

ВЫСОКОЛОКАЛЬНЫЙ СВЧ НАГРЕВ ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

Ю.Е. ГОРДИЕНКО, Д.А. ПОЛЕТАЕВ, А.М. ПРОКАЗА, Н.И. СЛИПЧЕНКО

Предложены принципы осуществления высоколокального СВЧ нагрева полупроводниковых материалов с целью их сканирующего перелегирования, оксидирования, отжига и других термических модификаций, которые используются в микро- и нанотехнологиях. Показана возможность создания СВЧ ближнеполевого аппликатора на основе конусного коаксиального зонда. Проведены численные исследования пространственно-временного распределения температуры в области воздействия такого аппликатора в зависимости от электрофизических параметров полупроводникового материала и конструктива зонда.

Ключевые слова: СВЧ модификация, тепловыделение, конусный коаксиальный СВЧ зонд, апертура, аппликатор.

ВВЕДЕНИЕ

Применение энергии СВЧ электромагнитного поля для нагревания различных сред широко известно и всесторонне исследовано [1]. Как правило, перед разработчиками различных направлений практического использования этого метода стояли задачи обеспечения пространственно однородного СВЧ нагрева. Задача локализации возникала реже, например, при гипертермии опухолей, и имела макроразмерный характер. Микроразмерный разогрев может стать актуальным в интересах модификации микрообъектов и, в особенности при микро- и нанотехнологиях для микро- и наноэлектроники [2]. Практическая возможность микролокализации СВЧ нагрева появилась с разработкой ближнеполевых источников СВЧ излучения, в частности, для сканирующей микроволновой микроскопии [3, 4].

В работах [5] впервые экспериментально осуществлен СВЧ локальный разогрев различных материалов с целью сверления малоразмерных отверстий в них, а в [6] впервые показана возможность перелегирования кремния СВЧ локальным. Эти работы дают основание считать реальной перспективу использования указанных источников СВЧ излучения в технологии микро- и наноэлектроники. Однако, для достижения микронных и субмикронных локализаций СВЧ разогрева необходимо решать проблему оптимального тепловыделения и теплоотвода. Для этого необходима приемлемая теория метода, адаптированного к специфике ближнеполевых СВЧ излучателей с коаксиальной апертурой [7].

Целью данной работы является теоретическое исследование особенностей локализации СВЧ разогрева полупроводниковых и диэлектрических объектов на основе совместного решения электродинамической и тепловой задач для ближнеполевых источников СВЧ излучения с коаксиальной апертурой.

В задачи исследований входило:

- установление пространственного распределения энергии ближнего СВЧ поля коаксиально апертурных излучателей в зависимости от геометрии апертуры и электрофизических параметров полубесконечной среды;

- нахождение пространственно-временного распределения температуры в объекте при различных длительностях СВЧ воздействия.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Практика постановки и развития СВЧ томографии и сканирующей СВЧ микроскопии показала, что для достижения высокой локальности взаимодействия датчика с объектом исследования перспективно использовать так называемый ближнеполевой вывод зондирующего СВЧ излучения. Физическая природа такого вывода не является волновой, в связи с чем локализация не ограничивается принципом Аббе. Наиболее эффективными ближнеполевыми СВЧ зондами оказались коаксиальные структуры с открытым торцом и центральным проводником, заканчивающимся острием. Локальность такого зонда определяется сечением острия и слабо зависит от диаметра наружной части коаксиала.

В работах по микроволновой микроскопии обоснована целесообразность использования конусных коаксиальных зондов [8]. На рис. 1 схематично изображен такой зонд, который может также использоваться для высоколокальных СВЧ воздействия на различные объекты. Подчеркнем, что конусность коаксиала в этом применении позволяет согласовать СВЧ источник с объектом в широком частотном диапазоне, а также в диапазоне возможных изменений электрофизических параметров объекта.

Электродинамическое функционирование такого зонда в деталях обсуждалось в цитированных выше статьях. Применительно к поставлен-

ным в данной работе задачам необходимо исследовать его функционирование как нагревателя. Теоретические аспекты могут охватывать физику процессов СВЧ тепловыделения и установления распределения температуры в объекте, а также количественные оценки зависимости этих процессов от параметров СВЧ зонда и электрофизических свойств объекта.

