

# МИКРОПОЛОСКОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕЙ СВЧ ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ МИКРОЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

БОРОДИН Б.Г., АНАНИН В.В.

Описываются результаты исследований резонансных измерительных преобразователей на основе микрополосковых резонаторов, предназначенных для контроля таких параметров полупроводниковых и диэлектрических пластин, как удельное сопротивление, толщина и диэлектрическая проницаемость.

## 1. Введение

Технологический контроль основных параметров и характеристик полупроводниковых и диэлектрических материалов и структур – важное условие обеспечения высокого качества приборов и устройств на их основе. Разработанные к настоящему времени неразрушающие микроволновые методы диагностики основаны на регистрации изменения амплитуд, фаз, поляризационных характеристик электромагнитных колебаний, резонансной частоты и добротности СВЧ резонаторов и других параметров различных типов измерительных преобразователей (ИП) при взаимодействии поля ИП с исследуемыми образцами [1-6]. При этом наряду с обеспечением многопараметровости контроля, высокой точности и чувствительности измерений, возможности автоматизации методик измерения важной задачей является миниатюризация соответствующих измерительных устройств. В работе [2] были обсуждены перспективы использования микрополосковых линий передачи при проектировании соответствующих сверхвысокочастотных трактов измерительных установок.

В таких установках чаще всего используются объемные или коаксиальные волноводные и резонаторные ИП [1]. До настоящего времени применение микрополосковых измерительных преобразователей ограничивалось, главным образом, невысокой чувствительностью. Однако в связи с интенсификацией разработок микрополосковой элементной базы актуальной становится задача создания соответствующего микрополоскового ИП с метрологическими показателями на уровне известных волноводных и резонаторных ИП.

В публикациях [3, 4] изучалась возможность использования прямоугольного микрополоскового резонатора в качестве зонда микроволнового микроскопа. Авторы работы [5] для измерения диэлектрической проницаемости диэлектрических материалов использовали метод, основанный на регистрации полюса затухания амплитудно-частотной характеристики двухзвенной микрополосковой секции, изгото-

товленной на подложке из исследуемого материала. В работе [6] исследована возможность измерения с помощью круглого микрополоскового резонатора диэлектрической проницаемости диэлектриков, а в работе [7] описан метод исследования диэлектрической проницаемости сегнетоэлектриков.

*Целью* настоящей работы является исследование возможности применения резонансных измерительных преобразователей на основе различных типов микрополосковых резонаторов для диагностики полупроводниковых и диэлектрических материалов.

*Задача* – оценка степени влияния удельного сопротивления ( $\epsilon$ ), толщины ( $h$ ) и диэлектрической проницаемости ( $\epsilon$ ) исследуемого образца на характеристики прямоугольного и круглого микрополоскового резонатора.

На различных этапах производства полупроводниковых пластин возникает проблема их контроля и измерения параметров. Применение существующих, так называемых разрушающих методов контроля параметров полупроводниковых образцов не всегда приемлемо и оправдано, так как после проведения измерений образец приходит в негодность.

В статье изложены некоторые соображения относительно перспектив использования традиционных элементов микрополосковой техники в качестве измерительных преобразователей для СВЧ диагностики полупроводниковых материалов и структур. Рассмотрены возможности применения прямоугольных и круглых полосковых резонаторов для контроля удельного сопротивления, толщины и диэлектрической проницаемости плоских полупроводниковых и диэлектрических пластин. При внесении в такой резонатор исследуемого образца изменяются добротность и резонансная частота колебательного контура резонатора. Эти изменения зависят от указанных параметров полупроводникового образца.

## 2. Сущность

На рис. 1 схематически приведены прямоугольный (рис. 1, а) и круглый (рис. 1, б) резонаторы на основе микрополосковой линии передачи.

