

БЛИЖНЕПОЛЬНОЕ СВЧ ЗОНДИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ ОБЪЕКТОВ

К. П. Гайкович¹, А. И. Смирнов^{2,3}, Е. С. Максимович⁴, В. А. Бадеев⁴

¹ Институт физики микроструктур Российской академии наук,
ГСП-105, г. Нижний Новгород, 603950, Россия

² Институт прикладной физики Российской академии наук,
ул. Ульянова, 46, г. Нижний Новгород, 603950, Россия

³ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
пр. Гагарина, 23, г. Нижний Новгород, 603950, Россия

⁴ Институт прикладной физики НАН Беларуси,
ул Академическая, 16, Минск, 220072, Республика Беларусь

Статья поступила в редакцию 5 августа 2020 г.

Аннотация. Представлен новый метод ближнепольной диагностики подповерхностных неоднородностей, обладающих нелинейным откликом на гармониках зондирующего сигнала, основанный на решении обратной задачи ближнепольного рассеяния. В этом методе для восстановления трехмерной подповерхностной структуры комплексной диэлектрической проницаемости и нелинейной восприимчивости зондируемого объекта (томография) могут использоваться данные многочастотных или импульсных измерений, получаемые с помощью сканирующей приемно-передающей системы в бистатической конфигурации. В данной статье демонстрируются результаты зондирования импульсным моносинусовым сигналом кремниевых объектов в песчаной среде. Материалы статьи были частично доложены на XIII Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь».

Ключевые слова: томография, голография, нелинейные среды, ближнепольная СВЧ диагностика, обратные задачи рассеяния.

Abstract. A new method of the near-field sounding of subsurface inhomogeneities with nonlinear response on harmonics of the probing signal is proposed. This method is based on the solving the near-field inverse scattering problem. For the retrieval of

the subsurface structure of complex permittivity and nonlinear susceptibility we used data of multifrequency or pulse measurements obtained with the scanning transceiver system operating in the bistatic configuration. In this paper, results of sounding with the pulse mono-sinus signal of silicon targets in the sand medium are demonstrated.

Key words: tomography, holography, dielectric, nonlinear media, near-field microwave diagnostics.

1. Теория

В последние годы были развиты методы ближнепольной электромагнитной диагностики подповерхностных диэлектрических неоднородностей, основанные на решении обратных задач ближнепольного рассеяния в различных постановках и схемах измерений – многочастотной, многоуровневой, импульсной, многоугловой, импедансной и многоапертурной (с переменной базой) [1-8]. В опубликованных статьях экспериментально продемонстрировано главное преимущество данного подхода – возможность реализовать субволновую разрешающую способность, что особенно важно в сильно поглощающих средах. В данной работе выполнена постановка обратной задачи с учетом нелинейного рассеяния и предложены алгоритмы ее решения для восстановления трехмерной структуры диэлектрической проницаемости и восприимчивости нелинейных неоднородностей по данным измерений рассеянного сигнала.

Возможности радиолокации нелинейных подповерхностных неоднородностей по измерениям на гармониках основного сигнала зондирования начали исследоваться применительно к обнаружению различных электронных устройств в стенах, грунте и поиску людей под снежными завалами [9,10]. В настоящее время для этой цели разработаны и продаются соответствующие приборы (см., например, в <http://www.bnti.ru/des.asp?itm=1746&tbl=04.01.02>). Предыдущие исследования нелинейного отклика различных материалов проводились преимущественно в оптическом и терагерцовом диапазонах с использованием мощных источников

зондирующего сигнала [11,12]. В миллиметровом диапазоне наблюдения третьей гармоники от частоты 188 ГГц были выполнены с применением гиротрона [13]. Об успешных измерениях нелинейного отклика в СВЧ диапазоне до сих пор не сообщалось. В данной работе приводятся результаты ближнеполюсной поверхностной и подповерхностной диагностики образцов монокристаллического кремния и кремниевого порошка в песке широкополосным импульсным зондирующим сигналом с пиковой мощностью 1,8 кВт. Предполагается, что сильная локализация электрического поля в ближней зоне используемых антенн типа bow-tie позволит наблюдать нелинейный отклик и в перспективе использовать его в подповерхностном зондировании.

