

ВЛИЯНИЕ ЗАЗОРА МЕЖДУ ЗОНДОМ И ОБЪЕКТОМ НА ВЫСОКОЛОКАЛЬНЫЙ СКАНИРУЮЩИЙ СВЧ НАГРЕВ МАТЕРИАЛОВ

Ю. Е. ГОРДИЕНКО, А. В. ЛЕВЧЕНКО, Е. Л. ЩЕРБАК

В работе исследуются особенности влияния воздушного зазора при локальном СВЧ разогреве полупроводниковых и диэлектрических материалов. Исследования осуществляются теоретически по результатам численного совместного решения уравнений Максвелла и теплопроводности для системы, содержащей локальный СВЧ зонд, взаимодействующий с объектом через воздушный зазор. Излучение зонда имеет ближнеполевой характер, специфичный для сканирующей микроволновой микроскопии. Показано, что кинетика и локальность установления температуры в объекте существенно зависят от величины зазора в диапазоне его значений, сравнимых с сечением острия зонда. При сферической форме острия зазор более существенно ослабляет нагрев, практически не влияя на его делокализацию.

Ключевые слова: СВЧ, нагрев, полупроводник, диэлектрик, технология, теория, микроэлектроника, поле, температура, локальность, зонд, модификация, зазор.

ВВЕДЕНИЕ

Высоколокальный сканирующий СВЧ нагрев является новейшей областью современных микротехнологий [1]. В этой области объединяются достижения по микронной локализации СВЧ излучения для сканирующей зондовой диагностики и СВЧ модификации объектов. При этом фактически создается СВЧ аналог СТМ и АСМ с их модифицирующим действием [2]. Преимуществом СВЧ аналога является тепловой характер микровоздействия на объект и возможность его работы с диэлектрическими, полупроводниковыми и проводящими тонкопленочными материалами.

Пока что, практическое применение находит в основном сканирующей микроволновой микроскопии (СММ). Работы по СВЧ микронагреву только разворачиваются. Поэтому моделирование этого процесса несомненно актуально. До сих пор преимущественно устанавливались общие физические закономерности [3]. В частности, определены количественные соотношения в кинетике нарастания и спада температуры; зависимость ее величины от геометрии и формы СВЧ нагревающего зонда, электрических и теплофизических параметров материала объекта, мощности питающего СВЧ генератора; условия самолокализации СВЧ разогрева.

Учитывая специфичную для СВЧ зондов возможность работы в бесконтактном режиме представляется важным оценить влияние зазора между зондом и объектом на локальный разогрев. В принципе, введение зазора обещает упростить технику сканирующего нагрева и уменьшить отвод выделяемого тепла. Поэтому детальные исследования влияния зазора на основные процессы локального СВЧ нагрева объектов определяют основную задачу данной работы.

1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Как и в ранее опубликованных работах, в основе модели физико-технической системы лежит конический коаксиальный нерезонансный зонд с апертурой на узком открытом торце и СВЧ возбуждением со стороны закороченного широкого торца (рис. 1, а). В отличие от работ [4] СВЧ электромагнитное поле рассматриваемого зонда имеет эванесцентный характер. По этой причине, его проникновение в объект пространственно соизмеримо с геометрией конца острия (рис. 1, б, в), которое является продолжением центрального проводника коаксиала, и при количественных оценках бегущей волной в объекте можно пренебрегать. Главное, здесь планируется учитывать наличие зазора размером « h_z », который отсутствовал во всех предыдущих исследованиях.

Для расчета тепловых процессов необходимо определение тепловых источников в объекте исходя из решения электродинамической части задачи. Удельная мощность СВЧ тепловыделения выражается следующим образом

$$q = \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot (\operatorname{tg} \delta) \cdot [Er^2 + Ez^2].$$

Для нахождения распределения СВЧ поля Ez и Er в работе решается система уравнений Максвелла с использованием прямого численного метода, основанного на методе конечных разностей [5]. С учетом осесимметричности модели эти уравнения имеют следующий вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial Er_i}{\partial t} &= -(\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_i)^{-1} \cdot \left(\frac{\partial H \phi_i}{\partial z} + \sigma_i \cdot Er_i \right), \\ \frac{\partial Ez_i}{\partial t} &= (\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_i)^{-1} \cdot \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot H \phi_i) - \sigma_i \cdot Ez_i \right), \\ \frac{\partial H \phi_i}{\partial t} &= (\mu_0 \cdot \mu_i)^{-1} \cdot \left(\frac{\partial Ez_i}{\partial r} - \frac{\partial Er_i}{\partial z} \right), \end{aligned}$$

