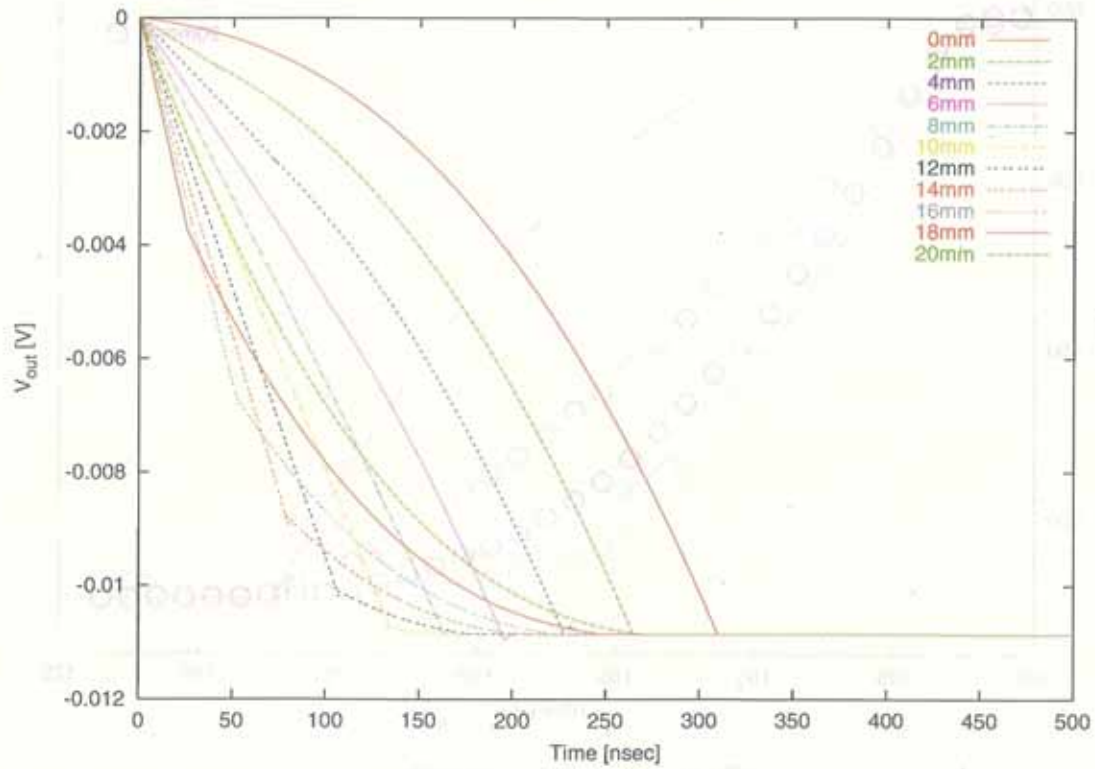


図 21: simulation のパルス波形 ($V_d = 1600V, V = 2000V$)

