

АНАЛИЗ ШУМОВЫХ ФАКТОРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Гордиенко Ю. Е., Бородин Б.Г., Галат А.Б.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

пр. Ленина 14, Харьков - 61009, Украина

тел.: +38 (057) 7021362, e-mail: meru@kture.kharkov.ua

Factors, influencing of semiconductor detectors of an ionising radiation are analysed in the report. The analytical expressions for noise characteristics of CaTe and CaZnTe based detectors in terms of equivalent noise charge (ENC) are resulted, allowing to execute noise level calculation and optimise the configuration of such detectors.

Введение

Проблемы загрязнения окружающей среды техногенными источниками ионизирующего излучения, необходимость мониторинга изменений естественного радиационного фона настоятельно требуют создания современных средств измерений и контроля в этой сфере [1]. Полупроводниковые детекторы ионизирующего излучения (ПДИИ) являются наиболее подходящими в качестве первичных элементов таких средств. ПДИИ в настоящее время широко используются для дозиметрии и спектрометрии различных радиационных источников. Большое внимание в последнее время уделяется ПДИИ на основе широкозонных материалов CdTe и CdZnTe, поскольку их использование дает возможность обойтись без криогенного охлаждения. В ряде случаев, например для спектрометров γ -излучения, принципиально важным является достижение максимальной разрешающей способности по энергии. Немаловажным для этого является уровень шумов, обусловленный как качеством материала датчика, так и способом его включения в измерительную цепь. Существенный вклад в шумовые характеристики вносят также элементы усиления и обработки сигнала [1,2].

Опыт исследований в данной области свидетельствует о том, что основное внимание уделяется экспериментальным исследованиям и оценкам [2,3].

Использование альтернативных методов подключения датчиков ионизирующего излучения в измерительную цепь, в частности использование СВЧ-смещения, расширяет возможности ПДИИ [4].

Целью данной работы является математическое моделирование влияния параметров материала, геометрических размеров и способа включения датчика ПДИИ, а также параметров всех остальных элементов измерительного тракта на шумовые характеристики детектора.

1. Анализ шумовых факторов

В работе [5] проанализированы основные составляющие шумов датчика ПДИИ.

Для детектора с постоянным смещением на амплитуду сигнала влияет количество неравновесных носителей, образованных при прохождении γ -кванта через датчик, место прохождения γ -кванта в объеме датчика, эффекты захвата и отпускания носителей ловушками (дефекты кристаллической решетки, атомы примеси), эффективность сбора заряда, время дрейфа носителей через объем датчика до электродов, способ формирования сигнала в цепи предусилителя.

Амплитуда отклика детектора с СВЧ-смещением определяется количеством неравновесных носителей, образованных при прохождении γ -кванта через датчик и местом их образования в объеме датчика.

2. Шумовые характеристики ПДИИ

Для оценки электронного шума детекторов ионизирующего излучения общепринятой в настоящее время является понятие эквивалентного шумового заряда ENC. Это связано с тем, что γ -квант образует в датчике лавину зарядов (неравновесных носителей), количество которых однозначно определяет энергию этого кванта. Регистрация количества образованных неравновесных носителей и является основной задачей детектора. Для этого в традиционных устройствах с постоянным смещением используется зарядочувствительный усилитель, преобразующий заряд на входе в напряжение (или ток) на выходе.

Эквивалентный шумовой заряд ENC определяет вклад шумовых факторов в общий сигнал в единицах заряда. Это позволяет учесть его действие на ширину пика амплитудного спектра регистрируемого излучения вместе с вкладом статистического шума. Ширина пика на амплитудном спектре W_{FWHM} в предположении гауссовского распределения может быть описана параметром дисперсии σ [2].

$$W_{FWHM} = 2,35 \cdot \sigma \cdot W_{eh}, \quad (1)$$

где W_{eh} – энергия образования пары неравновесных носителей.

Дисперсия числа пар образованных при ионизации носителей с учетом статистического и электронного шума равна [3]

$$\sigma^2 = \sigma_{cm}^2 + \sigma_{эл}^2. \quad (2)$$

Статистический разброс $\sigma_{ст}$ зависит от энергии γ -кванта W_γ и энергии образования пары неравновесных носителей W_{eh}

$$\sigma_{cm} = \sqrt{\frac{F \cdot W_\gamma}{W_{eh}}}, \quad (3)$$

где F – фактор Фано.

Дисперсия за счет электронного шума

$$\sigma_{эл} = \sqrt{\frac{ENC}{e}}. \quad (4)$$

Здесь $\sigma_{эл}$ определяется по аналогии с σ_{cm} по амплитуде числа шумовых зарядов.

Эквивалентный шумовой заряд ENC определяется по-разному для случая детектора с постоянным и СВЧ-смещением.