Постановка обратной задачи нелинейного ближнеполюсного рассеяния основана на уравнениях для поля $\mathbf{E}_1(\mathbf{r}, \omega)$, связанного с рассеянием, обусловленным неоднородностью комплексной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_1(\mathbf{r}')$, и для рассеянного поля $\mathbf{E}_1(\mathbf{r}, n\omega)$ на гармониках $n\omega$ зондирующего сигнала, связанного с неоднородной нелинейной восприимчивостью $\chi(\mathbf{r})$ объекта:

$$\mathbf{E}_1(\mathbf{r}, \omega) = -\frac{i\omega}{4\pi} \int_V \varepsilon_1(\mathbf{r}') \vec{\mathbf{G}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega) \mathbf{E}(\mathbf{r}', \omega) d\mathbf{r}', \quad (1)$$

$$\mathbf{E}_1(\mathbf{r}, n\omega) = -in\omega \int_V \vec{\mathbf{G}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', n\omega) \mathbf{P}(\mathbf{r}', n\omega) d\mathbf{r}', \quad n = 2, 3 \quad (2)$$

где $\mathbf{P}(\mathbf{r}', n\omega)$ – нелинейная поляризуемость на частотах $n\omega$ с компонентами $P_i(2\omega) = \chi_{ijk} E_j(\omega) E_k(\omega)$ для 2-й гармоники и $P_i(3\omega) = \chi_{ijkl} E_j(\omega) E_k(\omega) E_l(\omega)$ для третьей, $\vec{\mathbf{G}}$ - соответствующие функции Грина. В борновском приближении (когда в полном поле, $\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathbf{E}_0(\mathbf{r}) + \mathbf{E}_1(\mathbf{r})$ в правых частях (1), (2) пренебрегают связанной с рассеянием составляющей). В случае изотропной кубической нелинейности $\mathbf{P}(\mathbf{r}', 3\omega) = \chi(\mathbf{r}') E_0(\mathbf{r}', \omega)^2 \mathbf{E}_0(\mathbf{r}', \omega)$ уравнение (2) преобразуется к виду:

$$\mathbf{E}_1(\mathbf{r}, 3\omega) = -i3\omega \int_V \chi(\mathbf{r}') E_0(\mathbf{r}', \omega)^2 \vec{\mathbf{G}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', 3\omega) \mathbf{E}_0(\mathbf{r}', \omega) d\mathbf{r}'. \quad (3)$$

Это уравнение можно использовать для постановки задачи восстановления трехмерной подповерхностной структуры нелинейной восприимчивости $\chi(\mathbf{r})$. При решении этого трехмерного уравнения (3) естественно использовать тот же метод, что и в аналогичной задаче рассеяния на диэлектрических неоднородностях. Этот метод справедлив как для моностатических измерений, так и в случае бистатической схемы зондирования по поперечным координатам x и y при условии постоянства фиксированного относительного положения источника и приемника (т.е. вектора $\delta\mathbf{r}$, определяющего сдвиг между антеннами), когда зондирующее поле не изменяется относительно приемно-передающей системы, т.е. представимо в виде $\mathbf{E}_0 = \mathbf{E}_0(x' - x, y' - y, \omega)$. При этом двумерное фурье-преобразование по поперечным координатам позволяет свести трехмерные задачи (1), (3) к одномерным уравнениям в k -пространстве. Для принимаемого сигнала (с учетом передаточной функции приемника) получаются аналогичные по типу уравнения, которые можно применить в методах томографии – определения трехмерного подповерхностного распределения неоднородностей комплексной диэлектрической проницаемости и нелинейной восприимчивости. Эти уравнения можно представить в компактной форме:

$$s_\varepsilon(k_x, k_y, \omega, \delta\mathbf{r}) = \int_{z'} \varepsilon_1(k_x, k_y, z') K_\varepsilon(k_x, k_y, z', \omega, \delta\mathbf{r}) dz', \quad (4)$$

$$s_\chi(k_x, k_y, \omega, \delta\mathbf{r}) = \int_{z'} \chi(k_x, k_y, z') K_\chi(k_x, k_y, z', \omega / 3 \rightarrow \omega, \delta\mathbf{r}) dz', \quad (5)$$

и для получения решения в k -пространстве они должны решаться для каждой пары k_x, k_y поперечного спектра.

