

JAERI-M

5734

Si(Li)光子スペクトロメータ

1974年6月

石井 三彦・経塚 勝*

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

S i (L i) 光子スペクトロメータ

日本原子力研究所東海研究所物理部

石井三彦・経塚 勝*

(1 9 7 4 年 5 月 2 2 日 受 理)

この論文は、Si(Li)光子スペクトロメータを自作して使用したいと望んでいる研究者に、その技術的な知識を提供することを目的としている。第一章でSi(Li)検出器の簡単な製作方法について述べる。製作手順を全てフローチャートで表わして実際の作業の便宜を計る。第二章で光子スペクトロメータに使用する光電帰還型プリアンプを取扱う。ここで発光ダイオードとFET間のフォトカプリングを室温で調整する方法を説明する。この方法は光電帰還型プリアンプを抵抗帰還型と同じ労力で作ることを可能にした。最後にこのようにして製作した光子スペクトロメータの性能に言及する。

* 日本電子株式会社部品材料開発部

Si(Li) Photon Spectrometers

Mitsuhiko ISHII and Masaru KYOZUKA*

Division of Physics, Tokai, JAERI.

(Received May 22, 1974)

This report is intended as technical information to those who will prepare Si(Li) photon spectrometers on their own. The first chapter describes a simple method of fabricating Si(Li) diodes. For convenience of fabrication the procedure is presented in flow chart. The second chapter deals with opto-electronic feedback preamplifiers used in the spectrometers. There is explained how to adjust the photocoupling of a light-emitting diode and an FET at room temperature. This saves efforts, and enables us to set up the opto-electronic feedback system as easily as the resistive one. Finally the performance of Si(Li) photon spectrometers thus built is mentioned.

* Now at JEOL, Akishima, Tokyo.

目 次

序 文	1
1. Si(Li)ダイオード	2
2. プリアンプ	11
3. Si(Li)光子スペクトロメータ	22
謝 辞	25

CONTENTS

Introduction	1
1. Si(Li) diodes	2
2. Preamplifiers	11
3. Si(Li) photon spectrometers	22

序 文

過去15年の間に半導体検出器は目覚ましい発展をとげた。まず荷電粒子用の検出器が開発され、主として核物理の分野で使用された。それに続くGe- γ 線検出器の出現は低エネルギー核物理に多大な成果をもたらすと同時に、半導体検出器が応用される分野を化学、物性物理、工学、生物科学、環境科学へと急速に拡張した。現在では核物理以外の分野に独自の活躍の場をもつ半導体検出器が現れ始めている。

この論文の表題であるSi(Li)光子スペクトロメータはその代表的なものの一つである。このスペクトロメータは約100 keV以下の蛍光X線あるいは γ 線を測定の対象としており、特に10 keV以下の光子については200 eV (FWHM) より良い分解能で分析することができる。しかも検出効率が大きく非分散型なので、能率よく測定を行えるという利点をもつ。したがって非常に高い分解能を必要としない場合には、分散型スペクトロメータの代りにこの種の非分散型スペクトロメータが使用されている。光子スペクトロメータが検出することのできるX線のエネルギーの下限は、検出器をも含めたプリアンプの雑音によって決定される。現在の最高水準のスペクトロメータでは雑音の大きさが約100 eV程度であり、Naあるいはその前後の元素の蛍光X線が検出できる。

この論文は、Si(Li)光子スペクトロメータを自作して使用したいと望んでいる研究者に、その技術的な知識を提供することを目的としている。したがって最高の性能を追求することよりも、標準的な性能のスペクトロメータを簡単に作る方法を示し、多くの人がそれを利用できるようにすることに重点を置く。

Si(Li)光子スペクトロメータの性能は、それに使用するSi(Li)ダイオード、プリアンプ、そして真空系を含めたクライオスタットとによって支配される。しかもそれらは、云けば和の形ではなく積の形で性能に寄与する。それ故いづれも同等の比重で配慮されるべきものである。しかし真空系とクライオスタットはその構成と形状に多様性があるので、この論文では割愛し、前二者のみを取扱う。第一章でSi(Li)ダイオードの製作方法について述べる。この方法は、著者の一人がJAERI-M-5000に公表したものを踏襲している。ここでは製作手順を全てフローチャートで表わし、実際の作業の便宜を計る。第二章で光子スペクトロメータに使用する光電帰還型プリアンプについて詳述する。まず増巾器の雑音と機能とを簡単に説明し、低雑音プリアンプを理解する上での一助とする。次にゲート・ソース接合の光電流特性をもとに光電帰還回路の作動について考察する。この解析から発光ダイオードとFET間のフォトカプリングの具体的調整方法が明らかになる。調整は室温で行うので、光電帰還型プリアンプを抵抗帰還型プリアンプと全く同じ労力で製作することができる。最後にSi(Li)光子スペクトロメータ全系の微調整と総合的性能に言及する。

1. Si(Li) ダイオード

光子スペクトロメータは1 keV から数10 keVの光子を検出の対象とするので、それに使用するSi(Li)ダイオードは電子用のダイオードと比較してより厳しい条件を満たさねばならない。これらのダイオードに対しては、キャリアがトラップされる確率が小さいことが勿論要求されるが、その他に雑音を減少させるために漏洩電流が 10^{-13} A程度、静電容量が数pF以下という条件が課せられる。このような特性のダイオードを製作するためには、まず良い特性の単結晶を入手する必要がある。現在のところ単結晶を特徴づけるパラメータと検出器の分解能との間に相関関係が存在しないので、漏洩電流の小さい検出器を作るという観点から単結晶の選択を行う。次に、良い素材を入手したとき、その能力を完全に発揮させることが重要である。この段階でSi(Li)ダイオードの製作方法の優劣が明らかになる。ここで述べる方法は、従来のもものと比較して簡単でしかも失敗することが少いという利点をもつ。

この章では、Si単結晶の選択とSi(Li)ダイオードの製作について述べる。製作手順を全てフローチャートで表わし、作業の際の便宜を計る。その詳細について不明な点はRef.1を参照されたい。

1.1 Si単結晶

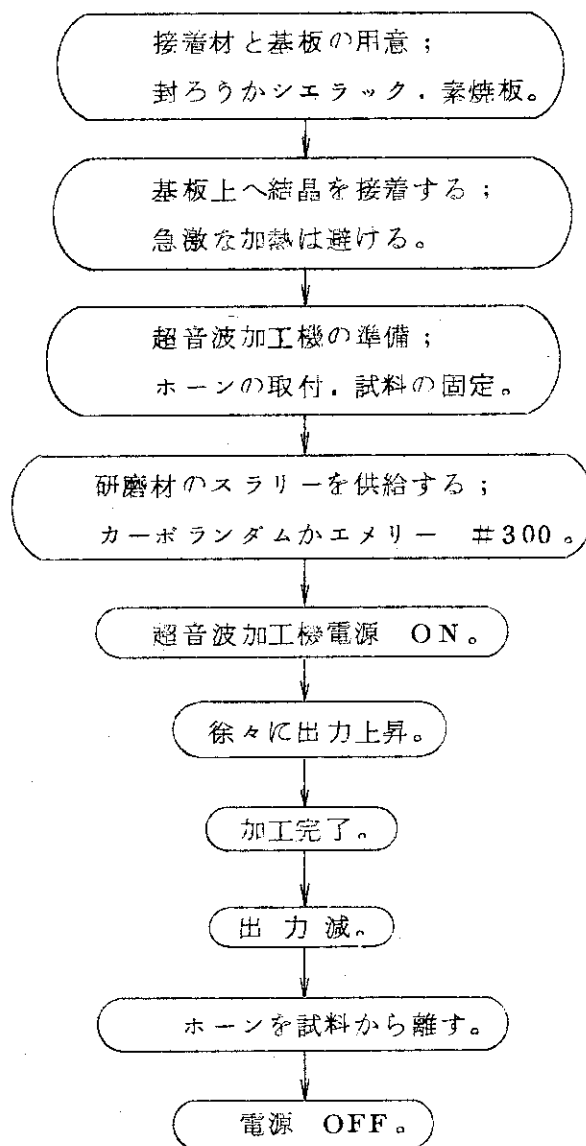
検出器の素材としては、フローティング・ゾーン法で成長させたボロン添加の単結晶を用いる。その比抵抗は次のような事柄によって決まる。Liを拡散するとき、ウェーハの殆んど全面がLi蒸気によって汚染される。これによるp面のn型への反転の深さは、比抵抗が高いほど深い。また高比抵抗の単結晶から作られたp-n接合は、Liイオンをドリフトするとき多量のキャリアがp領域から注入され、ドリフト温度を上げ難いという欠点をもつ。このような事情からSi(Li)ダイオードの製作に用いる単結晶の比抵抗は10 K Ω cm以下であることが望ましい。Si(Li)ダイオードを室温で放置すると露出したi層の表面近くではLiが表面に析出して、i領域が乱れる。表面が乱れる速さは、比抵抗が小さい程速い。従って、Si(Li)ダイオード用の素材としては、比抵抗の小さい結晶は不適當である。2 K Ω cm程度の単結晶が最適である。

少数キャリアのライフタイムは比抵抗や転位に依存するので、相対的な目安としてのみ使用する。例えば2 K Ω cm、エッチピット密度 2×10^4 cm $^{-2}$ 、ライフタイム500 μ secの単結晶と、公称無転位、2 K Ω cm、200 μ secの単結晶とを比較したとき前者をより良質な検出器の素材とみなす。

