

УДК 533.951.8

**ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РЕЗОНАНСНЫХ
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Полетаев Д. А.

*Таврический национальный университет имени В .И. Вернадского, проспект академика
Вернадского 4, Симферополь 295007, Республика Крым, Россия
E-mail: dmjtry@gmail.com*

В работе рассматривается возможность применения коаксиального резонаторного измерительного преобразователя с укорачивающей емкостью для диагностики полупроводниковых материалов. Проводится анализ основных геометрических параметров, определяющих характеристики зонда и его чувствительность.

Ключевые слова: СВЧ, резонатор, добротность, чувствительность, полупроводник.

PACS: 07.07.Vx

ВВЕДЕНИЕ

Весьма перспективной отраслью энергетики является технология получения энергии из солнечного света. Она не требует расхода полезных ископаемых в процессе эксплуатации [1]. Наиболее востребованной считается электрическая энергия, как наиболее универсальная для дальнейших преобразований.

Для получения электрической энергии из солнечного света широко используются фотоэлектрические преобразователи. Лучшие современные образцы таких устройств имеют КПД до 40%. Это весьма сложные многопереходные структуры на основе полупроводниковых наногетероструктур [2]. Они состоят из нескольких субэлементов с р-п переходами и барьерными слоями различных материалов, расположенных по убыванию ширины запрещенной зоны, соединенные встречновключенными туннельными диодами. Каждый субэлемент преобразует в электричество энергию коротковолновой части падающего спектра и пропускает длинноволновую часть спектра в последующий субэлемент. Основным недостатком таких элементов является высокая себестоимость производства.

Большие площади фотоэлектрических преобразователей позволяют получить значительную мощность на выходе. Многослойная конструкция позволяет увеличить спектр поглощения, повышая КПД [1]. В то же время, это требует высокой технологичности производства и накладывает определенные ограничения на эксплуатационные режимы фотопреобразователя. Так, механическое повреждение в какой-либо точке пластины фотоэлектрического преобразователя, может нарушить структуру конструкции, внося дополнительные потери и снижая КПД. По результатам производственного тестирования такая пластина фотоэлектрического преобразователя может не вписываться в установленные

нормы и отбраковывается. Представляется целесообразным осуществлять дополнительную диагностику таких структур, не как готового прибора, а локально – в каждой точке для поиска дефектных участков. Это позволяет повысить процент выхода годных изделий, снижая итоговую себестоимость. Кроме того, наличие инструмента для локальной диагностики параметров полупроводниковых фотоэлементов позволит получать значения подвижности, времени жизни носителей заряда и др., связанные с электрофизическими параметрами материала: относительной диэлектрической проницаемостью и тангенсом угла потерь. Это дополнительно расширяет возможности диагностики готовых изделий и открывает новые горизонты многопараметрического анализа.

Сегодня радиоволновые методы диагностики материалов и объектов вышли на этап применения СВЧ резонансных измерительных преобразователей, в частности с коаксиальной измерительной апертурой [3]. Преимущества их применения обусловлены неразрушаемостью объекта исследования и бесконтактностью. Особо требуется отметить, что в отличие от оптических методов, СВЧ зонды позволяют исследовать не только поверхностные параметры образца, но и на некоторой глубине, которая обусловлена конструкцией зонда и толщиной скин-слоя [4]. Целесообразно исследовать возможности применения резонансных измерительных преобразователей, для диагностики параметров полупроводниковых фотоэлектрических преобразователей.

Целью работы является анализ особенностей применения резонансных измерительных преобразователей для диагностики полупроводниковых структур.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РЕЗОНАНСНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Предварительный теоретический анализ позволил установить отсутствие ощутимого влияния малой мощности электромагнитного поля зонда на тестируемый образец. Так, при мощности электромагнитного поля в 100 мВт, плотность потока составляет 100 мВт/см², а напряженность электрического поля не превышает значения 10² В/м, согласно [5], что на 4 – 5 порядков меньше значений напряженности полей, существенно влияющих на дрейфовую скорость носителей заряда в полупроводниках [6].