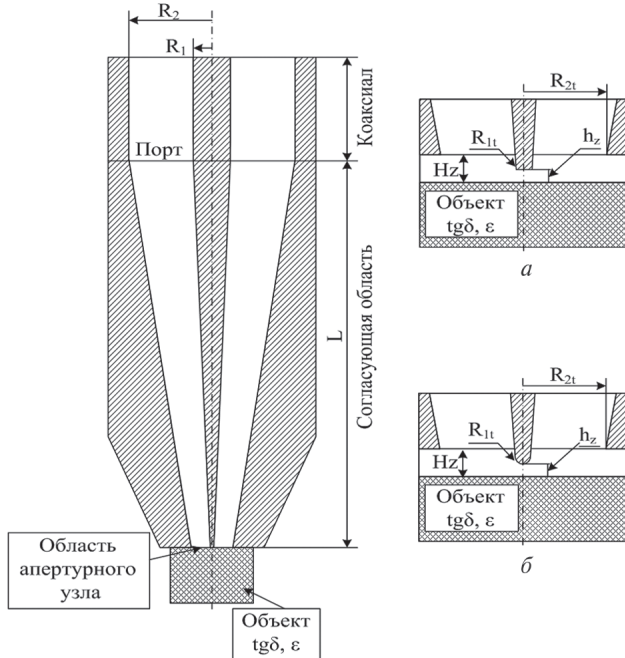


Рис. 1. Схематическое изображение конусного коаксиального излучателя и его апертурного узла с различной формой острия: а — плоское; б — сферическое

Ввиду сложности аналитического описания такой системы теоретические исследования возможны только лишь численными методами.

В частности, исходя из осесимметричности геометрии зонда и целесообразности его работы на низшем типе волны в питающей и согласующих частях коаксиала, электродинамическое моделирование СВЧ поля во всей системе может базироваться на аналитической формулировке в виде следующей записи уравнений Максвелла:

$$\frac{\partial E_r}{\partial t} = (\epsilon\epsilon_0)^{-1} \left(\frac{\partial H_\phi}{\partial z} + \sigma E_r \right); \quad (1)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = (\epsilon\epsilon_0)^{-1} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial(rH_\phi)}{\partial r} - \sigma E_z \right); \quad (2)$$

$$\frac{\partial H_\phi}{\partial t} = (\mu\mu_0)^{-1} \left(\frac{\partial E_z}{\partial r} - \frac{\partial E_r}{\partial z} \right), \quad (3)$$

где ϵ_0 и μ_0 — диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума; E_r , H_r , E_z , H_z — напряженности СВЧ поля в свободном пространстве и исследуемой среде.

Для нахождения пространственно-временного распределения СВЧ поля в объекте под зондом, необходимо учитывать следующие граничные условия.

На проводящих стенках коаксиального волновода:

$$E_\tau(R_{ст}, z) = \frac{1+j}{\sigma\delta_{ст}} [\vec{H}, \vec{n}_0];$$

$$[\vec{H}, \vec{n}_0] = \vec{J}_s, \quad (4)$$

где E_τ — тангенциальная составляющая напряженности СВЧ электрического поля; $\vec{J}_s$ — вектор поверхностной плотности тока; $\vec{n}_0$ — вектор нормали к границе;

На границе «свободное пространство — полупроводник»:

$$E_{1n} = \epsilon_2 E_{2n}; \quad E_{1\tau} = E_{2\tau};$$

$$[\vec{n}_0, (\vec{H}_1 - \vec{H}_2)] = \sigma \vec{E}_2 = \omega \epsilon \epsilon_0 \operatorname{tg} \delta \vec{E}_2, \quad (5)$$

где ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость; σ — удельная электропроводимость материала стенок; $\delta_{ст}$ — глубина скин-слоя в стенках.

Для расчета тепловых процессов в объекте, подвергаемом локальному СВЧ воздействию, необходимо решать нестационарное уравнение теплопроводности с тепловыми источниками, которые распределяются в нем исходя из решения предыдущей электродинамической задачи. С учетом осесимметричности рассматриваемой модели это уравнение имеет вид:

$$c\rho \frac{\partial T(r, z)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\lambda r \frac{\partial T(r, z)}{\partial r} \right] +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda \frac{\partial T(r, z)}{\partial z} \right] + q(r, z, t), \quad (6)$$

где $T(r, z)$ — искомое пространственное распределение температуры в объеме; c — удельная теплоемкость материала объекта; λ — коэффициент теплопроводности; ρ — его удельная плотность; $q(r, z, t)$ — удельная мощность тепловых источников.

При решении этого уравнения на границах объекта должны выполняться условия:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{\text{гр}} = -\frac{\alpha}{\lambda} (T_{\text{пов}} - T_{\text{о.ср}}), \quad (7)$$

где α — коэффициент теплопередачи поверхности объекта; $T_{\text{пов}}$ — температура поверхности объекта; $T_{\text{о.ср}}$ — температура окружающей среды.

