

ОДНОМODOVЫЕ РЕЗОНАТОРНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ В ОБЩЕЙ ТЕОРИИ СВЧ ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ

ГОРДИЕНКО Ю.Е., ГУД Ю.И., КОРЯГИНА Е.Ю.,
СЛИПЧЕНКО Н.И.

Обосновывается общая теория идеально одномодовых резонаторных измерительных преобразователей для СВЧ диагностики полупроводников и диэлектриков. Описываются фундаментальные сигналы измерительной информации. Исследуется их зависимость от степени включения образца в поле измерительного преобразователя Н- и Е-типа.

1. Введение

При исследовании на СВЧ диэлектриков и диагностике полупроводников широко применяются так называемые резонаторные измерительные преобразователи (РИП) Н- и Е-типа [1-5]. Важной их особенностью в метрологическом плане является доступность создания строгой теории взаимодействия плоскостойкого образца с электромагнитным полем рабочего вида колебаний. Условие плоскостойкости образца зачастую естественным образом выполняется в силу специфики конструктивно-технологического использования этих материалов в технике.

В рамках приближения, получившего название одномодового, были установлены новые закономерности, позволившие создать высокопрецизионные толщиномеры диэлектрических и полупроводниковых пленок на различных подложках [6], предложить и реализовать оригинальные фотомодуляционные методы СВЧ диагностики полупроводниковых структур [7-9], обосновать удобный подход для теоретического исследования СВЧ эффективной диэлектрической проницаемости влагосодержащих дисперсных сред [10].

Однако большая часть этих исследований была направлена на разработку конкретных измерительных средств, поэтому общие вопросы теории таких РИП остались не изученными, что сдерживает оценку области их применения и вскрытие новых возможностей. В данной статье осуществлена попытка формулировки основ такой теории.

2. Общие теоретические формулировки

В большинстве предшествующих разработок исследуемый плоскостойкий образец располагается между двумя строгосоосными частями объемного резонатора с заданным рабочим видом колебаний. Наибольшее распространение получил цилиндрический

резонатор с H_{012} видом колебаний, благодаря отсутствию электрического контакта этих частей между собой и с образцом, а также бесконтактных переключательных поршней [2, 7-9]. Сложившаяся к настоящему времени конструкция универсального РИП Н-типа схематически представлена на рис. 1.

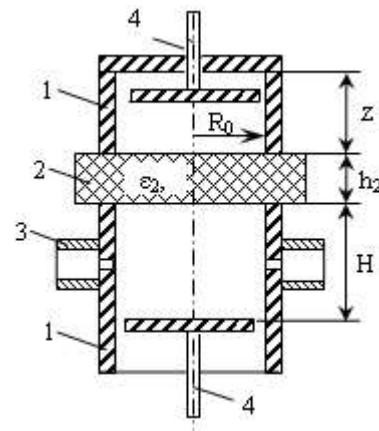


Рис. 1. Схематическая конструкция универсального РИП Н-типа: 1 – СВЧ резонатор; 2 – образец; 3 – подводные волноводы; 4 – короткозамыкающий поршень

Следует заметить, что для РИП Н-типа характерно взаимодействие немагнитного образца только с единственной электрической составляющей поля E_{φ} . При условии строгой параллельности образца торцам РИП и полном заполнении им поперечного сечения резонатора нормальные к границам электрические составляющие поля отсутствуют.

В случае РИП Е-типа при таких же условиях расположения образца имеет место его взаимодействие как с тангенциальной, так и с нормальной составляющими электрического поля. Такая специфика важна в некоторых применениях [2, 4, 5]. Теоретическое исследование ее имеет важное значение и хорошо доступно в одномодовом приближении. Реальные измерения осложнены по сравнению с РИП Н-типа существованием СВЧ токов радиального и осевого направлений, исключающих применение бесконтактных переключательных поршней и затрудняющих оптимальное размещение образца между соосными частями резонатора.

По этим причинам применяются РИП Е-типа с апертурным включением образца [4, 5]. Основные физические особенности их характеристик преобразования можно устанавливать из анализа идеальной модели в одномодовом приближении, аналогичной РИП Н-типа.