где ϵ_0 и μ_0 – диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума; $E_{r_i}, E_{z_i}, H_{\phi_i}$ – напряженность СВЧ поля в свободном пространстве и в различных частях электродинамической структуры; ϵ_i и μ_i – диэлектрическая и магнитная проницаемости материала заполнения; $\sigma_i = \omega \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_i \cdot \text{tg} \delta_i$ – электропроводность заполнения.

Имея результаты расчета удельной мощности СВЧ-источников далее решается тепловая задача с использованием нестационарного уравнения теплопроводности.

$$C_{pp} \frac{\partial T(r, z)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[kr \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial z} \right] + q(r, z, t),$$

где C_p – удельная теплоемкость материала объекта; k – коэффициент теплопроводности; ρ – удельная плотность материала.

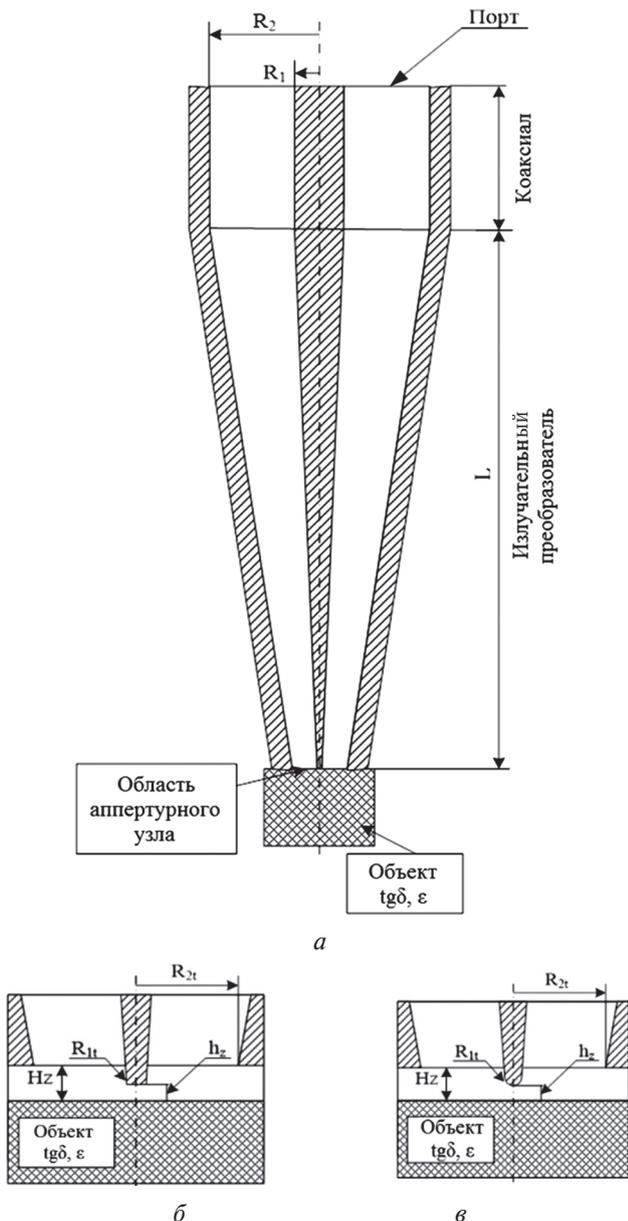


Рис. 1. Схематичные изображения апертурного узла (а) с различными типами острия: б – сферическим; в – коническим

Численное решение всех возникающих задач базируется на самосогласованном решении приведенной системы уравнений с учетом граничных условий. Более подробное изложение методики решения можно найти в нашей ранее опубликованной работе [5]. Подтверждением адекватности получаемых результатов является сравнение их с данными, получаемыми с помощью пакета COMSOL Multiphysics в нескольких реперных точках.

Все численные исследования проводились при следующих параметрах системы: рабочая частота 8 ГГц; мощность СВЧ источника 50 Вт; геометрия СВЧ зонда: $R_1 = 1.9$ мм, $R_2 = 8$ мм, $R_{1t} = 10$ мкм, $R_{2t} = 600$ мкм, $L = 81$ мм.