エッチピット密度はSiダイオードの逆耐圧に関係する。この章の終りに掲げたTable 1から判るように、エッチピット密度が小さいほど漏洩電流が小さい。エッチピット密度が 2×10^4 cm $^{-2}$ 以下の単結晶を選ぶ。僅かにトラップの影響が大きいSi(Li)ダイオードも、高いバイアスを加えることができれば、低エネルギーX線の検出器として使用できる。それ故、入手可能ならばDF(dislocation free)と呼ばれる単結晶の方が望ましい。

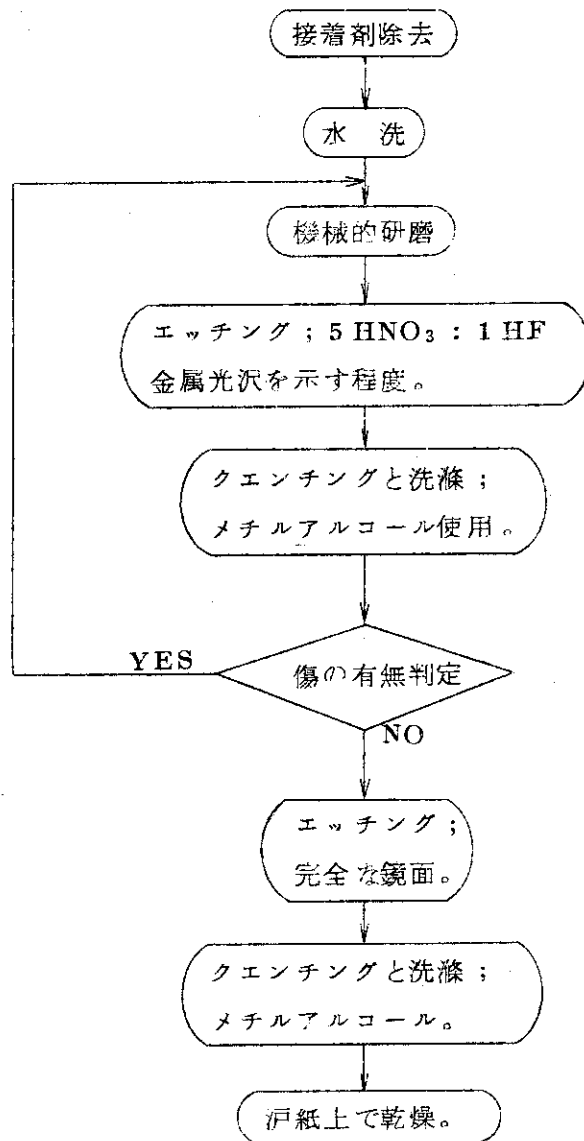
1.2 ウェーハの用意 (I) : 機械的加工

ウェーハの厚さは、研磨したあとで最終的なSi(Li)ダイオードの厚さよりも1 mm厚くなるように選ぶ。後でウェーハに溝を刻む必要が起るので、ここでは超音波加工機を使う作業を標準的な工程として採用する。ダイヤモンドカッターを用いる場合には、その取扱ひ手引きに従って工程を組み立てたい。



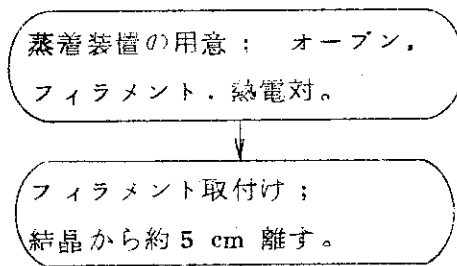
1.3 ウェーハの用意 (II) : 研磨とエッチング

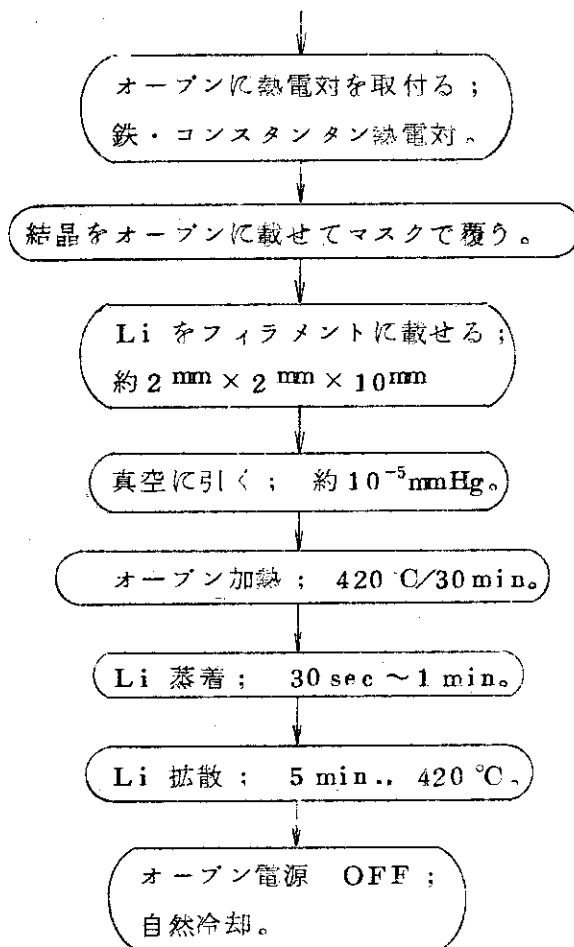
機械的加工によって生じた傷をカーボランダムあるいはエメリーを用いて除く。更にLiを拡散する面の破壊層をエッチングによって除去する。



1.4. リシウムの拡散

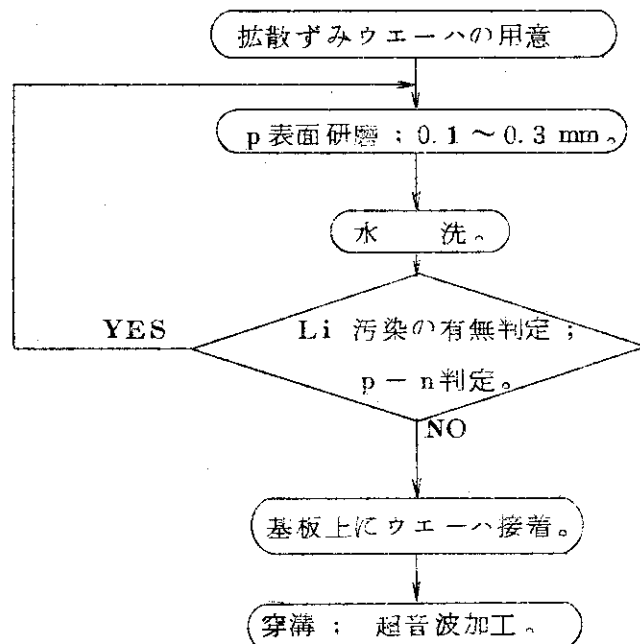
Li を拡散して p-n 接合を作る。拡散を行う領域を除くウエーハの全面をマスクで覆って、Li による汚染を最小限に留める。n 層の厚さは 0.5 mm 程度であることが望ましい。初めて使用するオープンに対しては試験用試料を用いて拡散を行い、拡散の深さと温度および時間との関係を求めておく必要がある。同様に新しいフィラメントは予め真空中で白熱するまで加熱して、金属の素肌を露出させておく。

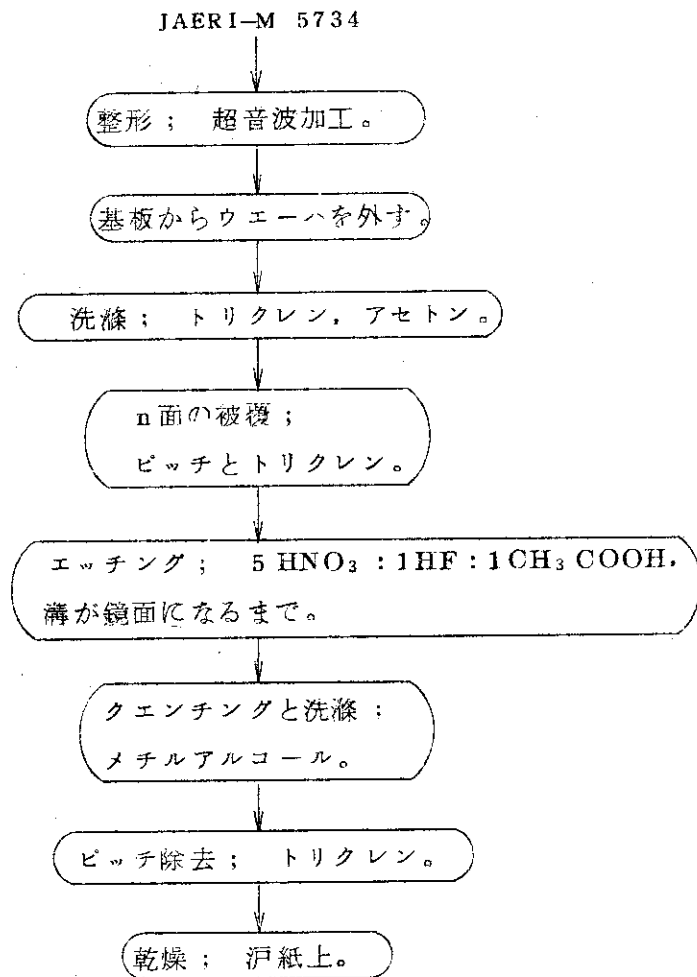




1.5 穿溝と整形

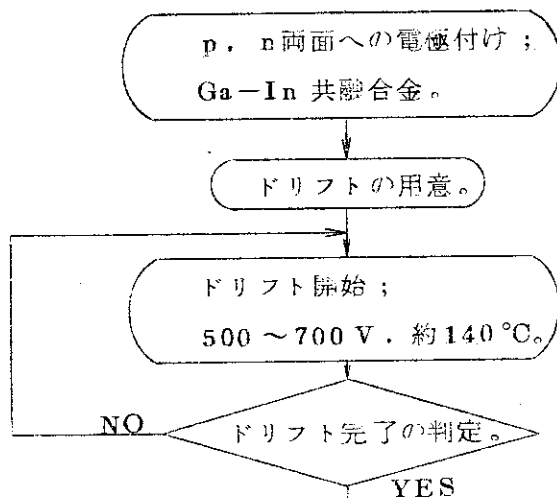
Li で汚染された p 側の層を除いて完全な p-n 接合を作る。また正確に n 領域を限定するために溝を刻む。溝の深さは母材を 1 ~ 1.5 mm 残すような値とする。次に素子の取扱いを容易にするために、Si ダイオードの形状を整える。