В работах [2, 5-8] аналитически обоснованы характеристики преобразования РИП Н- и Е-типа в одномодовом приближении с учетом СВЧ потерь в образце для общего случая многослойного образца и произвольного его расположения по оси резонатора. Численный их анализ осуществлялся чаще всего при размерных параметрах, что было обусловлено стандартностью исследуемых полупроводниковых структур по толщине пластин подложек (200...250 мкм).

В общей постановке характеристическое уравнение целесообразно представлять, например, для однослойного образца в следующем виде:

$$\chi_{21}(1 - \chi_{21} \operatorname{th} l_2 \operatorname{th} l_3) \operatorname{th} l_1 = -(\operatorname{th} l_2 + \chi_{21} \operatorname{th} l_3), (1)$$

где $\chi_{21} = \left(\frac{\tilde{\varepsilon}_2 - \Theta}{1 - \Theta} \right)^{1/2}$ для РИП Н-типа;

$\chi_{21} = \frac{\tilde{\varepsilon}_2(1 - \Theta)^{1/2}}{(\tilde{\varepsilon}_2 - \Theta)^{1/2}}$ для РИП Е-типа;

$$\tilde{\varepsilon}_2 = \varepsilon_2' - j\varepsilon_2'' = \varepsilon_2(1 - j \operatorname{tg} \delta_2);$$

$$\Theta = (\lambda_0 / \lambda_{\text{кр}})^{1/2} \cdot (1 + \Omega' + j\Omega'')^{-2};$$

$$l_1 = 2\pi \frac{z_1}{\lambda_0} (1 - \Theta)^{1/2} (1 + \Omega' + j\Omega'');$$

$$l_2 = 2\pi \frac{h_2}{\lambda_0} (\tilde{\varepsilon}_2 - \Theta)^{1/2} (1 + \Omega' + j\Omega'');$$

$$l_3 = 2\pi \frac{H}{\lambda_0} (1 - \Theta)^{1/2} (1 + \Omega' + j\Omega'');$$

$\lambda_{\text{кр}}$ – критическая длина волны для данного сечения цилиндрического резонатора и рабочего вида колебаний; λ_0 – исходная рабочая длина волны на частоте f_0 ; $\Omega' = \Delta f / f_0$ – изменение резонансной частоты РИП, вызванное введением в его поле исследуемого образца;

$$\Omega'' = (f_0' / 2f'')^{-1} = 1/Q_{20}; \quad Q_2^{-1} = Q_1^{-1} + Q_{20}^{-1};$$

Q_{20} – добротность, вносимая в РИП образцом; Q_1 – исходная добротность РИП; Q_2 – добротность РИП с образцом.

Нетрудно видеть, что характеристическое уравнение (1) позволяет, вычисляя Ω' и Ω'' , исследовать зависимость расстройки резонатора $\Delta f / f_0$ и его добротности Q_2 от безразмерных параметров образца ε_2 , $\operatorname{tg} \delta_2$, h_2 / λ_0 и степени включения его в поле резонатора, характеризуемое H / λ_0 и параметром Θ .

При многослойности образца в аналогичных представлениях характеристическое уравнение имеет вид:

$$-\chi_{12} \operatorname{th} l_1 = \frac{\chi_{43} \operatorname{th} l_3 + \frac{\chi_{54} \operatorname{th} l_4 + \dots}{\chi_{54} + \dots}}{\chi_{43} + \operatorname{th} l_3} \cdot \frac{\chi_{32} \operatorname{th} l_2 + \frac{\chi_{43} \operatorname{th} l_3 + \frac{\chi_{54} \operatorname{th} l_4 + \dots}{\chi_{54} + \dots}}{\chi_{43} + \operatorname{th} l_3}}{\chi_{32} + \operatorname{th} l_2} \cdot \dots (2)$$