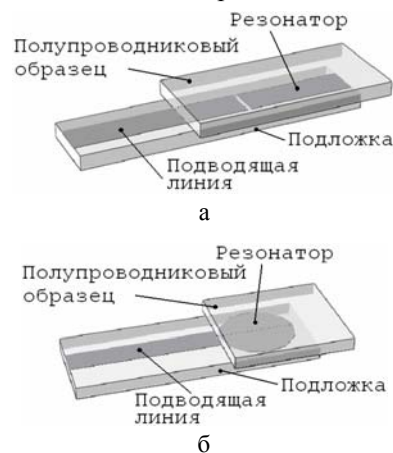


Рис. 1. Прямоугольный и круглый микрополосковый резонатор с исследуемым образцом

Расчет таких резонаторов и разработка их топологии осуществлялись при помощи современных программных пакетов проектирования планарных СВЧ устройств.

Значение резонансной длины волны прямоугольного микрополоскового резонатора для волны произвольного типа может быть определено с помощью соотношения [8]:

$$\lambda_{\text{рез}} = \frac{2\sqrt{\varepsilon_{\text{эфф}}}}{\sqrt{(m/w_{\text{эфф}})^2 + (n/l_{\text{эфф}})^2}}, \quad (1)$$

где  $m$  и  $n$  – число полуволн на длине и ширине резонатора соответственно;  $l_{\text{эфф}}$  и  $w_{\text{эфф}}$  – эффективная длина и ширина резонатора соответственно;  $\varepsilon_{\text{эфф}}$  – эффективная диэлектрическая проницаемость подложки.

Для нахождения резонансной частоты круглого микрополоскового резонатора можно использовать соотношение [8]:

$$\lambda_{\text{рез}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_{\text{эфф}} \sqrt{\varepsilon_{\text{эфф}}}}{v_{mn}}, \quad (2)$$

где  $m$  и  $n$  – число полуволн, укладываемых по окружности резонатора и вдоль радиуса;  $r_{\text{эфф}}$  – эффективный радиус;  $v_{mn}$  –  $n$ -й корень производной функции Бесселя  $m$ -го порядка.

Согласно приведенным соотношениям (1), (2), если в поле микрополоскового резонатора размещается плоский образец, то такие параметры, как удельное сопротивление, толщина и диэлектрическая проницаемость определяют эффективные значения длины, ширины диэлектрической проницаемости микрополоскового резонатора и соответственно – значение резонансной частоты. Таким образом, по величине смещения резонансной частоты микрополоскового резонатора при внесении в поле резонатора плоского образца появляется возможность определить параметры этого образца.

Для теоретических исследований были выбраны прямоугольный и круглый микрополосковые резонаторы, выполненные на кварцевой подложке толщиной 1 мм. Резонаторы включены в линию по схеме двухполюсника (см. рис. 1, а, б).

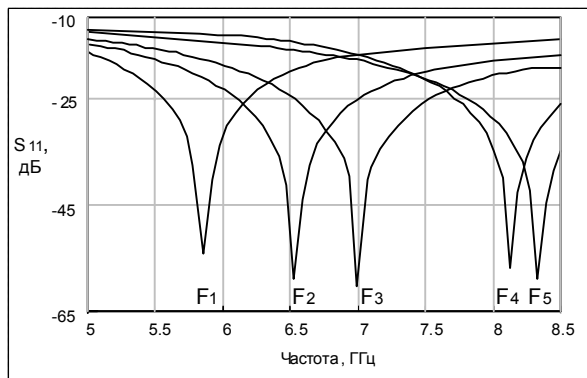


Рис. 2. Примеры резонансных характеристик прямоугольного резонатора с плоским полупроводниковым образцом для различных значений параметров этого образца

На рис. 2 представлены примеры рассчитанных резонансных характеристик такого резонатора при различных значениях диэлектрической проницаемости и удельного сопротивления внесенной в резонатор полупроводниковой пластины ( $F_1 - \varepsilon = 14, \rho = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}, h = 0,2 \text{ мм}$  (Ge);  $F_2 - \varepsilon = 11,8, \rho = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}, h = 0,2 \text{ мм}$  (Si);  $F_3 - \varepsilon = 11,8, \rho = 10 \text{ Ом} \cdot \text{м}, h = 0,2 \text{ мм}$  (Si);  $F_4 - \varepsilon = 11,8, \rho = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}, h = 1,5 \text{ мм}$  (Si);  $F_5 - \varepsilon = 11,8, \rho = 10 \text{ Ом} \cdot \text{м}, h = 1,5 \text{ мм}$  (Si)).

