

АНАЛИЗ СОБСТВЕННЫХ РЕЖИМОВ РЕЗОНАНСНЫХ СИСТЕМ РАДИАЦИОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ С СВЧ СМЕЩЕНИЕМ

Гордиенко Ю. Е., Бородин Б. Г., Сорока А. С., Ларкин С.Ю.*
Харьковский национальный университет радиоэлектроники
61166, Харьков пр. Ленина 14, тел.: (057) 702-13-62,
e-mail: mepu@kture.kharkov.ua

* ЗАО «Научно – производственный концерн «Наука»
(03148, г. Киев, пр-т. 50-летия Октября 2-Б, nauka_concern@ukr.net, 482-05-11)

The dependences of own quality factors of resonant systems of radiating detectors with a microwave bias for cylindrical and toroidal systems from the loss factor of a sensor are considered. The requirements to geometry and parameters of resonant systems containing a sensitive sensor of ionizing radiations are formulated.

Введение

Создание надежных высокочувствительных портативных дозиметров для персонала и приборов для радиационного мониторинга является насущной потребностью стран с развитой атомной энергетикой. Наибольшее распространение в настоящее время получили твердотельные полупроводниковые приборы контроля радиационных источников. Создание полупроводниковых радиационных детекторов (РПД) сопряжено с решением достаточно сложных научно-технических проблем, связанных с получением высококачественных чистых элементарных полупроводников или широкозонных бинарных и тройных соединений с специальными характеристиками, оптимизацией электродных систем и совершенствованием систем первичной обработки информации.

В РПД с СВЧ смещением удается преодолеть ряд ограничений, присущих РПД на постоянном смещении, упростить конструкцию, повысить надежность и эффективность детектора. Включение чувствительного к ионизирующему излучению полупроводникового элемента (сенсора) в резонансную микроволновую систему требует проведения тщательного анализа таких электродинамических систем для достижения наилучших характеристик таких детекторов. К наиболее важным вопросам, подлежащим рассмотрению относятся выбор частотного диапазона, выбор типа резонансной системы, влияние геометрии сенсора, обоснование требований к материалу сенсора.

Цель работы: анализ собственных режимов резонансных систем применительно к разработке радиационных полупроводниковых детекторов с СВЧ смещением.

1. Требования к материалу полупроводникового чувствительного элемента

Полупроводниковые радиационные детекторы относятся к группе дискретных твердотельных ионизационных детекторов излучения, в которых количество сгенерированных пар электрон-дырка жестко связано с энергией поглощенной частицы. Использование этого эффекта для детектирования излучения и определения его энергетических характеристик возможно при выполнении ряда общих условий для рассматриваемого класса *традиционных* РПД:

- 1) средняя энергия образования пары носителей заряда должна быть достаточно малой, что позволяет обеспечивать высокую чувствительность детектора;
- 2) достаточно широкая запрещенная зона позволяет обеспечивать низкий уровень собственных шумов благодаря незначительной термогенерации носителей в условиях работы при комнатных температурах;
- 3) элементы материала детектора должны иметь по возможности высокий порядковый номер в Периодической системе, что обеспечивает эффективное поглощение рентгеновского и γ -излучений;
- 4) объемная структура детектора должна иметь высокую локальную однородность условий транспорта носителей заряда, что обеспечивает идентификацию квантов с учетом того, что треки занимают относительно небольшую часть чувствительного материала;
- 5) материал детектора должен иметь высокое электрическое сопротивление, что позволяет обеспечивать низкий уровень токов утечки;
- 6) подвижность носителей заряда и время их жизни должны быть достаточно большими (обеспечивается высокой чистотой материала и однородностью кристаллической решетки), что позволяет обеспечивать сбор носителей заряда с высокой эффективностью;
- 7) также для реализации высокой эффективности сбора заряженных частиц к контактными системам детекторов предъявляются жесткие требования, учитывая также необходимость применения высоких напряжений.