Удельная мощность тепловыделения источников выражается соотношением:

$$q(r, z, t) = \sigma (E_r^2 + E_z^2). \quad (8)$$

В общем случае параметры ϵ , σ , $\operatorname{tg} \delta$, c , λ , α могут зависеть как от координат, так и от температуры. При исследовании процессов локального СВЧ теплового воздействия следует выделять их температурную зависимость, влияние которой может проявляться в так называемом режиме с обострением [9, 10].

Однако в общем виде подобная задача оказывается сложной даже при постановке об-

щего направления решения. Поэтому на первом этапе будем исключать как пространственную, так и временную зависимость этих параметров. Ограничимся только установлением особенностей пространственно-временного распределения температуры в объекте с учетом неоднородного тепловыделения. Важным проявлением этих особенностей, исходя из практических задач, следует считать минимизацию локальности нагрева и достижимость заданного диапазона температуры. Очевидно, что локализация нагрева в первую очередь определяется локализацией источников и нивелируется теплопроводностью. Скорость увеличения температуры максимальна в области источников и контролируется произведением ($c \cdot \rho$). Однако, в связи с высокой локализацией источников и неоднородностью их распределения от центра к периферии необходима количественная детализация этих процессов для понимания возможного направления решения указанных выше практических задач. Учитывая недостаточность исследований по локализации СВЧ поля до микронного и субмикронного масштаба и решению тепловых задач для таких областей, в данной работе выполнены численные исследования путем совместного решения уравнений (1–3, 6) методом конечных элементов [11].

2. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ

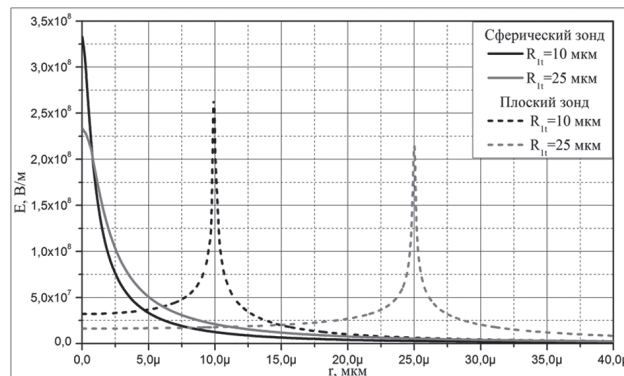
Из соотношения (8) следует, что распределение тепловых источников при исследуемом локальном СВЧ нагреве одновременно определяется пространственно-временным распределением СВЧ поля в объекте под воздействием на него зондом, так и электрофизическими параметрами ϵ и $\operatorname{tg} \delta$ материала объекта в этой области. Параметр $\operatorname{tg} \delta$ в смысле влияния его величины на сканирование является более общим по сравнению с удельной электропроводностью σ . Он позволяет учитывать как разогрев материала за счет СВЧ колебаний решетки, так и за счет повышения энергии свободных носителей заряда

$$\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \delta_{\text{реш}} + \frac{\sigma}{\omega \epsilon \epsilon_0} . \quad (9)$$

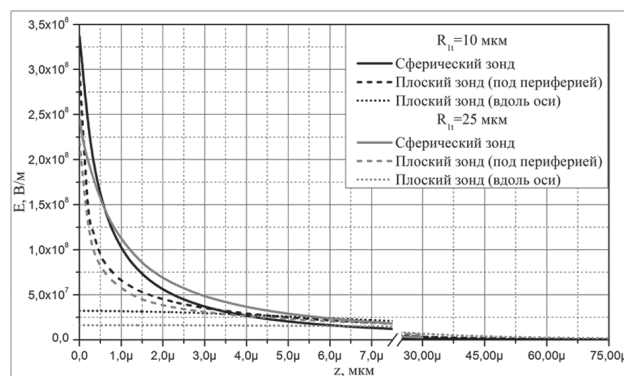
Из работ по исследованию распределения поля в апертуре наиболее высоколокальных трехмерных СВЧ излучателей коаксиального типа [12] известно, что его характер существенно зависит от формы острия апертурно образующего центрального проводника коаксиала. Это физическое обстоятельство обуславливает значительные отличия пространственного распределения соответствующих тепловых источников для различных зондов. Будем, как и в микроволновой микроскопии, условно характеризовать форму острия по доли сферичности и плоскостности при заданном значении радиуса $R_{\text{и}}$ сечения выходящего конца центрального проводника. Весь спектр ожидаемых распределений СВЧ поля бу-

дет располагаться между сферическим и плоским остриями.

На рис. 2 а, б приведено в сравнении для одинакового значения питающей СВЧ мощности распределение напряженности электрического СВЧ поля по поверхности объекта (а) и по его глубине вдоль оси зонда (б) при $\epsilon = 12$ и $\operatorname{tg} \delta = 0,1$ для двух значений радиуса острия.



