

ТЕХНОЛОГИЯ ЛОКАЛЬНОГО МИКРОВОЛНОВОГО НАГРЕВА**Введение**

Использование энергии СВЧ электромагнитного поля для нагревания разных сред широко известно и достаточно хорошо исследовано [1]. Как правило, перед разработчиками различных направлений практического использования этого метода стояли задачи обеспечить пространственно однородный СВЧ нагрев. Задача локализации возникала очень редко, например при гипертермии опухолей, и имела макроразмерный характер. В то же время микроразмерный разогрев может быть актуальным в интересах модификации микрообъектов и, особенно, для микро- и наноэлектроники [2].

Процессы легирования имеют большое значение при создании электронных переходов в кремнии, а также при производстве полупроводниковых приборов в целом. Увеличение степени интеграции и быстродействия электронных устройств требует создания мелкозалегающих переходов с меньшим количеством дефектов и более высоким качеством поверхности. Это, в свою очередь, стимулирует углубленное изучение таких переходов, сформированных разными методами: ионной имплантацией, плазменными разрядами, лазерными методами, сочетанием плазменного и лазерного излучения, химическим парофазным осаждением и микроволновым излучением, в том числе [3 – 7].

В работе [8] впервые экспериментально осуществлен СВЧ локальный разогрев разных материалов с целью сверления малоразмерных отверстий, а в работе [9] показана возможность перелегирования кремния СВЧ локальным нагревом. Эти работы дают основание считать реальной перспективу использования источников локального СВЧ излучения в технологии микро- и наноэлектроники. Однако для достижения микронной и субмикронной локализации СВЧ нагрева необходимо решить проблему оптимального тепловыделения. Для этого необходимо иметь соответствующее теоретическое описание метода, адаптированного к типу используемого СВЧ излучателя, например с коаксиальной апертурой.

Результаты исследований использования микроволн для отжига и легирования кремниевых пластин и других процессов, связанных, в том числе, с быстрым нагревом и плавлением материалов приведены в работах [10 – 14].

Обеспечение локального нагревания и сверления материалов [15] происходит за счет локализации микроволновой энергии в заданной точке в течение локализованного теплового процесса [16]. Авторы [9] адаптировали технику СВЧ тепловой обработки для создания локальных участков легированного и окисленного кремния.

Практическая возможность микролокализации СВЧ нагрева появилась в результате разработки ближнеполевых источников СВЧ излучения, в частности для сканирующей микроволновой микроскопии [17, 18].

Развитие высоколокального СВЧ теплового нагрева дает возможность легирования и перелегирования, термического окисления, рекристаллизации и отжигу разных материалов в приповерхностном слое объекта, в том числе и в пленочных структурах.

Цель работы – проведение экспериментальных исследований возможностей локального микроволнового нагрева для подтверждения основных положений условий его реализации, полученных при модельном рассмотрении.

Основная часть

В работах [16, 19, 20] представлена теория взаимодействия СВЧ излучения с разными материалами с локальностью порядка 1 мм. Однако эта теория не апробирована для высоколокального разогрева, поэтому целесообразно более детально рассмотреть ситуацию для случая с намного большей локальностью.

Теоретические исследования особенностей локализации СВЧ нагрева полупроводниковых и диэлектрических объектов базируются на совместном решении электродинамической и тепловой задач для ближнеполевых источников СВЧ излучения. Детально теоретические основы моделирования локального СВЧ нагрева описаны в работах [21 – 27].

На рис. 1 схематично представлена возможная функциональная схема реализации локального СВЧ нагрева, а также вид электродинамической структуры микромодификатора.

В качестве локального микромодификатора при моделировании рассматривался излучатель на основе конусного коаксиального зонда со сферической и плоской формой острия. Радиус острия ~ 10 мкм. Объект исследования – структура "пленка на подложке".

