

**ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ  
ТЕОРИИ ВЫСОКОЛОКАЛЬНОГО СКАНИРУЮЩЕГО СВЧ НАГРЕВА  
ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ**

**Ю. Е. Гордиенко, Е. Л. Щербак, А. В. Левченко**

*Харьковский национальный университет радиоэлектроники,  
Украина*

Поступила в редакцию 07.09.2015

В работе развиты предшествующие теоретические и экспериментальные исследования локального СВЧ нагрева полупроводников, диэлектриков и биообъектов. В результате сформулированы положения, оценивающие зависимость кинетики и локальности нагрева от длительности воздействующего СВЧ импульса, термодинамических характеристик объекта и геометрии острия СВЧ зонда. Показано, что при сферической форме острия локальность установления температуры в приповерхностной области объекта под СВЧ зондом характеризуется малоизменяющимся микронным объемом (порядка  $1 \text{ мкм}^3$ ) при радиусе сферы от 1 до примерно 100 мкм. При радиусе сферы менее 1 мкм локальность становится субмикронной и улучшается с уменьшением радиуса. Длительность воздействия слабо влияет на локальность при сферической форме острия. При острие конической формы имеет место прямая зависимость локальности от радиуса острия и существенна делокализация с увеличением длительности воздействия. Отдельно представлены зависимости кинетики от физических параметров объекта.

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

**ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ  
ТЕОРІЇ ВИСОКОЛОКАЛЬНОГО СКАНУЮЧОГО НВЧ НАГРІВУ  
НАПІВПРОВІДНИКІВ І ДІЕЛЕКТРИКІВ**

**Ю. О. Гордієнко, Є. Л. Щербак, А. В. Левченко**

У роботі розвинуті попередні теоретичні та експериментальні дослідження локального НВЧ нагріву напівпровідників, діелектриків та біооб'єктів. У результаті сформульовані положення які оцінюють залежність кінетики та локальності нагріву від тривалості впливу НВЧ імпульсу, термодинамічних характеристик об'єкта та геометрії вістря НВЧ зонду. Показано, що при сферичній формі вістря локальність встановлення температури у приповерхневій області об'єкта під НВЧ зондом характеризується малозмінним мікронним об'ємом (порядку  $1 \text{ мкм}^3$ ) при радіусі сфери від 1 до, приблизно, 100 мкм. При радіусі сфери менше 1 мкм локальність стає субмікронною та покращується зі зменшенням радіуса. Тривалість впливу слабо впливає на локальність при сферичній формі вістря. При вістрі конічної форми має місце пряма залежність локальності від радіуса вістря та суттєва делокалізація зі збільшенням тривалості впливу. Окремо представлені залежності кінетики від фізичних параметрів об'єкта.

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

**BASIC PROVISIONS  
OF THE HIGH LOCAL SCANNING MICROWAVE HEATING  
OF SEMICONDUCTORS AND DIELECTRICS THEORY**

**Yu. Ye. Gordienko, Ye. L. Csherbak, A. V. Levchenko**

In this work, the previous theoretical and experimental researches of local microwave heating of semiconductors, dielectrics and biological objects are improved. As a result, the provisions evaluating the dependence of the kinetics and local heating from duration of microwave pulse, the thermodynamic characteristics of the object and the geometry of the tip of the microwave probe

are set forth. It is shown that with the spherical shape of the tip the localization of the temperature setting in the surface region of the object under the microwave probe is characterized by a small change in volume of a micron (about  $1 \text{ mcm}^3$ ) with a radius of the sphere from 1 to about 100 microns. With a radius of less than 1 micron the sphere localization becomes submicron sized and improves with decrease in the radius. The duration of exposure has little effect on the localization if the edge has a spherical shape. With the tip of the conical shape there is a direct dependence of the localization from the radius of the tip and significant delocalization with increase of the exposure duration. Separately the dependences of kinetics from the physical parameters of the object are presented.

**Keywords:** microwave, heating, semiconductors, dielectrics, technology, theory, microelectronics field, temperature, locality, probe, modification.

## ВВЕДЕНИЕ

СВЧ нагрев диэлектриков и биообъектов используется уже давно и стал основой развития отдельной области науки и техники, известной как СВЧ энергетика. Важнейшей ее особенностью является практически безынерционное выделение тепла в объекте электромагнитным полем, введение которого не требует специального конфигурирования объекта. Объемный характер нагрева как правило, представляется также важным преимуществом перед обычной передачей тепла от внешнего нагревателя.

