

МИКРОВОЛНОВЫЕ СЕНСОРЫ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Слипченко Н. И., Бородин Б. Г., Сорока А. С.
Харьковский национальный университет радиоэлектроники
пр. Ленина 14, Харьков, 61009, Украина
тел.: +38 (057) 7021362, e-mail: meru@kture.kharkov.ua

Аннотация — Разработка радиационных полупроводниковых датчиков с СВЧ смещением (РПД СВЧ) для регистрации ионизирующих излучений позволит преодолеть ряд технологических ограничений, присущих РПД на постоянном смещении, упростить конструкцию, повысить надежность и эффективность детектора. Цена такого подхода — некоторое усложнение системы обработки первичного сигнала на СВЧ. В работе обоснованы критерии выбора частотного диапазона и разработаны конструкции эффективных микроволновых резонансных сенсоров ионизирующих излучений на основе анализа фактора эффективности.

I. Введение

РПД с СВЧ смещением, по-видимому, впервые предложен в работах Террега [1-2]. В таком детекторе чувствительный к ионизирующему излучению (ИИ) кристалл сверхчистого германия применен как малое возмущающее тело, размещенное в объемном резонаторе 3 см диапазона с колебанием TE_{011} . Резонатор подключен к генератору СВЧ через отрезок волновода как двухполосник, и в отсутствие излучений согласован с линией передачи. При поглощении кристаллом кванта ионизирующего излучения, во входном сечении элемента связи резонатора (на его входных "зажимах") возникает электрический сигнал, который выделяется затем СВЧ детектором во вспомогательной линии, подключенной к отрезку волновода с помощью направленного ответвителя или циркулятора. Процесс поглощения носит случайный характер как по событию захвата кванта атомом кристалла, так и по развитию во времени индуцированной дополнительной электропроводности за счет генерации в объеме кристалла неравновесных носителей заряда, которые характеризуются достаточно коротким временем жизни. Радиофизические методы позволяют регистрировать возникающие таким образом скачки электропроводности и, следовательно, обнаруживать кванты ИИ.

Такой сенсор, выполненный на основе резонансной системы с чувствительным элементом, подключенный к источнику СВЧ колебаний и оснащенный цепью регистрации сигнала, возникающего при поглощении кванта ИИ, является важной составной частью РПД. Аппаратная часть РПД выделяет сигнал из шума, усиливает его и, в зависимости от функции РПД — дозиметрия или спектрометрия, выполняет соответствующую обработку сигнала. Мерой энергии, поглощенной кристаллом, являются изменение добротности резонатора или параметров возникающего на зажимах резонатора сигнала. Работа РПД в счетном режиме не зависит от времени жизни носителей и области их локализации в объеме кристалла. Однако эти же факторы влияют на точность идентификации поглощенной энергии при работе РПД в спектрометрическом режиме.

Развитие рассматриваемого класса перспективных детекторов, которые обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными контактными РПД [3-4], сдерживается недостаточной теоретической проработкой как сенсорной части, так и методов

обработки возникающих в сенсоре первичных сигналов. Цель работы — предложить адекватные задачам радиометрии ионизирующих излучений радиофизические методы и средства, в основе которых лежат явления взаимодействия ионизирующих частиц с кристаллом полупроводника, включенного в микроволновую резонансную структуру.

II. Оценка уровня первичного высокочастотного сигнала

Формирование импульса во входном сечении элемента связи — первичного высокочастотного сигнала (см. рис. 1) при поглощении кванта ИИ обусловлено генерацией в кристалле сенсора дополнительных (к имеющимся темновым равновесным носителям) неравновесных носителей заряда.

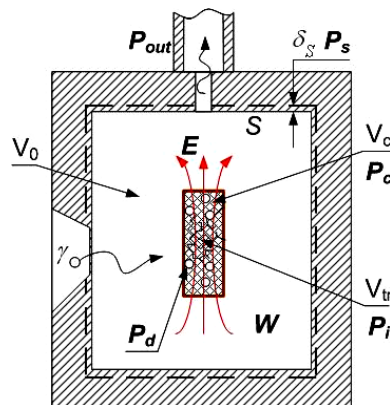


Рис. 1. Потери в резонансном сенсоре.