Можно также использовать импульсный метод зондирования, примененный в [6] для диагностики подповерхностных диэлектрических неоднородностей. В этом случае для поперечного спектра импульса в k -пространстве имеет место интегральное соотношение, в котором целесообразно

выделить в явном виде зависимость от амплитуды генератора зондирующего сигнала A :

$$s_p(k_x, k_y, \omega, \delta \mathbf{r}, A) = (A / A_0) \int_{z'} \{ \varepsilon_1(k_x, k_y, z') \frac{1}{2} [K_\varepsilon(k_x, k_y, \omega, z', A_0) + K_\varepsilon^*(-k_x, -k_y, -\omega, z', A_0)] + (A / A_0)^3 \chi_1(k_x, k_y, z') \frac{1}{2} [K_\chi(k_x, k_y, \omega / 3 \rightarrow \omega, z', A_0) + K_\chi^*(-k_x, -k_y, -\omega / 3 \rightarrow \omega, z', A_0)] \} dz', \quad (6)$$

где A_0 – амплитуда генератора, для которой вычислены функции ядра интеграла. Тогда вклад линейной и нелинейной части в (6) можно выделить по данным измерений при двух значениях амплитуды A_1, A_2 и получить интегральные уравнения для определения диэлектрической проницаемости и нелинейной восприимчивости:

$$\int_{z'} \varepsilon_1(k_x, k_y, z') \frac{1}{2} [K_\varepsilon(k_x, k_y, \omega, z', A_0) + K_\varepsilon^*(-k_x, -k_y, -\omega, z', A_0)] dz' = \frac{A_0}{A_1} s_p(k_x, k_y, \omega, \delta \mathbf{r}, A_1) - \frac{\frac{A_0}{A_2} s_p(k_x, k_y, \omega, \delta \mathbf{r}, A_2) - \frac{A_0}{A_1} s_p(k_x, k_y, \omega, \delta \mathbf{r}, A_1)}{A_2^2 / A_1^2 - 1}, \quad (7)$$

$$\int_{z'} \chi_1(k_x, k_y, z') \frac{1}{2} [K_\chi(k_x, k_y, \omega / 3 \rightarrow \omega, z', A_0) + K_\chi^*(-k_x, -k_y, -\omega / 3 \rightarrow \omega, z', A_0)] dz' = \frac{(\frac{A_0}{A_2}) s_p(k_x, k_y, \omega, \delta \mathbf{r}, A_2) - (\frac{A_0}{A_1}) s_p(k_x, k_y, \omega, \delta \mathbf{r}, A_1)}{A_2^2 / A_0^2 - A_1^2 / A_0^2}. \quad (8)$$

Уравнения (4-5), (7-8) решаются методом Тихонова и преобразуются к декартовым координатам аналогично [2]:

$$\varepsilon_1, \chi(x, y, z) = \int \varepsilon_1, \chi(k_x, k_y, z) \exp(ik_x x + ik_y y) dk_x dk_y. \quad (9)$$

Однако, на практике вклад нелинейного рассеяния в (7) столь мал, что при анализе при решении этой задачи им можно пренебречь.

2. Эксперимент

Были выполнены измерения полупроводниковых объектов – полуцилиндра из кремния, допированного бором (7 см длина, 3 см диаметр), который располагался плоскостью вверх, и контейнера из тонкого картона в форме параллелепипеда размерами 5 x 3,7 x 0,5 см³, содержащего порошок кристаллического кремния (см. рис 1). Объекты снимались от уровня поверхности и заглублялись до уровня $z = -5$ см.

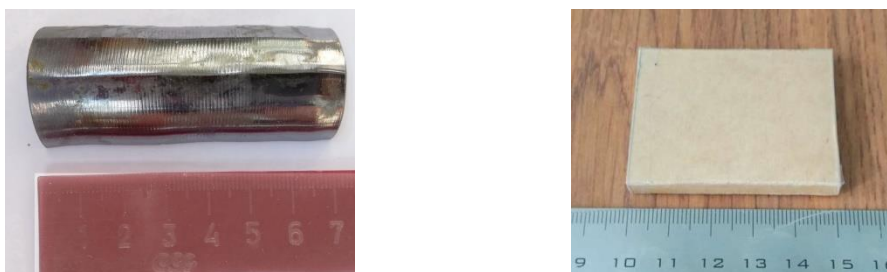


Рис.1. Слева – полуцилиндр из монокристаллического кремния; справа – картонный контейнер с кремниевым порошком.