Наиболее перспективными являются резонансные измерительные преобразователи (РИП) апертурного типа, в частности с коаксиальной измерительной апертурой [4]. Однако возможности таких преобразователей ещё недостаточно изучены.

Из общих физических представлений, понятно, что выбором конструктивных параметров можно изменять добротность и чувствительность резонансного измерительного преобразователя.

Конструкцией, рассматриваемой в работе, является коаксиальный резонансный измерительный преобразователь с укорачивающей емкостью (рис. 1). Конструкция включает коаксиальный волновод, длиной H , образующий накопительную часть РИП, отрезок коаксиального волновода, длиной h , образующий коаксиальную

измерительную апертуру, образец, толщиной h_2 , имеющий электрофизические параметры ε_2 ; $\operatorname{tg} \delta_2$.

Для проведения практических измерений важно, чтобы электрофизические параметры образца оказывали как можно большее влияние на нагруженную добротность РИП. При этом нагруженная добротность не должна быть меньше 100 [5]. Из теории коаксиальных линий передач [5] известно, что минимальный коэффициент затухания в коаксиальной линии достигается при отношении радиусов: $R_1 / R_2 = 0,28$. Очевидно, максимальная добротность четвертьволнового резонатора будет также достигаться при данном отношении.

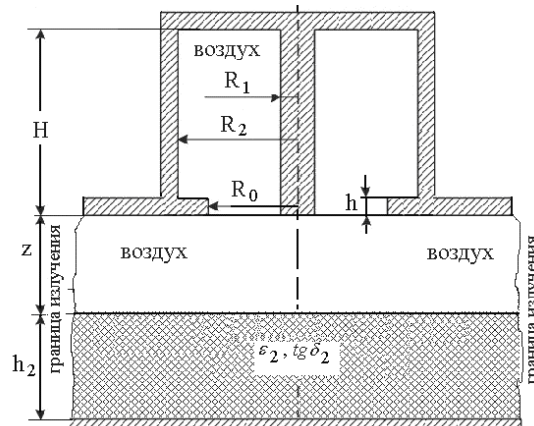


Рис. 1. Модель РИП.

Одномодовый режим коаксиальной линии обеспечивается в диапазоне частот [5]:

$$f < \frac{c}{\pi(R_1 + R_2)} \quad (1)$$

где c – скорость света в вакууме; R_1 – радиус центрального проводника; R_2 – внутренний радиус коаксиального волновода (по рис. 1).

Резонансная частота идеального четвертьволнового резонатора находится из выражения [5]:

$$f_0 = \frac{c(2n-1)}{4H}. \quad (2)$$

Представленный выше предварительный анализ позволяет выбрать геометрические размеры модели: $H / \lambda = 1,25$; $R_2 / \lambda = 0,17$; $h / H = 5,6 \cdot 10^{-3}$; $z = \infty$ (четвертьволновый резонатор нагружен на свободное пространство); проводимость стенок резонатора принята равной $\sigma = 5,8 \cdot 10^6$ (с целью учета влияния шероховатости стенок).

Для теоретического исследования данного СВЧ зонда решаются следующие волновые уравнения методом конечных элементов [7]:

$$\nabla \times (\mu^{-1} \nabla \times \mathbf{E}) - k^2 \varepsilon \mathbf{E} = 0, \quad (3)$$

$$\nabla \times (\mu^{-1} \nabla \times \mathbf{H}) - k^2 \varepsilon \mathbf{H} = 0, \quad (4)$$

где $\mathbf{E}$ – вектор напряженности электрического поля; k – комплексное волновое число; ε – комплексная диэлектрическая проницаемость; μ – относительная магнитная проницаемость; $\mathbf{H}$ – вектор напряженности магнитного поля.