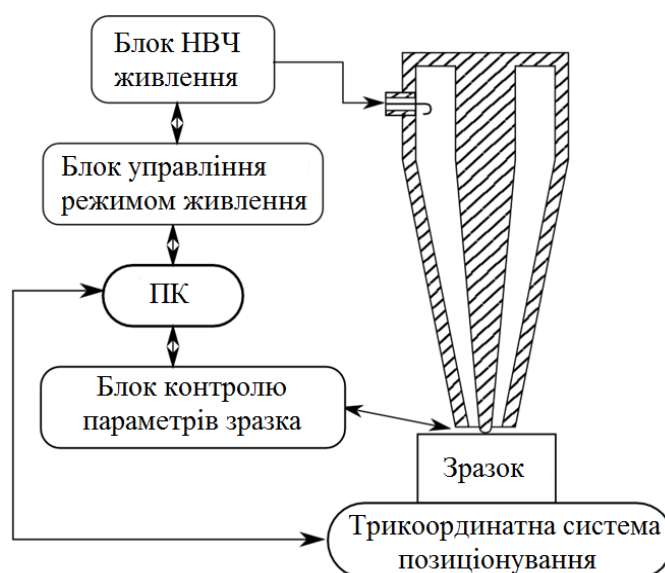


Рис. 1. Функциональная схема основных узлов СВЧ микромодификатора

В результате проведения модельных исследований в работах [23 – 26] было установлено следующее:

- распределение температуры вглубь и вдоль поверхности образца существенно зависит от величины зазора между острием микромодификатора и поверхностью образца;
- пространственное распределение температуры в образце в зависимости от формы кончика острия (плоской или сферической) также меняется – для сферического носителя более локализованный характер;
- при локальном нагреве образца происходит локальное изменение электрофизических характеристик, которое дополнительно ускоряет процесс нагрева;
- при длительном (более 10^{-3} с) воздействии микроволнового излучения на образец происходит растекание тепла по образцу за счет его теплопроводности, что приводит к снижению степени локализации нагрева.

Для проведения экспериментальных исследований СВЧ нагрева была собрана установка на основе генератора магнетронного типа М-857 с частотой генерации ~ 9,480 ГГц, принципиальная схема которой показана на рис. 2.

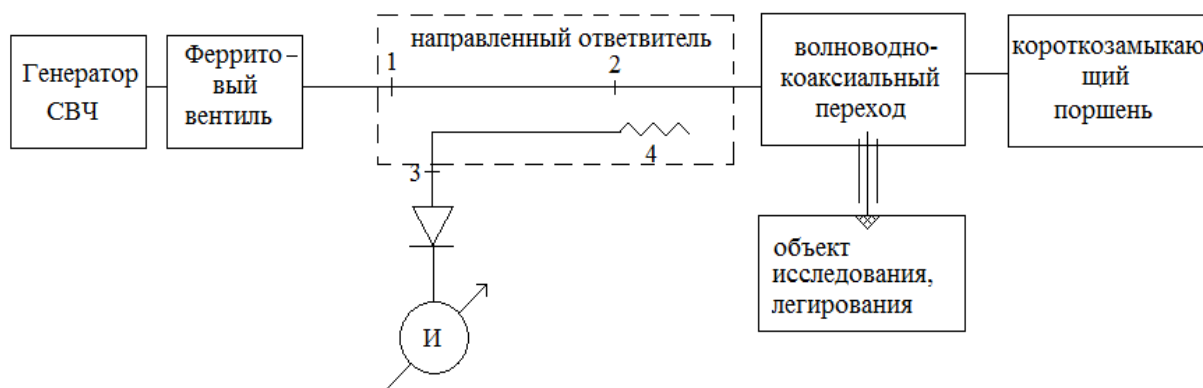


Рис. 2. Схема установки для проведения экспериментальных исследований процесса локального нагрева

На рис. 3 представлена установка формирования локального ЭМП мощностью до 10 Вт: 1 – магнетрон М-857, 2 – ферритовый вентиль, 3 – направленный ответвитель с аттенуатором и детекторной головкой, 4 – излучатель (инструмент воздействия), 5 – предметный столик, 6 – блоки питания магнетрона. На рис. 4 показан общий вид излучателя с винтом настройки: 1 – волноводно-коаксиальный переход, 2 – винт настройки короткозамыкающего поршня.