Рассчитанные характеристики были получены путем создания численной модели, в которой исследуемый резонатор включался в тракт по отражательной схеме, при этом программным пакетом рассчитывалось значение параметра матрицы рассеяния  $S_{11}$ , определяемого

как  $S_{11} = \frac{U_{\text{OTР1}}}{U_{\text{ПАД1}}}$ , где  $U_{\text{ПАД1}}$  – амплитуда напряжения СВЧ колебания, поступающего на резонатор;  $U_{\text{OTР1}}$  – амплитуда напряжения СВЧ колебания, отраженного от резонатора. На рис. 2 значение параметра  $S_{11}$  приведено в дБ.

Анализ полученных зависимостей показывает, что резонансная частота микрополоскового резонатора зависит от параметров полупроводниковой пластины и может быть использована в качестве характеристики для их определения.

На рис. 3 – 5 в обобщенном виде представлены зависимости резонансной частоты прямоугольного микрополоскового резонатора от удельного сопротивления и толщины полупроводниковых пластин и диэлектрической проницаемости диэлектрических пластин соответственно.

На рис. 3 – 5 в обобщенном виде представлены зависимости резонансной частоты прямоугольного микрополоскового резонатора от удельного сопротивления и толщины полупроводниковых пластин и диэлектрической проницаемости диэлектрических пластин соответственно.

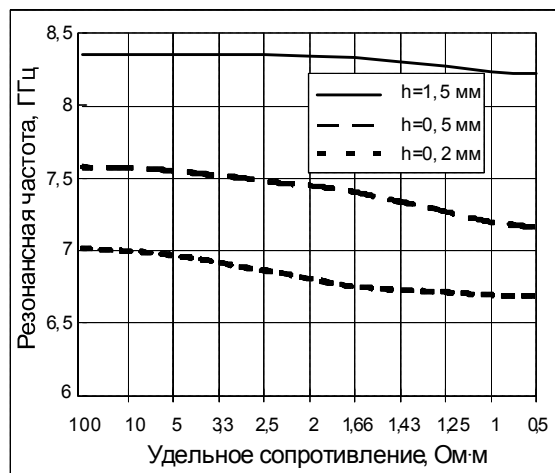


Рис. 3. Зависимость резонансной частоты прямоугольного микрополоскового резонатора от удельного сопротивления кремния для пластин различной толщины

Анализ зависимости резонансной частоты прямоугольного микрополоскового резонатора от удельного сопротивления кремния для пластин различной толщины (см. рис. 3) показывает, что реально реализуемая точность измерения резонансной частоты  $\Delta f = \pm 10 \text{ МГц}$  позволяет определять значение удель-

ного сопротивления с погрешностью не хуже  $\pm 5...6\%$  в диапазоне значений  $1...10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . За пределами границ этого диапазона точность измерений уменьшается. Это ограничивает область применимости исследуемого ИП.

Для расширения пределов измеряемых установкой значений удельного сопротивления необходимо провести дополнительные исследования и разработать комплект из нескольких ИП для различных диапазонов удельного сопротивления, либо изменить конструкцию микрополоскового резонатора.

На рис. 4 показана зависимость резонансной частоты прямоугольного микрополоскового резонатора от толщины кремниевой пластины.

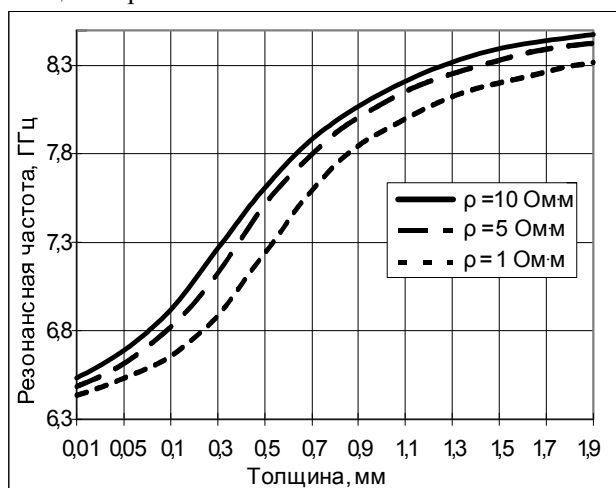


Рис. 4. Зависимость резонансной частоты прямоугольного микрополоскового резонатора от толщины кремниевой пластины при разных величинах удельного сопротивления кремния