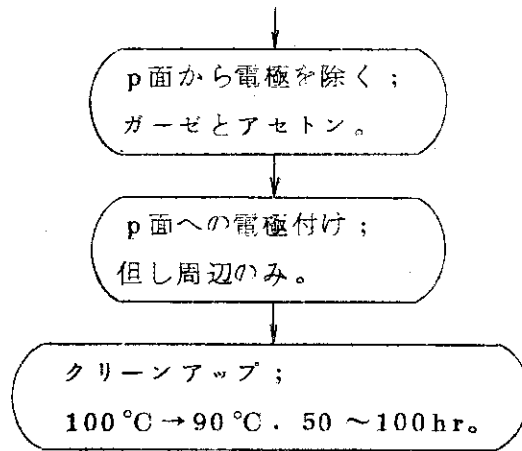


1.6 イオン・ドリフト

よく乾燥しているSiダイオードの逆電流は、室温で $10\mu\text{A}/500\text{V}$ 以下である。この値を大きく越える素子には、もう一度エッチングを施す。ドリフトは強制空冷方式で行う。また正常なp-n接合は、寸法と素材とに依存して、 140°C で $1\sim 10\text{mA}$ のドリフト電流値を示す。ドリフトが完了したかどうかの判定は、室温での漏洩電流を目安にして行う。p側電極から 0.3mm 以内の距離にi領域が近づく、室温での漏洩電流が初めの値の $10\sim 10^2$ 倍に増加する。この検査は、事前にp側電極の塗りなおしを必要とする。

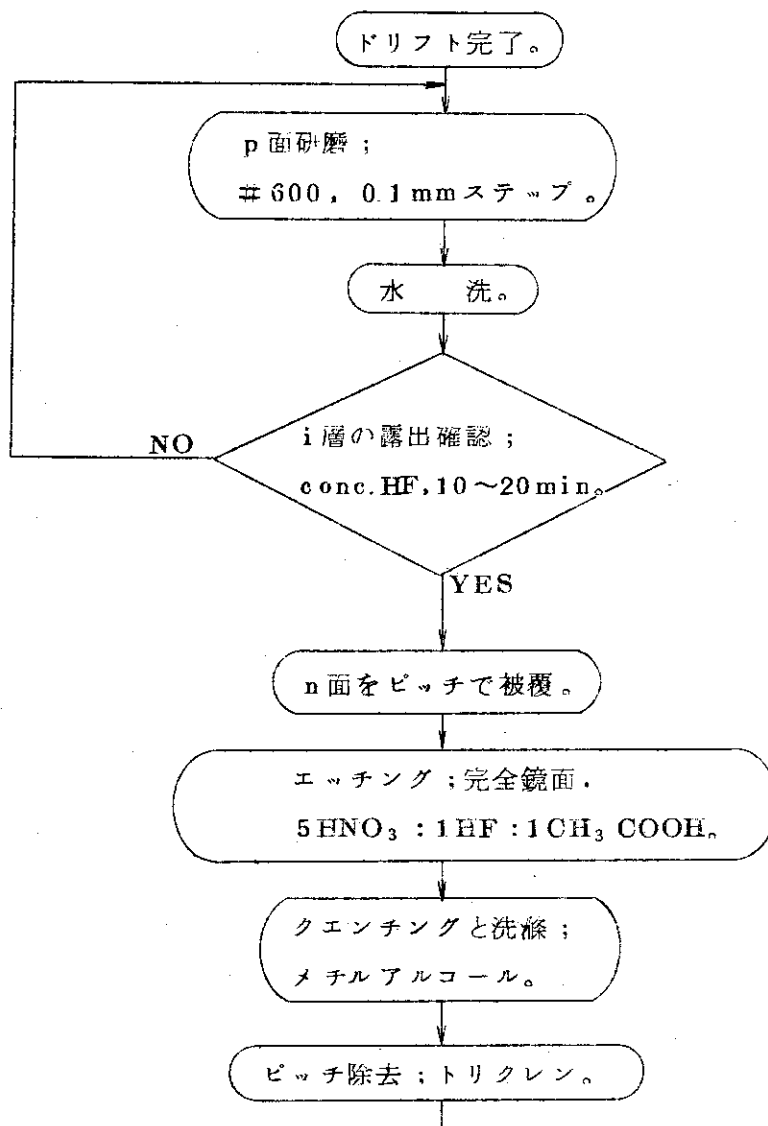


JAERI-M 5734

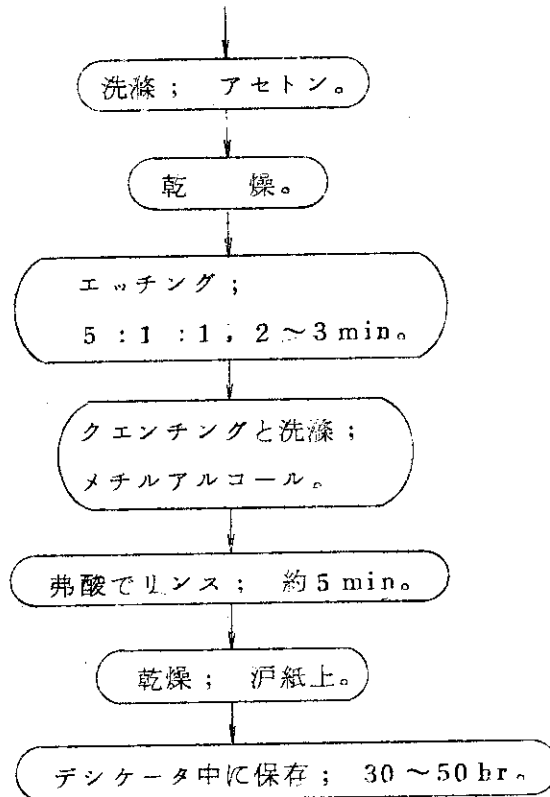


1.7 仕上げ処理

デッドレイヤーを除くために p 面を研磨して i 領域を露出させる。ドリフトが完全に行なわれていると、0.3 mm 程度の研磨によって i 領域が現れる。最後のエッチングにはできるだけ清浄な容器を使用する。

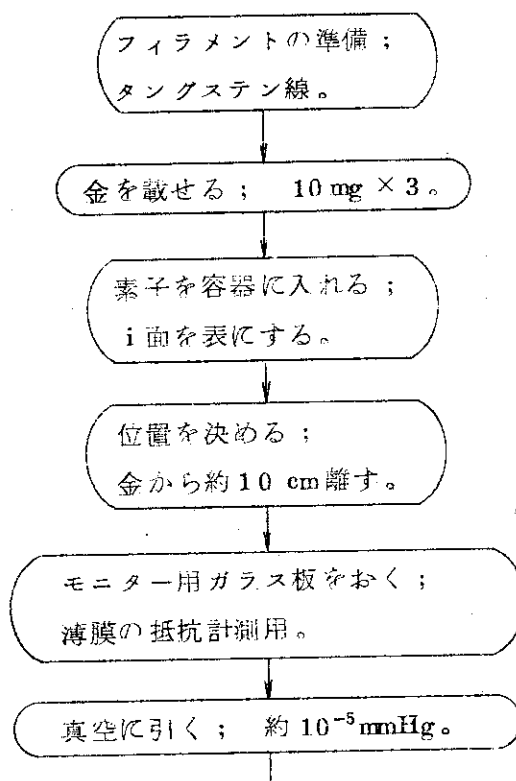


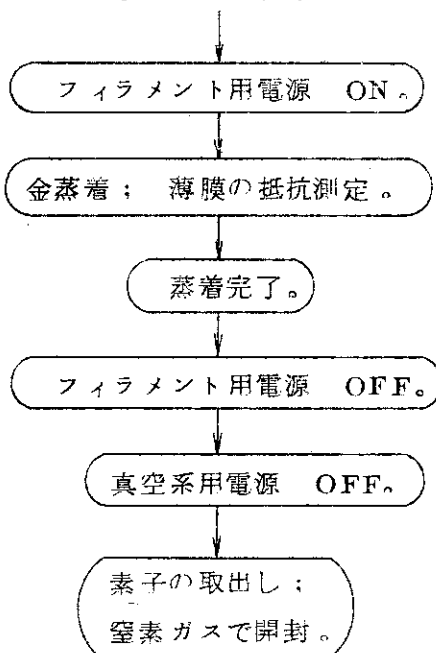
JAERI-M 5734



1.8 金の蒸着

金の蒸着は次の二つのことを目的としている。その一つは *i* 表面でのキャリアー収集を良くすることであり、他の一つは *p* 面にオーミックコンタクトをとるためである。金の蒸着膜の厚さは、 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm} \times 1000\text{ \AA}$ の薄膜に対する値 $0.27\ \Omega$ を用いて評価する。