Нагреваемые в СВЧ энергетике объемы соизмеримы с длиной волны излучения. Более локальный нагрев не становится востребованным до тех пор, пока не возникает необходимость решения специальных технологических задач [1], связанных с малоразмерной тепловой обработкой.

Впервые локальный СВЧ нагрев начал систематически разрабатываться группой израильских исследователей, в первую очередь, для сверления миллиметровых отверстий в кремнии [2]. Стало очевидным, что это направление имеет широкую перспективу.

Нами [3, 4, 5] задекларировано, что высоколокальный СВЧ нагрев может стать основой развития зондовых сканирующих СВЧ микротехнологий, подобных зондовым туннельным, атомным и ионным технологиям [6].

Для оценки перспективы СВЧ зондовых технологий необходимо располагать рабочими гипотезами, основанными на количественных теоретических и экспериментальных исследованиях. Примером таких исследований являются уже цитированные работы [2–5]. Однако, в них еще не ставились

конкретно задачи высокой локальности, например, необходимой для формирования микро- и наноструктур.

Поэтому целью данной работы является развитие указанных исследований в направлении создания теоретической базы физического проектирования высоколокальных зондовых СВЧ технологий. В первую очередь, при этом планируется системно, количественно описать влияние физико-электрических параметров объектов на локальность СВЧ зондового нагрева. Кроме того, необходимо установить влияние зазора между зондом и объектом на установление температуры и ее распределение по объекту. Важно также количественно охарактеризовать влияние временного режима СВЧ питания на кинетику СВЧ разогрева.

## ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Как и в предыдущих работах модель исследуемой физико-технической системы строится на основе конического коаксиального нерезонансного зонда с апертурой на узком открытом торце и СВЧ возбуждением со стороны закороченного широкого торца (рис. 1а). СВЧ электромагнитное поле имеет в отличие от работ [2] эванесцентный характер. Поэтому его проникновение в объект пространственно соизмеримо с геометрией конца острия (рис. 1б), образуемого центральным проводником коаксиала (рис. 1б), а излучением (бегущей волной) в объекте можно пренебрегать в количественных оценках.

Необходимое для установления искомых зависимостей распределение СВЧ поля в объекте во всех случаях находится из

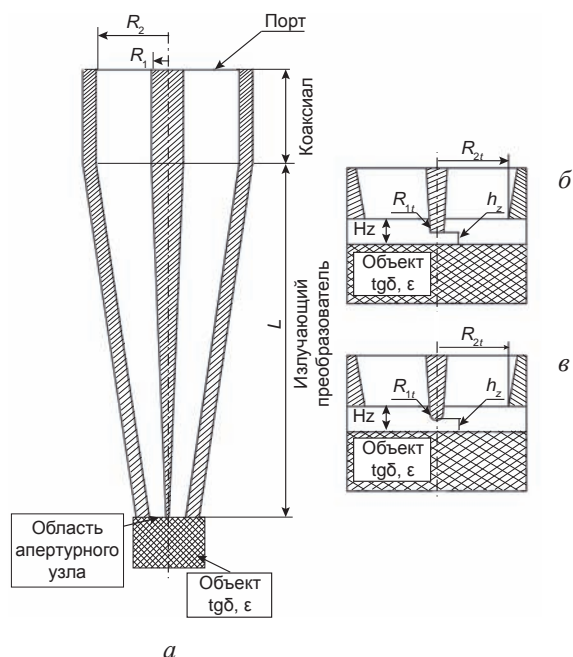


Рис. 1. Схематичные изображения конусного коаксиального излучателя *a* и апертурного узла с различными типами острия: *б* — коническим; *в* — сферическим

решения уравнений Максвелла прямым численным методом, основанном на стандартном методе конечных разностей [3]. Эти уравнения, с учетом осесимметричности модели, имеют следующий вид

$$\frac{\partial E_{ri}}{\partial t} = (\epsilon\epsilon_0)^{-1} \left( \frac{\partial H_{\phi i}}{\partial z} + \sigma_i E_{ri} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial E_{zi}}{\partial t} = (\epsilon_i\epsilon_0)^{-1} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial (rH_{\phi i})}{\partial r} - \sigma E_{zi} \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial H_{\phi i}}{\partial t} = (\mu_i\mu_0)^{-1} \left( \frac{\partial E_{zi}}{\partial r} - \frac{\partial E_{ri}}{\partial z} \right), \quad (3)$$