Из приведенного графика (см.рис. 4) следует, что измерение толщины пластины может быть произведено с точностью не менее  $\pm 1...1,5\%$  в диапазоне значений  $0,1...1,1 \text{ мм}$ . Полученные границы диапазона измеряемых значений можно объяснить тем, что при малых толщинах кремниевой пластины область взаимодействия поля резонатора с пластиной мала, и энергия, запасаемая в резонаторе образцом, поглощается слабо. В свою очередь, увеличение толщины пластины до значений более  $1 \text{ мм}$  незначительно сказывается на резонансной частоте резонатора, так как поле этого резонатора сосредоточено в приповерхностной области и почти не проникает в исследуемый образец на глубину более  $1 \text{ мм}$ .

Как видно из зависимостей, приведенных на рис. 2, наибольшее изменение резонансной частоты микрополоскового резонатора вызывает изменение диэлектрической проницаемости пластины. Измерение величины этого параметра является составной частью технологического процесса производства и разработки подложек гибридных интегральных схем. На рис. 5 приведены зависимости резонансной частоты прямоугольного микрополоскового резонатора от диэлектрической проницаемости пластины при трех различных значениях толщины пластины и удельном сопротивлении  $100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .

Анализ полученных зависимостей (см. рис. 5) показывает, что диэлектрическая проницаемость может быть измерена в диапазоне значений от 3 до 19 с точностью не хуже  $\pm 0,3...0,4\%$ .

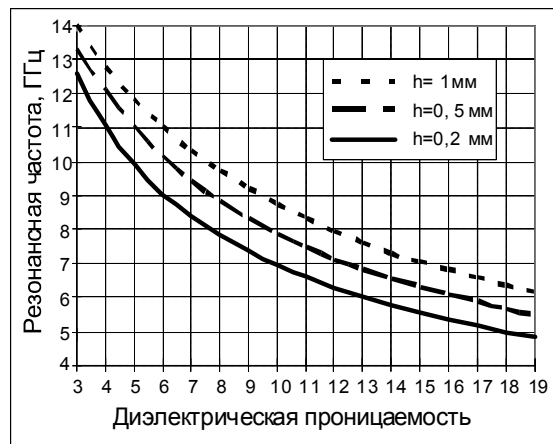


Рис. 5. Зависимость резонансной частоты прямоугольного микрополоскового резонатора от диэлектрической проницаемости пластины при различных толщинах пластин

Пределы изменения диэлектрической проницаемости были выбраны исходя из соображений применимости данного ИП для измерений этого параметра как в диэлектрических подложках гибридных интегральных схем, так и для полупроводниковых подложек, поскольку типичные значения их диэлектрических проницаемостей располагаются в пределах диапазона от 3 до 19.

Аналогичные численные исследования зависимости резонансной частоты резонатора от удельного сопротивления и толщины кремниевой пластины, а также от ее диэлектрической проницаемости были проведены для круглого микрополоскового резонатора. Полученные результаты представлены на рис. 6 – 8.

Внешний вид круглого микрополоскового резонатора с резонансной частотой  $10 \text{ ГГц}$  показан на рис. 1,б. Резонатор расположен на кварцевой подложке толщиной  $1 \text{ мм}$ . Основной тип колебаний  $E_{010}$ .