Электрофизические параметры объекта в силу общей постановки задачи выбирались без привязки к конкретному материалу. Важным было определить физическую тенденцию зависимостей. Все исследования выполнены для полупроводникового объекта полубесконечной толщины со следующими параметрами $\epsilon = 11.7$, $\text{tg} \delta = 1.56$, $k = 30$ Вт/(м·К), $C_p = 700$ Дж/(кг·К).

Режим СВЧ питания практически может варьироваться с помощью отдельного устройства. Однако, для достижения заданных целей в работе его изменение ограничивается различием длительности СВЧ воздействия $T_{\text{возд}}$.

Распределение СВЧ поля в такой системе исследовалось нами ранее в работах по СММ [6]. Из них известно и подтверждено экспериментально в более ранних работах [7], что форма острия существенно влияет на функционирование таких локализаторов СВЧ поля. На рис. 2 приведены

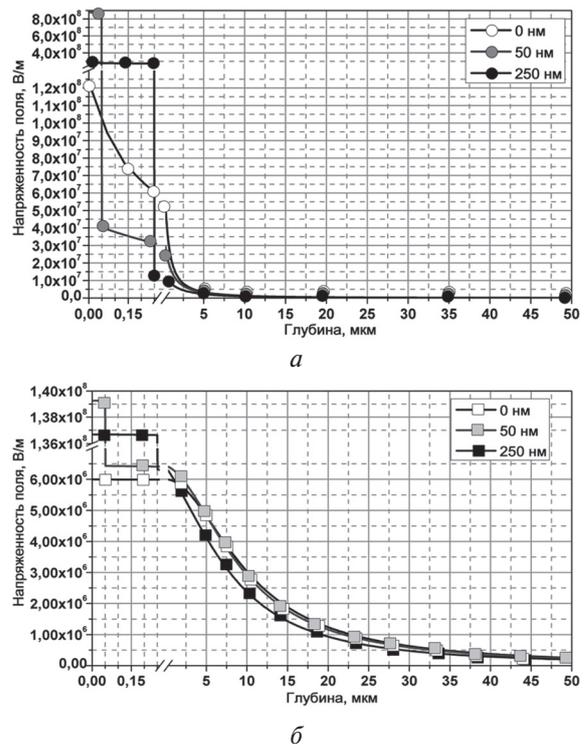


Рис. 2. Распределение СВЧ электромагнитного поля по глубине при различных зазорах для сферического (а) и конического (б) острий

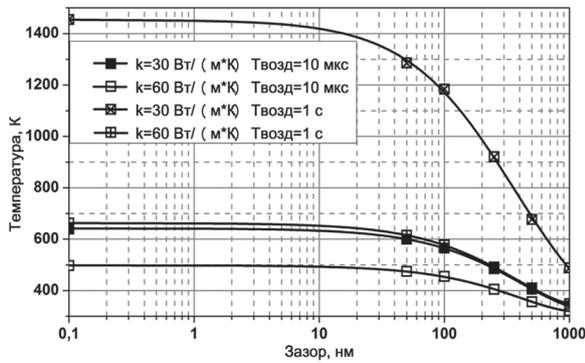
результаты оценки влияния зазора на распределение поля в объекте по глубине, характеризующее конкретно рассматриваемую здесь систему. Из них следует, что воздушный зазор между острием и объектом существенно ослабляет СВЧ поле в объекте, которое проявляется уже при нанометровых зазорах. Особенно это ощутимо при сферической форме острия. Представленные на рис. 2 результаты в полной мере количественно характеризуют физическую картину, определяющую распределение тепловых источников в зависимости от величины зазора.

Отдельно заметим, что увеличение радиуса острия R_1 смещает вправо зависимости для его конической формы и практически не влияет на зависимость при сферической форме вплоть до 50 мкм. Влияние зазора на распределение поля по радиусу при этом практически отсутствует.