1.9 特性試験

製作の全工程を完了したダイオードに対して、液体窒素温度におけるV-I特性、V-C特性およびトラップの影響の大きさを測定する。測定に便利なように素子がアースから絶縁された形で容器に収める。絶縁材料として窒化ボロン(BN)あるいはテフロンを用いる。

逆電流を測るときには、ダイオードに対する遮光および測定端子間の絶縁によく注意する。また真空に関しても適切な配慮を行い、冷却時におけるダイオード上への水の凝結を極力避ける。

検出器の静電容量を測定するときには、その値が1 pF ないし数 pF なので、配線に注意してリード線間の容量を正確に補正する必要がある。

トラップの影響に対する評価は、プリアンプの雑音が相対的に小さいエネルギー領域で行う。ここでは便宜上 Np^{237} からの59.6 keV- γ 線の分解能をその目安として用いる。検出器を製作するために、結晶製造メーカー3社から計6ロットの単結晶を入手して使用した。Table 1は、それらの特性を要約したものである。使用したプリアンプは冷却した抵抗帰還型のものである。その分解能は外部負荷なしで180 eV FWHMであり、0.5 pA、1 pFの負荷を負わせるとき210 eV FWHM程度である。Table 1に記入されている分解能は、トラップの影響のみならず雑音からの寄与も含む。実際にいくつかの素子では、キャリアを効率よく収集するためにバイアスを上げて使用しているので、漏洩電流による分解能の劣化が認められる。しかしトラップの影響を減少させるためにバイアスを加えたとき、漏洩電流が1 pAを越えるダイオードは、X線検出器として不適當である。この意味において単結晶A、Dは不適當であり、Cも漏洩電流がやや大きい。

Table 1
Qualities and performance of silicon single crystals.

Crystal & diode	Resistivity KΩcm	Life time μs	Etch pit density cm ⁻²	Diameter & thickness mm	Leakage current & bias pA / V	FWHM at 59.6 keV eV
A - 1	~ 20	1000	3.5 x 10 ⁴	6φ x 6t	11 / 500	1250 (±3%)
2				6φ x 6t	5 / 400	930
3				6φ x 6t	0.4 / 400	1130
B - 4	~ 1.8	400	D. F.	6φ x 6t	0.4 / 1000	436
5				6φ x 6t	0.3 / 800	473
6				4φ x 3t	0.15 / 1000	425
7				4φ x 3t	0.1 / 500	431
C - 8	~ 2	> 200	< 4 x 10 ⁴	4φ x 3t	1.2 / 800	472
D - 9	~ 2	> 200	< 4 x 10 ⁴	4φ x 3t	3 / 400	660
E - 10	~ 2	1000	D. F.	4φ x 3t	0.3 / 1500	448
F - 11	~ 1.8	800	2 x 10 ⁴	4φ x 3t	0.3 / 800	447

2. プリアンプ

光子スペクトロメータが検出することのできるX線のエネルギーの下限は、プリアンプの雑音によって決定される。それ故に高分解能スペクトロメータを製作するためには、低雑音プリアンプが良い特性の検出器素子と同様に必要である。この章では光子スペクトロメータに使用する光電帰還型プリアンプについて述べる。まず簡単に増巾器の雑音について復習し、次に光電帰還型プリアンプの作動原理と具体的な製作方法を説明する。雑音に関する詳細については、Ref.1 およびそれに引用されている文献を参照されたい。

2.1 増巾器の雑音

増巾器系の主要な雑音源はプリアンプの初段に集中している。この様子をFig.1 に図式的に示す。半導体検出器用プリアンプの入力段に使用する素子は、特に低雑音である必要がある。増巾作用をもつ素子として、通常FETが使用される。従ってFig.1 では、その素子をFETで代表する。図の電流源は、検出器の中に作られた信号に対応する電流パルス $Q\delta(t)$ と、検出器やゲート・ソース間の漏洩電流 i とからなる。簡単のためにいわゆる $1/f$ 雑音は無視して、漏洩電流は全てホワイト・ノイズであるとする。容量 C は全入力容量であり、この中には検出器の容量や入力端子と他の電極間との容量等が含まれる。抵抗 R はゲート・ソース間をシャントしている抵抗である。

各素子から生じるプリアンプの出力における雑音は、等価雑音電荷 (equivalent noise charge)¹⁾ を用いると次のように表わすことができる。

$$\text{抵抗の熱雑音: } (ENC)^2 d\omega = \frac{2kT}{\pi\omega^2 R} d\omega$$

$$\text{漏洩電流によるショット・ノイズ: } (ENC)^2 d\omega = \frac{qi}{\pi\omega^2} d\omega$$

$$\text{FETのドレン電流によるショット・ノイズ: } (ENC)^2 d\omega = \frac{4kT\theta C^2}{g_m} d\omega$$

ここで ω = 角周波数

$d\omega$ = 微分角周波数

k = ボルツマン定数

T = 絶対温度

q = 電気素量

g_m = FETの相互コンダクタンス

θ = FETの空間電荷分布に関する定数

容量 C は、FETの出力を等価な入力に換算するためのパラミターとして、雑音に關与する。

一方、この表示に従うと

信号 = QH ; H = Heaviside step function

と表わすことができる。

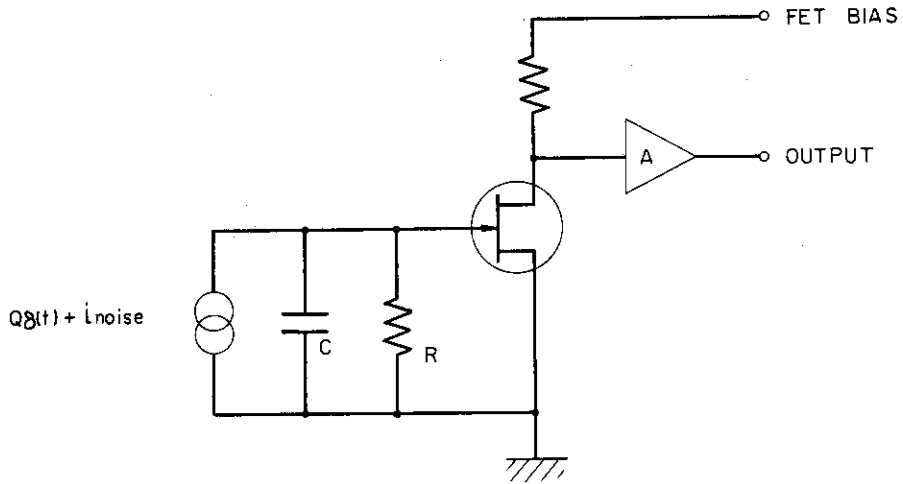


Fig. 1 An equivalent network of the amplifier for noise analysis.

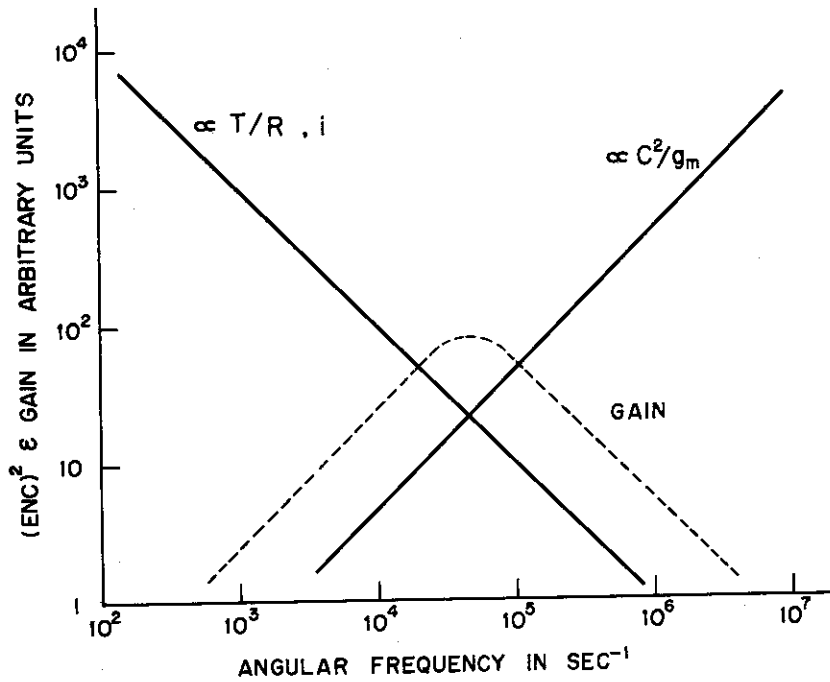


Fig. 2 Frequency responses of mean square noise and an amplifier. These are plotted on log-log paper. A straight line with a positive slope indicates the thermal noise in the FET, and another straight line with a negative slope indicates the thermal noise in the resistor and shot noise due to the leakage current. A dotted curve is the frequency response of an amplifier.