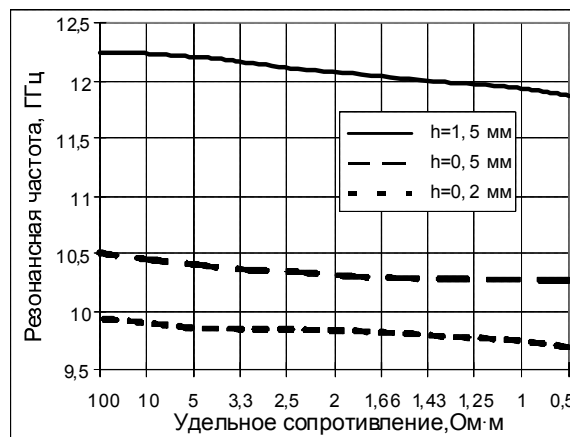


Рис. 6. Зависимость резонансной частоты круглого микрополоскового резонатора от удельного сопротивления кремния для пластин различной толщины

По результатам исследования зависимости резонансной частоты круглого микрополоскового резонатора от удельного сопротивления кремния для пластин различной толщины (см. рис. 6) можно сказать, что при точности измерения резонансной частоты в  $\pm 10$  МГц погрешность измерения удельного сопротивления в диапазоне значений  $1 \dots 10$  Ом·м составит  $\pm 4 \dots 5\%$ , за пределами указанного диапазона ослабляется влияние удельного сопротивления исследуемой пластины на резонансную частоту круглого микрополоскового резонатора и, следовательно, возрастает погрешность.

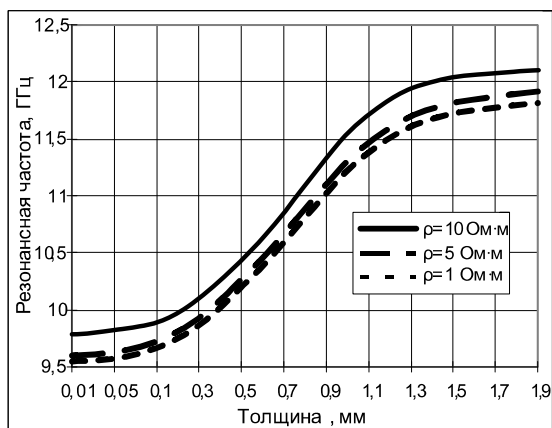


Рис. 7. Зависимость резонансной частоты круглого микрополоскового резонатора от толщины кремниевой пластины при разных величинах удельного сопротивления кремния

Измерение толщины кремниевой пластины с помощью круглого микрополоскового резонатора (см. рис. 7) может быть осуществлено с погрешностью  $\pm 3 \dots 4\%$  в диапазоне значений  $0,1 \dots 1,3$  мм.

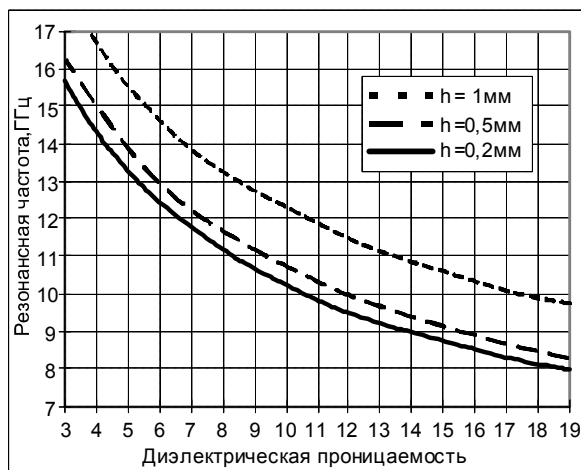


Рис. 8. Зависимость резонансной частоты круглого микрополоскового резонатора от диэлектрической проницаемости пластины при различных толщинах пластин

Анализ полученных зависимостей (см. рис. 8) показывает, что диэлектрическая проницаемость может быть измерена с помощью круглого микрополоскового резонатора в диапазоне значений от 3 до 19, исходя из точности измерения резонансной частоты  $\Delta f = \pm 10$  МГц, с погрешностью не хуже  $\pm 0,15 \dots 0,2\%$ .

### 3. Выводы

На основе изложенного можно сделать следующие выводы.

Прямоугольный и круглый микрополосковые резонаторы могут быть использованы для измерения удельного сопротивления и толщины полупроводников, а также диэлектрической проницаемости подложек гибридных интегральных схем.

Наибольшее изменение резонансной частоты происходит при изменении диэлектрической проницаемости исследуемой пластины, и это изменение носит плавный характер во всем исследуемом диапазоне для обоих микрополосковых резонаторов (см. рис. 5 и 8).