В экспериментах использовалась сканирующая система, которая включала в себя генератор с центральной рабочей частотой спектра сигнала в форме моносинуса, равной 1 ГГц, а также приемо-передающие широкополосные дипольные антенны типа «bow-tie», имеющие широкий пространственный спектр передаточной функции (см. рис.2). Сканирование осуществлялось по сетке 39×39 см² с шагом 0,5 см. Измерения были выполнены при различных значениях амплитуды зондирующего импульса.

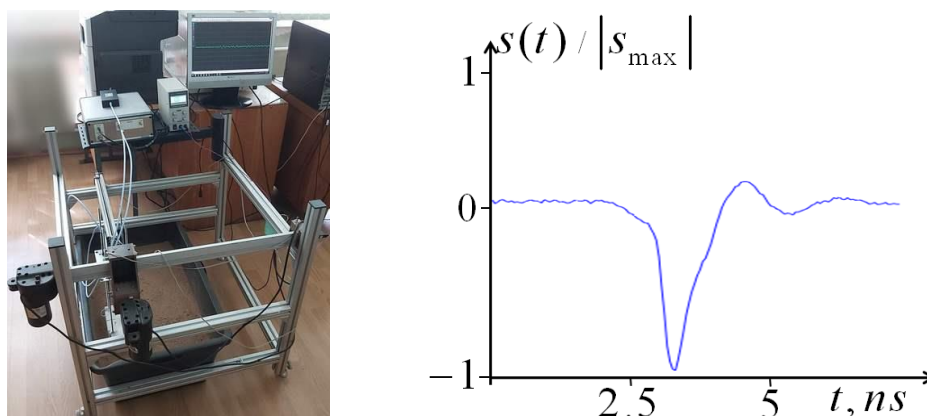


Рис. 2. Слева – измерительная система; справа – моносинусовый сигнал.

На рис.3 показаны результаты экспериментов с контейнером с кремниевым порошком (верхняя плоскость – на уровне песка).

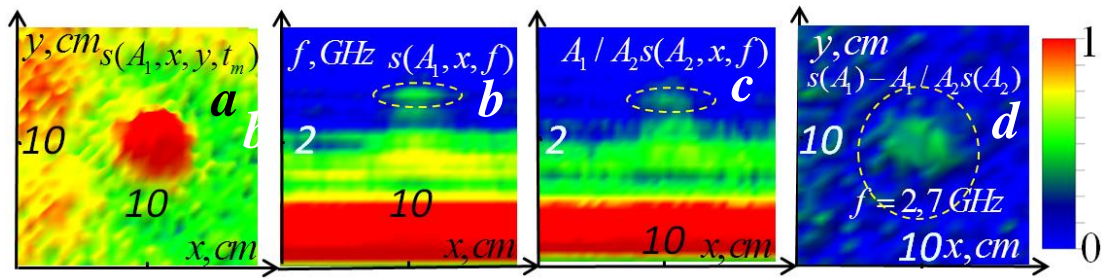


Рис.3. *a*) Поперечное распределение относительной амплитуды рассеянного импульсного сигнала в максимуме зондирующего сигнала генератора с амплитудой A_1 ; *b*) частотный спектр сигнала на рис.3*a* в сечении $y = 11$ см; *c*) частотный спектр рассеянного сигнала зондирующего сигнала с амплитудой A_2 , умноженный на отношение амплитуд $A_1/A_2 = 2.24$; *d*) поперечное распределение нелинейной части спектра сигнала на третьей гармонике максимума спектра основного сигнала (радиус области, выделенной пунктиром, соответствует ширине по оси x спектральных областей третьих гармоник, выделенных пунктиром на рис.3*a, b*, рассеянных от области вблизи спектрального максимума).

Результаты показывают, что над областью образца в спектре рассеянного сигнала представлены частоты на третьей гармонике от частот вблизи спектрального максимума основного сигнала (в красной зоне на рис.3*b, c*). Поперечное распределение комбинации спектров сигналов, рассеянных при двух разных значениях амплитуды зондирующего сигнала, которая образует вклад в нелинейное рассеяние в уравнении (8), представлена на рис.3*d*. Полученный результат указывает на наличие нелинейного рассеяния, которое нельзя объяснить в рамках обычно используемого в анализе керровского механизма. Вместе с тем, эффект наблюдается на уровне, незначительно превышающем шум, и необходимо дальнейшее исследование с использованием сигналов большей мощности или гармонического сигнала. Эффект становится неразличим при заглублении объекта, поэтому его пока нельзя использовать для реализации нелинейной томографии на основе решения уравнения (8).