雑音の各成分はいくつかのパラミターの積として表わされているので、雑音を減少させる方法を容易に見い出すことができる。まず入力段を冷却することにより、抵抗の熱雑音とFETのショット・ノイズとを減少させることができる。また低温では g_m が増大するので、後者は一層小さくなる。しかし一方では別の種類の雑音が増加するので、FETには最適作動温度が存在する。入力をシャントする抵抗はできるだけ大きく、漏洩電流と容量は小さいほど低雑音である。またFETの g_m は大きいことが望ましいが、 g_m はゲート・ソース間の容量にも関係するので、外部容量も含めた上でその寄与を判断すべきである。X線検出器用プリアンプに用いられるFETに対しては、高い相互コンダクタンスよりもむしろゲートの漏洩電流、特にf雑音の小さいことが要求される。

プリアンプの出力は、更に主増巾器で増巾と波形整形を受ける。この過程においてS/N比を改善することができることを定性的に説明する。Fig. 2は雑音の角周波数分布を両対数のグラフ上に描いたものである。右下りの直線は抵抗と漏洩電流とに起因する雑音であり、左下りの直線はFETのショット・ノイズを表わす。また増巾率の周波数応答、即ちフィルターの形を点線で示す。主増巾器の出力における雑音の大きさは、Fig. 2の雑音の分布にフィルターの形を重ねて積分することによって求めることができる。このことからフィルターの位置、正確な云い方をするとフィルターの時定数を適切な値に選ぶことにより雑音の大きさを極小にすることができる。一方、信号の波高値はフィルターの位置に存在しないので、S/N比が極大値をとり得ることが判る。更にフィルターの形を選ぶことによりS/N比を最大にすることが可能である。

2.2 光電帰還型プリアンプ²⁾

半導体検出器のように絶縁の高い検出器に対しては、一般に電荷増巾器が入力段に使用される。Fig. 3はその基本的構造と微小信号に対する応答を示す。この増巾器の特徴は、開放利得が十分大きいとき出力が帰還容量 C_F のみに依存し、 Q/C_F で与えられることである。このことは検出器に互換性をもたらし、また波高値の較正を容易にする。

入力に与えられた電荷を放電し入力端子のDCレベルを復元するために、いろいろな回路が考案されている。もっとも簡単なものは電荷を高抵抗を介して出力側に戻すもので抵抗帰還型と呼ばれている。光電帰還方式は、発光ダイオードを用いてゲート電荷の増減に比例した光電流をゲート・ソース間の接合に流して、ゲート電位の安定化を計るものである。この方式の利点は抵抗に起因する雑音が完全に除去できる点にある。一方、漏洩電流による雑音は光電帰還により $\sqrt{2}$ 倍になる。その他にゲート・ドレン間の漏洩電流を利用したドレン・ゲート・フィードバック型プリアンプが最近提案されている³⁾。更に計数特性を改良する目的で、ゲートの電位がその許容範囲を逸脱したときに間歇的にその復元を行なう型もある⁴⁾。この論文においては通常の光電帰還型プリアンプを取り扱う。

光電帰還型プリアンプの微小信号に対する作動は、既にFig. 3で説明した一般的な電荷増巾型のそれに従う。このプリアンプに特有な問題はバイアスの設定に関連して起きる。まず発光ダイオード(LED)の発光特性とゲート・ソース接合を流れる光電流、そしてそれらと漏洩電流との関係について説明する。

LEDの発光量はダイオードの順方向の電流 i_{LED} とともに増加し、近似的に

$$\text{発光量} \propto i_{LED}^{\gamma}; \quad \gamma \approx 1$$

で与えられる。発光効率は発光機構に関係するので、LEDの種類に依る。一般に低温では発光効率は増加し、液体窒素温度で数倍程度大きくなる。

ゲート・ソースを横切って流れる電流は、普通のダイオード特性に基づき電流と光電流との和に等しい。Fig. 4 は、光を照らされたゲート・ソース接合の $V-I$ 特性の一例である。実線は接合部分の温度が一定に保たれたときの値である。ゲート・バイアス V_{GS} がピンチオフ電圧 V_P よりも浅い場合にはドレン電流が流れ、FETのチップは発熱する。それにより接合の温度が上昇し、漏洩電流が増加する。そのときゲート電流 I_{GS} は点線で描いた見掛けの $V-I$ 特性を示す。受光面におけるキャリア濃度が飽和に達しない限り、光電流はドレン・ソース電圧 V_{DS} とゲート・ソース電圧 V_{GS} に依存しない。

ゲートに検出器を接続したときの光電帰還型プリアンプの作動は、 $V_{GS} - I_{GS}$ 特性上に、検出器の $V-I$ 特性に対応する負荷曲線を重ねて引くことによって明らかになる。Fig. 4 では、判り易くするために誇張された傾斜をもつ直線で検出器に対応する負荷を表わす。このプリアンプでは、常に I_{GS} を I_{DET} に等しく保つようにフィードバック回路が働く。例えば I_{DET} と I_{GS} は初めに P 点で平衡を保っており、次に I_{DET} が増加して平衡点が Q に移動したとする。このとき負帰還の作用により V_{GS} の変化は非常に小さい。後で具体的なプリアンプの調整に必要なになるので、バイアスの変動を定量的に解析しておく。光電帰還型プリアンプの回路の基本的な部分を Fig. 5 に示す。帰還容量 C_F および入力容量 C_I は、DC レベルの解析には不要であるが、プリアンプの機能を完全に表現するために省略しないでおく。検出器を近似的に固定抵抗 R と可変バイアス V_{GG} とで置換する。そして漏洩電流の変化を V_{GG} を変えることでシミュレートする。電流源 ($\beta V_o + \text{CONST}$) は基準の出力レベルからの変動に比例して増減する光電流を表わす。バイアスの変動分を変数に δ を付加することによって表示すると、ゲート電位の変化は、

$$\delta V_G = -\delta V_{GG} + \beta R \delta V_o$$

で与えられる。この式は、ゲートの光電流特性に抵抗 R なる負荷直線を引いて動作点を求めることに対応している。一方、増巾器の開放利得を A とすると、出力レベルの変動は、

$$\delta V_o = A \delta V_G$$

となる。両式から

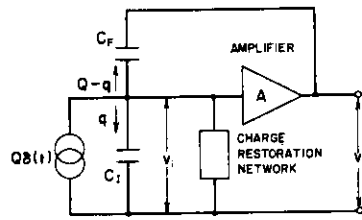
$$\begin{aligned} \delta V_G &= \frac{-\delta V_{GG}}{1 - \beta AR} \\ &\rightarrow \frac{\delta V_{GG}}{\beta AR} \quad \left| \beta AR \right| \gg 1 \end{aligned}$$

をえる。 $\delta V_{GG}/R \approx -\delta I_{DET}$ であることに注目すると

$$\delta V_G \approx -\frac{\delta I_{DET}}{\beta A}$$

出力の変化分は、

$$\delta V_o = A \delta V_G$$



$$\begin{cases} v_o = A v_i \\ v_i = \frac{q}{C_1} \\ v_i - v_o = \frac{Q - q}{C_F} \end{cases}$$

OR $v_o = \frac{AQ}{C_1 + (1-A)C_F}$
 $\rightarrow -\frac{Q}{C_F} \quad |AC_F| \gg C_1$

Fig. 3 The charge amplifier with a charge restoration network.

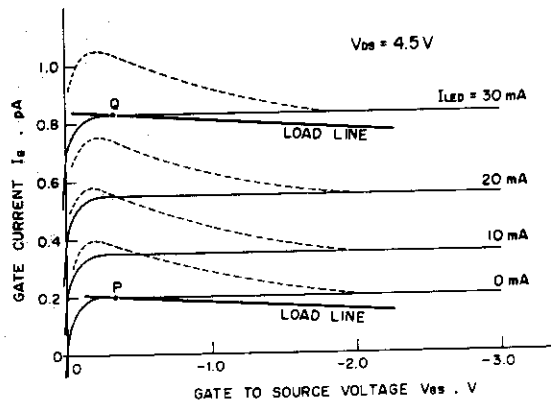


Fig. 4 Volt-ampere characteristics of the gate-to-source junction in an FET illuminated by an LED. Solid lines show the isothermal characteristics. In practice the junction temperature rises because of self-heating and the leakage current increases, as indicated by dotted lines. Load lines corresponding to Si(Li) diodes are nearly parallel to the abscissa, but they are indicated by lines with enlarged slopes.

$$\approx -\frac{\delta I_{DET}}{\beta}$$

で与えられる。参考のために各定数の大きさを示しておく。 $R \sim 5 \times 10^{11} \Omega$, $A \sim -500$, $\beta \sim 10^{-12} A/V$.

