210. 原子力発電所用シリコン半導体 γ 線検出器の開発とその応用

北口 博司*, 出海 滋*,
海原 明久**, 三谷 信次**, 黒須 俊樹**

(1989年 11月 1日 受理)

*Development and Application of Silicon Semiconductor
Gamma-Ray Detector for Nuclear Power Plants*

By Hiroshi KITAGUCHI, Sigeru IZUMI,
Akihisa KAIHARA, Shinji MITANI and Toshiki KUROSU

A semiconductor γ -ray detector using high resistivity P-type silicon crystals has been developed for nuclear power plants. Since the operating temperature requirement is high ($\leq 60^\circ\text{C}$) in these plants, the electrical thermal noise of the detector element due to the reverse current has to be decreased. The reverse current of the silicon diffused p-n junction fabricated by a planar process was evaluated and satisfactory results were obtained.

The detector elements were applied to a γ -ray area monitor and also to a personal dosimeter with an IC card, as a means for reducing manpower requirements in radiation control work. Performance tests were carried out in a nuclear power plant and the practicality of these applications was confirmed.

KEYWORDS: high resistivity silicon, Si semiconductor detectors, reverse current, p-n junctions, lifetime, temperature dependence, gamma radiation, area monitor, nuclear power plants, personnel dosimeters, performance, IC card, trend data, radiation protection system

I. 緒 言

放射線センサの高信頼化をねらいシリコン(Si)半導体放射線検出器の開発と実用化が急速に進展している⁽¹⁾⁽²⁾。これは近年、Si単結晶の精製技術が向上し、抵抗率数 $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$ 以上の高純度Siが容易に入手できるようになったことによる⁽³⁾。

原子力発電所に設置されているエアモニタ等 γ 線検出器の大多数もGM計数管であり、この代替として寿命の向上や低電圧作動が図れる半導体式への転換要望が強い。原子力発電所用エアモニタの仕様はJIS規格の仕様⁽⁴⁾に比べて温度仕様が厳しく、高性能の検出器を実現しなければならない⁽⁵⁾。検出器の使用温度が上昇すると漏洩電流が増大し雑音レベルが上昇する。

エアモニタに要求されている γ 線有感エネルギーの下限は50 keVであり、使用温度範囲で雑音レベルが下限値を超えないようにしなければならない。さらに、従来のGM計数管の γ 線検出感度と同等のSi検出

器を実現するためには 100 mm^2 程度の大きな面積素子が必要となるが、面積の増大は直接漏洩電流を増大させる。したがって、このSi検出器開発の重要な技術課題は検出素子の漏洩電流を低減することである。

本報では、P型高純度Si(抵抗率 $2\sim 10\text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ 、キャリアのライフタイム数ms)を用いた検出素子製造プロセス(ブレナープロセス)に改善を加え、低漏洩電流の検出素子を実現した。本報では、検出素子製造プロセスの改善内容と、製作した検出素子の特性とを評価検討した結果について報告する。また、この検出素子の応用として、原子力発電所用エアモニタおよび放射線管理業務の高度化を図る目的のICカード付き個人被曝線量計の開発例についても報告する。

* 日立製作所エネルギー研究所(Energy Res. Lab., Hitachi Ltd.)

** 日立製作所大みか工場(Omika Works, Hitachi Ltd.)

** 日立製作所日立工場(Hitachi Works, Hitachi Ltd.)

II. 検出素子

1. 素子構造と製造プロセス

Fig. 1に検出素子の構造を示す。 n^+ 層に正の逆電圧を印加すると、 n^+ 層の下部に放射線有感部となる空乏層が広がる。放射線検出の有感面積は n^+ 層の周囲に設けるガードリング(P^+ 層)の内径(Fig. 1中の ϕ)にはほぼ等しくなる。これは、素子の表面保護膜とSiの間に反転層ができ、ガードリング端までp-n接合が形成されることによる。