Граничные условия имеют вид [7]:

$$\mathbf{E}_T = Z_s (\mathbf{n} \times \mathbf{H}_T), \quad (5)$$

где $\mathbf{E}_T$, $\mathbf{H}_T$ – тангенциальная компоненты вектора напряженности электрического и магнитного полей, соответственно; Z_s – поверхностное сопротивление; $\mathbf{n}$ – единичный вектор нормали к поверхности.

Добротность определяется по формуле [7]:

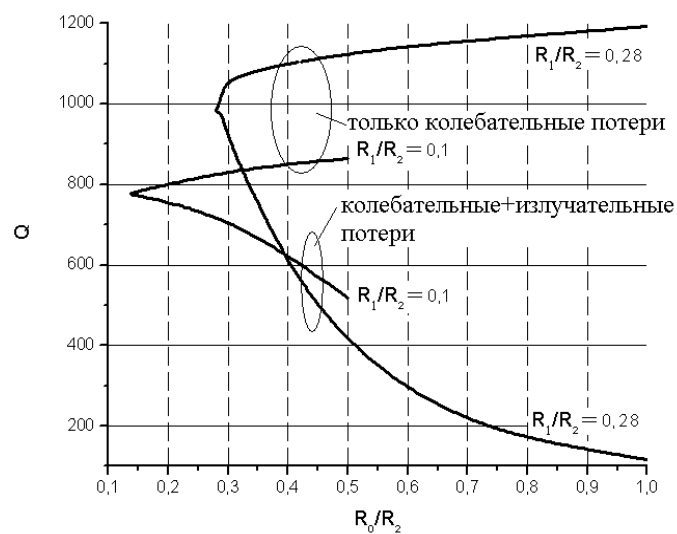
$$Q = \frac{|k|}{2\text{Im}(k)}. \quad (6)$$

На рис. 2 приведены зависимости добротности и резонансной частоты РИП от величины R_0 , рассчитанные при отсутствии объекта исследования.

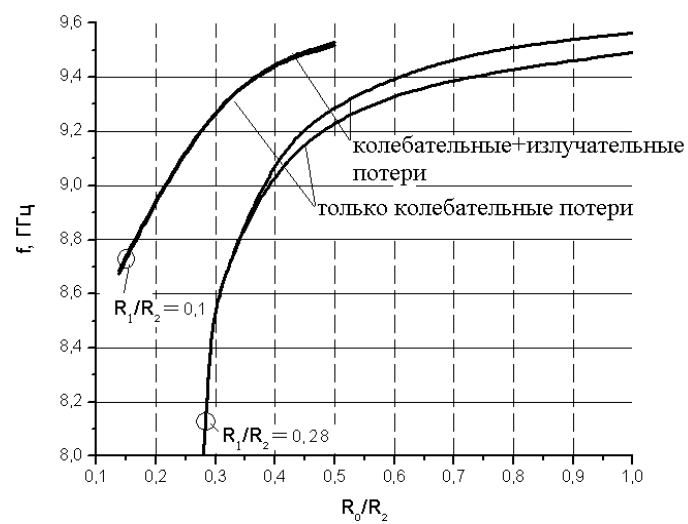
Как видно из графиков на рис. 2, уменьшение R_0 снижает потери на излучение в свободное пространство. Необходимость учета излучательных потерь наиболее явно демонстрируется на зависимости добротности от R_0 (рис. 2, а). Даже при малом размере R_0 добротность при учете излучения и без учета отличаются почти в 2 раза. Требуется отметить, что добротность РИП уменьшается в 1,5 раза, по сравнению с РИП, в котором выдержано оптимальное соотношение радиусов. Из графика на рис. 2, б видно, что учет излучения практически не влияет на резонансную частоту.

На рис. 3 приведены зависимости добротности и резонансной частоты РИП от продольного размера апертурно-формирующей части коаксиала h , при разных значениях величины R_0 и диэлектрической проницаемости кремния, как наиболее распространенного материала для изготовления полупроводниковых фотоэлементов [1], изменяющейся от 4 (оксид кремния) до 12 (чистый кремний).