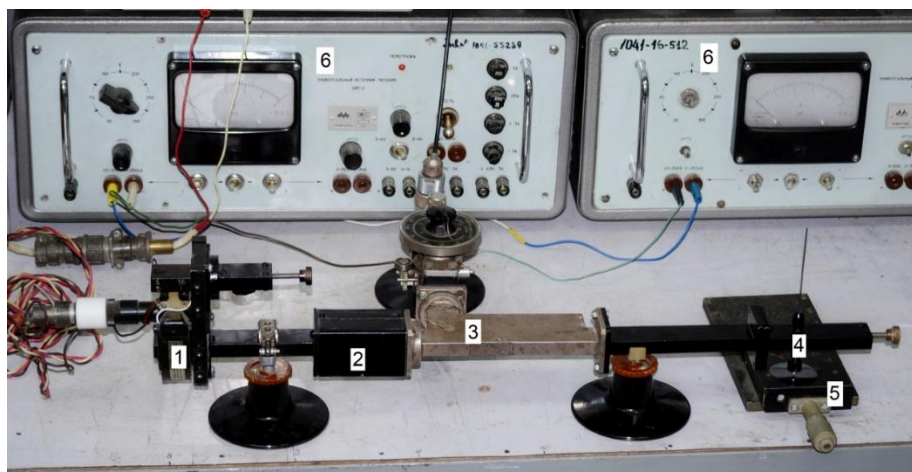


Рис. 3. Установка формирования локального ЭМП мощностью до 10 Вт: 1 – магнетрон М-857, 2 – ферритовый вентиль, 3 – направленный ответвитель с аттенуатором и детекторной головкой, 4 – излучатель (инструмент воздействия), 5 – предметный столик, 6 – блоки питания магнетрона

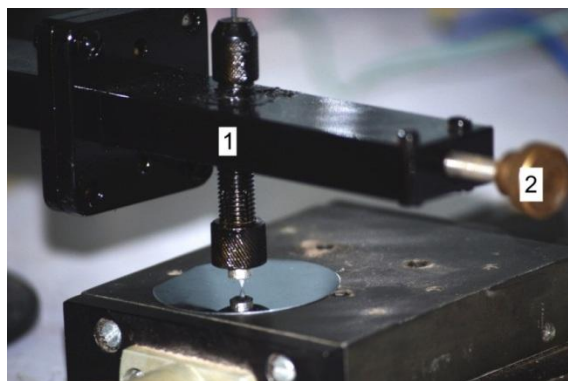


Рис. 4. Общий вид излучателя с винтом настройки: 1 – волноводно-коаксиальный переход, 2 – винт настройки короткозамыкающего поршня

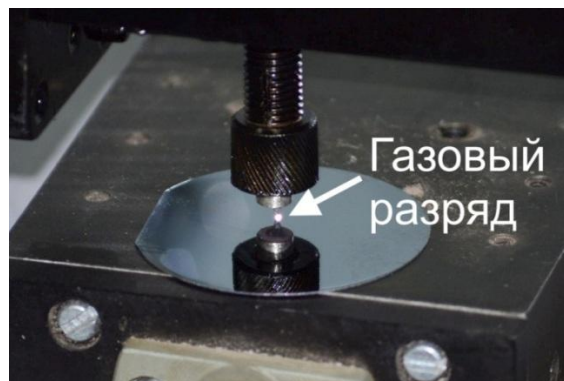


Рис. 5. Газовый разряд в промежутке между излучателем и объектом

При некоторых соотношениях напряженности электрического поля между излучателем и объектом, зазором между ними и давлением окружающей среды возникает газовый разряд, показанный на рис. 5.

Генератор СВЧ через ферритовый вентиль нагружен на согласованный с помощью короткозамыкающего поршня волноводно-коаксиальный переход, центральный вывод которого используется для воздействия на объект в процессе технологических работ. Для индикации согласования тракта генератор-центральный вывод коаксиала между ферритовым вентилем и волноводно-коаксиальным переходом размещается направленный ответвитель с переходным затуханием ~ 20 дБ, что дает возможность фиксировать уровень отраженной от перехода волны.