Fig. 1 Structure of detector element

検出素子の漏洩電流は表面漏洩とバルク漏洩に分けられる。表面漏洩は素子製造プロセスの表面処理技術に依存する。バルク漏洩はバルク内の発生電流と拡散電流の和となる。発生電流(I_{gen})と拡散電流(I_{diff})は、次式で表わすことができる⁽⁶⁾。

$$I_{gen} = \frac{1}{2} q \frac{n_i}{\tau} ws \quad (1)$$

ここで、 q : 電子の電荷 ($1.6 \times 10^{-19} \text{C}$)

n_i : 真性半導体のキャリア濃度 ($1.5 \times 10^{-10} \text{cm}^{-3}$)

w : 空乏層厚 (cm), s : 接合面積 (cm²)

τ : 少数キャリアのライフタイム (s)

$$I_{diff} = qD \frac{n_i^2}{NL} s \quad (2)$$

ここで、 D : 電子の拡散係数 (cm²/s)

L : 電子の拡散長 (cm) [$L = \sqrt{D\tau}$]

N : 不純物濃度 (cm⁻³)

以上の関係から明らかなように、少数キャリアのライフタイム(τ)を向上させることが漏洩電流低減の重要なポイントとなる。このためには、素子内の転位密度の減少やライフタイムキラー(重金属等)の含有率を低減させる技術が必要となる。この観点から、現在まで蓄積されたIC等の製造技術を駆使してライフタイム向上策を検討した結果、①熱拡散プロセスの不純物ドーピング濃度を最適に制御すること、②熱拡散処理の昇降温速度を適切に制御すること、が有力であること

がわかった。①の対策では、不純物の濃度勾配を抑制し、素子内の転位密度を大幅に減少させることができる。②の対策でも、転位の発生を防ぐとともに重金属の固溶度を低く保つことができる。

Photo. 1に対策前後の素子表面観察結果を示す。この結果で網目状に現れている部分が表面から内部に存在する転位であり、対策前後の効果が明瞭にわかる。

Photo. 1 Improvement result of thermal diffusion process

以下、この製造プロセスで製作した検出素子の漏洩電流成分を考察した結果について述べる。

2. 漏洩電流の評価試験法

検出素子是有感面積(p-n接合面積)の異なる数種類(0.13~314 mm², 直径0.4~20 mm)を製作し、フラットベースパッケージに封入して検出器に組み立てた。

漏洩電流(I_d)は表面漏洩(I_s)とバルク漏洩(I_b)に分けられ、さらに、 I_b は発生電流成分(I_{gen})と拡散電流成分(I_{diff})に分けられ、次式の関係になる⁽⁷⁾。

$$I_d = I_s + I_b \quad (3)$$

$$I_b = I_{gen} + I_{diff} \quad (4)$$

I_s と I_b 成分を評価するため、ガードリングの内径(ϕ)が同一で n^+ 層(電極)の外径が異なる素子(保護膜SiO₂とP型シリコンとの接触表面積が異なる)を製作し、それぞれの I_d を調べた。製作した素子の寸法をTable 1に示す。漏洩電流の温度依存性試験は恒温槽に熱電

Table 1 Dimension of detector elements for evaluation of reverse current

Guard-ring inner dia. ϕ (mm)	n^+ layer outer dia. ϕ (mm)	Surface area A_s (mm ²)
6	5.5	4.5
	5.0	8.6
	4.0	15.7
2	1.5	1.4
	1.0	2.4
	0.5	2.9

対を取り付けた検出器を挿入し、各温度の漏洩電流を測定した。なお、検出器への印加電圧は24V一定とした。漏洩電流による雑音レベルと γ 線エネルギーの関係は、 ^{241}Am (59.5 keV), ^{57}Co (122 keV)の低エネルギー γ 線線源で校正した。

3. 試験結果と考察

Fig. 2に検出素子の有感表面積(A_s)と I_d の関係を示す。この結果では I_d と A_s に依存性が見られず、 I_d は I_b が律速になっていると推察できる。これは素子製造プロセスの表面処理技術で表面漏洩を無視できる程度に抑制していることを示す⁽⁷⁾。

