

УДК 53.082.74

В.П. Беличенко, А.С. Мироньев, А.В. Клоков, А.С. Запасной

Моделирование резонансных полосковых зондов для интерференционной ближнепольной микроскопии

Проведен анализ различных видов зондов, используемых в приборах ближнепольной микроволновой микроскопии. Описаны особенности зондов каждого типа и области их применения. Отдельно представлены конструктивные особенности и результаты компьютерного моделирования зонда, нагруженного на микрополосковый резонатор, который входит в состав разработанного макета ближнепольного интерференционного микроволнового микроскопа.

Ключевые слова: ближнепольная диагностика, зонд, эванесцентные поля, микроволновый микроскоп, разрешающая способность.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-1-30-34

Ближнепольное радиоволновое зондирование применяется в целом ряде областей, относящихся к неразрушающим и бесконтактным методам с очень высоким разрешением. Например, для обнаружения субмикронных дефектов и изменений в концентрации носителя заряда в полупроводниковом материале; для визуализации изменений проводимости в биологических объектах с диагностическими целями. На сегодняшний день существует множество разнообразных схем реализации ближнепольных микроскопов. Различия главным образом заключаются в реализации конструкций зондов, которые являются важнейшими элементами таких систем.

Коаксиальные зонды

Один из наиболее распространенных вариантов ближнепольного микроволнового микроскопа использует в качестве зонда отрезок коаксиальной линии, имеющей продолжение в виде коаксиального зонда с заостренным внутренним проводником [1]. Уже первая версия такого микроскопа позволила получить разрешение, равное 100 мкм, при использовании гармонических колебаний с частотой 12 ГГц. Пожалуй, наиболее удачной конструкцией зонда ближнепольного микроволнового микроскопа нужно признать оригинальное решение, предложенное в [2, 3], где зонд интегрирован с высокочастотным четвертьволновым коаксиальным резонатором (рис. 1).

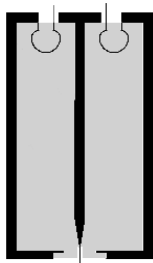


Рис. 1. Коаксиальный зонд в виде высокочастотного четвертьволнового резонатора

Следует отметить, что предложенное в [4, 5] выполнение центрального проводника коаксиального резонатора в виде двухпроводной полосковой линии, образованной путем напыления алюминия-

вых пленок на противоположные грани сужающегося кварцевого стержня, позволило использовать при возбуждении резонатора симметричную нечетную моду, что в конечном итоге обеспечило возможность достижения еще большего пространственного разрешения. В данном случае размер апертуры составил величину порядка 5×5 мкм.

В статье [6] исследуются возможности метода резонансного ближнепольного микроволнового зондирования для неинвазивной диагностики меланомы и других новообразований кожи. Метод, предложенный в этой работе, позволяет визуализировать распределения диэлектрической проницаемости и проводимости биологических тканей.

Измерительная система для исследования меланомы кожи представляет собой СВЧ-резонатор (рис. 2) в виде отрезка коаксиальной линии с фторопластовым заполнением, на одном конце которого расположена магнитная рамка (для этого центральный проводник коаксиальной линии замыкается на экран, образуя индуктивную нагрузку). К противоположному концу резонатора посредством выносного коаксиального кабеля подключается аппликатор, содержащий на конце цилиндрический конденсатор. Зондирование биологических тканей осуществляется краевой емкостью цилиндрического конденсатора аппликатора (измерительная емкость). Для уменьшения вносимых в резонатор потерь при контакте с поверхностью исследуемого объекта в точке подключения выносного кабеля к резонатору параллельно впаяна индуктивность.