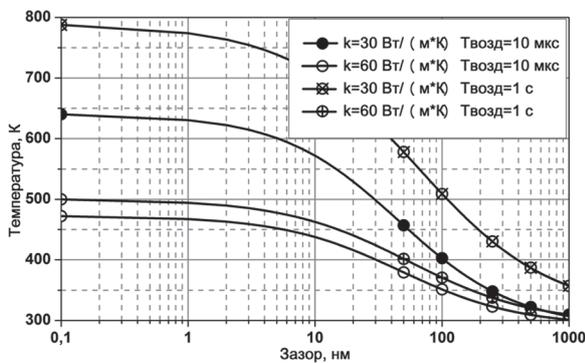
2. ЗАВИСИМОСТЬ ЛОКАЛЬНОГО СВЧ НАГРЕВА ОТ ВЕЛИЧИНЫ ЗАЗОРА

На рис. 3 представлены результаты полученных в работе оценок зависимости температуры в приповерхностной области полупроводника по центру острия ($z = 0, r = 0$) от величины зазора для различных значений времени воздействия.

Из них следует, что наибольшее изменение достижимой температуры по абсолютной величине имеет место при зазорах, существенно меньше радиуса острия.



а



б

Рис. 3. Зависимость достижимой температуры от величины зазора для конического (а) и сферического (б) острий при различной теплопроводности и времени воздействия

Характер зависимостей практически не изменяется при увеличении радиуса острия и времени воздействия. Следует обратить внимание на то, что для конической формы острия достижимая температура возрастает с увеличением времени воздействия при малой теплопроводности материала. Однако, это не имеет общего характера, т.к. связано со спецификой установления температуры под центром острия.

В работе особое внимание было обращено на исследование влияния зазора при его нанометровых значениях. Учитывая трудности прямых численных исследований, связанные с влиянием на точность оценок разномасштабности сетки, исследования в нанометровой области были выполнены с применением интерполяционного подхода. При этом интерполяция в область нанометровых зазоров осуществляется на основе аналитической аппроксимации зависимостей, полученных в микронных и субмикронных областях прямым численным методом. Для указанных параметров СВЧ зонда и объекта полученные зависимости имеют следующий вид:

$$T(h_z) = A_2 + \frac{(A_1 - A_2)}{1 + (\frac{h_z}{m})^p},$$

где A_1, A_2, m, p – коэффициенты, зависящие от ϵ и $\text{tg}\delta$ объекта и радиуса острия и практически не зависящие от теплофизических параметров объекта.

Соответствие аппроксимирующей зависимости и точных значений иллюстрируется точками на графиках рис. 3.

В целом, эти данные позволяют допускать возможность нетрудоёмкого оптимального проектирования бесконтактных СВЧ зондов для локального разогрева полупроводников и диэлектриков.

3. ВЛИЯНИЕ ЗАЗОРА НА КИНЕТИКУ РАЗОГРЕВА

Исследование кинетики разогрева должно охватывать, в первую очередь, процесс нарастания температуры в различных условиях. Учитывая инерционность влияния различных факторов, необходимо особенно тщательно рассматривать начальный участок и область медленного изменения температуры, которое имеет место при длительном СВЧ воздействии. Непосредственно выделение тепла поглощаемым СВЧ полем является практически безынерционным процессом. Поэтому на начальном участке будет сказываться влияние теплопроводности и теплоемкости объекта. При длительном воздействии СВЧ поля установление температуры, очевидно, будет определяться преимущественно теплопроводностью.

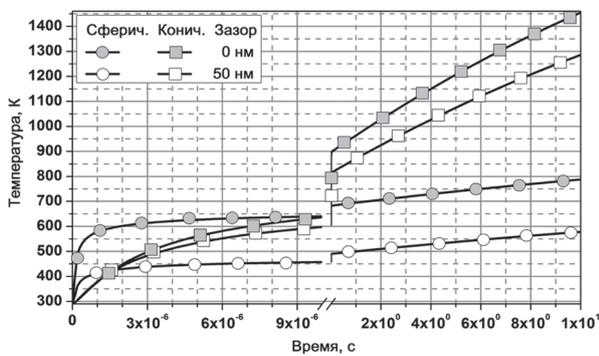
На рис. 4 представлены основные данные по кинетике нарастания при различных значениях воздушного зазора h_z и для разных форм острия зонда.

В первую очередь следует отметить, что при острии сферической формы начальный участок более крутой, однако, достижимая температура ниже, чем при острии конической формы. При длительном воздействии такие соотношения качественно сохраняются.