Fig. 2 Relation of reverse current vs. surface area

Fig. 3には漏洩電流の温度依存性を示す。真性キャリア濃度(n_i)の温度依存性は次式で示される。

$$n_i \propto \exp\left(\frac{-E_a}{kT}\right) \quad (5)$$

ここで、 E_a : 活性化エネルギー (eV)
 k : ボルツマン定数 (8.62×10^{-5} eV/K)
 T : 絶対温度 (K)

(1), (2), (5)式の関係から、温度依存性を絶対温度の逆数でプロットすることによって、 I_{gon} と I_{dtr} 成分を評価することができる。すなわち、このプロットで n_i に比例する範囲では I_{gon} が主となり、 n_i^2 に比例する範囲では I_{dtr} が主となる。Fig. 3の結果から、本検出素子の使用温度範囲(0~60℃)での漏洩電流成分は I_{gon} が主体となっているといえる。漏洩電流の評価は検出素子の有感面積を大きくする場合の重要な設計パラメータとなる。

Fig. 4には各検出器漏洩電流の温度依存性について調べた結果を示す。漏洩電流評価結果の計算値と実測値が良く一致していることがわかる。また、この結果から明かなように、GM計数管と同等の感度をもつ検出器(直径12mm, 113 mm²)がエアモニタの温度仕様を十分満足していることがわかる。さらに、最も

Fig. 3 Temperature dependency of reverse current

有感面積の大きい検出器(直径20mm, 314 mm²)もエアモニタ仕様を満足させる結果を得ている。エアモニタには各種の測定レンジに対応した検出器を用いるが、直径12mm検出器より有感面積の小さいものについても、その温度仕様は満足できるといえる。

Fig. 4 Relation of reverse current vs. temperature

以上の検討結果から、本検出素子の漏洩電流が(1)式の I_{gon} に従うと仮定すれば、検出素子の実効ライフタイムは数msとなる。これはSi素材のライフタイムを維持している値といえる。

以下、本検出素子実用化の応用展開例として、原子力発電所用エアモニタおよびICカード付個人被曝線量計の開発内容について報告する。

Ⅲ. 検出素子の応用展開

1. 原子力発電所用エリアモニタ

Photo. 2 に本検出素子を用いた原子力発電所用エリアモニタの外観を, Fig. 5 に検出器のエネルギー特性試験結果の1例を示す。エネルギー特性は0.08~3 MeVの範囲で $\pm 17\%$ (^{60}Co の感度を基準)の値を得た。

Photo. 2 γ -ray area monitor

Fig. 5 Characteristic of energy response

Fig. 6 にはその直線性を調べた結果を示す。直線性試験結果では5 デカダの範囲で $\pm 2.8\%$ FS, 4 デカダの範囲で $\pm 1.8\%$ FS の性能を得た。

Fig. 6 Characteristic of linearity

Table 2 には半導体式エリアモニタの性能をまとめて示す。これらの性能は JIS 規格と原子力発電所仕様

をすべて満足するものである⁽⁶⁾。このエリアモニタを実稼働プラント内で1年間実用耐久試験し, その実用性を実証した。

Table 2 Abilities of radiation area monitor in nuclear power plants

Item	Nucl. power plant spec.	Ability
1 Energy response (%) (80 keV~1.25 MeV)	± 25	± 17
2 Linearity (% full scale)	± 4	± 2.8
3 Directional response (%)		
$\pm 45^\circ\text{C}$	± 10	± 5
$\pm 60^\circ\text{C}$	± 30	± 22
4 Operating temperature range ($^\circ\text{C}$)	0~60	0~60

2. ICカード付個人被曝線量計

Photo. 3 に本検出素子を用いたICカード付個人被曝線量計の外観を示す。この線量計は放射線管理技術の高度化を目的に, 従来の各種個人管理機器の機能を1台に集約させた多機能線量計である。特に, 情報流通媒体となる大容量メモリのICカード⁽⁹⁾を脱着可能に実装する新しい形式の個人被曝線量計である⁽¹⁰⁾。