Иногда в вычислительном отношении удобно вместо характеристического уравнения (2) использовать для оценок Ω' и Ω'' рекуррентные соотношения вида:

$$\begin{aligned} \operatorname{th} l_1 &= -\chi_{21}^{-1} \frac{A_1 + \operatorname{th} l_2}{1 + A_1 \operatorname{th} l_2}, \\ A_1 &= \chi_{32}^{-1} \frac{A_2 + \operatorname{th} l_3}{1 + A_2 \operatorname{th} l_3}, \\ &\dots \\ A_{i-1} &= \chi_{i,i-1}^{-1} \frac{A_i + \operatorname{th} l_i}{1 + A_i \operatorname{th} l_i}, \\ &\dots \\ A_N &= \chi_{N,M}^{-1} \operatorname{th} l_N. \end{aligned} (3)$$

Величины $\Delta f / f_0$ и Q_2 являются реально измеряемыми параметрами РИП. Поскольку они определяются прямо из характеристического уравнения, их принято называть фундаментальными.

Другие нередко измеряемые параметры РИП, например, коэффициент передачи (отражения), фазовый сдвиг и прочие, являются в такой постановке теории производными от них.

Практика показала, что всесторонние исследования зависимостей фундаментальных сигналов измерительной информации (ФСИИ) РИП от параметров образца и СВЧ резонатора необходимы для оптимизации РИП и процесса измерений по различным требуемым критериям.

Наиболее востребуемые из таких зависимостей представлены на рис. 2, 4, 6.

3. Особенности зависимости изменения резонансной частоты РИП

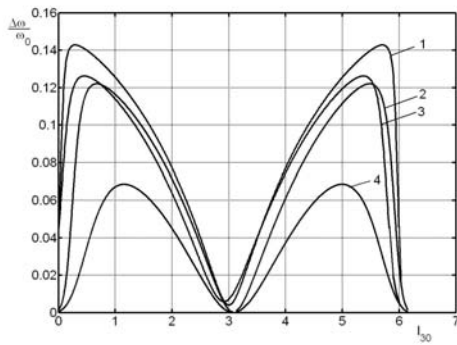
Зависимости $\frac{\Delta f}{f_0} = \Phi(l_{30}; l_{20}; \Theta_0)$, представленные на рис. 2, отражают влияние степени включения образца и его электрической толщины на величину относительного изменения резонансной частоты РИП.

Величины $l_{20} = 2\pi \frac{h_2}{\lambda_0} (\varepsilon_2 - \Theta_0)^{1/2}$;

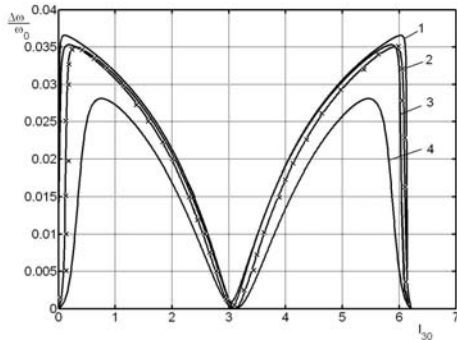
$$l_{30} = 2\pi \frac{H}{\lambda_0} (1 - \Theta_0)^{1/2} \quad \text{и} \quad \Theta_0 = \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{\text{кр}}} \right)^{1/2}$$

являются количественными характеристиками перечисленных параметров.

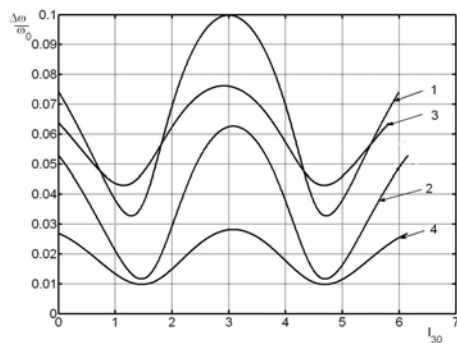
Нетрудно видеть, что только при малой толщине образца $l_{20} \ll \pi/2$ рассматриваемые зависимости укладываются в представления теории малых возмущений [1]. При l_{20} , сравнимом с $\pi/2$, имеют место следующие существенные моменты:



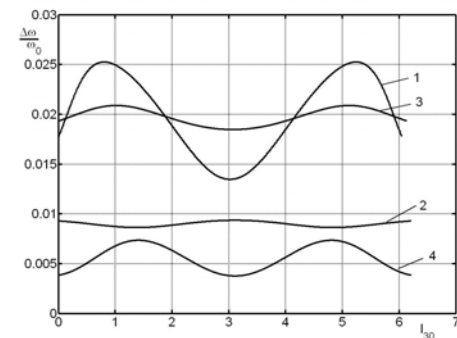
а



б



в



г

Рис. 2. Зависимость изменения резонансной частоты от степени включения образца в поле РИП: $\text{tg } \delta_2 = 10^{-3}$; $\lambda_0 = 8$ мм; а,б – РИП Н-типа; в,г – РИП Е-типа; а,в – $\Theta_0 = 0,6$; б,г – $\Theta_0 = 0,9$; 1,2 – $e_2 = 12$; 3,4 – $e_2 = 5$; 1, 3 – $l_{20} = 1,5$; 2, 4 – $l_{20} = 0,41$

а) асимметрия на, казалось бы, физически равноценных краях диапазона l_{30} от 0 до π ;

б) смещение экстремумов с увеличением l_{20} в область меньших значений степени включения l_{30} и возрастание крутизны зависимостей в областях от 0 до $l_{30}^{\max 1}$ и от $l_{30}^{\max 2}$ до 2π ;

в) дополнительная, помимо зависимости от l_{20} и l_{30} , зависимость от параметра Θ_0 .

Для РИП Е-типа эти факторы практически не проявляются.

Следует также отметить то, что для обоих РИП практически не наблюдается зависимость $\Delta f / f_0$ от $\text{tg } \delta_2$ вплоть до $\text{tg } \delta_2 < 0,5$. Данные оценки здесь не приводятся ввиду отсутствия особенностей даже в области $\text{tg } \delta_2 > 0,5$, когда появляется существенная зависимость.

Отмеченные характерные зависимости подтверждены экспериментально на пластинах кремния толщиной 250 мкм при удельном сопротивлении более 10^2 Ом·см (экспериментальные точки приведены на соответствующей теоретической зависимости).

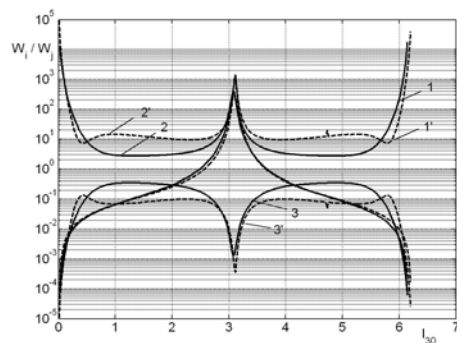


Рис. 3. Зависимость соотношения запасаемой энергии в различных частях резонатора от степени включения образца РИП Н-типа $\lambda_0 = 8$ мм; $\varepsilon_2 = 5$; $\text{tg } \delta_2 = 10^{-2}$; $l_{20} = 0,41$; — $\Theta_0 = 0,6$; - - - $\Theta_0 = 0,9$; 1, 1' – W_1/W_2 ; 2, 2' – W_3/W_2 ; 3, 3' – $W_2/(W_1 + W_3)$

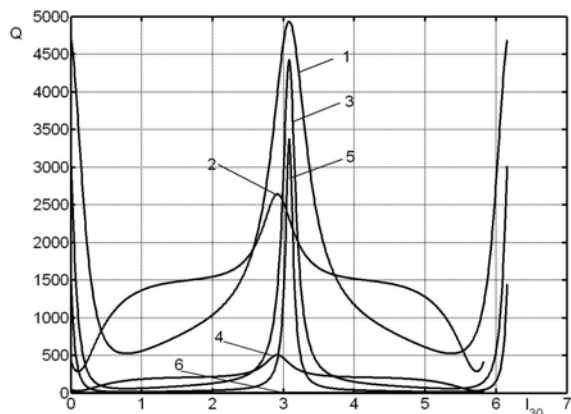
Возникновение указанных особенностей следует связывать с перераспределением поля рабочего вида колебаний в резонаторе образцом, толщина которого не соответствует условиям малости возмущения. Для подтверждения этого предположения в работе исследована численным методом зависимость соотношения запасаемой энергии в различных частях резонатора от степени включения образца (рис. 3). Распределение электрического поля при этом находилось путем решения уравнения Гельмгольца для анализируемой геометрии РИП методом конечных элементов [11].