Современное полупроводниковое материаловедение предоставляет для создания РПД ряд эффективных полупроводников, при выборе которых необходимо учитывать условия наилучшего согласования их массовых, электрических и кинетических характеристик с измеряемыми параметрами ионизирующих излучений [1]. Наиболее подходящими [2] по параметрам и коммерчески приемлемыми для создания неохлаждаемых детекторов γ -излучения являются следующие материалы в порядке приоритетности: CdZnTe, CdTe и GaAs, на основе которых выполнена разработка планарных чувствительных элементов РПД (сенсоров) с электродами, к которым прикладывается постоянное высокое напряжение. Можно утверждать, что в результате достаточно продолжительных целенаправленных исследований сформировалось новое направление в области создания систем радиационного контроля, основанное на применении широкозонных полупроводниковых соединений $Cd_{1-x}Zn_xTe$ и CdTe, которое оказалось весьма перспективным [4, 5]. Однако, разработка и совершенствование указанных РПД наталкивается на необходимость решения серьезных проблем, связанных с повышением эффективности сбора нескомпенсированного заряда при ионизации материала сенсора. Дополнительные проблемы при разработке дозиметрических РПД на основе соединений CdTe связаны с существенной зависимостью чувствительности детекторов от энергии γ -квантов и геометрии сенсора. По данным монографии [5] в диапазоне энергий 60..1250 кэВ чувствительность детекторов изменяется более, чем на два порядка.

В РПД СВЧ, предназначенных для работы при комнатных температурах, целесообразно применять широкозонные полупроводники, которые должны обладать достаточно малыми собственными потерями на СВЧ. Величины тангенса угла потерь кристаллической решетки сенсоров на основе GaAs и CdTe – соответственно равны $tg\delta_c = (2..6) \cdot 10^{-4}$ (в диапазоне 2.5..36 ГГц) и $tg\delta_c = 1.1 \cdot 10^{-3}$ (для 15.95 ГГц) [6]; «темновая» электропроводность сенсоров, обусловленной термогенерацией носителей при комнатных температурах, $\sigma_d = 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ – для GaAs и $\sigma_d = 10^{-9} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ – для CdTe.

2. Безэлектродные РПД с СВЧ смещением

Указанные проблемы (пп. 5-7) в определенной мере могут быть сняты в конструкции безэлектродного детектора с СВЧ смещением, который, по-видимому, впервые предложен в работах Террега, см., например, [7, 8]. В детекторе чувствительный к ионизирующему излучению кристалл сверхчистого германия (сенсор) применен как малое возмущающее тело, размещенное в объемном микроволновом резонаторе 3 см диапазона с колебанием TE₀₁₁. Отклик резонатора на поглощение материалом сенсора ионизирующей частицы регистрируется в виде сигнала, отраженного от резонатора и выделенного СВЧ детектором. Видимые преимущества микроволновой измерительной схемы состоят в следующем: а) практически мгновенная реакция резонансной системы на акт ионизации материала сенсора; б) нет необходимости «вытягивать» из объема сенсора заряд и собирать на электродах – при этом снимается проблема борьбы за эффективность транспорта носителей; в) отказ от применения электроконтактов позволяет избежать многих технологических и эксплуатационных проблем; г) нет необходимости применять высокие напряжения для сбора зарядов.

Отметим, что в РПД СВЧ ограничения на размер сенсора, связанные с временем жизни и подвижностью носителей, отсутствуют. Существенным требованием является лишь обеспечение однородности распределения электрического поля в объеме сенсора. В этом плане приемлемым выбором типов резонатора может быть объемный, коаксиальный, возможно, волноводно-диэлектрический. Наилучшую однородность обеспечивает квазистатический тороидальный резонатор, однако последний обладает наименьшей собственной добротностью среди перечисленных типов резонаторов.

