

가변용량반도체방사선검출기에서 전하손실을 결정하기 위한 한가지 방법

고명선, 박철순

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《모든 과학자, 기술자들이 과학기술발전의 추세에 맞게 첨단과학과 기초과학발전에 힘을 넣어 나라의 과학기술을 세계적수준에 올려세우도록 하여야 합니다.》(《김정일선집》 증보판 제20권 62페이지)

반도체방사선검출기들에서 전하손실을 결정하는 방법은 전하나르개의 수명을 비롯한 반도체재료의 특성을 연구하는 일반적인 방법이다.[2, 3] 반도체검출기들에서 포획중심의 농도가 $<10^{12}\text{cm}^{-3}$ 인 고순도재료를 리용한다는 사실을 고려하면 전하손실결정에 보통 검출기의 신호진폭분석방법을 리용할수 있다.[1] 전하나르개의 수명은 신호의 평균진폭과 검출기에 걸어진 편기전압사이의 관계를 리용하여 결정할수 있다. 지금까지 이 방법은 p-i-n이음과 같이 검출기용량에 관계되지 않는 구조를 연구하는데 리용되였다.

론문에서는 쇼트키이음이나 p-n이음에 기초한 가변용량반도체방사선검출기들에서 전하손실을 정밀하게 결정할수 있는 한가지 방법을 고찰하였다.

리론적고찰

대부분의 이음형반도체방사선검출기는 본질상 절면장벽형과 같은 금속-반도체이음(쇼트키이음)이거나 p-n이음, p-i-n이음이다. 방사선립자나 빛양자가 공간전하구역에 흡수되면 립자의 에네르기와 련관된 전하 Q_0 (비평형전자-구멍쌍)이 형성된다. 나르개들은 수집과정에 포획과 재결합에 의하여 감소되므로 전극에는 전하 $Q = Q_0(1-\lambda)$ 가 나타난다. 여기서 λ 는 전하손실을 특징짓는다.

전하 Q 의 원리적인 측정회로는 전하수감예비증폭기, 선형증폭기와 다선진폭분석기로 구성된다.(그림 1)

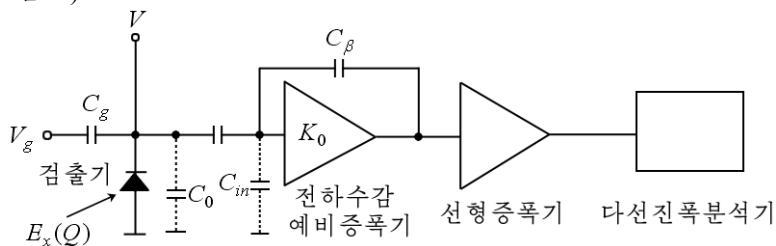


그림 1. 발진기를 리용한 전하측정회로

전하수감예비증폭기의 출구전압은 다음과 같다.

$$U = -\frac{Q}{C_{\Sigma} + C_{\beta} + \frac{C_{\beta}}{K_0}} \quad (1)$$

$$C_{\Sigma} = C_0 + C_{in}$$

여기서 K_0 은 열린 증폭계수, C_0 은 검출기용량, C_{in} 은 전하수감예비증폭기의 입구용량이다. 식 (1)로부터 출구전압 U 는 편기전압에 따르는 C_0 의 변화를 포함하여 용량에 따라 불가피하게 변하게 된다. 보통 $K_0 \approx 10^4$, $C_{\beta} = 1\text{pF}$, $C_{in} = 10\text{pF}$ 이고 검출기의 용량이 $10 \sim 100\text{pF}$ 에서 변할 때 출구전압은 $\Delta U/U \approx 1\%$ 정도 변한다. 이 값은 허용오차를 훨씬 넘는다.

λ 결정의 정확성을 높이는 가장 간단한 방법은 비교적 안정한 표준신호원의 손실을 계산하는것이다. 이러한 표준신호원으로 보통 진폭 V_g 의 안정성이 높은($\sim 10^{-3}\%$) 발진기를 리용할수 있다. 용량 C_g 를 통하여 전하

$$Q_g = V_g \frac{C_g C_{\Sigma}}{C_g + C_{\Sigma}} = V_g C_g \left/ \left(1 + \frac{C_g}{C_{\Sigma}} \right) \right. \quad (2)$$

를 전하수감예비증폭기의 입구에 준다.

C_g 가 작으면 $Q_g(C_{\Sigma})$ 의 의존관계는 약화된다. 실제로 검출기의 용량이 $1 \sim 10\text{pF}$ 에서 변할 때 $\sim 10^{-2}\%$ 의 정확도를 보장하려면 $C_g \leq 0.01\text{pF}$ 이여야 한다. 그런데 C_g 가 이 정도로 작아지면 발진기의 전압 V_g 는 수백V로 되어야 하는데 이 값은 표준스펙트럼분석기의 한계를 훨씬 벗어나므로 이 방법을 적용할수 없다.