Характер изменения добротности (рис. 3, а) носит резонансный характер. Более острый резонансный пик соответствует меньшему R_0 , что согласуется с общими физическими представлениями. Уменьшение резонансной частоты (рис. 3, б) обуславливается ростом емкости апертуры, при увеличении ее продольного размера апертурно-формирующей части коаксиала.

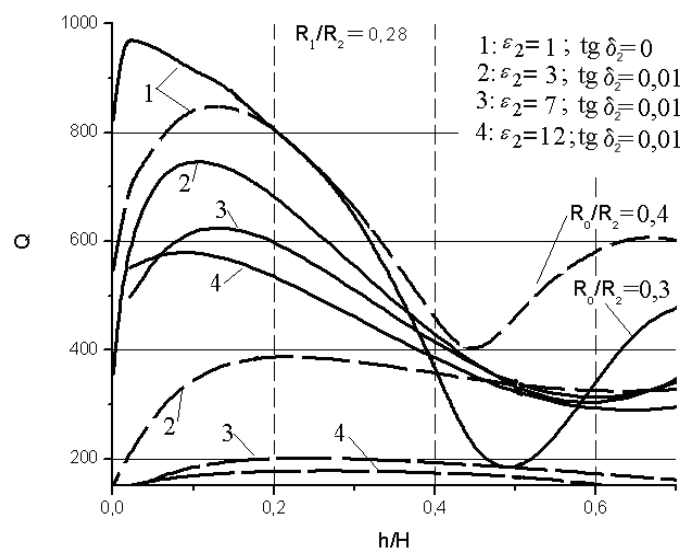


(а)

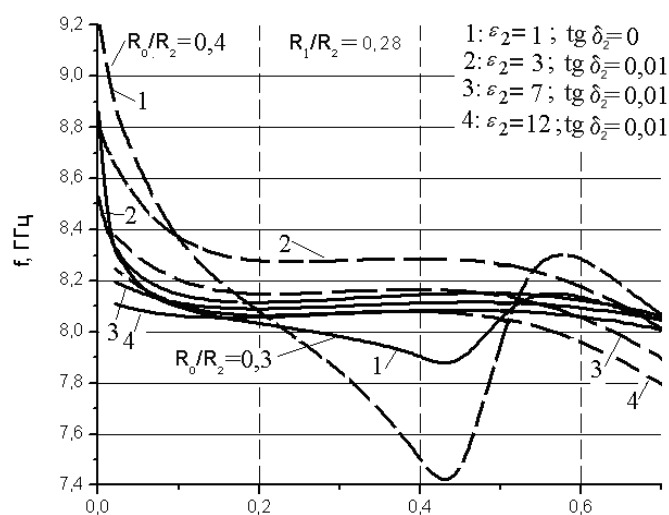


(б)

Рис. 2. Зависимость (а) добротности и (б) частоты от величины R_0 .



(a)



(б)

Рис. 3. Зависимость (а) добротности, (б) резонансной частоты от размеров апертуры.

Как видно из графика (рис. 3, а) добротность РИП при исследовании образца с параметрами $\varepsilon_2 = 3$; $\text{tg} \delta_2 = 0,01$ остается довольно высокой даже при раскрывах апертуры $R_0 / R_2 > 0,3$. Отчетливо видно значительное изменение добротности с образцом, при $h / H \approx 0,4$ (что соответствует $h / \lambda = 0,5$), относительно добротности, рассчитанной при нагрузке на свободное пространство (рис. 3, а).

Данный факт свидетельствует об адекватности численной модели. Вместе с тем, даже при $h/H \approx 0,4$, изменение добротности РИП в 2 раза меньше, чем при $h \rightarrow 0$. Это связано со значительным провисанием поля из апертуры. Из графика на рис. 3, а следует весьма важный вывод: наибольшее изменение добротности обеспечивается при $h/H < 0,05$.