Приведенные графики убедительно подтверждают наличие такого перераспределения и его зависимость от степени включения образца.

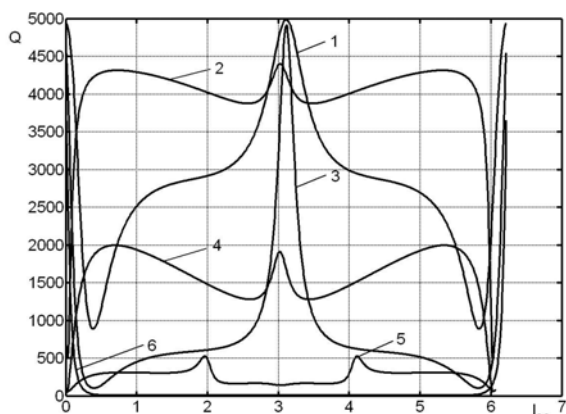
4. Особенности зависимости изменения добротности от параметров образца и степени включения его в поле РИП

Зависимости добротности от параметров образца и степени включения его в поле РИП

$Q_2 = \varphi(l_{30}, \text{tg } \delta_2, \varepsilon_2)$ приведены на рис. 4 – 6.



а



б

Рис. 4. Зависимость добротности от параметров образца степени его включения в поле РИП Н-типа: $\lambda_0 = 8$ мм; $\varepsilon_2 = 5$; а – $\Theta_0 = 0,6$; б – $\Theta_0 = 0,9$; 1-2 – $\text{tg } \delta_2 = 10^{-2}$; 3-4 – $\text{tg } \delta_2 = 0,1$; 5-6 – $\text{tg } \delta_2 = 0,4$; 1, 3, 5 – $l_{20} = 0,41$; 2, 4, 6 – $l_{20} = 1,5$

Они построены в предположении, что исходная ненагруженная добротность РИП (без образца) равна $5 \cdot 10^3$, что соответствует реально достижимой величине. Обращают на себя внимание качественные соответствия положению экстремумов в изменении добротности положению экстремумов изменения резонансной частоты. Вместе с тем о совпадении их формы можно говорить только при $\text{tg } \delta_2 \leq 10^{-2}$. Влияние $\text{tg } \delta_2$ заметно проявляется не только количественно, что физически естественно, но и на характере зависимостей.

Отдельные исследования влияния $\text{tg } \delta_2$ на перераспределение поля в РИП показали его существенность при $\text{tg } \delta_2 > 10^{-2}$.

В целом же следует отметить, что представленные зависимости весьма полезны для оптимального выбора электродинамической структуры РИП Н-типа по значению Θ_0 и степени включения образца при осуществлении его физической диагностики. В первую РИ, 2007, № 2

очередь это относится к реализуемому значению ненагруженной добротности, которая не должна снижаться образцом до величины, нивелирующей резонансные свойства РИП и связанные с этим его преимущества.

Далее, важным являются изменения добротности, связанные с изменением диагностируемых параметров объекта. Первичное представление об этом дает значение крутизны соответствующих зависимостей. На рис. 4 в качестве примера показаны зависимости Q_2 от ε_2 образца при различной степени его включения (l_{30}), толщины (l_{20}) и значения $\text{tg } \delta_2$. Видно, что чувствительность РИП, связанная с крутизной зависимостей, может быть различной, что требует постановки оптимизационной задачи, ориентированной на ряд критериев.

Представленный алгоритм строгой количественной оценки фундаментальных для РИП величин $\Delta f / f_0$, Q_2 вполне приемлем не только для исследования свойств РИП, но и для их оптимизации по целесообразным критериям.