필요한 정확도로 λ 를 결정할수 있는 기준검출기를 리용한 전하측정회로는 그림 2와 같다. 회로의 특징은 진폭이 안정한 신호원으로 방사선검출기 D_1 을 기준검출기로 리용한것이다. 이 회로에 의하여 단색방사선이나 빛량자의 단색에너지에 의하여 형성된 전하(전하량은 눈금새김됨)가 직접 예비증폭기의 입구에 주어진다. 기준검출기 D_1 과 고찰하려는 검출기 D_2 사이에는 결합용량이 없다. 그 역할은 기준검출기 D_1 의 편기회로에 있는 커패시터용량 C_f 가 수행한다. C_f 의 크기를 입구용량 C_{Σ} 보다 훨씬 크게 하면 입구에 들어가는 전하 Q_g 는 실제로 검출기용량 C_0 에 관계되지 않는다. 기준검출기를 비접지 전원(실제로 갈바니전지)과 연결하면 수명측정에 필요한 전압 V_0 을 넓은 범위에서 변화시킬수 있다.

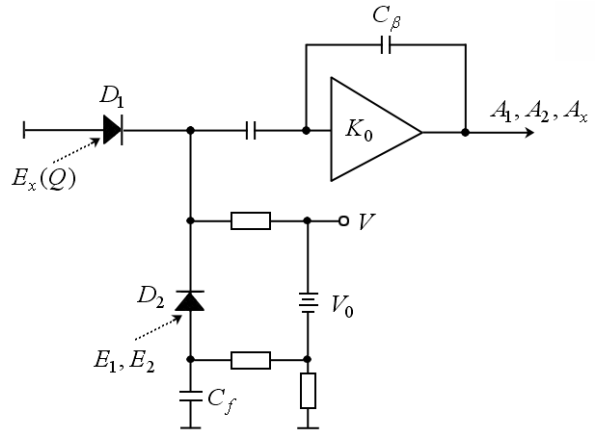


그림 2. 기준검출기를 리용한 전하측정회로

이와 같이 해결하려는 문제는 결국 검출기 D_1 의 신호진폭이 검출기 D_2 의 신호진폭에 대하여 얼마나 변위되었는가 하는데 귀착된다.

이제 측정체계 파라미터들의 가능한 불안정성이 λ 측정의 정확도에 영향을 주지 않는가를 보기로 하자. 기록되는 펄스들의 에너지 E_1 과 E_2 에 해당하는 2개의 신호진폭 A_1 과 A_2 를 기준검출기로 얻었다고 하자. 검출기 D_1 에 에너지가 E_x 인 복사선을 쏘이면 그에 해당하는 진폭 A_x 를 얻는다. 이때 복사선의 에너지와 신호진폭사이에는 다음과

같은 관계가 만족된다.

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= m(kE_1 - c) \\ A_2 &= m(kE_2 - c) \\ A_x &= m[kE_x(1 - \lambda) - c] \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

여기서 k 는 측정체계의 증폭을 포함하는 변환계수이고 c 는 선별력, m 은 확장기의 증폭계수이다.

이와 같은 관계는 체계의 불안정성으로 하여 m, k, c 의 크기가 변한 경우에도 성립할뿐아니라 실험조건 실례로 편기전압 V 가 높아진 조건에서도 성립한다. 이 경우에 λ 는 작아진다. 즉 이 경우에

$$\left. \begin{aligned} A'_1 &= m'(k'E_1 - c') \\ A'_2 &= m'(k'E_2 - c') \\ A'_x &= m'[k'E_x(1 - \lambda') - c'] \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

이다.

런립방정식 (3)과 (4)를 풀면 구하려는 량 $\Delta\lambda = \lambda - \lambda'$ 는 측정체계의 파라미터에 관계 없는 다음의 식으로 된다.

$$\Delta\lambda = \frac{1}{A_1 - A_2} \left[\left(1 - \frac{E_2}{E_x} \right) \Delta A_1 + \left(\frac{E_1}{E_x} - 1 \right) \Delta A_2 + \frac{E_2 - E_1}{E_x} \Delta A_x \right] \quad (5)$$

여기서 $\Delta A_1 = A_1 - A'_1$, $\Delta A_2 = A_2 - A'_2$, $\Delta A_x = A_x - A'_x$ 이다.

이와 같이 $\Delta\lambda$ 의 측정오차는 다만 평균진폭 A_1, A_2, A_x 의 측정정확도와만 관계된다. 오차는 진폭스펙트럼의 선폭 σ 에 의하여 규정되며 반도체방사선검출기의 경우 이 값은 대략 0.3~1%이다. 그러므로 평균값의 분산은 임펄스의 수가 $N \approx 10^4 \sim 10^5$ 개일 때

$$\sigma(A) = \sigma / \sqrt{N} \approx 10^{-3} \sim 10^{-2} \%$$

이다.