Сравнение результатов исследований различных резонаторов показывает, что для измерения удельного сопротивления кремниевой пластины целесообразно использовать круглый микрополосковый резонатор, так как он обеспечивает меньшую погрешность измерений по сравнению с прямоугольным, который, в свою очередь, предпочтительнее использовать для измерения толщин кремниевых пластин.

Объединение измерений с помощью круглого и прямоугольного микрополосковых резонаторов может позволить осуществлять двухпараметровый контроль кремниевых пластин. Для этого поочередно измеряется расстройка круглого и прямоугольного резонаторов исследуемой пластиной (кремниевой или германиевой), а значение удельного сопротивления и толщины определяется с помощью градуировочных характеристик типа приведенной на рис. 9.

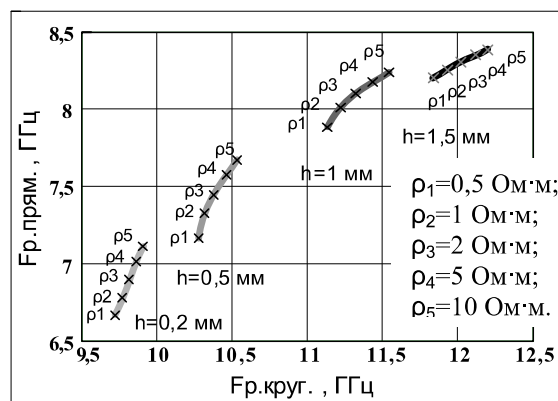


Рис. 9. Градуировочная характеристика для двухпараметрового контроля свойств кремниевых пластин

Аналогичную градуировочную характеристику можно построить и для двухпараметрового контроля свойств подложек гибридных интегральных схем (рис. 10).

Методика определения диэлектрической проницаемости и толщины подложки такая же, как и у описанного выше двухпараметрового метода контроля параметров кремниевых пластин – поочередно измеряют расстройку резонаторов исследуемой пластиной и по градуировочной характеристике (см. рис. 10) определяют значение толщины и диэлектрической проницаемости подложки.

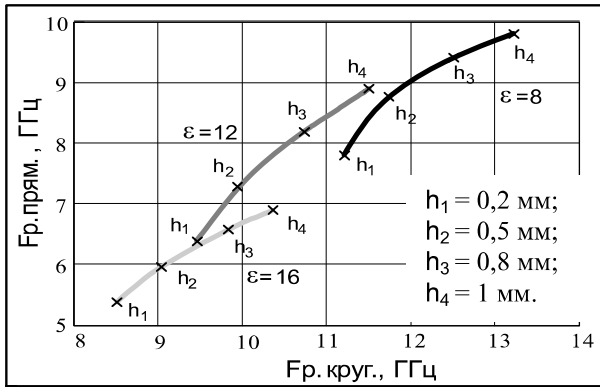


Рис. 10. Градуировочная характеристика для двухпараметрового контроля свойств диэлектрических пластин

*Научная новизна* данного исследования заключается в том, что впервые проведена количественная оценка степени влияния параметров внешнего образца ( $\epsilon$ ,  $h$  и  $e$ ) на резонансную частоту круглого и прямоугольного микрополоскового резонатора.

*Практическая значимость:* результаты исследований могут быть использованы при создании измерительной установки для неразрушающей диагностики полупроводников и диэлектриков.

В заключение следует отметить, что дальнейшие исследования в целях выбора оптимальной формы и геометрических размеров резонаторов могут позволить повысить чувствительность и расширить диапазон измеряемых величин.