2.3 光電帰還型プリアンプの製作と調整

光電帰還方式と抵抗帰還方式との相違は、2.2節で述べたようにゲート電位の複元回路の違いにある。それ故、負極性のパルスを増巾することのできる全ての抵抗帰還型プリアンプは容易に光電帰還型プリアンプに改造することができる。ここではFig.6に示すような抵抗帰還型電荷増巾器から出発する。この増巾器の開放利得は室温で $A \approx -300$ 、FETの最適作動温度では $A \approx -700$ である。Fig.6の R_F を除き、Fig.7のLED制御回路をAB間に接続することによって、光によるフィードバックが完成する。Fig.7の Q_5 はLEDの電流を制御するトランジスタであり、 Q_6 は電流制御回路のバイアスを定める定電圧回路を構成している。電荷増巾段が正常に作動することができる出力電位の範囲は、この定電圧回路とダイオード D_1 と D_2 によって規定されている。Fig.7では、 V_0 の範囲は $(-7.5V, 0V)$ である。

プリアンプの調整について述べる前に、FETとLEDとの具体的な結合方法を示す。FETとLEDは、接合部分の受光量を調節するためのスリットとともに一つのアセンブリーに組み立てられている。一例として、試作段階で用いた各部分をFig.8に図示する。FETに関しては次節で詳しく言及するので、ここでは割愛する。LEDの発光には指向性があるので、採光の方向に注意されたい。輝度の強い方向にFETを置いて直接に照らすと、受光量の調節が非常に困難になる。アセンブリーにはガス抜き穴を設けておくこと、またそのときLEDの光が漏れないように注意する必要がある。もし漏れた光がSi(Li)素子にあたると、正のフィードバックとして作用し、制御が不可能になる。FETを最適温度で作動させるために、アセンブリーを熱的緩衝材を介してクライオスタット上に固定する。定電圧ダイオード等を用いて温度を調節することもできるが、ここでは $10\text{mm}\phi \times 5\text{mmt}$ のテフロン板で過冷却を防ぐ。

光電帰還型プリアンプの調整は次の手順に従って行う。

- (1) 抵抗帰還型プリアンプにおいて入力に 2pF の較正用容量を接続する。次にFETが動作点(V_{DS} , I_{DSS} (室温))になるようにトランジスタ Q_2 のベース電位と R_D を調整し、正常な作動を確認する。例えば $V_{DS} = 4V$ とすると Q_2 のベース電位は約 $3.4V$ である。このときFig.6の R_D は

$$R_D + 100\Omega = \frac{24V - 4V}{I_{DSS} + 0.5\text{mA}}$$

で与えられる。ここに 0.5mA は Q_2 のエミッター電流である。

- (2) 次に R_F を除き、Fig.6のAB間にLED制御回路を挿入する。入力端子に抵抗 $R = 5 \times 10^{11}\Omega$ と可変バイアス $V_{GG} = 0V \sim 3V$ を接ぎ、検出器をシミュレートする。 C_{CAL} にパルスを入れて、電荷増巾段が正常に働く V_{GG} の範囲(V_{GG1} , V_{GG2})を求める。作動しないときにはスリットの高さ、あるいは R_{LED} の値を調節してフォトカプリングを強くする。ただし発光ダイオードを流れる電流は、最大定格値よりも十分に小さい値に留める。普通、ゲ-

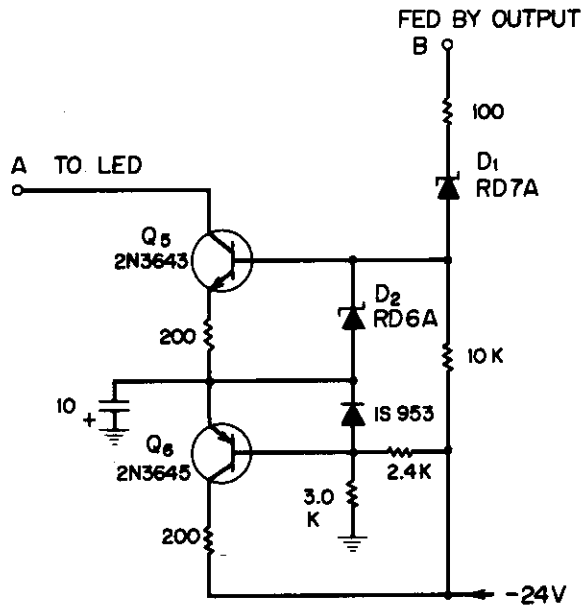


Fig. 7 A configuration of the opto-electronic feedback network.

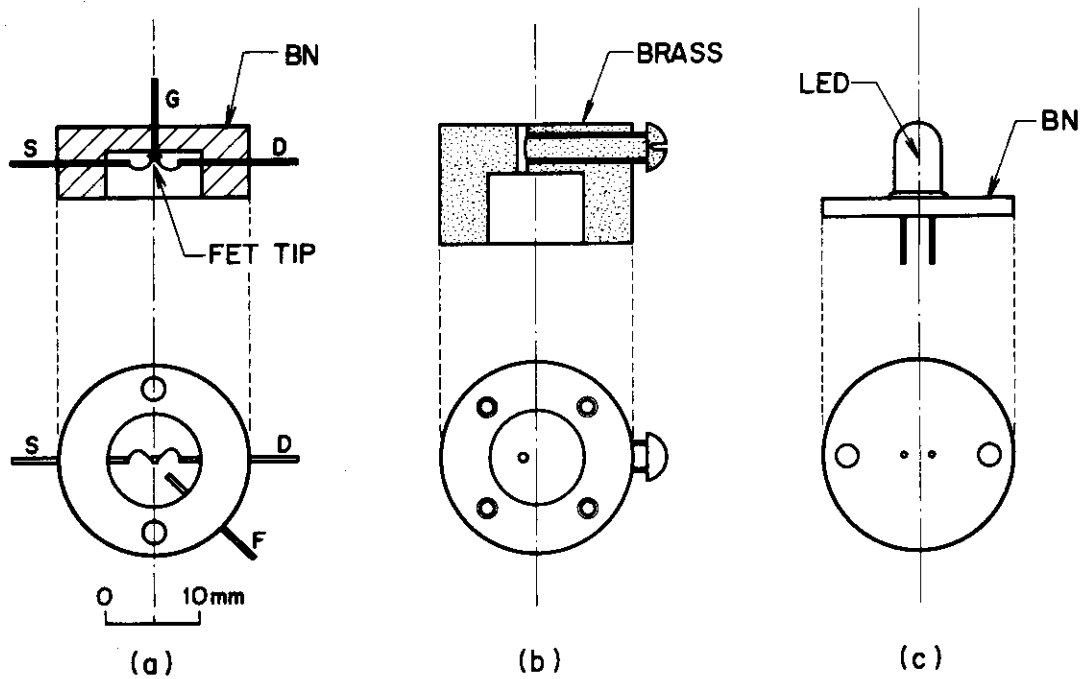


Fig. 8 Parts of an FET-LED assembly; (a) a boron nitride mount for the FET, (b) a slit, and (c) a mount for the LED.

トに 10^{-13} A 位の漏洩電流が流れるので、 $V_{GG1} \approx 0$ V である。光電帰還型プリアンプが応答できる検出器の漏洩電流の範囲は、

$$\left(0, \frac{V_{GG2} - V_{GG1}}{R} \right)$$

で与えられる。冷却すると発光効率が增加することを考慮して、漏洩電流の上限が約 5 pA になるようにフォトカプリングの強さを決める。液体窒素温度に冷却したとき、10 pA の漏洩電流の増加に対して出力電位が 5 V だけ変化したとするとフォトカプリングの強さは $\beta = 2 \times 10^{-12}$ A/V になる。以上で光電帰還型プリアンプの粗調整は終る。微調整については最後の章で述べる。

2.4 FETの選別

低雑音プリアンプを製作するとき、雑音の小さいFETは必須の素子である。その重要性から特に一節をもうけて、その選別方法について説明する。

FETのチップをその容器から取りはずしてBN(窒化ボロン)の基板上に載せ換える。Fig.8(a)は、基板の一例であり、ゲート・ソース・ドレンおよびフィードバック用の端子はエポキシ樹脂で接着されている。基板上に固定されたリード線とゲート間の容量が帰還容量として働き、その値は約 0.1 pF である。

FETは、基板に載せたままの状態かあるいはLEDとのアセンブリの形でクライオスタット上に固定する。そのとき前にも述べたように、熱的緩衝材を用いてFETが過冷却になるのを防ぐ。緩衝材としてテフロンを使う場合には、テフロンが帯電することに注意する必要がある。その帯電による電界は、表面から 1 cm 離れた所でもFETのチップに電界効果を及ぼす程強いことがある。それ故、テフロンとFETとの間には、接地した金属板を挟んで高電界からFETを遮蔽する。

S/N比の測定には抵抗帰還型プリアンプを使用する。入力に較正用容量 2 pF を接ぎ、 $2 \times 10^{11} \Omega$ の帰還抵抗を用いる。ここで使用するFETは 2N4416(TI)なので、その動作点を $V_{DS} = 4$ V, $V_{GS} = 0 \sim -0.5$ V の範囲に設定する。較正用パルスの波高値をシングルチャンネル・アナライザで求め、次に雑音の大きさをRMSメータで測る。このときS/N比を最大にするようなフィルター時定数を選ぶ。

次にクライオスタットを液体窒素で冷却しながらFETの雑音を測定する。また低温ではgmが増大し波高値が変化するので、較正用パルスの波高値も同時に測定する必要がある。FETの最適動作点を見つけるためには、その点を僅かに越えた点でFETが熱平衡に到達することが望ましい。冷却が強過ぎる場合には、FETが室温に回復する過程でS/N比を測定するとよい。このようにして最適作動状態に対応するS/N比と(V_{DS}, I_{DS})あるいは(V_{DS}, R_D)とを求める。

FETを選別するためには相対的S/N比の測定だけで十分であるが、雑音をエネルギー単位で表わすためには較正用パルスに対応するエネルギー値を正確に知る必要がある。このことは、検出器を接続して較正用パルスを更に既知のX線か γ 線で再較正することによって行う。