Рис. 2. СВЧ-резонатор с оконечным цилиндрическим конденсатором для неинвазивной диагностики меланомы

Полосковые зонды

Еще ранее в качестве зондов использовались малые апертуры в проводящих экранах или же на конце сужающегося круглого волновода. Однако подобным зондам свойственно значительное уменьшение чувствительности по мере уменьшения размеров апертуры с целью увеличения разрешающей способности. Радикально исправить положение удалось путем существенного изменения конфигурации апертуры. А именно, было предложено применять апертуры прямоугольной формы в виде очень узкой щели длиной порядка длины волны, прорезанной посередине проводящей пластины, закрывающей открытый конец прямоугольного волновода [7]. И тем не менее у подобной конструкции обнаруживается недостаток, связанный с резонансным поведением пропускающей способности апертуры. Улучшенный вариант конструкции был предложен на пути сужения примыкающей к апертуре части прямоугольного волновода до образования узкой щели с продольным размером порядка длины волны [8]. Выполнение микроскопа на базе микрополоскового резонатора [9] позволило достичь разрешения 0,4 мкм, что составило в долях длины волны λ используемого излучения величину $\lambda/750000$. Известны также и принципиально иные конструктивные решения микроскопа [10].

В [11] теоретически было показано, что ближнепольный (квазистационарный) компонент теплового излучения должен существенно влиять на интенсивность сигнала, измеряемого радиометром, если антенна имеет малые электрические размеры и расположена на высоте $h \ll \lambda$ над излучающей поверхностью. В этой статье представлены разработанная радиометрическая система для ближнепольных измерений, результаты исследования ближнепольных эффектов в тепловом излучении и восстановления подповерхностного температурного профиля среды по данным ближнепольных радиометрических измерений. При измерениях использовались зонды, в которых центральный проводник реализован в виде двухпроводной полосковой линии. Данная схема зондов была выполнена на фольгированном стеклотекстолите (рис. 3).

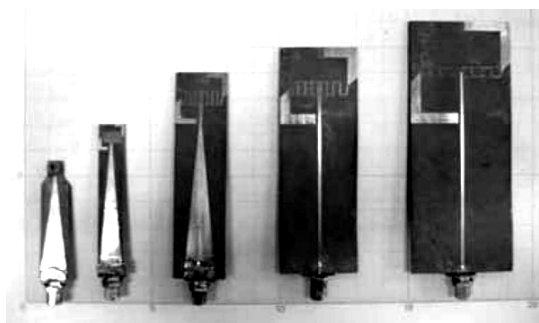


Рис. 3. Зонды, реализованные на полосковых линиях

Принцип работы сканирующих микроволновых микроскопов, как правило, такой: регистрируются резонансная частота, добротность резонатора и высота расположения зонда над исследуемым образ-

цом. При изменении расстояния между зондом и образцом будет происходить изменение как резонансной частоты, так и добротности. Таким образом, топология поверхности образца имеет весьма существенное значение при исследовании его свойств (диэлектрическая проницаемость, проводимость и т.д.). Тем не менее в микроволновом диапазоне уже вполне обеспечивается субмикронное разрешение [1].

Здесь уместно отметить, что во всех известных нам моделях ближнепольных микроскопов используется только один зонд. Причем осуществляется его механическое перемещение над исследуемой поверхностью. В данной работе рассматриваются возможности создания модели ближнепольного микроскопа, в котором будут использованы как минимум два активных резонансных зонда [12], причем в полосковом исполнении.

Вследствие наличия у зондов нескольких резонансных частот предполагается осуществлять зондирование исследуемого объекта перекрывающимися эванесцентными полями упомянутых активных зондов, реализуя, таким образом, процедуру ближнепольного интерференционного микроволнового зондирования на сетке резонансных частот зондов. Предтечей такого подхода явилось теоретическое исследование [13], в котором были описаны процессы формирования энергетических потоков в перекрывающихся эванесцентных полях излучающих систем, содержащих нескольких пространственно разнесенных элементарных излучателей.

Результаты компьютерного моделирования полосковых зондов

В качестве основы для компьютерного моделирования изначально была взята конструкция зонда, описанная в работах [14, 15] А.Н. Резника с соавт (Институт физики микроструктур РАН, г. Нижний Новгород). Зонд представляет собой компактный микрополосковый резонатор, к которому подключена электрически малая патч-антенна, представляющая собой металлизированную квадратную пластину текстолита со стороной 0,9 см. Нами размеры микрополосков и антенны подбирались по результатам моделирования в программном продукте CST Microwave studio. Геометрия зонда изображена на рис. 4.