На рис.4,5 представлены результаты томографического анализа распределения трехмерного распределения комплексной диэлектрической

проницаемости на основе решения уравнения (7) по данным двумерного импульсного сканирования среды с заглубленным на разных уровнях контейнером с кремниевым порошком (см. рис.1 справа), и образца монокристаллического кремния (на рис.1 слева). На рис.4 можно видеть результаты для контейнера с кремниевым порошком, заглубленного в песок на 3 см.

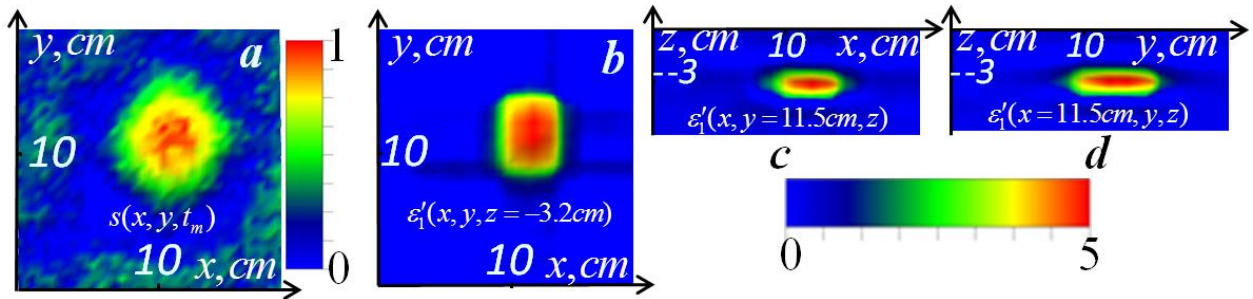


Рис.4. *a)* Поперечное распределение относительной амплитуды рассеянного импульсного сигнала в максимуме; *b)* восстановленное распределение реальной части комплексной диэлектрической проницаемости образца в горизонтальном сечении $z = -3,2$ см из решения обратной задачи (7); *c)* восстановленное распределение реальной части комплексной диэлектрической проницаемости в вертикальном сечении $y = 11,5$ см *d)* восстановленное распределение в вертикальном сечении $x = 11,5$ см.

На рис.5 показаны результаты томографического анализа образца монокристаллического кремния (см. рис.1 слева), заглубленного в песок на 2 см.

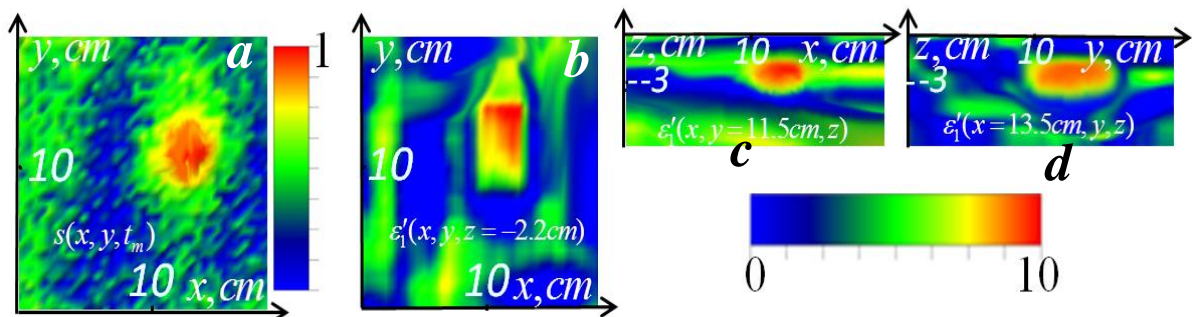


Рис.5. *a)* Поперечное распределение относительной амплитуды рассеянного импульсного сигнала в максимуме; *b)* восстановленное распределение диэлектрической проницаемости образца в среде в горизонтальном сечении $z = -3,2$ см из решения обратной задачи (7); *c)* распределение в вертикальном сечении $y = 11,5$ см; *d)* распределение в вертикальном сечении $x = 13,5$ см.