Дальнейшие расчеты проведены для модели с параметрами: $H/\lambda = 1,25$; $R_2/\lambda = 0,17$; $z = 0$; $h_{21} = 0$; $h_2/\lambda = 0,14$; $h/H = 0,01$; проводимость стенок $\sigma = 5,8 \cdot 10^6$; $\lambda = 3$ см, при изменении величины апертуры R_0/R_2 от 0,29 до 1. Графики зависимости чувствительности РИП $\delta Q/Q$ от величины R_0 апертуры приведены на рис. 4. Чувствительность вычислялась исходя из изменения тангенса угла диэлектрических потерь $\Delta \operatorname{tg} \delta_2 = 0,01$, при значении $\operatorname{tg} \delta_2 = 0,01$ и постоянной относительной диэлектрической проницаемости.

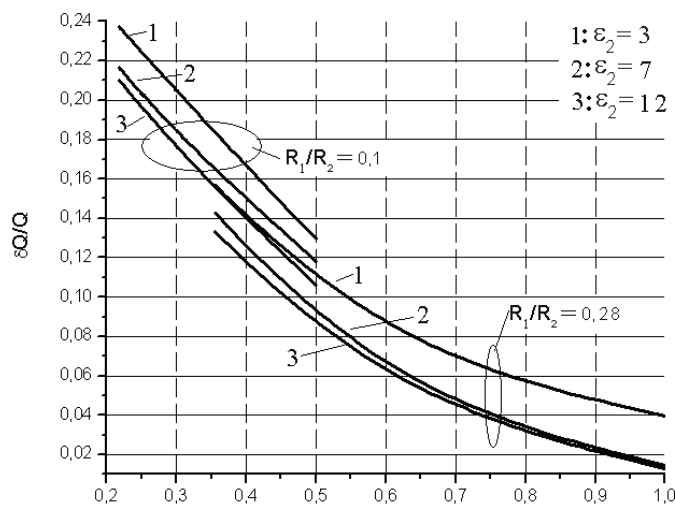


Рис. 4. Зависимость $\delta Q/Q$ от величины апертуры и параметров образца.

Чувствительность датчика (рис. 4) увеличивается при уменьшении R_0/R_2 , оказываясь недостаточной для образцов с высокой диэлектрической проницаемостью. Поэтому оптимизировать такой резонансный измерительный преобразователь следует отдельно для объектов с низким и высоким значением диэлектрической проницаемости.

ВЫВОДЫ

Выполненные расчеты свидетельствуют о том, что при проведении теоретического описания характеристик резонансных измерительных преобразователей с коаксиальной апертурой при исследовании собственных полупроводников с малыми потерями необходимо учитывать потери на излучение.

В работе установлены количественные особенности влияния геометрии апертуры на добротность и чувствительность в широком диапазоне изменения электрофизических параметров объектов, что позволяет обозначить основные направления оптимизации чувствительности резонансных измерительных преобразователей для исследования параметров полупроводниковых структур.

Список литературы

1. Алферов Ж. И. Тенденции и перспективы развития солнечной энергетики / Ж. И. Алферов, В. М. Андреев, В. Д. Румянцев // ФТП. – 2004. – Т. 8, вып. 38. – С. 937 – 948.
2. Минтаиров С. А. Исследование диффузионных длин основных носителей заряда в фотоактивных слоях многопереходных солнечных элементов / С. А. Минтаиров, В. М. Андреев, В. М. Емельянов [и др.] // ФТП. – 2010. – Т. 8, вып. 44. – С. 1118 – 1123.
3. Chen L. F. Microwave electronics measurement and materials characterization / L. F. Chen, C. K. Ong, C. P. Neo. – Southern Gate: John Wiley & Sons Ltd, 2004. – 537 p.
4. Гордиенко Ю. Е. Вклад колебательных и излучательных потерь в характеристики СВЧ преобразователей с коаксиальной измерительной апертурой / Ю. Е. Гордиенко, Ю. И. Гуд, Д. А. Полетаев // Радиотехника. – 2009. – № 157. – С. 108 – 114.
5. Кураев А. А. Электродинамика и распространение радиоволн / А. А. Кураев, Т. Л. Попкова, А. К. Синицын – Мн.: Бестпринт, 2004. – 358 с.
6. Случинская И. А. Основы материаловедения и технологии полупроводников / И. А. Случинская. – М.: Радио и связь, 2002. – 376 с.
7. Григорьев А. Д. Электродинамика и техника СВЧ / А. Д. Григорьев. – М.: Высш. шк., 1990. – 335 с.