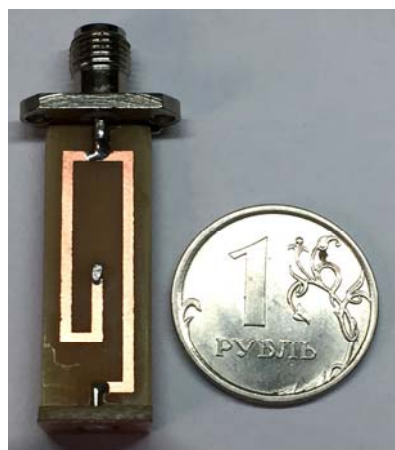


Рис. 4. Зонд на основе микрополоскового резонатора

Прежде всего моделирование позволило оценить размеры области ближнего поля, создаваемого зондом. Как и ожидалось, они оказались соизмеримыми с размерами апертуры патч-антенны (рис. 5). Это обстоятельство указывает на обоснованную возможность осуществления ближнепольного интерференционного микроволнового зондирования объектов толщиной вплоть до 1 см, по крайней мере, если, конечно же, проводимость объекта не слишком высока.

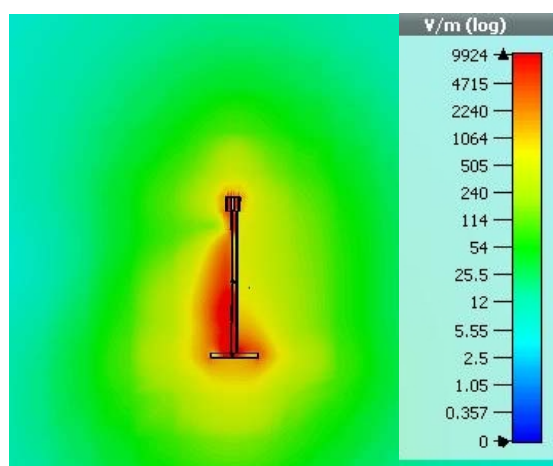


Рис. 5. Распределение электрического поля вблизи зонда

С учетом результатов компьютерного моделирования были изготовлены несколько зондов, нагруженных на резонатор в микрополосковом исполнении (см. рис. 4). Характеристики зондов экспериментально исследовались с использованием векторного рефлектометра САВАН R140. Частотный диапазон работы этого прибора занимает интервал от 85 МГц до 14 ГГц. На рис. 6 в качестве примера представлена частотная зависимость параметра S_{11} одного из зондов. Можно отметить наличие трех резонансных частот, что позволяет рассчитывать на расширение сферы их применения.

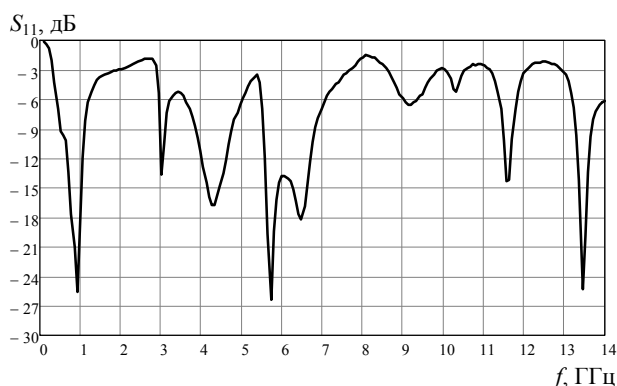


Рис. 6. Частотная зависимость параметра S_{11} зонда

Рисунки 7 и 8 наглядно иллюстрируют существенное увеличение размера области, занимаемой ближним (эванесцентным) полем в окрестности пространственно разнесенных и обращенных друг к другу апертур зондов по сравнению с аналогичной областью одного зонда (см. рис. 5). Определенный

вклад в структуру этой области вносят и интерференционные потоки энергии, образующиеся в промежутке между апертурами зондов. При этом имеет место влияние разности фаз сигналов ($\Delta\phi = 0$ или $\Delta\phi = 90^\circ$), подаваемых на входы зондов. На рис. 7, 8 приведены результаты моделирования для частоты 1 ГГц.