Fig. 1. Losses in a resonant sensor

На рисунке приведены следующие обозначения: W — энергия, запасенная в полости; E — напряженность электрического поля в области кристалла; P_s — мощность омических потерь в стенках; P_c — мощность диэлектрических потерь в кристалле; P_d — мощность омических потерь на темновых носителях в кристалле; P_i — мощность омических потерь на неравновесных носителях, возникших при поглощении кванта ИИ; P_{out} — внешние потери.

Полагая, что в темновом режиме в отсутствие ИИ резонансная система согласована с линией передачи (коэффициент связи $\beta = 1$), поглощение кристаллом кванта ИИ приведет к нарушению режима критической связи резонансного сенсора с линией и возникновению на его зажимах импульса напряжения, который может быть обнаружен в линии как отраженный сигнал. Модуль коэффициента отражения, зависящий от времени в соответствии с изменением индуцированной проводимости, имеет вид:

$$\Gamma(t) = \frac{\bar{\sigma}_i(t)}{2\omega_0 \varepsilon_0 \varepsilon \cdot tg \delta} \cdot \left[1 + \frac{\sigma_d}{\omega_0 \varepsilon_0 \varepsilon \cdot tg \delta} + \frac{k_{rough} Z_0^2 \delta_s \int_V |\vec{H}_i|^2 ds}{2\varepsilon \cdot tg \delta \int_V |\vec{E}|^2 dv} \right]^{-1} \quad (1)$$

В (1) фигурируют переменные: σ_d , $\bar{\sigma}_i$ – темновая и индуцированная электропроводности кристалла; k_{rough} – шероховатость и δ_s – глубина скин-слоя стенок резонатора; ε , $tg\delta$ – диэлектрические характеристики кристалла; ω_0 – резонансная частота. Коэффициент отражения (1) при ионизации кристалла существенно зависит от его диэлектрических потерь, т.к. они целиком шунтируют рассматриваемый эффект. Поэтому для данного метода регистрации частиц ИИ очень важно обеспечивать минимальные потери в кристалле. Если это обеспечено (например, выполняется $tg\delta \leq 10^{-3}$), то необходимо добиваться уменьшения величины знаменателя (1) – используя высокоомный кристалл, повышая качество обработки стенок, охлаждая корпус резонатора (т.е. обеспечивая малые величины σ_d , k_{rough} , δ_s). Для соединений типа CdZnTe, используемых в традиционных контактных РПД, это соотношение выполняется на частотах от ~20 МГц и выше.

Коэффициент отражения (1) можно представить в виде:

$$\Gamma(t) = \frac{\bar{\sigma}_i(t)}{2\varepsilon_0 \varepsilon \cdot \omega_0} K_C Q_{od}, \quad (2)$$

где $K_C = W_C / W$ – энергетический коэффициент заполнения резонатора по электрическому полю [5], и Q_{od} – собственная “темновая” добротность резонатора. Произведение этих параметров, подобно сопротивлению связи в электронике СВЧ резонансных генераторов [6], характеризует, с одной стороны, степень “включенности” активной части электродинамической системы (полупроводникового кристалла) в энергетику колебаний, с другой – энергетику измерений, т.е. интенсивность воздействия поля резонансной системы на кристалл, в котором возникают неравновесные носители. Подобный рассмотренному подход применяется также в практике исследования фотопроводимости полупроводников, см., например, [7].