Методика оценки и расчеты ENC для детекторов с постоянным смещением известны [1-3]. Величина ENC для распространенной конструкции полупроводникового детектора ионизирующего излучения (ПДИИ) с датчиком на основе высокоомного полупроводника р-типа (CdTe, CdZnTe) может быть записана в виде

$$ENC^2 = \exp(2) \cdot \left(\frac{kT\tau}{2R_d} + \frac{I_d^2 b^2 n \theta \tau}{P^2 (1 + \omega^2 \theta^2)} + \frac{kT\tau}{2R_f} + \frac{kT(C_{in} + C_f + C_m)^2}{2g_{in}\tau} + A_F(\omega) \right), \quad (5)$$

где I_d — постоянный ток смещения датчика;

k – постоянная Больцмана;

T – температура;

τ – время формирования сигнала в усилительном тракте;

b – отношение подвижностей электрона и дырки;

n – концентрация свободных электронов в объеме датчика;

P – полное число дырок в объеме датчика;

V – объем кристалла датчика;

ω – циклическая частота входного сигнала;

R_d – сопротивление кристалла датчика;

R_f – сопротивление резистора обратной связи предусилителя;

C_{in} – входная емкость предусилителя;

C_f – емкость резистора обратной связи предусилителя;

C_m – емкость монтажа;

g_{in} – входная проводимость предусилителя;

θ – среднее время жизни свободных неравновесных носителей (в предположении, что оно одинаково для электронов и дырок);

A_f – коэффициент фликкер-шума (1/f).

Расчеты шумовых характеристик детекторов с СВЧ-смещением практически не представлены и ограничены лишь оценками [6,7].

Величину ENC для ПДИИ с СВЧ-смещением с датчиком на основе высокоомного полупроводника p-типа (CdTe, CdZnTe) можно представить в виде

$$ENC_U^2 = \exp(2) \cdot \left(P_s \frac{b^2 n \theta \tau}{2 \rho l^2 p^2 (1 + 4\pi^2)} + \frac{e I_s \tau}{4} + \frac{k T \tau}{2 R_f} + \frac{k T (C_{in} + C_f + C_m)^2}{2 g_m \tau} \right), \quad (6)$$

где P_s – мощность СВЧ-излучения, проходящая через датчик;

ρ – удельное сопротивление материала датчика;

l – толщина датчика в направлении E – составляющей СВЧ-поля;

I_s – ток смещения детекторного СВЧ-диода.

Первое и второе слагаемые в скобках формулы (6) определяют генерационно-рекомбинационный шум датчика и шум СВЧ-диода в терминах ENC. Остальные слагаемые определяют шумы предусилителя аналогично (5).

3. Результаты расчетов шумовых характеристик ПДИИ

Шумы СВЧ-тракта определяются качеством его элементов и могут быть сведены к значениям, значительно меньшим, чем шум датчика.

В данной практически реализуемой конфигурации спектрометрический детектор с постоянным смещением дает электронный шум в 1,5 раза больше детектора с СВЧ-смещением.

Для дозиметрического детектора с постоянным смещением электронный шум будет в 1,22 раза больше, чем для детектора с СВЧ-смещением.

1. Bertuccio, G. A Method for the Determination of the Noise Parameters in Preamplifier Systems for Semiconductor Detectors [Text]/ G. Bertuccio, A. Pullia. - Rev. Sci. Instrum. - 1993. -Vol. 64. - P.3294-3298.
2. Кутний В.Е., Рыбка А.В., Кутний Д.В. и др. Разработка дозиметрических и спектрометрических блоков регистрации γ -излучения на основе полупроводниковых соединений CdTe (CdZnTe) для АЭС Украины // Вопросы атомной науки и техники. – 2003. – Т.7, № 13. – с.167-171.
3. Захарченко А.А., Кутний В.Е., Прохорец И.М. и др. Моделирование влияния шумов на характеристики CdZnTe детекторов γ -излучения // Радиоэлектроника и информатика. – 2007. – №1(36). – С.13-16.
4. Gary Tepper, Jon Losee. A contactless, microwave-based radiation detector. Nuclear Instruments and Methods, 2001, A, 458, p. 472-477.
5. Гордиенко Ю.Е., Бородин Б.Г., Галат А.Б. Шумовые характеристики полупроводниковых детекторов ионизирующего излучения с СВЧ-смещением //2-я международная научная конференция «Электронная компонентная база. Состояние и перспективы развития». Сб. науч. трудов. – Харьков: ХНУРЭ, 2009. – С. 78–80.
6. Sommer, G.C. Демодуляция широкополосных слабых оптических сигналов при помощи полупроводников. Часть 3. Экспериментальное исследование приемников излучения на фотосопротивлении [Текст] / Г.С. Sommer, Е.К. Гетчелл // ТИИЕР. –1966. – Т.54. – № 11. – С.58–75.
7. Tepper, G. Detection of single photon ionization events using a contactless microwave technique [Text]/ G. Tepper, Jon Losee //Rev. Sci. Instrum., – 1997. – Vol. 68, No. 1. – P.55–57.