

シリコン  $\gamma$ 線検出器

## Silicon Gamma-ray Detector

矢部正也 \* Masaya Yabe · 佐藤則忠 \* Noritada Satô

## I. まえがき

富士電機は、原子力発電所、放射性物質を利用する病院、大学研究所などで放射線計測に用いる測定器や安全管理のための放射線監視測定装置を製作している。また放射線の物質透過力を利用して非接触で厚さ、レベル、密度などを測定する工業計測器も各種製作している。これらの機器装置には必ず放射線センサが使用され、それぞれの目的にかなう各種センサを開発製造してきた。富士電機の放射線センサ及び機器装置については、本誌放射線機器特集号に述べているので、ここでは最近開発した超高純度シリコン単結晶を用いた放射線検出器について紹介する。

## II. シリコン放射線検出器

半導体結晶を用いた放射線検出器に関する報告は多数あるが、従来の検出器は高い印加電圧や冷却を必要とし、携帯用照射線量計のような小形・軽量・簡便さを要求される機器に適合する実用的なものは存在していなかった。

しかし、最近の目ざましいシリコン半導体技術の進歩に伴い、放射線検出器に使用できる超高純度高抵抗シリコン単結晶が我が国で開発され、工業的入手が可能になった。これはモノシランガスの高純度精製により作られるものであるが、その究極的不純物はボロンであるため p 形になる。もちろんこれを補償して高比抵抗の n 形結晶も得られるが、ドナー不純物による補償を行わない p 形結晶の方が比抵抗の均一性がよく、より高比抵抗の結晶が得られ、製造も n 形より容易である、などの利点がある。

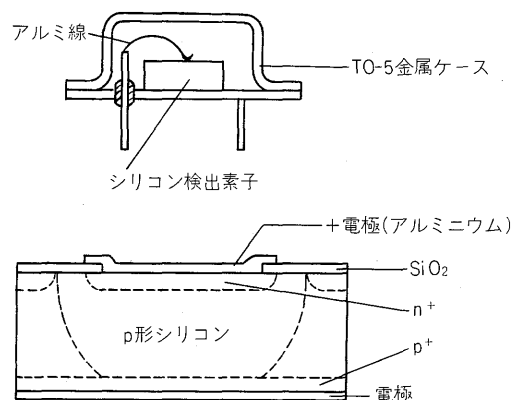
その比抵抗は、p 形では  $10\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$  から  $120\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$  に達し、このような結晶でダイオードを作ると、低いバイアス電圧でも、放射線検出に必要な広い空乏層幅が得られる。これを用いて、富士電機では既にバイアス電圧  $100\text{V}$  で動作する放射線検出器を開発してきたが、今回更に低い  $20\text{V}$  で動作するものを開発した。これは携帯用測定器に適用した場合、その小形軽量化、及び長寿命化を図ることが期待できるものである。

## III. 検出器の原理及び構造

X 線又は  $\gamma$  線がシリコン結晶内を通過するとき、その

エネルギーにより、光電効果、コンプトン散乱、電子対生成のいずれかの過程で発生した二次電子が、更にシリコンの格子原子と作用し、電子正孔対を生成する。このうち、空乏層内で生じた電子正孔対が電極に集められ、増幅回路を通して電流パルスとして検出される。この二次電子が空乏層内でエネルギーを失う場合、そのパルス波高は  $\gamma$  線エネルギーとほぼ比例する。

検出器の構造は、第 1 図に示すようなプレーナ形 pn 接合で、 $10\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$  以上の p 形シリコン基板を使用し、 $20\text{V}$  バイアス時には厚みの全体に空乏層が広がるようにしてある。この検出器は、長寿命化を図るため TO-5 の金属ケースに封止する。特に低エネルギー X 線又は  $\gamma$  線を検出する場合は、ケースによる吸収を極力少なくするため、約  $20\mu\text{m}$  のアルミ箔窓のついた金属ケースを使用する。



第 1 図 シリコン  $\gamma$  線検出器の断面構造  
Fig. 1. Cross section of encapsulated detector and structure of detector element