Поскольку, как правило, воздействие на объект производится одиночными импульсами без особых требований к их форме, необходимости в использовании специальных схем модуляторов нет. Нами использовано свойство магнетрона, прекращать генерацию при снижении напряжения на аноде меньше определенного значения.

Для экспериментального исследования теплового поля на поверхности подложки была использована система формирования локального электромагнитного поля мощностью до 10 Вт (см. рис. 3). В качестве объектов для изучения температурных распределений использовались ложки из монокристаллического кремния и поликора, покрытого слоем фоторезиста.

Исследования тепловых полей на подложках проводилось как в режиме касания зондом их поверхности, так и плазменного воздействия с зазором. На рис. 6 показана часть экспериментальной установки с установленными на координатном столе подложками из поликора (а) и кремния (б).

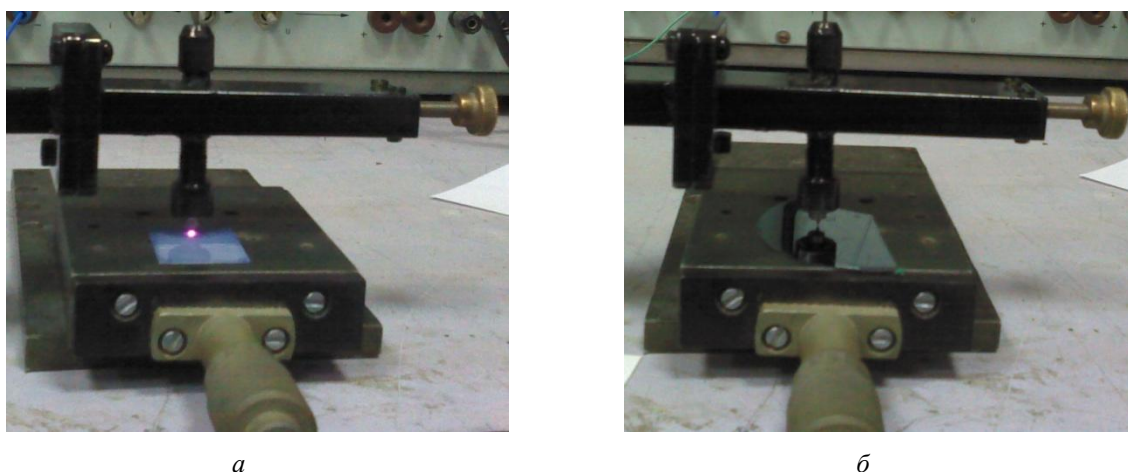


Рис. 6. Часть экспериментальной установки с установленными на координатном столе подложками из поликора (а) и кремния (б)

Регистрация теплового распределения проводилась с помощью тепловизионной камеры типа FLIR E60 с объективом FOL17. Температурная разрешающая способность камеры составляет $0,05^{\circ}\text{C}$. Тепловые изображения обрабатывались с использованием встроенной программы FLIR Quick Report 1.2.

На рис. 7 – 10 приведены тепловые поля в поле зрения камеры (а) и температуры в точках подложки, которые расположены по радиусу области с центром на кончике рабочего зонда Sp1...Sp7, температура кончика зонда Sp8, а также диапазон температур вдоль радиуса (б).

Рис. 7, 8 демонстрируют распределение температуры в случае плазменного влияния излучения на подложку, когда зазор между зондом и объектом составляет порядка 100 мкм, а рис. 9, 10 отображают случай, когда зонд касается поверхности подложки и имеет с ней непосредственный тепловой контакт.

Во всех случаях воздействие СВЧ мощности было постоянным, без модуляции по времени воздействия. Характер распределения в целом одинаковый с незначительными отличиями крутизны, связанными, вероятно, с разной теплопроводностью и влиянием фоторезиста на теплораспределение.