Fig.9はこのようにして求めた室温での雑音(Si換算FWHM)を横軸に、最適作動状態に

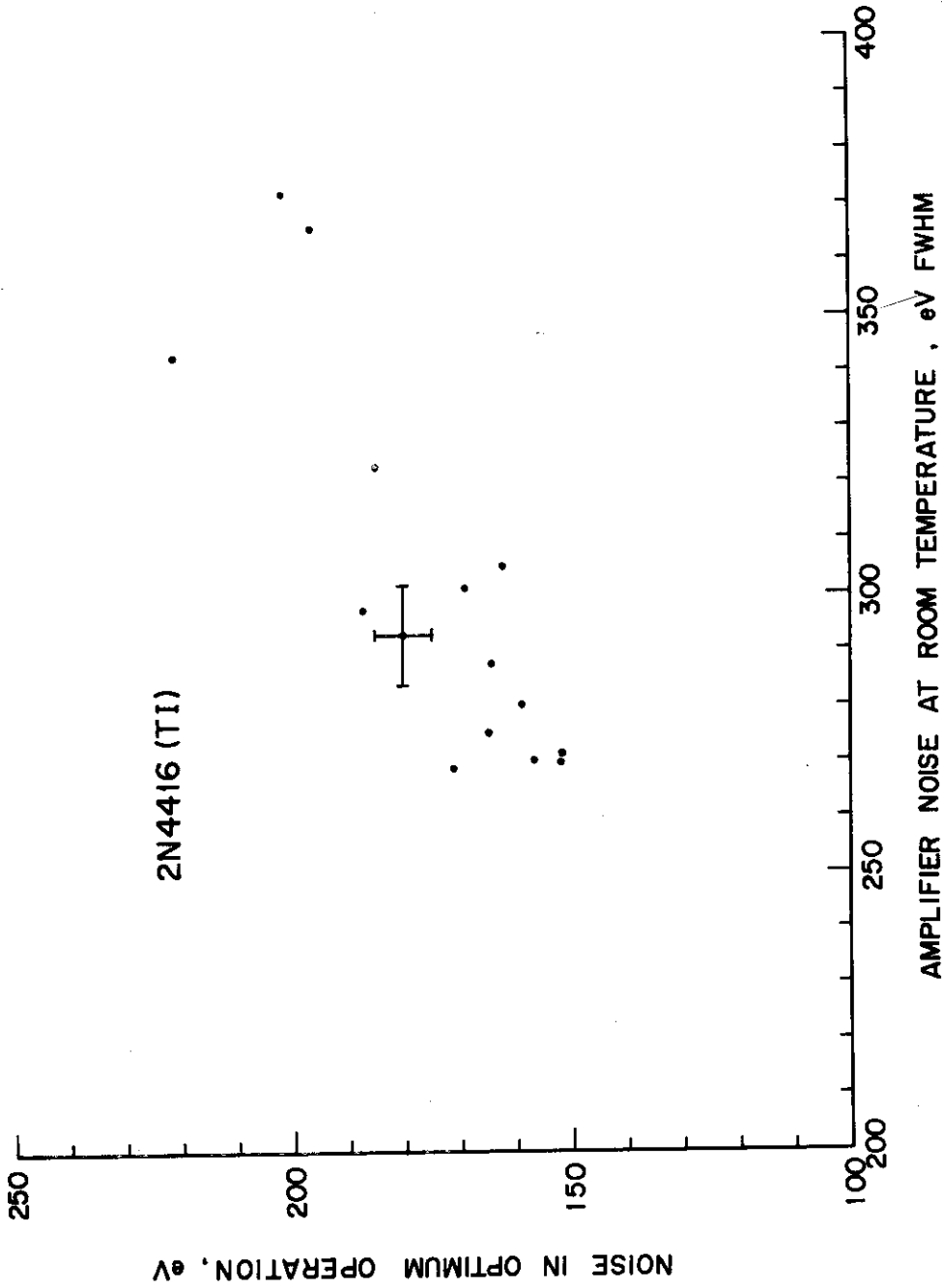


Fig. 9 Selection of FET's. The noise voltage was measured in the preamplifier with an FET at room temperature and in optimum operation; R_F was 2×10^{11} ohm, C_{CAL} 2.15 pF and the filter 6.4 μ s quasi gaussian. Those values in unit of eV FWHM are plotted on a graph.

おける雑音を縦軸にプロットして表わしたものである。測定条件は、 $R_F = 2 \times 10^{11} \Omega$ 、 $C_{CAL} = 2.15 \text{ pF}$ 、アクティブフィルターの時定数 $= 6.4 \mu \text{ sec}$ であった。この選別の過程で判明したいくつかの事実を要約しておく。

- (1) FETのチップをBN基板上に載せ換えることによって、通常の素子よりも15~20%だけ雑音が減少する。このときフィルターの最適時定数が大きくなるので、漏洩電流の減少が原因と考えられる。
- (2) 室温における雑音の大きさと最適作動状態での雑音の大きさとの間に、可成り強い相関関係がある。
- (3) 開封したFETのゲート・ソース間逆耐圧は、大気中の湿気に影響されて低下している。この点を越えて電圧を印加すると特性が劣化する。 I_{DSS} が大きいFETを、深いゲート・バイアスを加えて大気中で使用することは避るべきである。

3. Si(Li) 光子スペクトロメータ

光子スペクトロメータの総合的な性能は、三つの要素によって決定される。初めの二つは既に述べた Si(Li) ダイオードとプリアンプであり、残りの一つは真空系を含めたクライオスタットである。しかもこれらの性能は、和としてではなく積として光子スペクトロメータの性能に寄与するので、いずれの一つも疎かにすることはできない。本来、真空系とクライオスタットとは前二者と同等の比重で論ぜられるべきものであるが、真空系の構成やクライオスタットの形状等に選択の余地があるので、ここでは一般的な注意のみを記す。

検出器の i 表面への水の凝結は、単に漏洩電流を増大させるのみならず、キャリアのトラップをも促進させる。特に表面積が相対的に大きい X 線用 Si ダイオードでは、後者の影響が大きい。それ故、クライオスタットに対して脱ガスの処理を十分に施すとともに、適切な方法で検出器上に水が付着するのを防ぐ必要がある。またアウトガスの経年変化を利用するのも有効である。検出器系を適当な期間冷却したのちに室温に戻して排気し、再び冷却すると、水の凝結が緩和される。

最後に Si(Li) ダイオードを光電帰還型プリアンプに接続して光子スペクトロメータとして完成させよう。その手順は次の通りである。

- (1) フォトカプリングの調整が終ったプリアンプから較正用容量を除き、Si(Li) ダイオードを接ぐ。雑音を測定する場合には高压端子を利用してパルスを入れる。
- (2) FET が最適動作点 (V_{DS} , I_{DS}) で作動するように R_D と Q_2 のベース電位を調節する。
- (3) クライオスタットを真空にして液体窒素温度に冷却する。入力段が冷却したのち、完全な遮光を期するために次のような検査をする。検出器に逆バイアス約 10 V を加える。光が漏れる心配のある箇所に光を当てて、出力の電位の変動をしらべる。もし変動が見つかれば、それは Si(Li) ダイオードに光電流が生じたことを意味している。
- (4) 徐々に検出器のバイアスを定格値に上げる。フォトカプリングの強さが $\beta = 2 \times 10^{-12}$ A/V、入力容量が 5 pF ならば、ゲート電位は時定数 2.5 sec で応答する。バイアスを加える速さは、この応答速度を考慮して決める。
- (5) FET の最適作動の微調整は次のようにして行い、プリアンプの出力を最適時定数で整形して雑音の大きさを測定する。 V_{DS} と R_D を少しずつ変えて雑音を最小にする。 V_{DS} は 3 ~ 5 V、 I_{DS} は $I_{DSS} \sim \frac{1}{2} I_{DSS}$ の範囲で可変なので、FET チップの発熱は約 2 倍の範囲で調節可能である。それ故、容易に最適作動温度を見い出すことができる。

このようにして製作した Si(Li) 光子スペクトロメータの性能の一端を Fig. 10 と Fig. 11 に図示する。Fig. 10 は、Cu- K_{α} X 線と較正用パルスとのスペクトルである。較正用パルスに対する分解能は 133 eV FWHM であり、これは RMS メータで測定した値と一致している。Cu- K_{α} X 線に対する分解能は 187 eV FWHM である。これらの値は、アルミニウムと鉄の K_{α} -X 線に対してそれぞれ 140 eV、170 eV の分解能を保証する。Fig. 11 は Np の L-X 線である。