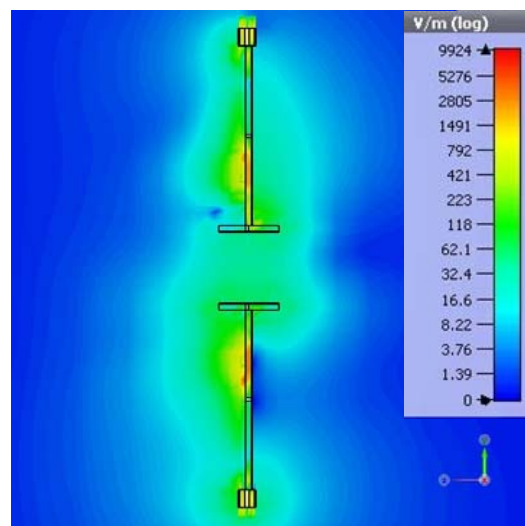


Рис. 7. Распределение электрического поля в окрестности апертур зондов ($\Delta\phi = 0$)

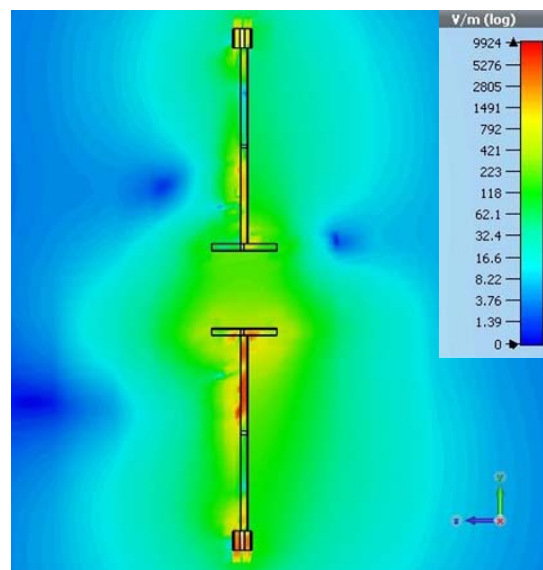


Рис. 8. Распределение электрического поля в окрестности апертур зондов ($\Delta\phi = 90^\circ$)

Выводы

Посредством компьютерного моделирования и экспериментальных исследований отработана конструкция ближнепольного зонда на основе электрически малой антенны, нагруженной на микрополосковый резонатор. Подтверждена возможность использования такого зонда в составе ближнепольного интерференционного микроволнового микроскопа с разрешением среднего уровня при зондировании объектов с характерной толщиной в 1 см по крайней мере.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и администрации Томской области в рамках научного проекта № 16-42-700942 регионального конкурса (р_сибирь_a).