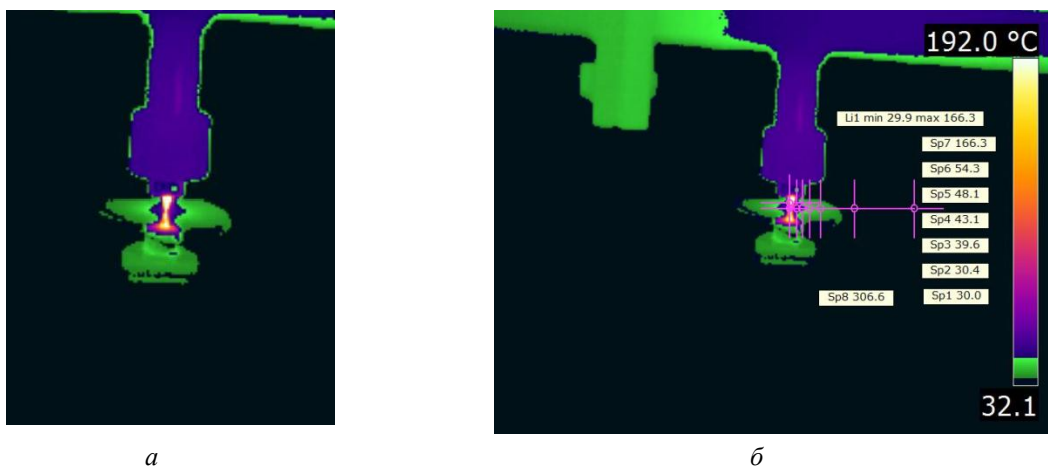


Рис. 7. Термограмма разогрева кремниевой подложки. Тепловое поле (а) и температуры в точках подложки Sp1...Sp7, расположенных по радиусу области с центром на кончике рабочего зонда Sp8 (б)

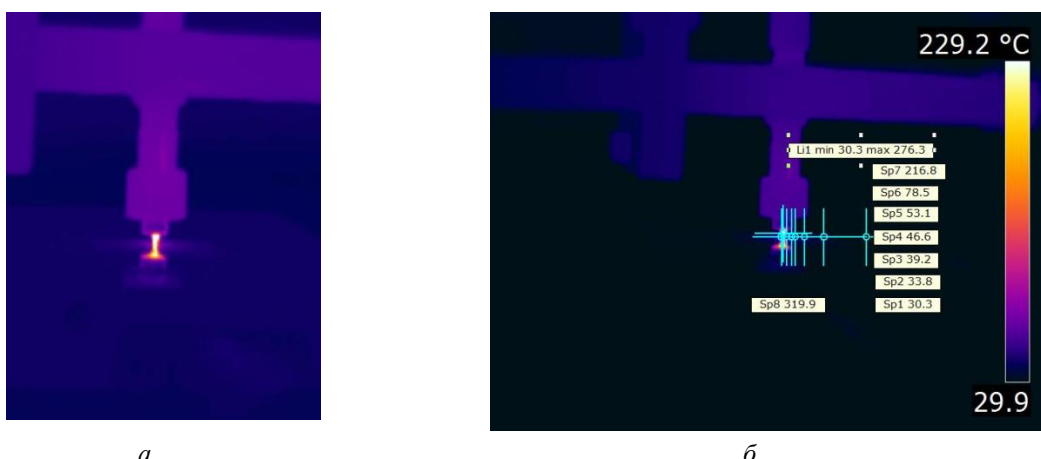


Рис. 8. Термограмма разогрева подложки из поликора с пленкой фоторезиста. Тепловое поле (а) и температуры в точках подложки Sp1...Sp7, расположенных по радиусу области с центром на кончике рабочего зонда Sp8 (б)



Рис. 9. Термограмма для случая касания зондом подложки из поликора с пленкой фоторезиста. Тепловое поле (а) и температуры в точках подложки Sp1...Sp7, расположенных по радиусу области с центром на кончике рабочего зонда Sp8 (б)



Рис. 10. Термограмма для случая касания зондом кремниевой подложки. Тепловое поле (а) и температуры в точках подложки Sp1...Sp7, расположенных по радиусу области с центром на кончике рабочего зонда Sp8 (б)

Выводы

Проведенные экспериментальные исследования микроволнового локального нагрева подтверждают основные положения условий его реализации, полученные при модельном рассмотрении. Это приводит к необходимости учета большинства факторов, выявленных моделированием, при реализации технологического процесса микроволнового локального нагрева.