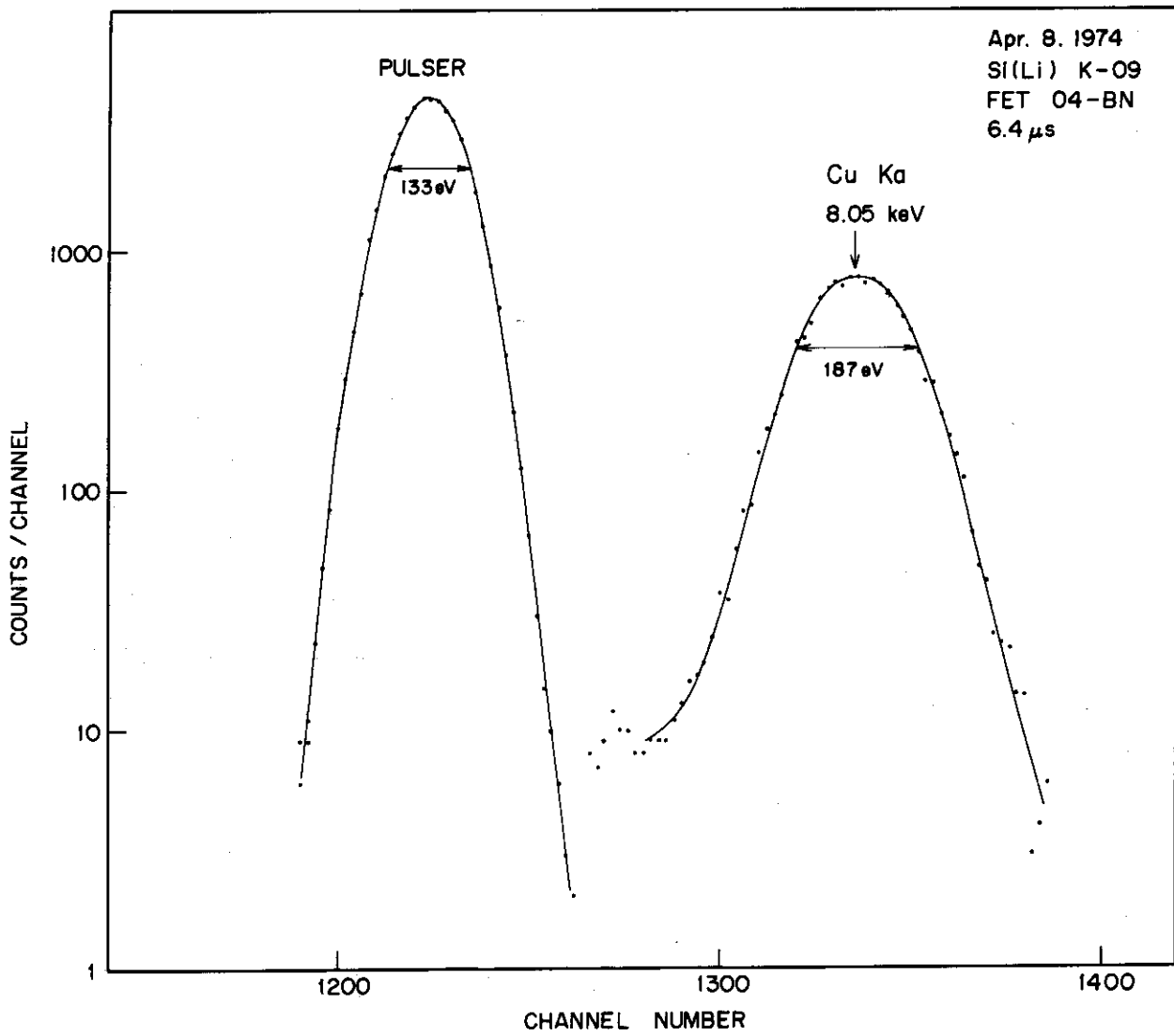


Fig.10 Performance of a Si(Li) photon spectrometer for Cu K_{α} -X rays and the pulser.

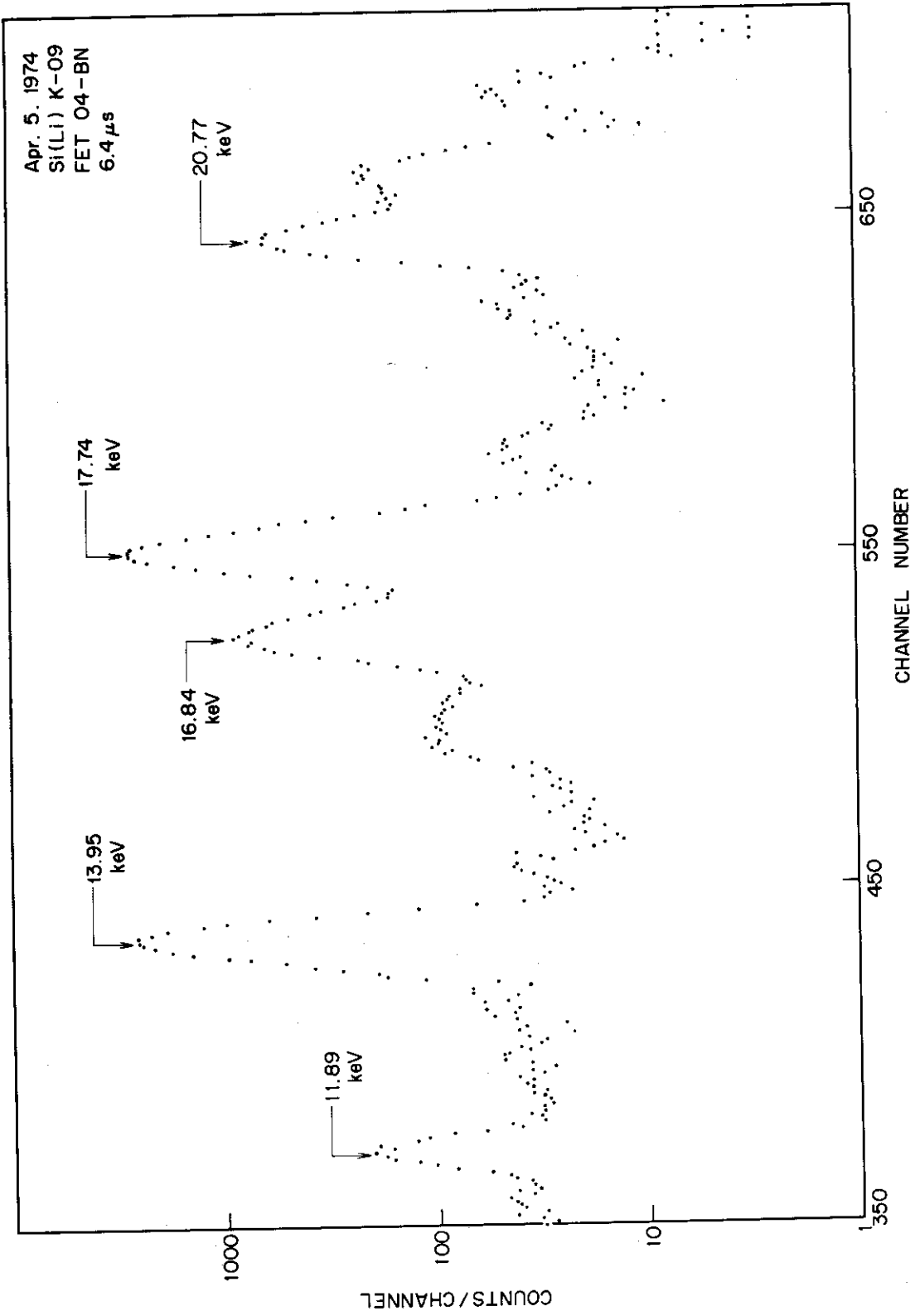


Fig.11 Performance of a Si(Li) photon spectrometer for Np

L-X rays.

前に述べたように、この論文の目的は最高の性能を追求することではなく、標準的な性能のスペクトロメータを簡単に作る方法を提示してその有効利用を計ることにある。この意味において既に目的は達成されているが、FETを厳選することにより更に雑音を15%程度削減することができる。10keV以上のX線に対する分解能は、キャリアーのトラップによって大きく左右される。この領域における分解能を改善するためには、良い単結晶を入手するとともに、i表面の影響をガードリング等を用いて除去する必要がある。

謝 辞

著者は、核物理第一研究室 原田言之助室長ならびにエレクトロニクス課 金原節朗課長そして熊原忠士係長に、適切な助言と配慮をいただいたことを感謝する。

References

1. M. Ishii, Si(Li) Detectors and their Applications in Nuclear Spectroscopy, Report JAERI-M-5000, 1972.
2. F.S. Goulding, J. Walton and D.F. Malone, Nucl. Instr. and Meth. 71 (1969) 273.
3. T. Kumahara, in "Nuclear Spectroscopy" (ed. Radiation Laboratory of the Institute of Physical and Chemical Research, Saitama, Japan, 1973) p.32.
4. D.A. Landis, F.S. Goulding and J.M. Jacklevic, Nucl. Instr. and Meth. 87 (1970) 211.

前に述べたように、この論文の目的は最高の性能を追求することではなく、標準的な性能のスペクトロメータを簡単に作る方法を提示してその有効利用を計ることにある。この意味において既に目的は達成されているが、FETを厳選することにより更に雑音を15%程度削減することができる。10keV以上のX線に対する分解能は、キャリアーのトラップによって大きく左右される。この領域における分解能を改善するためには、良い単結晶を入手するとともに、i表面の影響をガードリング等を用いて除去する必要がある。

謝 辞

著者は、核物理第一研究室 原田吉之助室長ならびにエレクトロニクス課 金原節朗課長そして熊原忠士係長に、適切な助言と配慮をいただいたことを感謝する。

References

1. M. Ishii, Si(Li) Detectors and their Applications in Nuclear Spectroscopy, Report JAERI-M-5000, 1972.
2. F.S. Goulding, J. Walton and D.F. Malone, Nucl. Instr. and Meth. 71 (1969) 273.
3. T. Kumahara, in "Nuclear Spectroscopy" (ed. Radiation Laboratory of the Institute of Physical and Chemical Research, Saitama, Japan, 1973) p.32.
4. D.A. Landis, F.S. Goulding and J.M. Jacklevic, Nucl. Instr. and Meth. 87 (1970) 211.