а



б

Рис. 2. Сравнение распределения СВЧ электрического поля для различных форм острий зонда

Численные исследования выполнялись на частоте 8 ГГц для следующей геометрии зонда: $L = 81$ мм; $R_1 = 1,9$ мм; $R_2 = 8$ мм; $R_{\text{и}} = 10$ мкм и 25 мкм; $R_{\text{з}} = 600$ мкм; $h_z = 10$ мкм; $\epsilon = 12$; $\operatorname{tg} \delta = 0,1$.

Из представленных данных видно, что в случае сферического острия распределение поля близко к полусферическому, а в случае плоского острия существенно не сферическое (называемое нами «трубчатым»). Следовательно, для реальных острий распределение СВЧ поля нельзя считать сферическим.

На рис. 3 представлено влияние ϵ и $\operatorname{tg} \delta$ материала объекта на распределение СВЧ электрического поля зонда вдоль радиуса объекта (рис. 3, а) и вдоль его оси (рис. 3, б) при сферическом острии радиусом $R_{\text{и}} = 25$ мкм. Из него видно, что увеличение $\operatorname{tg} \delta$ ослабляет поле в объекте, как и увеличение диэлектрической проницаемости ϵ . Однако, проявление зависимости от $\operatorname{tg} \delta$ начинается только при $\operatorname{tg} \delta > 0,1$ и особенно усиливается при $\operatorname{tg} \delta > 1$. Для полупроводников при этом бу-

дет одновременно играть роль ослабление поля носителями заряда за счет потерь энергии на них и экранирования.

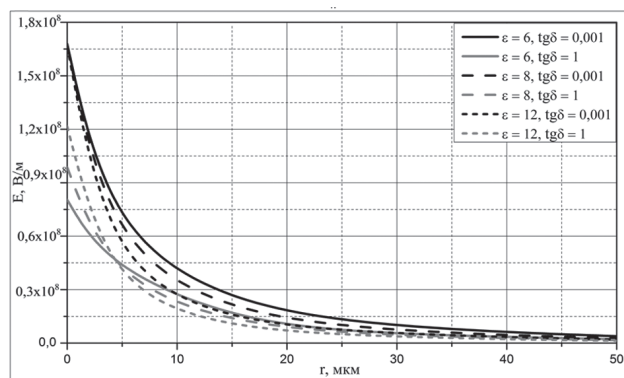
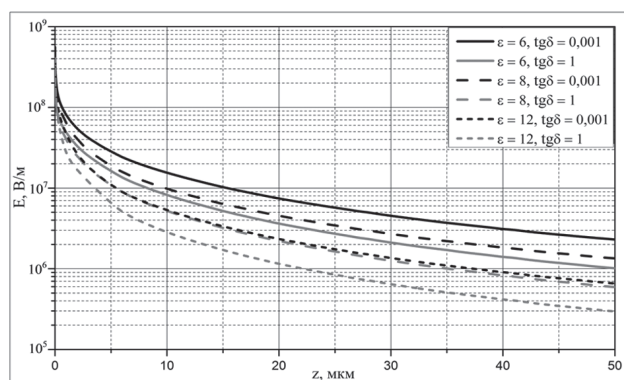


Рис. 3. Влияние параметров объекта на пространственное распределение СВЧ электрического поля зонда

Особенно сильно влияет на распределение поля зонда в области объекта величина зазора h_z . На рис. 4 показано это влияние при сферической форме острия зонда с $R_{1r} = 10$ мкм. В первую очередь это влияние проявляется в ослаблении поля по глубине (рис. 4, а). Влияние зазора на распределение поля в объекте ($z = +0$) по радиусу отражается только через общее его ослабление зазором (рис. 4, б).

Соответствующее этим особенностям распределение тепловых источников, создаваемых в объекте исследуемым СВЧ зондом с коаксиальной апертурой, представлено на рис. 5 и рис. 6.

Из них видно, что пространственное распределение тепловыделения качественно повторяет при различных $\text{tg}\delta$ (рис. 5) распределение СВЧ поля. Влияние $\text{tg}\delta$ проявляется количественно. Влияние радиуса и формы острия, как и должно следовать из соотношения (8) несет отпечаток зависимости поля E от этих параметров.

Следует обратить внимание на то, что при сферической форме острия уменьшение его сечения (R_{1r}) способствует увеличению тепловыделения по центру апертуры и уменьшения его периферии. Другими словами, локализация тепловыделения таким способом увеличивает одновременно энергетику в центре. Для плоской

формы острия это не характерно даже в “пиках” распределения поля.