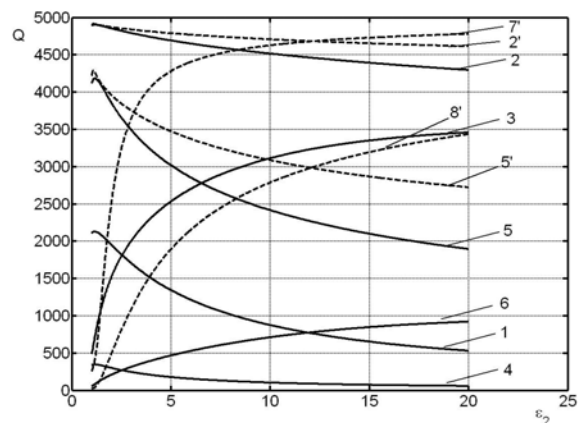


Рис. 5. Зависимость добротности от параметров образца и степени его включения в поле РИП Н-типа: $\lambda_0 = 8$ мм; - - - $\Theta_0 = 0,9$; — $\Theta_0 = 0,6$; 1, 2, 3, 2', 7' – $\text{tg } \delta_2 = 10^{-2}$; 4, 5, 6, 5', 8' – $\text{tg } \delta_2 = 0,1$; 1, 4 – $l_{20} = 0,25$, $l_{30} = 0,5$; 2, 5, 2', 5' – $l_{20} = 0,25$; $l_{30} = 3$; 3, 6 – $l_{20} = 1,5$; – $l_{30} = 3$; 7', 8' – $l_{20} = 1,5$; – $l_{30} = 0,5$

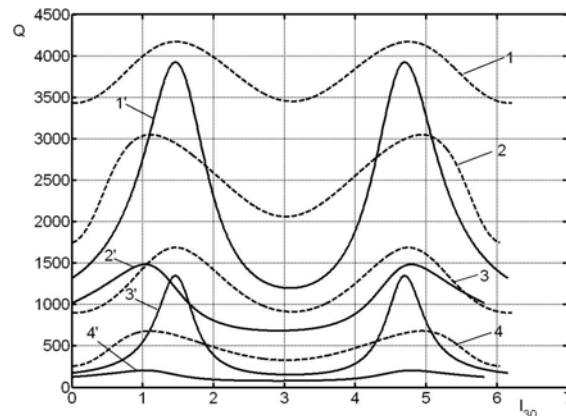


Рис. 6. Зависимость добротности от параметров образца и степени его включения в поле РИП Е-типа: $\lambda_0 = 8$ мм; $\varepsilon_2 = 5$; — $\Theta_0 = 0,6$; - - - $\Theta_0 = 0,9$; 1, 2, 1', 2' – $\text{tg } \delta_2 = 10^{-2}$; 3, 4, 3', 4' – $\text{tg } \delta_2 = 0,1$

На рис. 6 приведены аналогичные рис. 4 зависимости добротности РИП Е-типа. Они отражают, как и в случае $\Delta f / f_0$, факт отсутствия существенных физических особенностей этого типа РИП. Полезным при этом может быть качественное сравнение изменения добротности.

5. Заключение

В теории СВЧ диагностики материалов важную роль играет уяснение, прогнозирование и исследование физических принципов расширения многопараметровости контроля свойств материалов без расширения вида и числа сенсоров.

Строгая и общая теория одномодовых РИП весьма полезна в плане развития многопараметровости контроля, так как позволяет проверить эффективность современных подходов, включая формирование комбинированных, модуляционных, режимно-модифицированных и других сигналов измерительной информации.

На примерах зависимости фундаментальных сигналов одномодовых РИП Н-типа от различных параметров диагностируемого образца показана полезная для реализации многопараметровости диагностики нелинейная их модифицируемость степенью включения образца.

Аналогичные характеристики РИП Е-типа не обнаруживают таких перспектив, поэтому остаются интересными скорее в плане создания апертурных сенсоров.