Если требования по позиционированию и геометрическим формам и размерам узлов и элементов могут быть удовлетворены с помощью существующих технических и практических возможностей, то вопросы динамического управления процессом микроволнового (электромагнитного) воздействия предполагают разработку специального обеспечения.

В этом плане перспективным представляется использование устройств формирования усиленных импульсных сигналов на основе микроволновых резонаторных накопителей [28 – 30]. Такие устройства позволяют от генераторов непрерывного микроволнового излучения невысокой мощности получать импульсные сигналы с амплитудой на порядки превышающей сигнал генератора и управлять их параметрами.

Комплексное использование имеющихся теоретических и экспериментальных результатов позволяют ставить вопрос о возможности создания технологических устройств микроволнового локального воздействия на малоразмерные объекты и структуры, в том числе микро- и наноразмерные.

Список литературы:

1. Диденко А.Н. СВЧ энергетика: Теория и практика. Москва : Наука, 2003. 446 с.
2. Thompson K., Booske J. H., Ives R.L., Lohr J., Gorelov Y., Kajiwara K. Millisecond microwave annealing: Driving microelectronics nano // J. Vac. Sci. Technol. B 23,3..., May/June 2005 p. 970-977.
3. Foggiato, J. Implementation of flash technology for ultra-shallow junction formation: challenges in process integration [Text] / J. Foggiato, W. S. Yoo // Journal of Vacuum Science and Technology. 2006. Vol. B 24. P. 515–520.
4. Chu P. K. Semiconductor applications of plasma immersion ion implantation // Plasma Physics and Controlled Fusion. 2003. Vol. 45. P. 555–570.
5. Kim S. D. Formation and control of box-shaped ultra-shallow junction using laser annealing and pre-amorphization implantation / S. D. Kim, C. M. Park, J. C. S. Woo // Solid State Electronics. 2004. Vol. 49. P. 131–135.
6. Takii E. Ultra-shallow junction formation by green-laser annealing with light absorber / E. Takii, T. Eto, K. Kurobe, K. Shibahara // Japanese Journal of Applied Physics. Part 2. 2005. Vol. 44. P. 756–759.
7. Sarubbi F. Chemical vapor deposition of boron layers on silicon for controlled nanometer-deep p⁺n junction formation / F. Sarubbi, T. L. M. Scholtes, L. K. Nanver // Journal of Electronic Materials. 2010. Vol. 39. P. 162–173.
8. Jerby E., Dikhtyar V. Drilling into hard non-conductive materials by localized microwave radiation // Trends in Microwave and HF Heating, Springer Verlag, 2002. P. 1-9.
9. Livshits P., Dikhtyar V., Inberg A., Shahadi A., Jerby E. Local doping of silicon by a point-contact microwave applicator // Microelectronic engineering. 2011. Vol. 88. P. 2831-2836.