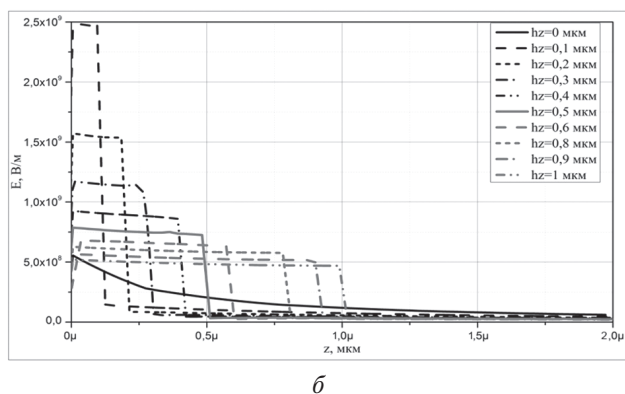
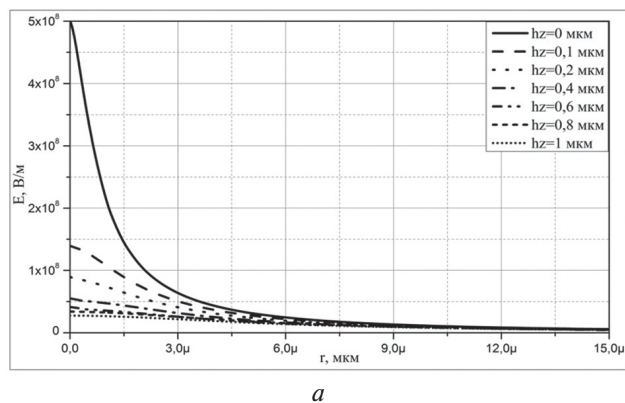


Рис. 4. Влияние величины зазора на пространственное распределение СВЧ поля

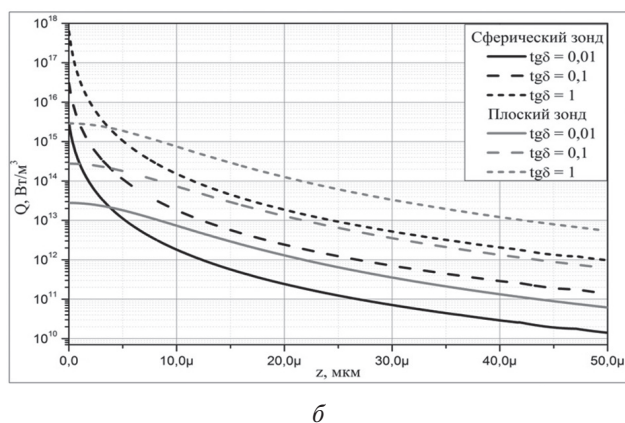
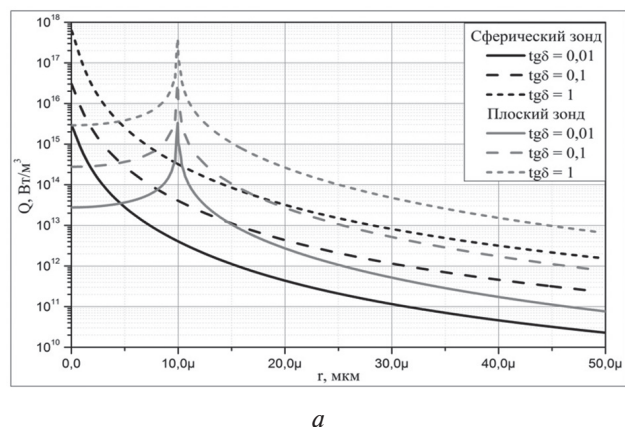
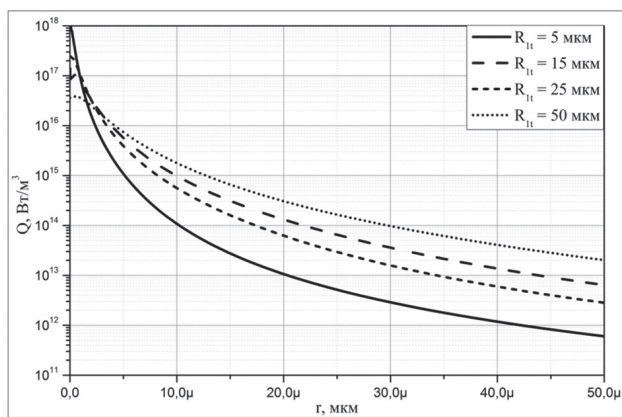
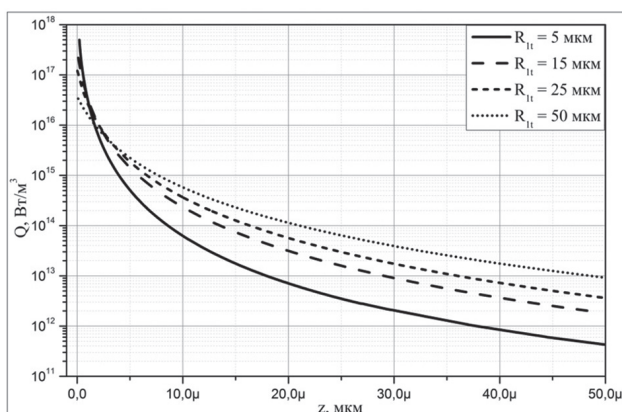