где  $\epsilon_0$  и  $\mu_0$  — диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума;  $E_{ri}$ ,  $E_{zi}$ ,  $H_{\phi i}$  — напряженность СВЧ поля в свободном пространстве и в различных частях электродинамической структуры;  $\epsilon_i$  и  $\mu_i$  — диэлектрическая и магнитная проницаемости материала заполнения;  $\sigma_i$  — электропроводность заполнения;

Для решения тепловой задачи необходимо использовать нестационарное уравнение теплопроводности.

$$C\rho \frac{\partial T(r, z)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda r \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial z} \right) + q(r, z, t), \quad (4)$$

где  $C$  — удельная теплоемкость материала объекта;  $\lambda$  — коэффициент его теплопроводности;  $\rho$  — удельная плотность материала;  $q(r, z, t)$  — удельная мощность СВЧ тепловыделения.

Однако, перед тем как приступить к расчету тепловых процессов необходимым условием является расчет тепловых источников, распределенных в объекте исходя из решения электродинамической части задачи. Удельная мощность этих источников выражается следующим образом

$$q(r, z, t) = \sigma(E_r^2 + E_z^2). \quad (5)$$

Численное решение базируется на самосогласованном решении приведенных систем уравнений с учетом граничных условий. Более подробно методика решения задачи рассматривалась ранее в нашей работе [3]. Подтверждением полученных данных является сравнение результатов с уже имеющимися данными полученными в пакете COMSOL Multiphysics.

Все численные исследования проводились на рабочей частоте 8 ГГц и мощности 50 Вт при следующей геометрии СВЧ зонда  $R_1 = 1,9$  мм,  $R_2 = 8$  мм,  $R_{1t} = 10$  мкм,  $R_{2t} = 600$  мкм.

Электрофизические параметры объекта в силу общей постановки задачи выбирались без привязки к конкретному материалу. Важным было определить физическую тенденцию зависимостей.

Установление влияния зазора между зондом и объектом на процессы в системе имеет принципиальный и практический характер. Принципиальный в силу значительных изменений этих процессов с изменением зазора. Практический, в связи с возникающей по ряду причин необходимости тепловой изоляции острия от объекта. Из предыдущих многочисленных исследований по сканирующей микроволновой микроскопии (СММ) известно, что для СВЧ зондов такого типа и эванисцентного

режима его работы основные изменения поля в зависимости от зазора между зондом и объектом имеют место при величине зазора меньше 2–5 мкм. Поэтому исследования осуществлялись в этом диапазоне значений.

Режим СВЧ питания практически может варьироваться с помощью отдельного устройства (рис. 2). Теоретически для обоснования его выбора необходимо в деталях количественно исследовать кинетику установления температуры в объекте и изменение ее пространственного распределения. Из физических представления следует предполагать, что в кинетике нарастания температуры при импульсном включении СВЧ питания будет существовать два участка, характеризующихся различной скоростью.

Начальный участок с быстрым нарастанием который формируется влиянием теплоемкости материала объекта его удельного веса, и участок медленного нарастания, который контролируется теплопроводностью материала.

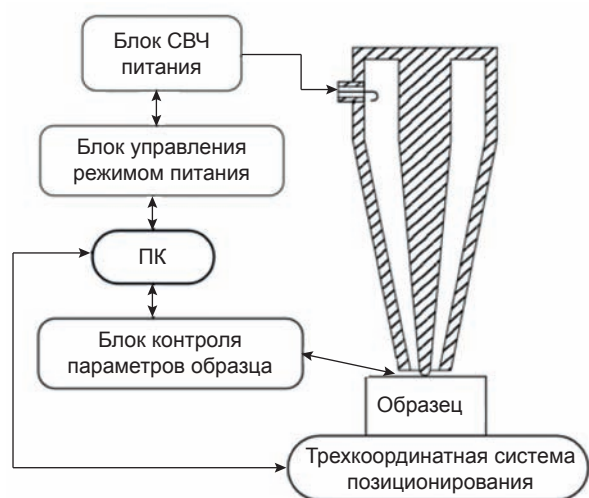


Рис. 2. Функциональная схема основных узлов СВЧ микромодификатора

В кинетике спада температуры процесс контролируется теплоемкостью и теплопроводностью. Высокая локальность нагрева наложит специфику на кинетику установления температуры, до сих пор мало изученную. При ее исследовании важно сходиться из задачи поддержания заданной температуры в течении необходимого времени как это обсуждалось в [5].