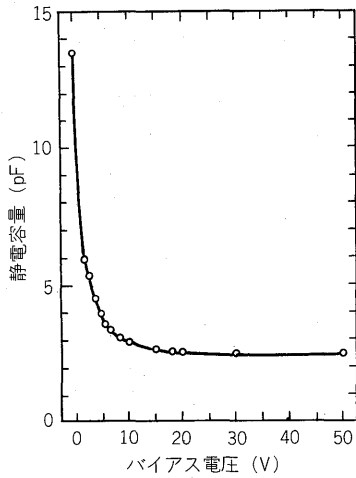
## IV. 特性

本検出器の特性を以下に紹介する。

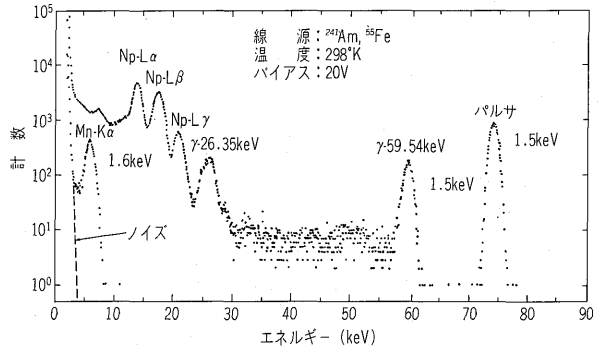
## 1) 動作電圧

逆バイアス電圧の増加とともに空乏層幅が広がるため、静電容量は減少する。第 2 図から、約  $18\text{V}$  以上で飽和していることがわかる。これは、動作電圧が  $20\text{V}$  のとき空乏層が厚みの全体に広がっていることであり、動作電圧が多少変動しても特性に及ぼす影響が少ないことを示すものである。

\* (株)富士電機総合研究所



第2図 静電容量対バイアス電圧  
Fig. 2. Detector capacitance vs. reverse bias



第3図 バイアス電圧20V, 25°Cにおける<sup>55</sup>FeのMn-Kα X線スペクトルと<sup>241</sup>Amのγ線スペクトル  
Fig. 3. Spectra of Mn-Kα X-ray due to <sup>55</sup>Fe and <sup>241</sup>Am gamma-ray obtained by the silicon detector at 25°C and a bias voltage of 20V

2) エネルギー分解能

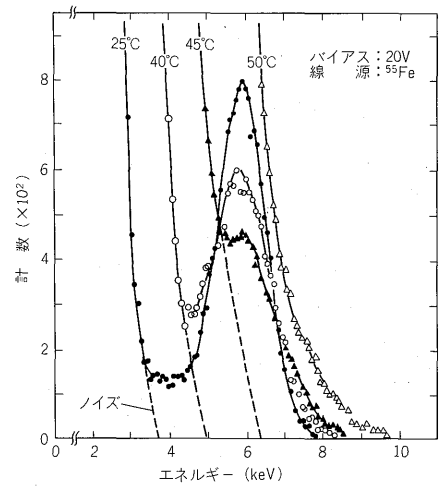
半導体検出器の特性を評価する指標として、半価幅エネルギー分解能 FWHM(Full Width at Half Maximum)がある。これは、あるγ線エネルギーによって得られるパルス波高の分布状態を示すもので、検出器から発生するノイズの大小により分布状態は変化する。すなわち、ノイズが大きいかほど FWHM は広がるが、この中には更に増幅回路系のノイズも含まれるため、パルス発生器から発するパルス波高分布も同時に観測し、回路特性を評価する。

検出器の逆電流が大きいとノイズは大きくなる。この逆電流はシリコン結晶の表面処理、熱酸化膜、pn 接合などの製造条件に大きく依存する。本検出器ではこれらの条件を確立したため、逆電流が少なく、かつノイズが少なく、したがって狭い FWHM が得られ、低エネルギー X 線・γ線の検出が可能になった。第3図は低エネルギー X 線及びγ線を発生する線源から得られたスペクトルである。第4図は<sup>55</sup>Feのスペクトルの温度変化を、第5図は FWHM とノイズパルス波高の温度依存性を示す。

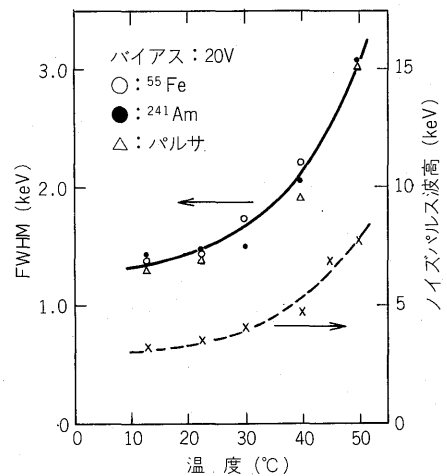
本検出器の FWHM は、25°C のとき 1.5~1.6keV である。40°C でもノイズは増えるが 5.9keV の<sup>55</sup>Fe の Mn-Kα X 線ラインを十分に測定できることがわかる。

3) 線量率直線性

本検出器は空乏層幅が狭い(~140μm)ので、高いエネルギーのγ線に対しては二次電子の飛程が空乏層領域に比して長くなる。このため、電子正孔対の一部しか検出されない確率が増し、その結果、得られるパルス波高が低下する。したがってエネルギーと関連するパルス波高と、パルス数の計数との関係は第6図に示すようになる。エネルギーの低い<sup>57</sup>Co に対しては 122keV と 136keV 相当のピークが観測され、エネルギースペクトルとの対応が成立するが、高いエネルギーのγ線を発生する<sup>137</sup>Cs や<sup>60</sup>Co に対してはこの対応が成立していない。しかし、単にγ線をパルスとして計数する線量計あるいは線量率