3. Требования к электродинамическим системам РПД

Эффективность РПД и его спектральная чувствительность определяются способностью измерительной резонаторной системы обнаруживать малые изменения электропроводности сенсора при ионизации его квантами ионизирующего излучения. Изменяемым параметром при этом является добротность резонансной микроволновой системы или связанные с ней другие параметры, например, коэффициент связи резонатора с внешней цепью или коэффициент отражения. Ввиду того, что резонансная частота колебаний в рассматриваемом процессе

практически не изменяется, методика измерений ориентирована на определение амплитудных характеристик собственных колебаний.

Относительное изменение электропроводности сенсора, вызванное ионизацией и создающее увеличение тангенса угла потерь на величину $\operatorname{tg} \delta_i = \sigma_i / (\omega \cdot \varepsilon' \varepsilon_0)$, где ε' – относительная проницаемость материала сенсора ($\varepsilon' = 12.95$ для GaAs, $\varepsilon' = 10.39$ для CdTe [6]), может быть определено через отношение:

$$\frac{\Delta \sigma}{\sigma} = \frac{Q_{0i}^{-1} - Q_{0d}^{-1}}{Q_{0d}^{-1} - Q_{0c}^{-1}},$$

где Q_{0i} – добротность резонатора с сенсором, находящегося под воздействием ионизирующего излучения, Q_{0d} – добротность при отсутствии излучения («темновое» значение), Q_{0c} – добротность в отсутствие тепловых носителей заряда в полупроводнике. Применение резонаторов с высоким значением собственной добротности позволяет реализовать более высокую чувствительность при измерении $\Delta \sigma$, а, следовательно, интенсивности ионизирующего излучения. При этом на величину добротности существенно влияют собственные диэлектрические потери сенсора, его размер и форма, месторасположение в резонансной полости, а также конечная проводимость стенок резонатора. На рис. 1 представлены результаты моделирования зависимости собственной добротности колебаний цилиндрического объемного резонатора H_{011} и E_{111} от величины тангенса угла потерь сенсора, расположенного в центре резонатора (геометрия взята из работы [7]). Хорошо видно, что выбор сенсора в виде диска имеет более высокую чувствительность по разрешению потерь.

Для обеспечения высокой однородности поля в объеме сенсора целесообразно использовать колебаний типа E_{01q} цилиндрического резонатора или колебания квазистатического тороидального резонатора с чувствительным сенсором в емкостном зазоре. Результаты численного моделирования колебаний тороидального резонатора, выполненного в среде специализированного программного пакета электродинамического моделирования HFSS, представлены на рис. 2, где показано распределение амплитуды электрического поля в трех диаметральных сечениях сенсора: а) в плоскости окна; б) в среднем сечении; в) в плоскости торца стержня. Интенсивность электрического поля на периферии сенсора отличается от центральной части не более чем на $\pm 2\%$.

Заключение

Сформулированы общие требования к колебательным системам РПД СВЧ. Про моделированы различные типы резонансных систем в широком частотном диапазоне при вариации их геометрических параметров и учетом различных вкладов потерь от стенок резонатора и материала сенсора. Проведенный анализ собственных режимов колебательных систем радиационных датчиков с СВЧ смещением позволил предложить пути реализации эффективных микроволновых измерительных резонансных систем с бесконтактным включением чувствительного к ионизирующему излучению сенсора, выполненного на основе широкозонного полупроводникового соединения CdTe (CdZnTe).