Рис. 5. Пространственное распределение СВЧ тепловыделения на поверхности объекта (а) и вдоль его оси (б) при различной форме острия



а



б

Рис. 6. Пространственное распределение тепловыделения на поверхности объекта (а) и вдоль его оси (б) в зависимости от радиуса сферического острия при $\epsilon = 12$ $\text{tg} \delta = 1$

3. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

Численное исследование процессов установления распределения температуры в объекте при локальном СВЧ воздействии зондом с коаксиальной апертурой осуществлено решением уравнения (6) при оговоренных граничных условиях. Соответствующие результаты иллюстрируют исследование пространственно-временного распределения температуры приведенными ниже рисунками.

Прежде всего представляет интерес исследовать динамику времени установления температуры в характерных точках объекта под зондом. Такими точками являются те, что относятся к предполагаемому максимуму температуры: $r = 0$; $z = 0$ для сферического острия и $r = R_{It}$; $z = 0$ для плоского острия. В этих точках, как показано выше, имеет место максимум тепловыделения. В точках $r = R_{It}$; $z = 0$ и $r = 0$; $z = R_{It}$ будут отражаться количественно временные особенности установления температуры за счет переноса выделенного в указанных выше точках тепла путем теплопроводности. Рис. 7, б показывает эти особенности и демонстрирует возможности определения соответствующих характеристических времен при использовании сферического острия

радиусом $R_{It} = 10$ мкм и параметров материала $\epsilon = 12$, $\text{tg} \delta = 0.1$.

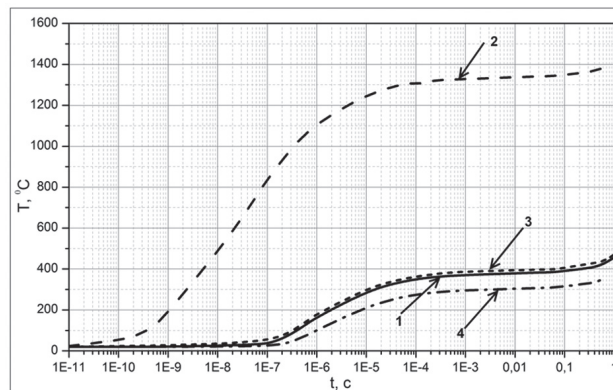
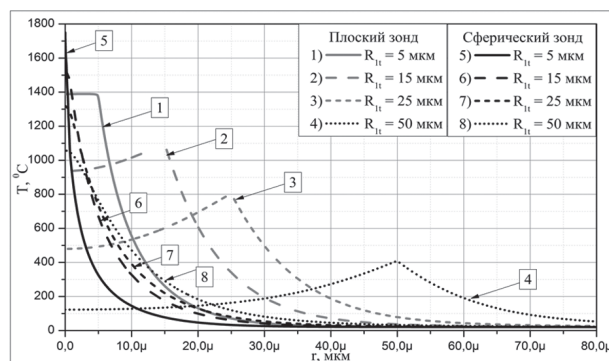
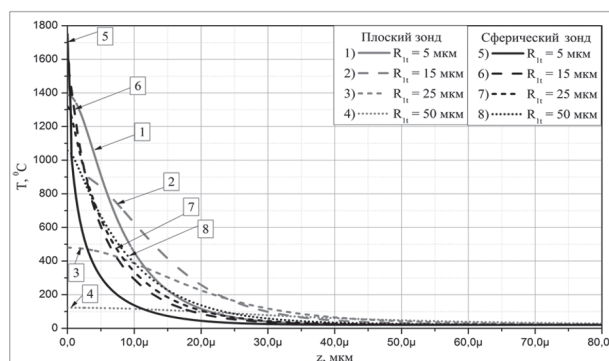


Рис. 7. Динамика установления пространственного распределения температуры в различных точках объекта 1) $r = 0$, $z = 10$ мкм; 2) $r = 0$, $z = 0$; 3) $r = 10$ мкм, $z = 0$; 4) $r = 10$ мкм; $z = 10$ мкм

Особенности пространственного распределения температуры представлены на рис. 8, а, б для сферической и плоской формы острия. Эти результаты получены при времени воздействия больше необходимого для установления динамического равновесия ($t = 1$ мкс). Для сферической формы острия размеры области нагрева существенно меньше зависят от радиуса R_{It} по сравнению с плоской формой. При этом для плоской формы характерно достижение менее высоких температур по сравнению со сферическим острием.