Полетаев Д. О. Особливості застосування резонансних вимірювальних перетворювачів для діагностики напівпровідникових матеріалів / Д. О. Полетаєв // Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія : Фізико-математичні науки. – 2014. – Т. 27 (66), № 2. – С. 132-140.

В роботі розглядається особливості застосування резонансних вимірювальних перетворювачів для діагностики напівпровідникових матеріалів. Проводиться аналіз основних геометричних параметрів, що визначають характеристики зонда і його чутливість. Виконані розрахунки свідчать про те, що при проведенні теоретичного опису характеристик резонансних вимірювальних перетворювачів з коаксиальною апертурою при дослідженні напівпровідників з малими втратами необхідно враховувати втрати на випромінювання.

Ключові слова: НВЧ, резонатор, добротність, чутливість, напівпровідник.

Poletaev D. A. Features of the Resonator Converter's Application for Semiconductor Materials Diagnostics / D. A. Poletaev // Scientific Notes of Taurida National V. I. Vernadsky University. – Series: Physics and Mathematics Sciences. – 2014. – Vol. 27 (66), No 2. – P. 132-140.

This paper considers the possibility of using a microwave coaxial resonator converter for diagnostics of semiconductor materials. Very promising energy industry is the technology of obtaining energy from sunlight. It does not require fuel minerals during operation. Indeed, for every square meter on average falls about 1 kW of power. For generating electrical energy from sunlight photoelectric converters are widely used. This is a very complex structure based on multijunction semiconductor nanoheterostructures. It seems appropriate to carry out additional diagnostics such structures, not as a finished device, and locally – at each point to search a defective places. Today radiowave methods of diagnostics of materials and objects are in the process of applying the microwave resonator converter, in particular with coaxial measuring aperture. The main advantages of their use are indestructible object of research and contactless, the possibility of studying the sample at some depth. The purpose of work is to analyze the specific application of the microwave resonator converter for diagnostics of semiconductor solar cells. Analyzes the basic geometric parameters that determine the characteristics of the probe and its sensitivity. Calculations show that during the theoretical description of the characteristics of the resonant transducers with a coaxial aperture in the study of semiconductors with

small losses must be taken into account radiation losses. In the quantified characteristics influence the geometry of the aperture on the quality factor and sensitivity in a wide range of electro-physical parameters of objects, allowing to identify the main directions of its optimization by the sensitivity.

Keywords: microwave, resonator, quality factor, sensitivity, semiconductor.

References

1. J. Alferov, V. Andreev, V. Rumyantsev, *Semiconductors* **38**, 937 (2004).
2. S. Mintairov, V. Andreev, V. Emelyanov et al., *Semiconductors* **44**, 1118 (2010).
3. L. Chen, *Microwave electronics measurement and materials characterization* (Wiley, 2004) 538 p.
4. Y. Gordienko, Y. Hood, D. Poletaev, *Technol* **157**, 108 (2009).
5. A. Kuraev, *Electrodynamics and wave propagation* (Bestprint, 2004) 358 p.
6. I. Sluchinskaya, *Fundamentals of materials science and semiconductor technology* (Radio and communications, 2002) 376 p.
7. D. Grigoriev, *Resonators and resonator microwave delay system* (Radio and communication, 1984) 248 p.

Received 10 August 2014.