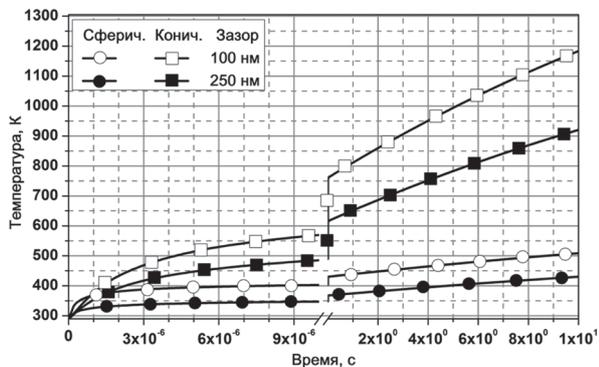
Влияние зазора, при сечении острия менее 10 мкм, особо остро проявляется в области h_z от 0 до 1 мкм. Физически это объясняется спецификой изменения СВЧ поля в объекте при увеличении зазора (рис. 4, б). Ценность этих сведений в первую очередь определяется количественными соотношениями для достижимых температур и относительной величиной зазора. Однако, при практической реализации необходимо сопоставить потери локальности, имеющие место при разных формах острия (представлено ниже).

4. ДЕЛОКАЛИЗАЦИЯ СВЧ РАЗОГРЕВА ПРИ НАЛИЧИИ ЗАЗОРА МЕЖДУ ЗОНДОМ И ОБЪЕКТОМ

В работе [3] нами показано, что на локальность СВЧ разогрева сильно влияет форма острия зонда. Это в первую очередь связано с зависимостью пространственного распределения СВЧ поля в объекте от поперечного сечения острия и его формы. При сферической форме, влияние радиуса острия начинает проявляться при $R_{1r} < 1,0$ мкм и $R_{1r} > 50$ мкм. В диапазоне значений $50 \text{ мкм} > R_{1r} > 1 \text{ мкм}$ локализация СВЧ поля характеризуется размером порядка 1 мкм и практически не зависит от R_{1r} .



а



б

Рис. 4. Кинетика роста температуры при сферическом и коническом острии для значений зазора (а) $h_z=0, 50$ нм и (б) $h_z=100, 250$ нм

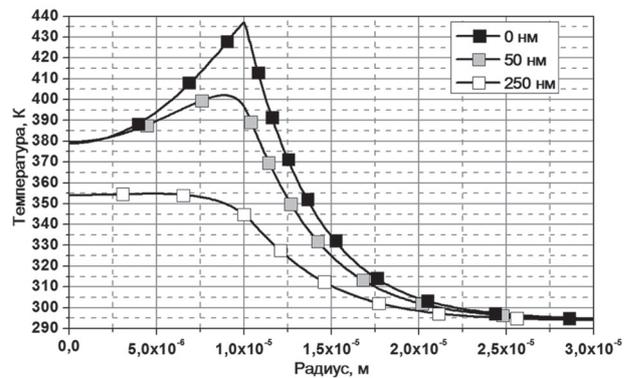
При геометрии острия в форме усеченного конуса распределение поля имеет трубчатый характер и зависит от R_{1r} во всем диапазоне значений. Это накладывает отпечаток и на локальность разогрева.

На рис. 5 сказанное проиллюстрировано для двух значений времени воздействия СВЧ поля и $h_z=0$. На этих же рисунках представлено распределение температуры при наличии зазора. Из приведенных результатов следует, что зазор слабо делокализует разогрев, хотя сильно влияет на достижимую температуру в различных точках локализации.

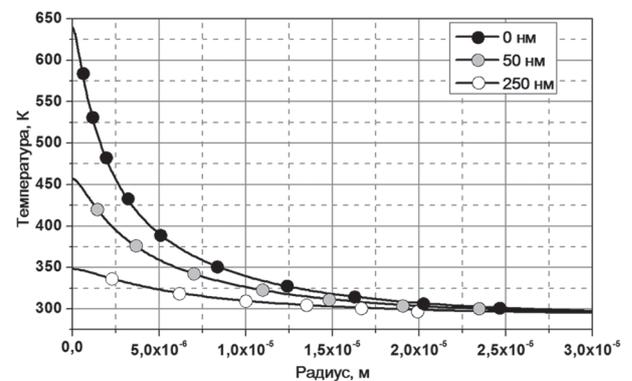
Следует обратить внимание на то обстоятельство, что при увеличении времени воздействия трубчатость распределения температуры при конической форме острия исчезает вследствие теплопроводности материала.