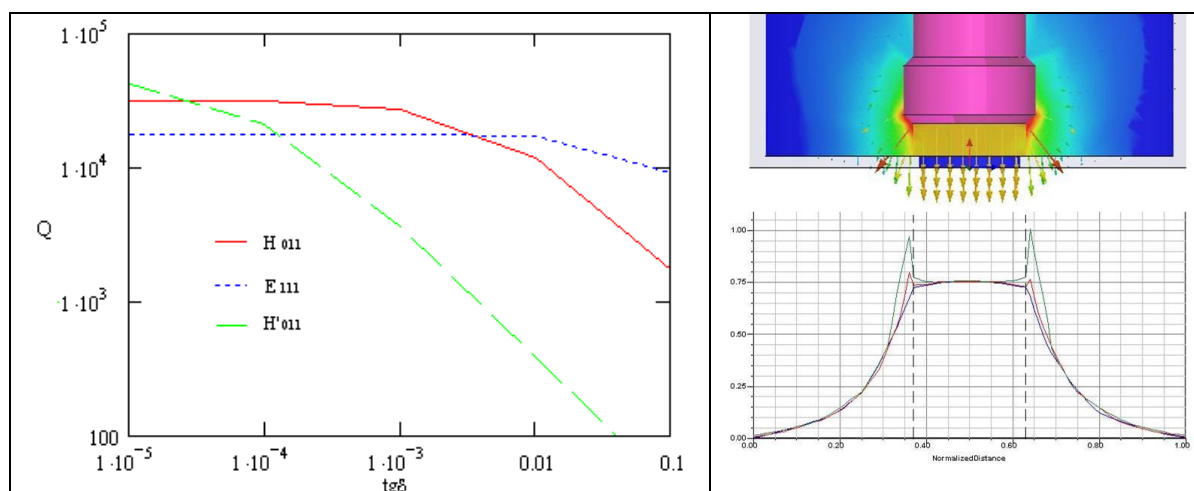


Рис. 1 – Зависимости добротности цилиндрического резонатора от потерь в сенсоре сферической формы (колебания H_{011} и E_{111}) и дисковой формы (H'_{011})

Рис. 2 – Векторная картина электрического поля тороидального резонатора в зазоре и распределение его амплитуды в различных сечениях сенсора

1. D. S. McGregor, H. Hermon. Room-temperature compound semiconductor radiation detectors // Nuclear Instrum. and Methods in Phys. Research. – 1997. – Pt. A. – V. 395. – P. 101-124.
2. Абызов А. С., Ажажа В. М., Дывыдов Л. Н., Ковтун Г. П., Кутний В. Е., Рыбка А. В. Выбор полупроводникового материала для детекторов гамма-излучения // Технология и конструирование в электрон. аппаратуре. – 2004. – №3. – С. 3-6.
3. Довбня Л. Н., Довбня А. Н., Захарченко А. А., Кутний В. Е., Кутний Д. В., Прохорец И. М., Рыбка А. В., Шляхов И. Н. Применение полупроводниковых детекторов для учета и контроля РАО // Вопросы атомной науки и техники. – Сер.: Физика радиац. повреждений и радиацион. материаловед. (81). – 2002, №3. – С. 142-146.
4. Кутний В. Е., Рыбка А. В., Кутний Д. В., Шляхов И. Н. Разработка дозиметрических и спектрометрических блоков регистрации γ -излучения на основе полупроводниковых соединений CdTe (CdZnTe) для АЭС Украины // Вопросы атомной науки и техники. – Сер.: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники (13). – 2003. – С. 167-171.
5. Корбутяк Д. В., Мельничук С. В., Корбут С. В., Борисюк М. М. Телурид кадмію домішково-дефектні стани та детекторні властивості / К.: Іван Федоров, 2000. – 198 с.
6. W. E. Courtney. Complex permittivity of GaAs and CdTe at microwave frequencies // IEEE trans. on MTT. – 1977. – MTT-25, No. 8. – P. 697-701.
7. Gary Tepper, Jon Losee. Detection of single photon ionization events using a contactless microwave technique // Rev. Sci. Instrum. – Jan. 1997. – V. 68 (1). – P. 55-57.
8. Gary Tepper, Jon Losee. A contactless, microwave-based radiation detector // Nuclear Instrum. and Methods in Phys. Research. – 2001. – Pt. A. – V. 458. – P. 472-477.