Анализ выражений (1), (2) показывает, что в широком интервале соотношений между составляющими потерь выгодно использовать относительно низких частоты. В диапазоне УВЧ $f=100..1000$ МГц целесообразно использовать миниатюрные квазистатические типы резонаторов, например, тороидальный или спиральный, которые обладают достаточно высокими собственными добротностями (порядка, соответственно, 1500 и 500). Получить приемлемый уровень первичного сигнала (1) можно и на СВЧ/КВЧ за счет более высоких собственных добротностей в этих диапазонах ($Q \geq 10^4$). При выборе частотного диапазона и конструкции резонансной системы необходимо учитывать размер кристалла, который определяет радиационную эффективность, его форму и электрические характеристики. Критерием эффективности синтезированного сенсора является введенный в (2) фактор $K_C \cdot Q_{od}$, величина которого должна быть максимальна на заданной рабочей частоте.

III. Заключение

Обоснованы критерии выбора частотного диапазона и разработки конструкций эффективных микроволновых резонансных сенсоров ионизирующих из-

лучений на основе фактора эффективности. Рассматриваются примеры оптимальных микроволновых сенсоров ионизирующих излучений.

Совершенствование аппаратной части РПД целесообразно по следующим направлениям: (а) повышение чувствительности микроволнового сенсора на основе применения автогенераторного принципа построения измерительной цепи; (б) улучшение отношения сигнал/шум путем оптимальной фильтрации первичных высокочастотных сигналов на основе априорной информации о форме измерительных сигналов.

IV. Список литературы

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Гордиенко Ю. Е., Бородин Б. Г., Сорока А. С. Вопросы разработки безэлектродных радиационных детекторов с СВЧ-смещением // 19-я Междунар. Крымская конфер. «СВЧ техника и телекоммун. технологии» (КрыМиКо'2009): матер. конфер. в 2 т. (Севастополь, 2009). Севастополь: Вебер, 2009. Т. 2. С. 793-794.
- [4] Гордиенко Ю. Е., Бородин Б. Г., Ларкин С. Ю., Сорока А. С. Анализ собственных режимов резонансных систем радиационных полупроводниковых детекторов с СВЧ смещением // 2-я Междунар. науч. конфер. «Электрон. компонентная база. Состояние и перспективы развития»: сб. науч. тр. Харьков-Кацивели, 2009. С. 247-250.
- [5] Егоров В. Н. Резонансные методы исследования диэлектриков на СВЧ // Приборы и техн. эксперимента. 2007. №2. С. 5-38.
- [6] Мороз Е. Е., Сорока А. С., Шматько А. А. Расчет и анализ сопротивления связи в резонансных генераторах с распределенным взаимодействием О-типа / Харьков. 1982. 43 с. (Препринт / АН УССР. Ин-т радиофизики и электроники: №198).
- [7] Subramanifn V., Sobhanandri J. Study of microwave transient photo conductivity on single and polysilicon using cavity perturbation method // Jap. J. Appl.Phys. Vol. 35 (1996). P. 2839-2844.

MICROWAVE SENSORS FOR REGISTRATION OF IONIZING RADIATION

Sliptchenko N. I., Borodin B. G., Soroka A. S.
Kharkiv National University of Radioelectronics
 14, Lenin Ave., Kharkiv, 61009, Ukraine
 Ph.: +38(057)7021362, e-mail: mepu@kture.kharkov.ua

Abstract — The development of contactless semiconductor microwave-biased detectors (microwave SMD) for registration of ionizing radiations will allow overcoming a number of technological restrictions inherent to traditional SMD, simplifying a design, raising reliability and efficiency of the detector. The price of such solution is some complication of signal extraction and processing of a primary signal at high frequencies. The purpose of work is to offer an adequate radiophysical methods and means for radiometry of ionizing particles. In the work the criteria of choice of a frequency range and development of designs of effective microwave resonant sensor for detecting ionizing radiations are proved on the basis of an analysis of the factor of efficiency.

Conclusion

The perfection of the SMD hardware is expedient on the following directions: (a) increasing of sensitivity of a microwave sensor as one-port network at the expense of application of an auto generating principle of construction the measuring circuit; (b) improvement of the relation S/N by an optimum filtration of primary high-frequency signal on a basis of a priori information about a measuring signal form.