Результаты оценки влияния зазора на распределение разогрева по глубине объекта представлены на рис. 6. Очевидно, что профиль температуры не искажается существенно. Однако, абсолютное значение достижимой температуры подвержено сильной зависимости от зазора.

Следовательно, изменением величины зазора можно в широких пределах варьировать разогрев по глубине. Поперечная делокализация не происходит, если оценивать ее как изменение разогрева относительно оси острия.



а



б

Рис. 5. Распределение температуры по поверхности при различных значениях зазора и времени воздействия для конического ($t_{\text{возд}} = 1$ мкс) (а) и сферического ($t_{\text{возд}} = 10$ мкс) (б) острий

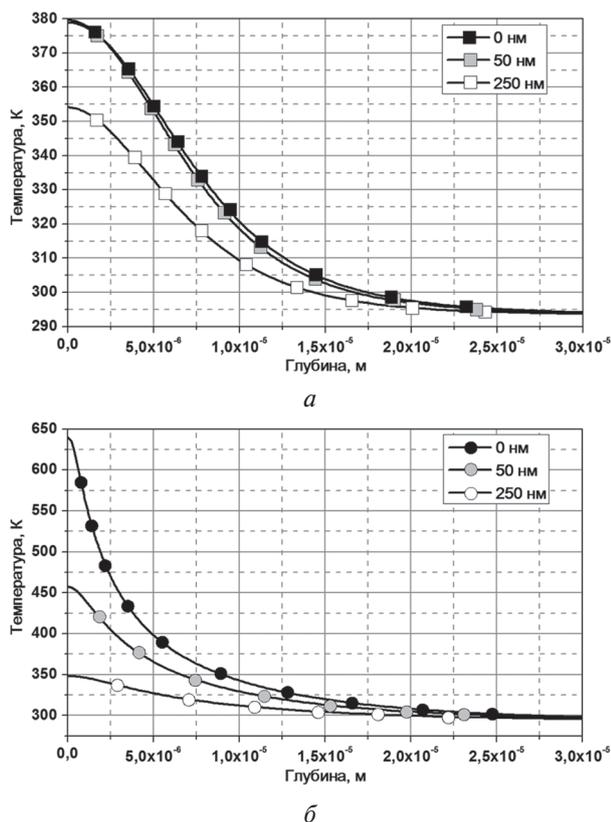


Рис. 6. Распределение температуры по глубине в объекте при различных значениях зазора и времени воздействия для конического зазора ($t_{\text{возд}}=1$ мкс) (а) и сферического ($t_{\text{возд}}=10$ мкс) (б) острей

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований осуществлена оценка влияния зазора между зондом и объектом на локальный СВЧ разогрев материалов микро- и нанoeлектроники.

Проведенные исследования позволяют установить, что введение зазора имеет слабое влияние на локальность разогрева как при использовании сферического острей, так и с коническим острей. Однако достижимая температура подвержена сильной зависимости от величины зазора, благодаря чему можно в широких пределах варьировать разогрев по глубине.

Отдельно следует отметить влияние формы острей на кинетику разогрева. Из проведенных исследований видно, что при использовании сферического острей на начальном участке разогрева скорость нарастания температуры значительно выше, чем при использовании конического острей. Однако, при дальнейшем нагреве достижимая температура выше при использовании конического острей.

В работе приведена интерполяция зависимости достижимой температуры от величины зазора на область малых зазоров (порядка 10^{-9} м), что позволяет допускать возможность нетрудоёмкого оптимального проектирования бесконтактных СВЧ зондов для локального разогрева полупроводников и диэлектриков.

Литература

[1] *Thompson Keith*. Millisecond microwave annealing: Driving microelectronics nano / Thompson Keith, Booske J.H., Ives R.L. // Journal of vacuum Science and Technology. Microelectronics and Nanometer Structures. 2005. — Vol. 23, № 3. — P. 970–978.

[2] *Неволин В. К.* Зондовые нанотехнологии в электронике / В. К. Неволин // Техносфера; Смоленск, 2014. — С. 176.

[3] *Гордиенко Ю.Е.*, Кинетика локального СВЧ разогрева полупроводников и диэлектриков / Ю.Е. Гордиенко, С.Ю. Ларкин, Н.И. Слипченко, Е.Л. Щербак // Радиотехника : науч.-техн. сб. — X., 2014. — С. 98–104.