立上りの5chを直線 $f(t) = a + bt$ で fit し、直線からずれ始めた点の V_{out} を $V1$ とする。

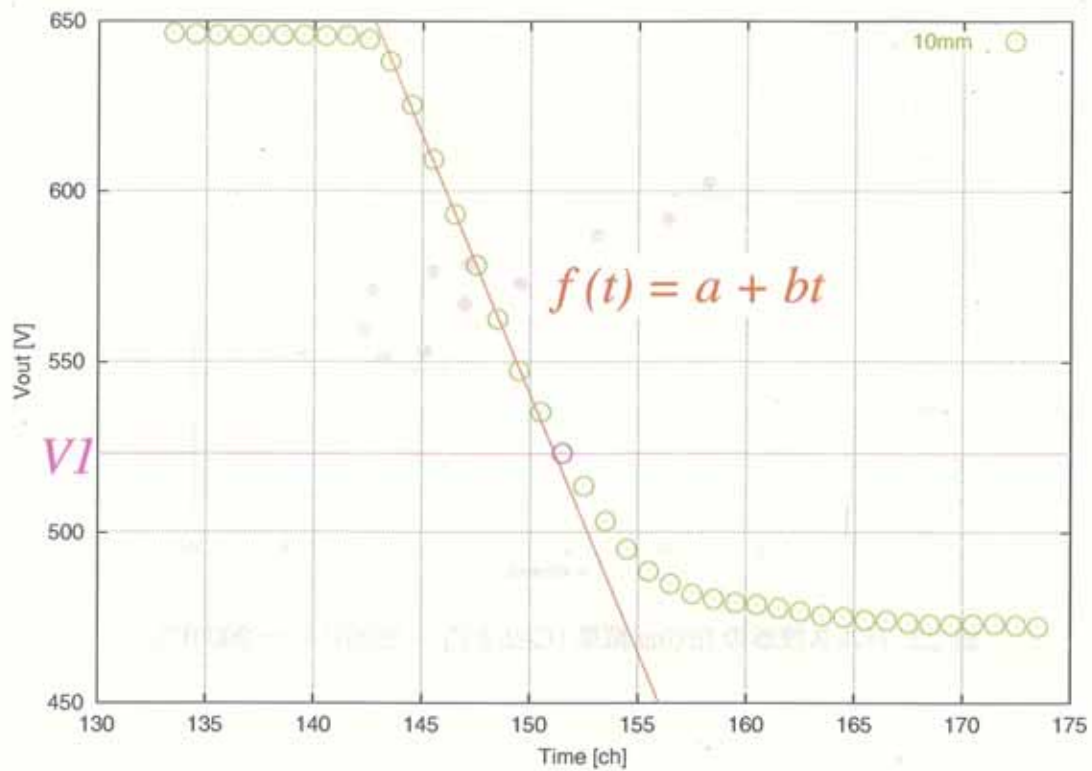


図 22: パルス波形の fitting(Ge2-2:10mm のデータ)

直線 fit の傾き b と V_1 をプロットした。(図 23 から 図 26)

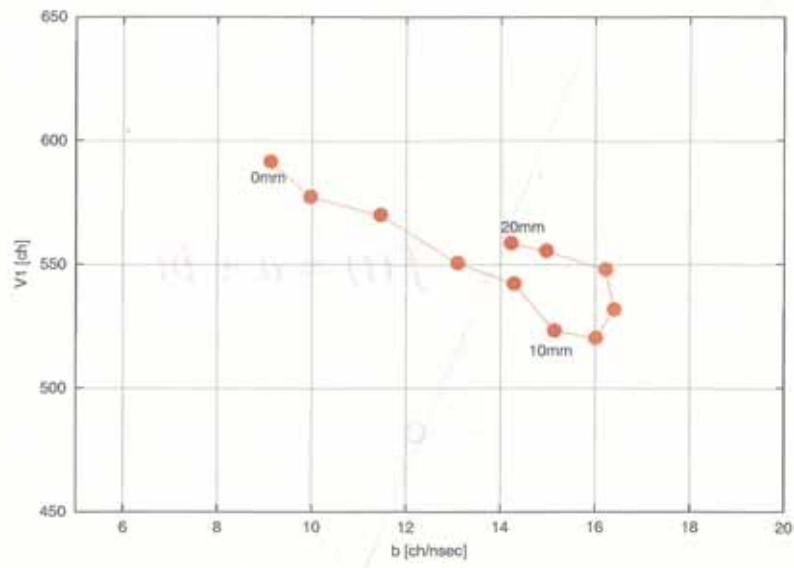


図 23: パルス波形の fitting 結果 ($\text{Ge2-2:}V_d = 1600\text{V}, V = 2000\text{V}$)

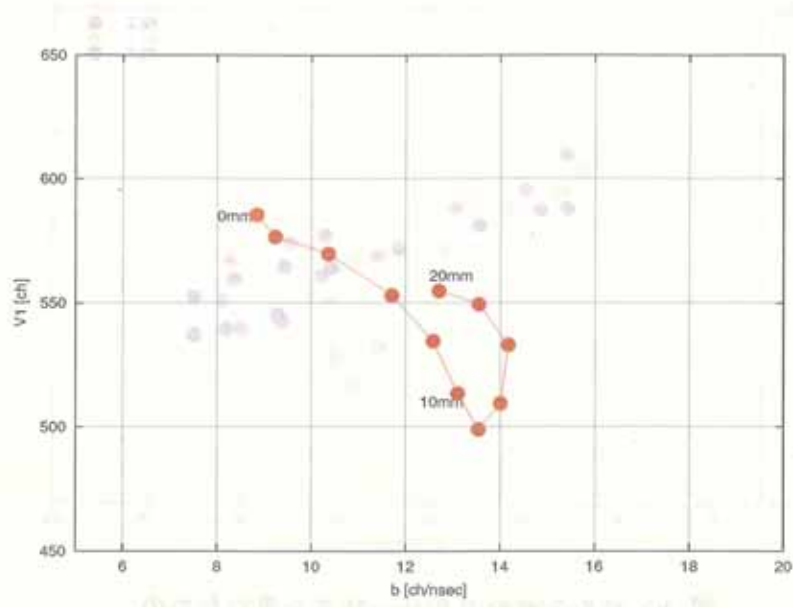


図 24: パルス波形の fitting 結果 ($Ge1-1:V_d = 900V, V = 2000V$)