Литература

1. Principles of Near-Field Microwave Microscopy / S.M. Anlage, V.V. Talanov, A.R. Schwartz // in Scanning Probe Microscopy: Electrical and Electromechanical Phenomena at the Nanoscale. Vol. 1, ed. by S.V. Kalinin and A. Gruverman. – New York: Springer-Verlag, 2007. – P. 215–253.
2. Scanning tip microwave near-field microscope / T. Wei, X.-D. Xiang, W.G. Wallace-Freedman, P.G. Schultz // Appl. Phys. Lett. – 1996. – Vol. 68, No. 24. – P. 3506–3508.
3. U.S. Patent № 7271574, МПК G01R 31/02. Evanescent microwave probe with enhanced resolution and sensitivity / X.D. Xiang, H. Yang, G. Wang; заявл. 11.07.2005; опублик. 18.09.2007. Заявитель: Intematix Corporation (Fremont, CA).
4. A near-field scanned microwave probe for spatially localized electrical metrology / V.V. Talanov, A. Scherz, R.L. Moreland, A.R. Schwartz // Appl. Phys. Lett. – 2006. – Vol. 88. – P. 134106.
5. U.S. Patent № 7362108, МПК G01R 27/04. System and method for quantitative measurements of a material's complex permittivity with use of near-field microwave probes / V.V. Talanov, A.R. Schwartz, A. Scherz; заявл. 14.10.2005; опублик. 22.04.2008. Заявитель: Solid State Measurements, Inc. (Pittsburgh, PA).
6. Неинвазивная диагностика меланомы и других новообразований кожи методом резонансного ближнепольного СВЧ-зондирования / Д.В. Янин, А.Г. Галка, А.И. Смирнов и др. // Журнал радиоэлектроники. – 2015. – № 1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jan15/3/text.html>, свободный (дата обращения: 20.12.2018).
7. Golosovsky M., Davidov D. Newel millimeter wave near-field resistivity microscope // Appl. Phys. Lett. – 1996. – Vol. 68, No. 11. – P. 1579–1581.
8. Scanning near-field millimeter-wave microscopy using a metal slit as a scanning probe / T. Nozokido, J. Bae, K. Mizuno // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 2001. – Vol. MTT-49, No. 3. – P. 491–499.
9. Evanescent Microwave Microscopy / C. Martínez, V. Coello, R. Cortés, R. Villagómez // J. Korean Phys. Soc. – 2005. – Vol. 47. – P. 152–156.
10. 0.4 μm spatial resolution with 1 GHz ($\lambda = 30\text{ cm}$) evanescent microwave probe / M. Tabib-Azar, D.-P. Su, A. Pohar // Rev. Sci. Instrum. – 1999. – Vol. 70, No. 3. – P. 1725–1729.
11. Резник А.Н. Квазистационарное поле теплового излучения в теории контактной радиотермометрии // Изв. вузов. Радиофизика. – 1991. – Т. 34, № 5. – С. 512–517.
12. Беличенко В.П., Запасной А.С. Схемное решение ближнепольного микроволнового интерференционного микроскопа // Изв. вузов. – 2015. – Т. 58, № 10/3. – С. 62–65.
13. Управление величиной и пространственным распределением интерференционных потоков энергии в ближних полях систем идентичных излучателей / В.П. Беличенко, А.С. Запасной, П.В. Шестаков // Оптика и спектроскопия. – 2015. – Т. 118, № 4. – С. 633–636.
14. Резник А.Н., Юрасова Н.В. Обнаружение контрастных образований внутри биологических сред при помощи ближнепольной СВЧ-диагностики // Журнал технической физики. – 2006. – Т. 76, вып. 1. – С. 90–104.
15. Reznik A.N., Yurasova N.V. Electrodynamics of microwave near-field probing: Application to medical diagnostics // J. Appl. Phys. – 2005. – Vol. 98. – P. 114701(1)–114701(9).

Беличенко Виктор Петрович

Др физ.-мат. наук, профессор каф. радиофизики (РФ) Национального исследовательского Томского государственного университета (НИ ТГУ) Ленина пр-т, 36, Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 41-34-63
Эл. почта: bvp@mail.tsu.ru

Мироньев Александр Сергеевич

Инженер каф. РФ НИ ТГУ
Ленина пр-т, 36, Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 41-34-63
Эл. почта: mironchev42@mail.ru

Клоков Андрей Владимирович

Канд. физ.-мат. наук, доцент каф. РФ НИ ТГУ
Ленина пр-т, 36, Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 41-34-63
Эл. почта: 701-kav@mail.tsu.ru

Запасной Андрей Сергеевич

Канд. физ.-мат. наук, доцент каф. РФ НИ ТГУ
Ленина пр-т, 36, Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-96-095-96-97
Эл. почта: zas_rff@live.com

Belichenko V.P., Mironchev A.S.,

Klokov A.V., Zapasnoy A.S.

Simulation of resonant strip probes for interference near-field microscopy

The analysis of various types of probes used in near-field microwave microscopy devices was carried out. The features of the probes of each type and the area of their application are described. Separately presented are the design features and the results of computer simulation of a probe loaded on a microstrip resonator, which is part of the developed model of the near-field interference microwave microscope.