3. Заключение

В статье представлены результаты исследования возможностей ближнепольного подповерхностного СВЧ зондирования диэлектрических сред с включениями, обладающими нелинейным откликом на гармониках зондирующего сигнала. Предложены методы томографической диагностики трехмерных распределений комплексной диэлектрической проницаемости и нелинейной восприимчивости по данным многочастотного или импульсного двумерного сканирования рассеянного поля, основанные на решении соответствующих обратных задачи ближнепольного рассеяния. Были разработаны алгоритм и компьютерная программа импульсного метода томографии. Выполнены измерения полупроводниковых объектов заглубленных в песчаную среду (полуцилиндра из монокристаллического кремния, допированного бором, и радиопрозрачного контейнера, содержащего порошок кристаллического кремния) сканирующей системой, включающей генератор сигнала в форме моносинуса центральной рабочей частотой спектра 1 ГГц, а также приемо-передающие широкополосные дипольные антенны типа «bow-tie». Выполненный спектральный анализ рассеянного сигнала над контейнером с кремниевым порошком показал наличие спектральных компонент на третьей гармонике частот спектрального максимума. Представленные результаты томографического анализа распределения трехмерного распределения комплексной диэлектрической проницаемости по данным двумерного сканирования среды с заглубленным на разных уровнях контейнером с кремниевым порошком продемонстрировали эффективность разработанного алгоритма.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 19-07-00782.

Литература

1. Gaikovich K.P. Subsurface near-field scanning tomography // Phys. Rev. Letters. 2007. Vol.98. No.18. P.183902.

2. Gaikovich K.P., Gaikovich P.K. Inverse problem of near-field scattering in multilayer media // *Inverse Problems*. 2010. Vol.26. No.12. P.125013.
3. Gaikovich K.P., Gaikovich P.K., Maksimovitch Ye.S., Badeev V.A. Pseudopulse near-field subsurface tomography // *Physical Review Letters*. 2012. Vol.108. No.16. P.163902.
4. Gaikovich K.P., Gaikovich P.K., Maksimovitch Ye.S., Badeev V.A. Subsurface near-field microwave holography // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2016. Vol.9. No.1. P.74-82.
5. Gaikovich K.P., Gaikovich P.K., Maksimovitch Ye. S., Smirnov A.I., and Sumin M.I. Dual regularization in non-linear inverse scattering problems // *Inverse Problems in Science and Engineering*. 2016. Vol. 24. No.7. P.1215–1239.
6. Gaikovich K.P., Maksimovitch Ye.S., Sumin M.I. Inverse scattering problems of near-field subsurface pulse diagnostics // *Inverse Problems in Science and Engineering*. 2018. Vol.26. No.11. P.1590-1611.
7. Gaikovich K.P., Smirnov A.I. Inverse problems of low-frequency diagnostics of the Earth's crust // *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2015. Vol. 58. No.6. P.428-442.
8. Gaikovich K.P. Left-handed lens tomography and holography // *Inverse Problems in Science and Engineering*. 2018.
<https://doi.org/10.1080/17415977.2018.1552953>.
9. Горбачев А.А. Особенности зондирования электромагнитными волнами сред с нелинейными включениями // *Радиотехника и электроника*. 1996. Т.41. №2. С.152-157.
10. Мусабеков П.М., Паньчев С.Н. Нелинейная радиолокация: методы, техника и области применения // *Зарубежная радиоэлектроника* 2000. №5. С.54-60.
11. Moss D.J., Ghahramani E., Sipe J.E., van Driel H.M. Band-structure calculation of dispersion and anisotropy in $\chi \rightarrow (3)$ for third-harmonic generation in Si, Ge, and GaAs // *Phys. Rev. B. Condens. Matter*. 1990. Vol.41. No.3. P.1542-1560.

12. Chefonov O.V., Ovchinnikov A.V., Agranat M.B., Fortov V.E., Efimenko E.S., Stepanov A.N., Savel'ev A.B. Nonlinear transfer of an intense few-cycle terahertz pulse through opaque n-doped Si. // Phys. Rev. B. 2018 Vol.98. P.165-206.
13. Narkowicz R., Siegrist M.R., Moreau Ph., Hogge J.P., Raguotis R., Brazis R. Third-Order Susceptibility of Silicon Crystals Measured with Millimeter-Wave Gyrotron // Acta Physica Polonica. 2011. Vol.119. No.4. P.509-513.

Для цитирования:

Гайкович К.П., Смирнов А.И., Максимович Е.С., Бадеев В.А. Ближнепольное СВЧ зондирование нелинейных подповерхностных объектов. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.8.6>