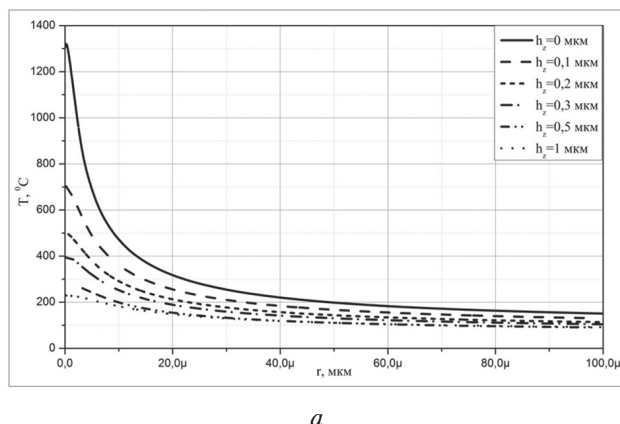
а



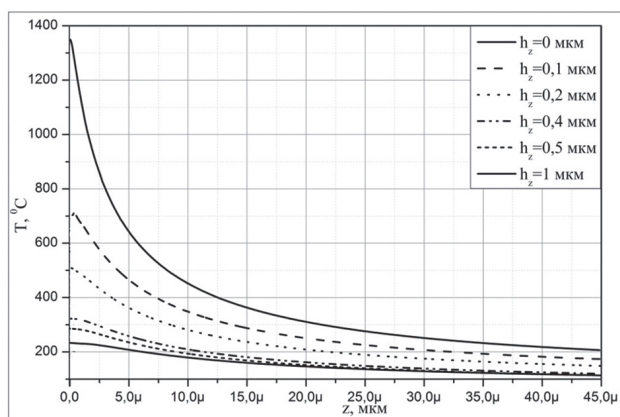
б

Рис. 8. Пространственное распределение температуры по поверхности объекта (а) и по его глубине вдоль оси (б) для различных значений радиуса сферического и плоского острия

Влияние величины зазора на распределение установившейся температуры, как и предполагалось выше, оказывается очень существенным уже в диапазоне от 0 до 1,0 мкм (рис. 9, а, б).



а



б

Рис. 9. Влияние зазора на распределение температуры вдоль радиуса объекта (а) и вдоль его оси (б)

При этом с увеличением зазора проявляется резкое снижение достигаемой температуры, как на поверхности, так и в объеме объекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований показана возможность создания на основе конусного коаксиального СВЧ зонда, свойства которого широко изучены, СВЧ ближнеполевого аппликатора для высоколокальной (менее 10 мкм²) модификации различных материалов в технологии микро- и нанoeлектроники. Представлено и проанализировано пространственно-временное распределение как тепловыделения ближнеполевого СВЧ излучения, так и установление температуры, вызванное его воздействием в зависимости от электрофизических параметров модифицируемого материала и геометрии зонда аппликатора.

Определены граничные температуры разогрева от 50 °С до 10⁴ °С, которые регулируются СВЧ мощностью от 10 до 10³ Вт разной длительности воздействия. Выбором длительности и

скважности импульса можно обеспечить оптимальный режим разогрева до нужной температуры без ухудшения локальности, которая определяется размерами и формой острия СВЧ аппликатора. Возможность работы в режиме “с обострением” по-видимому позволит повысить локальность модификации и снижение рабочей СВЧ мощности.