Keywords: near-field diagnostics, probe, evanescent fields, microwave microscope, resolution.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-1-30-34

References

1. Anlage S.M., Talanov V.V., Schwartz A.R. *Principles of Near-Field Microwave Microscopy* / in Scanning Probe Microscopy: Electrical and Electromechanical Phenomena at the Nanoscale. Vol. 1, ed/ by S.V. Kalinin and A. Gruverman. Springer-Verlag, New York, 2007, pp. 215–253.
2. Wei T., Xiang X.-D., Wallace-Freedman W.G., Schultz P.G. Scanning tip microwave near-field microscope. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, vol. 68, no. 24, pp. 3506–3508.
3. Xiang X.D., Yang H., Wang G. *Evanescent microwave probe with enhanced resolution and sensitivity*. U.S. Patent no 7271574, July 2005.
4. Talanov V.V., Scherz A., Moreland R.L., Schwartz A.R. A near-field scanned microwave probe for spatially localized electrical metrology. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, vol. 88, pp. 134106.
5. Talanov V.V., Schwartz A.R., Scherz A. *System and method for quantitative measurements of a material's complex permittivity with use of near-field microwave probes*. U.S. Patent no. 7362108, October 2005.
6. Yanin D.V., Galka A.G., Smirnov A.I., Kostrov A.V., Strikovskii A.V., Orlinskaya N.Yu., Epishkina A.A., Grebenkin E.V. Noninvasive diagnostics of black cancer and other

skin neoplasms using the method of near-field microwave sounding. *Journal of radio electronics*, no 1, 2015. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/jan15/3/text.html> (accessed: December 20, 2018).

7. Golosovsky M., Davidov D. Newel millimeter wave near-field resistivity microscope. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, vol. 68, no. 11, pp. 1579–1581.

8. Nozokido T., Bae J., Mizino K. Scanning near-field millimeter-wave microscopy using a metal slit as a scanning probe. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech*, 2001, vol. MTT-49, no. 3, pp. 491–499.

9. Martínez C., Coello V., Cortés R., Villagómez R. Evanescent Microwave Microscopy. *J. Korean Phys. Soc.*, 2005, vol. 47, pp. 152–156.

10. Tabib-Azar M., Su D.-P., Pohar A. 0.4 μm spatial resolution with 1 GHz ($\lambda = 30\text{ cm}$) evanescent microwave probe. *Rev. Sci. Instrum*, 1999, vol. 70, no. 3, pp. 1725–1729.

11. Reznik A.N. Kvazistacionarnoe pole teplovogo izlucheniya v teorii kontaktnoj radiotermometrii [Quasi-stationary field of thermal radiation in the theory of contact radiometry]. *Izv. vuzov. Radiofizika*, 1991, vol. 34, no 5, pp. 512–517 (in Russ.)

12. Belichenko V.P., Zapasnoy A.S. Skhemnoe reshenie blizhnepol'nogo mikrovolnovogo interferencionnogo mikroskopa [The schematic of a near-field microwave interference microscope]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Fizika*, 2015, vol. 58, no. 10/3, pp. 62–65 (in Russ.)

13. Belichenko V.P., Zapasnoy A.S., Shestakov P.V. Control of the Magnitude and Spatial Distribution of Interference Energy Flows in Near Fields of Systems of Identical Radiators. *Optics and Spectroscopy*, 2015, vol. 118, no. 4, pp. 605–608.

14. Reznik A.N., Yurasova N.V. Obnaruzhenie kontrastnykh obrazovaniy vnutri biologicheskikh sred pri pomoshchi blizhnepol'noj SVCh diagnostiki [Detection of contrast formations inside biological media using near-field microwave diagnostics]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 2006, vol. 76, no 1, pp. 90–104 (in Russ.)

15. Reznik A.N., Yurasova N.V. Electrodynamics of microwave near-field probing: Application to medical diagnostics. *J. Appl. Phys*, 2005, vol. 98, pp. 114701(1)–114701(9).

Victor P. Belichenko

Doctor of Physics and Mathematics, Professor
Department of Radiophysics,
National Research Tomsk State University (NI TSU).
36, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 41-34-63
Email: bvp@mail.tsu.ru

Aleksander S. Mironchev

Candidate of Physics and Mathematics,
Engineer Department of Radiophysics, NI TSU
36, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 41-34-63
Email: mironchev42@mail.ru

Andrey V. Klovov

Candidate of Physics and Mathematics,
Associate Professor Department of Radiophysics NI TSU
36, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 41-34-63
Email: 701-kav@mail.tsu.ru

Andrey S. Zapasnoy

Candidate of Physics and Mathematics,
Associate Professor Department of Radiophysics NI TSU
36, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-961-095-96-97
Email: zas_rff@live.com