Dimension: 116×71×19 mm, Weight: 175 g

Photo. 3 Computerized personal dosimeter with IC card

Fig. 7 にICカード付個人被曝線量計の構成を示す。この線量計は集積線量の計測を行うアナログ系と集積線量データの収集管理を行うデジタル系に大別できる。前者には上述の半導体検出素子を用いており, 小型低消費電力化をねらったハイブリッド回路で構成する。後者はゲートアレイ(カウンタ回路, シリアルインターフェイス等), シングルチップコンピュータ, 脱着可能なICカード(EEPROM)が主要構成要素となる。

Fig. 7 Structure of personal dosimeter with IC card

本線量計を用いることによって、従来の線量管理機器では実現できなかった⁽¹¹⁾⁽¹²⁾ min 単位の線量履歴データの収集や、集積値、線量率、入退域管理等の複合管理を容易に達成できる。また、ICカードには放射線管理手帖の内容を含む個人情報をファイルすることが可能であり、ペーパーレス化を図る新しい線量管理システムを構築できる⁽¹³⁾。本線量計を原子力発電所内の実作業で携帯試用する実証試験を行い、その実用性能を確認した⁽¹⁴⁾。

Fig. 8 に、この実証試験で収集した min 単位の線量履歴データ収集例を示す。作業内容は原子炉1次格納容器ベデスタル内の中性子計装配管の交換である。携帯試用者が高線量部分の中性子計装配管に接近した状況がピークとして現れ、作業での個人線量状況を克明に把握できる。この線量履歴データの収集は作業工程に沿った個人線量の様子を詳細に知ることができ、各種放射線作業の被曝低減を検討する重要な資料となる。

Fig. 8 Experimental results on exposure trend data

IV. 結 論

高純度P型シリコンを用いた原子力発電所用γ線検出素子を開発した。この素子は半導体製造の熱拡散プロセスでp-n接合を形成したものである。本開発では、検出素子の漏洩電流低減策を講じたプレナープロセスを採用し、原子力発電所用エアモニタに要求される使用温度60℃で、熱雑音成分が無視できる検出素子を実現した。この検出素子の漏洩電流成分を評価検討するとともに、各種のγ線検出器を設計する基礎データを収集した。本検出素子を原子力発電所用エアモニタおよび放射線管理業務の省力化を図るICカード付個人被曝線量計に应用し、実稼働プラント内での実証試験でその実用性を確認した。

— 参考文献 —

- (1) Van WIJNEN, P.J., et al.: *Nucl. Instrum. Methods*, A253, 351~359 (1987).
- (2) 応物学会放射線分科会: 放射線, 10[2/3], (1984).
- (3) AMMON, W.V., et al.: *Nucl. Instrum. Methods*, 226, 94~102 (1984).
- (4) IIS Z-4324, X線及びγ線用エアモニタ, p450~453 (1985).
- (5) 北口博司, 他: 原子力学会「昭62秋の大会」予稿集, A33.
- (6) GROVE A.S. (垂井訳): 「半導体デバイスの基礎」, p193 (1986), マグロウヒルブック.
- (7) KEMMER, J.: *Nucl. Instrum. Methods*, 226, 89~93 (1984).
- (8) 北口博司, 他: 原子力誌, 30[4], 330 (1988).
- (9) 相良岩男: 「ICカード」電子技術, p74 (1986-8).
- (10) IZUMI, S., et al.: *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS-36[1], 1150 (1989).
- (11) WOIF, M.A., et al.: *ibid.*, NS-29[1], 773 (1982).
- (12) BOUTELLER, P.F., et al.: *ibid.*, NS-32[1], 1156 (1985).
- (13) 北口博司, 他: 原子力誌, 31[2], 276 (1989).
- (14) 北口博司, 他: 保物学会「第24回研究発表会」要旨集, A35, (1989).