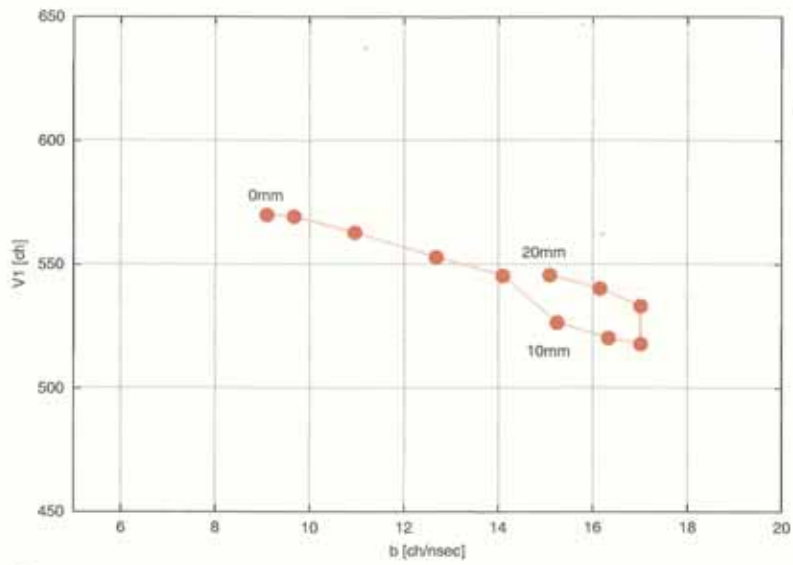


図 25: パルス波形の fitting 結果 ($Ge2-1:V_d = 1600V, V = 2000V$)

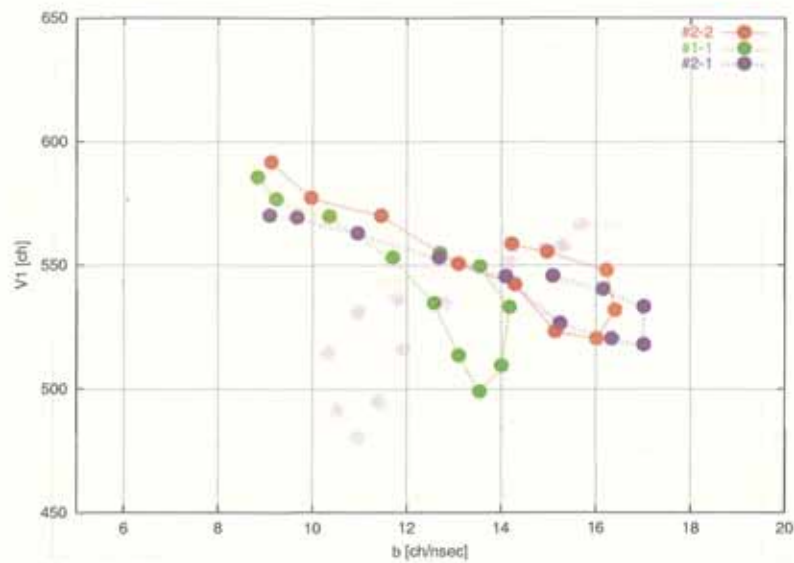


図 26: パルス波形の fitting 結果を重ねたもの

結晶によってパルス波形が異なることがわかる。Ge#1-1は他の2つと大きく異なっている。 V_d が等しいGe#2-2とGe#2-1もやや異なっているのも、不純物濃度が少しちがう為だと考えられる。

傾きと V_1 には位置との相関があるが、位置の測定精度の定量的誤差についてはまだつめられない。

7 まとめ

γ 線を collimate して入射位置を変えるとパルス波形が明らかに変化する事がわかった。しかし、定量的な解析が出来なかったので今後取り組みたい。

問題点として結晶の左右非対称性がある。電界の弱い側 ($x = 0\text{mm}$) は光電ピークの数少なく、パルス波形もばらついて幅をもっている。それに対し電界の強い側 ($x = 20\text{mm}$) はパルス波形がほとんどばらつかず、計算値に最も近い波形をしている。位置が偏らないように測った場合 (all) と最も近いのも 20mm のデータである。何らかの理由により γ 線の相互作用か電荷収集に電場依存性があると思われる。

実験を始めた時に collimate がうまくいかず、background が鉛を通り抜けた γ 線によるものだと思っていて、collimator の直径がある程度大きくないと測定できないと考えていた。しかしソースからのものではない雑音だったことがわかったので、collimator の直径をもう少し小さくして測定するともっと良い結果が得られるかも知れない。

これまでの処理は多数のイベントの平均的な処理だが、位置測定のためには各イベント毎に同様な解析をする必要がある。その為の program を開発中である。

参考文献

- [1] GLENN F.KNOLL 放射線計測ハンドブック 第3版 (木村逸郎/阪井英次 訳)
日刊工業新聞社

謝辞

この研究をするにあたり、小林俊雄教授には様々な事をなにからなまでに丁寧にご指導いただきました。心より感謝申し上げます。また大津秀暁助手には測定機器やプログラムの使い方など教えていただき、本当にありがとうございました。

液体窒素を運ぶのを快く手伝ってくださった方々、その他の皆様にも本当にお世話になりました。ありがとうございました。

堀文彦 謹言

2017年12月