**Литература:** 1. Гордиенко Ю.Е., Бородин Б.Г., Рябухин А.А. Фотомодуляционная СВЧ диагностика полупроводниковых структур // Радиотехника. 1999. Вып. 111. С. 7-13. 2. Бородин Б.Г., Абу Анзех Ияд, Ананьин В.В. Техника

микроволнового контроля в полупроводниковом материальоведении // Радиотехника. 2002. Вып. 130. С. 225-234. 3. Tabib-Azar M., Pathak P.S. Nondestructive superresolution imaging of defects and nonuniformities in metals, semi-conductors, dielectrics, composites, and plants using evanescent microwaves // Review of scientific instruments. Vol. 70. № 6. 1999. P. 2783-2792. 4. Tabib-Azar M., Katz J.L., LeClair S. R. Evanescent microwaves: a novel super-resolution noncontact nondestructive imaging technique for biological applications // IEEE transactions on instrumentation and measurement. 1999. No. 6. Vol. 48. P. 1111-1116. 5. Беляев Б.А., Лексиков А.А., Тюрнев В.В. Микрополосковый метод исследования диэлектрической проницаемости на сверхвысоких частотах // Приборы и техника эксперимента. 1995. С. №5. 123-129. 6. Bernard P.A., Gautray J.M. Measurement of dielectric constant using a microstrip ring resonator // IEEE transaction on microwave theory and techniques. 1991. Vol. 39, No. 3. P. 592-595. 7. Tan C. Y., Ong C. K. Nondestructive microwave permittivity characterization of ferroelectric thin film using microstrip dual resonator // Review of scientific instruments. 2004. Vol. 75, № 1. P. 136-140. 8. Микроэлектронные устройства СВЧ: Учебное пособие для радиотехнических специальностей вузов / Под ред. Г.И. Веселова. М: Высшая школа. 1988. 280 с.

Поступила в редколлегию 18.05.2007

**Рецензент:** д-р физ.-мат. наук, проф. Аркуша Ю.В.

**Бородин Борис Григорьевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры МЭПУ, ХНУРЭ. Научные интересы: Неразрушающий радиоволновый контроль параметров материалов и сред, инфракрасная техника. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 702-13-62.

**Ананьин Виктор Владимирович**, аспирант кафедры МЭПУ, ХНУРЭ. Научные интересы: СВЧ диагностика сред, приборы и устройства на основе высокочастотных резонаторов СВЧ диапазона. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 702-13-62.

УДК 621.396

## ЗАСТОСУВАННЯ КОРЕКЦІЇ КОНСТАНТИ РАДАРА НЕКОГЕРЕНТНОГО РОЗСІЯННЯ ДЛЯ УТОЧНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ ЕЛЕКТРОННОЇ КОНЦЕНТРАЦІЇ ІОНОСФЕРНОЇ ПЛАЗМИ

ПУЛЯЄВ В.О., ЛИСЕНКО В.М.

Розглядається можливість покращання якості обробки даних при визначенні електронної концентрації іоносферної плазми за допомогою радіолокаторів некогерентного розсіяння. При цьому пропонується методика аналізу потужності космічних шумів для корекції нестабільних значень константи радіолокатора.

### Вступ

Іоносфера Землі чутливо реагує на зміни в її геофізичних оболонках – літосфері, атмосфері, магнітосфері при впливі на них різних природних та антропогенних РИ, 2007, № 2

чинників. Спостереження за висотно-часовими параметрами іоносфери, зокрема за такими, як електронна концентрація  $N_e(h,t)$ , електронна  $T_e(h,t)$  та іонна  $T_i(h,t)$  температури у широкому діапазоні висот  $h = 80 - 1500$  км дають великий обсяг геофізичної інформації при змінах “космічної погоди” [1]. Ця інформація необхідна для аналізу стану сонячно-земних зв’язків, розробки іоносферних моделей, забезпечення надійного функціонування чутливої апаратури, яка застосовується на наземних та космічних об’єктах.

Найбільш інформаційним методом, який дозволяє одночасно одержувати велику кількість параметрів, є метод некогерентного розсіяння (НР) радіохвиль [2]. Він реалізується за допомогою унікальних установок - радарів некогерентного розсіяння, яких у світі всього вісім. Для отримання таким радаром абсолютних значень  $N_e(h,t)$  необхідна додаткова періодична калібровка вимірних даних за допомогою іонозонду. Період калібровки звичайно складає біля 15 хвилин. Однак при наявності сильних спорадичних шарів  $E_s$ , під час сильних іоносферних збурень, при поломці іонозонду необхідно вимірювати електронну концентрацію за його відсутності. При відомих способах [2 -