정확도를 낮추는 다른 하나의 원인은 온도에 따라 비평형나르개형성에너지가 변화되는것이다. 이와 관련된 기준검출기진폭의 불안정성은 대략 $10^{-2} \%/^{\circ}\text{C}$ 이다. 그러므로 검출기 D_2 뿐아니라 검출기 D_1 의 온도를 $\sim 0.1^{\circ}\text{C}$ 의 정확도로 보장하여야 하는데 이것은 실천에서 쉽게 실현할수 있다.

검출기재료가 같고 기록되는 립자가 같은 경우 A_1, A_2, A_x 의 분산은 같다고 볼수 있으므로 이 분산을 $\sigma(A)$ 로 표시하면 식 (5)에 따라 결과의 오차는

$$\sigma(\Delta\lambda) \leq \frac{\sqrt{6}}{A_1 - A_2} \sigma(A) A_x \left(\frac{E_2 - E_1}{E_x} \right) \quad (6)$$

로 된다. $\sigma(A) = 10^{-2} \%$ 일 때 $\sigma(\Delta\lambda) \leq 0.014 \%$ 이다. 통계량이 증가하면 정확도가 더 높아진다는것은 명백하다.

실험 결과

전하손실을 결정하려는 금속-규소반도체이음검출기에 ^{241}Am 의 α 립자($E_\alpha = 5.486\text{keV}$)를 쏘여 전하 Q_0 을 형성한다. 기준검출기로는 48V로 역편기된 $p^+ - n - n^+$ 구조의 규소검

출기를 리용하고 여기에 ^{239}Pu 와 ^{244}Cm 의 α 립자(각각 $E_1 = 5147\text{keV}$, $E_2 = 5796\text{keV}$)를 입사시켰다. 측정자료를 처리하여 봉우리의 평균진폭값을 얻고 식 (5)를 리용하여 전하손실 $\Delta\lambda$ 를 결정한다. 먼저 봉우리의 최대위치를 결정하고 그것을 리용하여 진폭을 평균화한다. 이때 평균화구역은 매개 봉우리에 대하여 스펙트르의 비대칭성과 확장정도를 고려하여 정한다.

금속-규소이음검출기에서 전압에 따르는 전하손실 $\Delta\lambda$ 의 측정결과는 그림 3과 같다. 그림 3에서 -기호는 전하손실과 반대과정인 전하증식을 의미한다. 180V까지의 전압구간에서 전하손실과 편기전압 $1/\sqrt{U}$ 은 선형관계를 가진다. 이것은 α 립자의 경로에서 전자-구멍쌍플라즈마의 전하손실관계를 고려하여 얻은 선행연구[3]결과와 완전히 일치한다. 그 이상의 전압에서는 전하손실이 급격히 변화되는데 이것은 예리한 침형모양을 가지는 α 립자경로 끝부분의 강한 전기마당에 의하여 전하증식이 일어나는 현상과 관련된다고 볼수 있다.

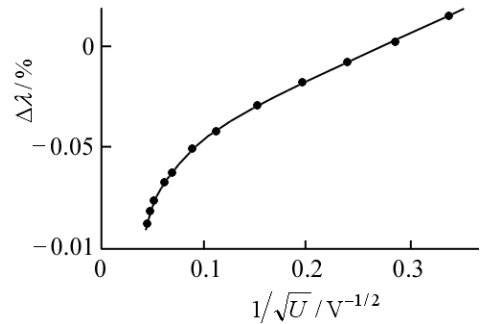


그림 3. 전압에 따르는 전하손실

맺 는 말

결면장벽형반도체방사선검출기와 p-n이음검출기를 비롯한 가변용량반도체검출기들에서 전하손실을 정밀하게 결정할수 있는 한가지 방법을 고찰하였다. 이 방법으로 가변용량반도체방사선검출기들에서 전하손실을 $\sim 10^{-2}\%$ 의 정확도로 측정할수 있다.

참 고 문 헌

- [1] В. К. Еремин и др.; ФТП, 12, 4, 718. 1978.
- [2] Salah Awadalla; Solid State Detectors, 17, 142, 2015.
- [3] Gerhard Lutz; Semiconductor Radiation Detectors, Springer, 77~152, 2007.

주제108(2019)년 9월 5일 원고접수

A Precision Determination of Charge Loss in Semiconductor Radiation Detectors with Variable Capacitance

Ko Myong Son, Pak Chol Sun

In this paper we studied one method for determining accurately the charge loss in semiconductor detectors with capacity variable, including surface-barrier semiconductor radiation detector, and p-n junction detector. By this method we measured the charge loss with accuracy of $10^{-2}\%$ in the variable capacitance semiconductor radiation detectors.

Keywords: semiconductor radiation detectors, charge sensitive preamplifier