В целом представленные результаты демонстрируют универсальность теории одномодовых РИП Н- и Е-типа для разработки СВЧ средств диагностики диэлектрических и полупроводниковых материалов, СВЧ влагометрии и т.д.

Литература: 1. *Брандт А.А.* Исследование диэлектриков на СВЧ. М.: Физматгиз, 1963. 403 с. 2. *Гордиенко Ю.Е.* Резонаторные измерительные преобразователи в диагностике микрослоистых структур // Радиотехника. 1996. Вып. 100. С. 253–260. 3. *Ахманаев В.Б., Детинко М.В., Медведев Ю.В. и др.* Неразрушающие бесконтактные СВЧ резонаторные методы локального контроля электрофизических параметров полупроводниковых материалов // Дефектоскопия. 1986. № 1. С. 23–35. 4. *Gordienko Yu. E., Gud Yu. I., Sukhorukov I. V.*, Progress in semiconductor resistivity measurements using noncontact microwave test equipment // Telecommunications and Radio engineering. 1998. Vol. 52, №3. P. 12–15. 5. *Гордиенко Ю.Е., Гуд Ю.И., Старостенко В.В.*, Измерительные

преобразователи для неразрушающего контроля электропроводности пленок в эпитаксиальных структурах np^+ типа // Электронная техника, сер.8, вып.9, 1974. С. 112–117. 6. *Гордиенко Ю.Е., Гуд Ю.И., Арсентьев В.А., Овчаренко Л.А., Главчев И.Г.* СВЧ толщинометрия неметаллических пленок в технологии электронного приборостроения. Часть 1. Анализ и сравнение СВЧ резонаторных измерительных преобразователей. Технология приборостроения, сер. XIII, №1, 1989. 7. *Gordienko Yu. E., Borodin B. G., Smuglij V.I.*, Microwave photomodulation method for the study of recombination processes in semiconductor // Telecommunications and Radio engineering. 1998. Vol. 52, №2. P. 47–52. 8. *Гордиенко Ю.Е., Бородин Б.Г., Криворучко В.И.* О синтезе СВЧ резонаторных измерительных преобразователей для фотомодуляционной диагностики полупроводниковых структур // Радиотехника, МНТ сборник, вып. 98, 1993, Харьков: Вища школа. С. 72–79. 9. *Гордиенко Ю.Е., Бородин Б.Г., Рябухин А.А.* Фотомодуляционная СВЧ диагностика полупроводниковых структур // Радиотехника, МНТ сборник, вып. 111, 1999, Харьков: Вища школа. С. 7–13. 10. *Фади Мохамед Хаммуд, Герасимов В.П., Гордиенко Ю.Е.* СВЧ диэлектрическая проницаемость дисперсных влагосодержащих сред // Радиофизика и радиоастрономия. 2005. Т.10, № 3. С. 334–340. 11. *Григорьев А.Д., Янкевич В.Б.* Резонаторы и резонаторные замедляющие системы СВЧ: Численные методы расчета и проектирования. М.: Радио и связь, 1984. 248 с.

Поступила в редколлегию 08.06.2007

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. Чурюмов Г.И.

Гордиенко Юрий Емельянович, д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: СВЧ-диагностика полупроводниковых материалов, нанoeлектроника и нанотехнологии. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр.Ленина, 14, тел. (0572) 70-21-362.

Гуд Юрий Иванович, канд. техн. наук, профессор ХНУРЭ. Научные интересы: СВЧ-диагностика и неразрушающий контроль материалов, сред и объектов. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр.Ленина, 14, тел. (0572) 70-21-362.

Корягина Евгения Юрьевна, стажер-исследователь кафедры МЭПУ ХНУРЭ. Научные интересы: СВЧ-диагностика полупроводниковых материалов, неразрушающий контроль материалов, сред и объектов. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр.Ленина, 14, тел. (0572) 70-21-362.

Слипченко Николай Иванович, канд. техн. наук, проф., проректор по научной работе ХНУРЭ. Научные интересы: СВЧ-диагностика и неразрушающий контроль материалов, сред и объектов, нанoeлектроника и нанотехнологии. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (0572) 70-21-362.