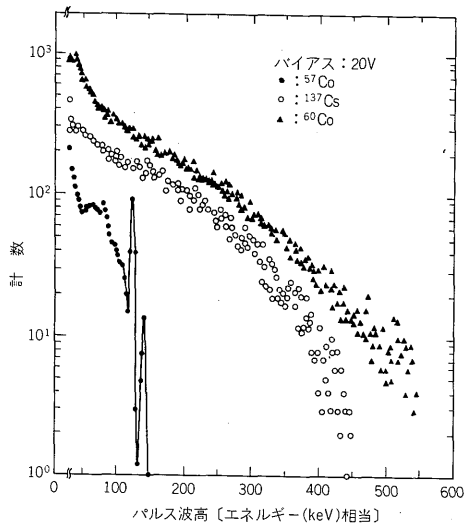
第4図 25°C以上の各温度における<sup>55</sup>FeのMn-Kα X線スペクトル  
Fig. 4. Profiles of the Mn-Kα line due to <sup>55</sup>Fe at different temperatures higher than 25°C



第5図 エネルギー分解能(FWHM)とノイズパルス波高の温度依存性  
Fig. 5. Dependence of energy resolution(FWHM) and noise pulse height on temperature

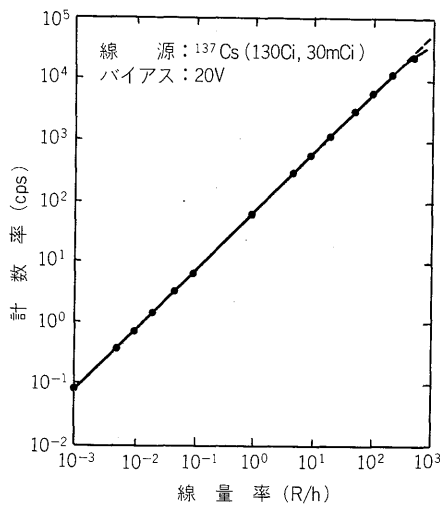
計としての適用が可能である。

第7図はその一例として662keVのγ線を発生する<sup>137</sup>Csを使用したときの線量率と計数率の関係を示したものである。このような狭い空乏層幅領域ではγ線の吸



第6図 バイアス電圧20V, 25°Cにおける $^{57}\text{Co}$   $^{137}\text{Cs}$   $^{60}\text{Co}$ の各 $\gamma$ 線スペクトル

Fig. 6. Spectra of  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{60}\text{Co}$  gamma-ray obtained by the silicon detector at 25°C and a bias voltage of 20V



第7図 計数率対線量率

Fig. 7. Counting rate vs. dose rate

収係数が低下し、計数効率が低いため高線量率でもパルスとパルスが時間的に重なり合う確率が低くなり、1 mR/h $\sim$ 100 R/hの広い線量率範囲にわたり偏差 $\pm$ 10%以下の直線性が得られている。

#### 4) 応用

第6図の特性から明らかなように、150keV以下の低エネルギーX線・ $\gamma$ 線に対してはスペクトロメータとして適用できる。一方、 $\gamma$ 線に対する線量計あるいは線量率計としての適用も可能で、第7図に示したように5けた以上の線量率に対し良好な直線性を有するものが得られる。特に本検出器は常温低電圧で動作するため、携帯用の各種測定器用検出器として有効である。

#### V. あとがき

本シリコン $\gamma$ 線検出器は、手軽にX線や $\gamma$ 線の検出が行えるものを得ることを目的として開発した。特に $\gamma$ 線は工業計測、医療などに広く利用されるので、本検出器の各方面への利用が期待される。

この研究に御助言を頂いた立教大学原子力研究所白石文夫講師に謝意を表する。

#### 参考文献

- (1) 放射線機器特集, 富士時報, **54**, 4, pp. 240~316 (1981)
- (2) プライス原著・西野治監修:放射線計測, pp. 224~288, コロナ社 (1966)
- (3) A. Yusa et al.: Ultrahigh purification of silane for semiconductor silicon, J. Electrochem. Soc. **122**, pp. 1700~1705 (1975)
- (4) M. Tajima et al.: Characterization of residual impurities in high pure Si crystals by photoluminescence technique, Jpn. J. Appl. Phys. Suppl. 19-1 pp. 631~635 (1980) (Proc. 11th Int. Conf. Solid State Devices Tokyo, Aug. 27-29, 1979)
- (5) 佐藤則忠ほか: シリコンガンマ線検出器, 第17回理工学における同位元素研究発表会, 2a-II-8 (1980)
- (6) 佐藤則忠ほか: 半導体センサ, 富士時報, **53**, 10, pp. 761~763 (1980)
- (7) M. Yabe et al.: A silicon X-and gamma-ray detector for room temperature and low voltage operation, Nuclear Instruments and Methods, to be published; Fifth Symposium on X-and Gamma Ray Sources and Applications, Univ. of Michigan, Ann Arbor, Michigan, June 10-12, 1981



\*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する  
商標または登録商標である場合があります。