10. Meir Y., Jerby E. Localized rapid heating by low-power solid-state microwave drill // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2012. Vol. 60, N 8. P. 2665–2672.
11. Bonifas C. J. An examination of athermal photonic effects on boron diffusion and activation during microwave rapid thermal processing / C. J. Bonifas, K. Thompson, J. H. Booske, R. F. Cooper // Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy. 2008. Vol. 42. P.23–34.
12. Noh, H. Wafer bonding using microwave heating of parylene intermediate layers / H. Noh, K. Moon, A. Cannon, J. Hesketh, C. P. Wong // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2004. Vol. 14. P. 625–631.
13. James, R. B. Melting of silicon surfaces by high-power pulsed microwave radiation / R. B. James, P. R. Bolton, R. A. Alvarez at al. // Journal of Applied Physics. 1988. Vol. 64. P. 3243–3253.
14. Herskowits, R. Silicon heating by a microwave-drill applicator with optical thermometry / R. Herskowits, P. Livshits, S. Stepanov at al. // Semiconductor Science and Technology. 2007. Vol. 22. P. 863–869. 1
5. Jerby, E. The microwave drill / E. Jerby, V. Dichtyar, O. Aktushev, U. Groszlick // Science. 2002. Vol. 298. P. 587–589.
16. Jerby E., Aktushev O., Dikhtyar V. Theoretical analysis of the microwave-drill near-field localized heating effect // Journal of Applied Physics. 2004. Vol. 97. 034909-1 034909-7.
17. Chen, L.F. Microwave Electronics: Measurement and Materials Characterization / L.F. Chen, C.K. Ong, C.P. Neo, V.V. Varadan, V.K. Varadan. John Willy & Sons, Ltd, 2004. 537 p.
18. Гордиенко Ю. Е. Ближнеполевой СВЧ датчик на основе конусного коаксиального резонатора / Ю. Е. Гордиенко, С. Ю. Ларкин, А. М. Яцкив // Радиотехника. 2009. № 159. С. 309–314.
19. Давидович М. В. Коаксиальный зонд для контроля параметров многослойного магнетодиэлектрика: прямая и обратная задачи // Радиотехника и электроника. 2006. Т. 51, № 11. С. 1308–1315.
20. Гордиенко Ю.Е. Одномодовые резонаторные измерительные преобразователи в общей теории СВЧ диагностики материалов / Ю.Е. Гордиенко, Ю.И. Гуд, Е.Ю. Корягина, Н.И. Слипенченко // Радиоэлектроника и информатика. 2007. № 2. С. 4–8.
21. Гордиенко Ю. Е. Высоколокальный СВЧ нагрев полупроводников и диэлектриков / Ю. Е. Гордиенко, Д.А. Полетаев, А.М. Проказа, Н.И. Слипенченко // Прикладная радиоэлектроника. 2013. Т. 11, №3. С.426-430.
22. Гордиенко Ю.Е., Ларкин С.Ю., Чхотуга М.С.Е. Бесконтактный режим работы при сканирующей микроволновой микроскопии // Радиотехника. 2012. № 170. С. 73–78.
23. Гордиенко Ю. Е., Левченко А.В., Щербак Е.Л. Влияние зазора между зондом и объектом на высоколокальный сканирующий СВЧ нагрев материалов // Прикладная радиоэлектроника. 2015. №3. С. 240-245.
24. Гордиенко Ю.Е., Полищук А.В., Пятайкина М.И. СВЧ высоколокальный сканирующий разогрев в технологии микро- и нанoeлектроники // Физическая инженерия поверхности. Харьков : ХНУ, 2015. Т.13, №2. С.209-217.
25. Гордиенко Ю. Е., Щербак Е. Л., Левченко А. В. Основные положения теории высоколокального сканирующего СВЧ нагрева полупроводников и диэлектриков // Физическая инженерия поверхности. Харьков : ХНУ, 2015.Т.13, №3. С.348-355.
26. Gordienko Yu. Ye., Slipchenko N.I., Larkin S. Yu., Shcherbak Ye. L. Local MW Heating-Up Kinetics in Semiconductors and Dielectrics // Telecommunication and Radio Engineering, Begell Hous, Inc., NY, (USA). 2015. Vol. 74, N 9. P. 787-795.
27. Bondarenko I.N., Gordienko Yu.Ye., Levchenko A.V. Submillimetric localization of microwave diagnostics and modification of objects of various nature // 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'2016), Kharkiv, Ukraine, 2016. № 7538014. DOI: 10.1109/MSMW.2016.7538014.
28. Bondarenko I.N., Gorbenko E.A., Krasnoshok V.I. Microwave switch based on waveguide T-junction for compression resonant pulse former // Telecommunications and Radio Engineering. Begell Hous, Inc., NY, (USA). 2017. Vol. 76, N 6. P. 469-475.
29. Bondarenko I.N., Gorbenko E.A., Krasnoshok V.I. Microwave switch based on a combined coaxial-waveguide tee for a cavity pulse shaper // Telecommunications and Radio Engineering. Begell Hous, Inc., NY, (USA). 2018. Vol. 77, N 5. P. 391-397.
30. Bondarenko I.N., Gorbenko E.A. Formation of powerful microwave pulses using resonator storage // Telecommunications and Radio Engineering Begell Hous, Inc., NY, (USA). 2018. Vol. 77, N 15. P.1311-1319.