[4] *Jerby, E.* The microwave drill / E. Jerby, V. Dichtyar, O. Aktushev, U. Groszlick // Science. — 2002. — Vol. 298. — P. 587–589.

[5] *Gordienko Yu.Ye.* The model of numerical investigation of highly localized thermal effect of the microwave electromagnetic field upon semiconductive substances / Yu.Ye. Gordienko, Ye.P. Taran. // Telecommunications and Radio Engineering. — 2013. Vol. 72. — № 20. — P.1899–1913.

[6] *Гордиенко Ю.Е.*, Основы высоколокальной СВЧ сенсорики / Ю. Е. Гордиенко, И. Н. Бондаренко, Я. И. Лепих, А. М. Проказа // Сенсорна електроніка і мікросистемні технології. — 2014. — Т. 11, № 4. — С. 18–26.

[7] *Anlage S. M.* Principles of near-field microwave microscopy / S. M. Anlage, V. V. Talanov, A. R. Schwartz // Scanning probe microscopy. Electrical and electro-mechanical phenomena at the nanoscale. — 2007. — Vol. I. — P. 215–253.

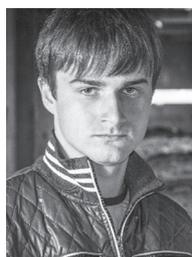
Поступила в редколлегию 23.09.2015



Гордиенко Юрий Емельянович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник кафедры микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: СВЧ диагностика материалов, сред и объектов; сканирующая микроволновая микроскопия проводников, полупроводников и диэлектриков, СВЧ модификация полупроводниковых материалов.



Левченко Андрей Владимирович, инженер 1-й категории кафедры микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: СВЧ модификация полупроводниковых материалов, микро- и нанoeлектроника.



Щербак Евгений Леонидович, аспирант кафедры микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: СВЧ модификация полупроводниковых материалов, микро- и нанoeлектроника.

УДК 537.533.35

Вплив зазору між зондом і об'єктом на високолокальний скануючий НВЧ нагрів матеріалів / Гордиенко Ю. О., Левченко А. В., Щербак Е. Л. // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. — 2015. — Том 15. — № 3. — С. 240–245.

В роботі досліджуються особливості впливу повітряного зазору при локальному НВЧ розігріві напівпровідникових і діелектричних матеріалів. Дослідження здійснюються теоретично за результатами чисельного спільного розв'язання рівнянь Максвелла і теплопровідності для системи, що містить локальний НВЧ зонд, який взаємодіє з об'єктом через повітряний зазор. Випромінювання зонда має ближньопольовий характер, специфічний для скануючої мікрохвильової мікроскопії. Показано, що кінетика і локальність встановлення температури в об'єкті істотно залежать від величини зазору в діапазоні його значень, порівнянних з перетином вістря зонда. При сферичній формі вістря зазор більш суттєво послаблює нагрів, практично не впливаючи на його делокалізацію.

Ключові слова: НВЧ, нагрів, напівпровідник, діелектрик, технологія, теорія, мікроелектроніка, поле, температура, локальність, зонд, модифікація, зазор.

Л.: 06. Бібліогр.: 07 найм.

UDC 537.533.35

Influence of a gap between a probe and an object on highlocalized scanning microwave heating of materials / Gordienko Yu.Ye., Levchenko A.V., Csherbak Ye.L. // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. — 2015. — Vol. 14. — № 3. — P. 240–245.

This paper investigates the features of the air gap influence at the local microwave heating of semiconductor and dielectric materials. Studies are carried out theoretically by the results of numerical joint solutions of thermal conductivity and Maxwell's equations for a system containing a local microwave probe that interacts with an object through an air gap. The radiation of the probe has a near-field nature that is specific for scanning microwave microscopy. It is shown that the kinetics and temperature establishment localization in the object substantially depend on the size of the gap between its values that are comparable with the cross section of the probe tip. Using the spherical shape of the tip the gap weakens the heating significantly, almost without affecting its delocalization.

Keywords: microwave, heating, semiconductor, dielectric, technology, theory, microelectronics, field, temperature, locality, probe, modification, gap.

Fig.: 06. Ref.: 07 items.