Литература

- [1] Диденко А.Н. СВЧ энергетика: Теория и практика // М.: Наука, 2003. — 446 с.
- [2] Thompson K., Booske J. H., Ives R.L., Lohr J., Gorelov Y., Kajiwaru K. Millisecond microwave annealing: Driving microelectronics nano // J. Vac. Sci. Technol. B 23 3, May/Jun 2005. — P. 970–977.
- [3] Anlage S.M., Talanov V.V., Schwartz A.R. Principles of Near-Field Microwave Microscopy // Scanning Probe Microscopy: Electrical and Electromechanical Phenomena at the Nanoscale, V. 1, SpringerVerlag, New York, 2007. — P. 215–253.
- [4] Гордієнко, Ю.О. Скануюча мікрохвильова мікроскопія як інтелектуальна вимірювальна система / Інтелектуальні вимірювальні системи на основі мікроелектронних датчиків нового покоління: монографія // за ред. Лепіха Я.І., Романова В.О. — Одеса: Астропринт, 2011. — С. 176–246.
- [5] 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.
- [6] Livshits P., Dikhtyar V., Anberg A., Shahadi A., Jerby E. Local doping of silicon by a point-contact microwave applicator // Microelectronic Engineering. — 2011. — Vol. 88. — P. 2831–2836.
- [7] Гордієнко Ю.О., Ларкін С.Ю., Ленков Я.І., Проценко В.О., Ваків М.М. Теоретичні аспекти моделювання та проектування резонаторних зондів для скануючої мікрохвильової мікроскопії // Сенсорна електроніка і мікросистемні технології, 2011, Т. 2 (8), № 3. — С. 97–107.
- [8] Гордиенко Ю.Е., Ларкин С.Ю., Яцкив А.М. Ближне-полевой СВЧ датчик на основе конусного коаксиального резонатора // Радиотехника: науч.-тех. сб. — Х.: ХНУРЭ, 2009. — Вып. 159. — С. 309–314.
- [9] Jerby E., Aktushev O., Dikhtyar V. Theoretical analysis of the microwave-drill near-field localized heating effect // Journal of Applied Physics. — 2004. — Vol. 97.
- [10] Meir Y., Salzberg A., Jerby E. Hotspot induced by low-power microwave drill — transistor-based localized heaters and their new applications // Proc. Ampere 13th Int'l Conf., Toulouse, France, 2011. — P. 201–204.
- [11] Банков С.Е., Курушин А.А. Электродинамика и техника СВЧ для пользователей САПР // М., 2008. — 276 с.
- [12] Gordienko Yu.E., Larkin S.Yu., Prokaza A.M. Quantitative estimation of physical processes at a contactless scanning microwave microscopy // Telecommunications and Radio Engineering, 2012. Vol. 71, № 3. — P. 265–276.

Поступила в редколлегию 26.07.2013



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.



Полетаев Дмитрий Александрович, кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры радиофизики и электроники Таврического национального университета имени В.И. Вернадского, Симферополь. Научные интересы: численное моделирование физических процессов, микроволновая диагностика, СВЧ влагометрия и диагностика параметров биообъектов, радиоэлектроника, микроконтроллерные комплексы, нанoeлектроника и нанотехнологии, взаимодействие мощных электромагнитных полей со слоистыми структурами и полупроводниковыми элементами, биосенсорика, биофизика, энергосберегающие технологии и альтернативные источники энергии.



Проказа Александр Михайлович, аспирант кафедры микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: сканирующая микроволновая микроскопия проводников, полупроводников и диэлектриков, СВЧ модификация полупроводниковых материалов, микро- и нанoeлектроника.



Слипченко Николай Иванович — доктор физико-математических наук, профессор кафедры микроэлектроники, электронных приборов и устройств, проректор по научной работе ХНУРЭ. Научные интересы: СВЧ диагностика материалов, сред и объектов; сканирующая микроволновая микроскопия проводников, полупроводников и диэлектриков, солнечная энергетика и технологии.

УДК 537.533.35

Високолокальний НВЧ нагрів напівпровідників і діелектриків / Ю.О. Гордієнко, Д.О. Полетаєв, О.М. Проказа, М.І. Сліпченко // Прикладна радіoeлектроніка: наук.-техн. журнал. — 2013. — Том 12. — № 3. — С. 452—458.

У статті запропоновано принципи здійснення високолокального НВЧ нагріву напівпровідникових матеріалів з метою їх скануючого перелегування, оксидування, відпау та інших термічних модифікацій, які використовуються в мікро- і нанотехнологіях. Показано можливість створення НВЧ ближньопольового аплікатора на основі конусного коаксialного зонда. Проведено чисельні дослідження просторово-часового розподілу температури в області дії такого аплікатора в залежності від електрофізичних параметрів напівпровідникового матеріалу та конструктиву зонда.

Ключові слова: НВЧ модифікація, тепловиділення, конусний коаксialний НВЧ зонд, апертура, аплікатор.

Л.: 9. Бібліогр.: 12 найм.

UDC 537.533.35

Highly localized microwave heating of semiconductors and dielectrics / Yu.E. Gordienko, D.A. Poletaev A.M. Prokaza, N.I. Slipchenko // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. — 2013. — Vol. 12. — № 3. — P. 452—458.

The paper suggests some principles of realizing highly localized microwave heating of semiconductor materials with the aim of their scanning realloying, oxidizing, annealing and other thermal modifications that are used in micro- and nanotechnologies. A possibility of creating a near-field microwave applicator on the basis of a tapered coaxial microwave probe is shown. Numerical studies of space-time temperature distribution in the area of influence of such an applicator depending on electrophysical parameters of a semiconductor material and the probe design are given.

Keywords: microwave modification, heat generation, tapered coaxial microwave probe, aperture, applicator.

Fig. 9. Ref.: 12 items.