## КИНЕТИКА УСТАНОВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Большая часть особенностей локального СВЧ нагрева может проявляться при исследовании кинетики установления температуры в характерных точках разогреваемого объема. Такие точки в первую очередь связаны с геометрией СВЧ зонда и определяются через распределение СВЧ поля. Предшествующие исследования [5] показали, что это распределение зависит от геометрии острия зонда. Для сферической формы СВЧ поле сильно локализуется под центром острия. Для конического (с формой усеченного конуса), наоборот, под периферией. Под центром поле стремится к нулю по мере увеличения радиуса острия. Поэтому, для сферической формы острия характерными точками являются центр острия ( $r = 0$ ); для конического следует отдельно рассматривать процессы разогрева под центром ( $r = 0$ ) и на периферии ( $r = R_{t1}$ ). Для обеих разновидностей формы острия СВЧ поле проникает вглубь объекта на расстояние сравнимое с радиусом острия. При сферическом острие на меньшую глубину.

На рис. 3 приведены результаты численного теоретического исследования кинетики высоколокального СВЧ нагрева поверхностной микрообласти полубесконечных объектов с помощью зондов со сферической и конусной формой острия при  $R_{t1} = 10$  мкм. Материал объекта взят с  $\rho = 2330$  кг/м<sup>3</sup>,  $\varepsilon = 11,7$ ,  $\text{tg}\delta = 1$ .

Из представленных графиков видно, что разогрев сферическим острием на начальном этапе происходит на порядок быстрее, чем разогрев коническим острием. При длительности разогрева превышающей характерное для фронта время, ситуация изменяется на обратную, однако, скорость нагрева существенно уменьшается в обоих случаях.

Кинетика нагрева при обеих формах острия сильно зависит от теплопроводности ( $\lambda$ ) материала объекта и в меньшей степени от его теплоемкости ( $C$ ). Полученные данные хорошо интерпретируются известными физическими представлениями и интересны, в первую очередь, своими количественными соотношениями. Отдельно следует отметить, что для сферической формы острия характерно не только увеличение пространственной

локализации нагрева, а и его ускорение более чем на порядок величины. Достижимая температура при этом сравнима на фронте нарастания и существенно выше для конической формы при длительном (более 1 с) нагреве.

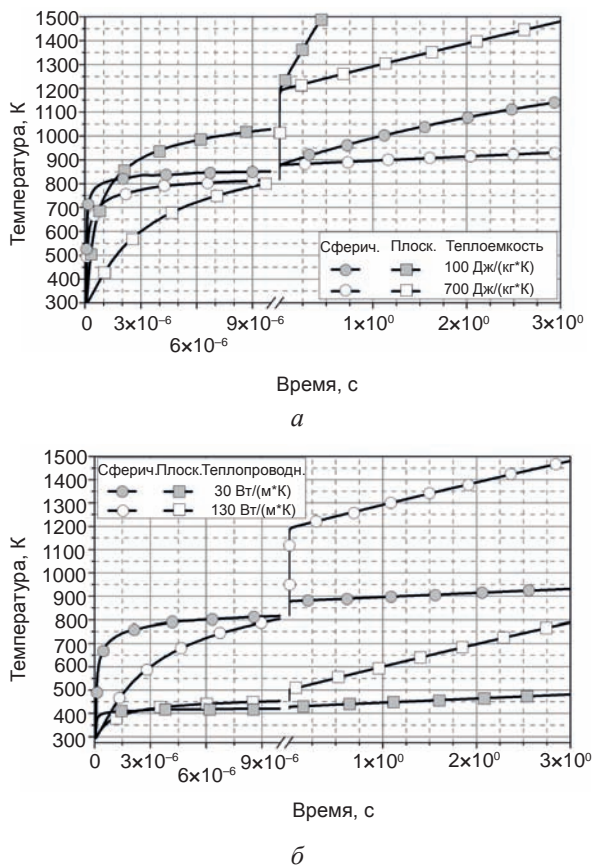


Рис. 3. Кинетика установления температуры в точке  $z = 0$  при различной форме острия и в зависимости от теплоемкости и теплопроводности материала объекта

### ЛОКАЛЬНОСТЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Как уже отмечалось, локализация СВЧ нагрева в первую очередь определяется поперечным сечением острия в области его контакта с объектом, а также формой острия. Следует также предполагать ее зависимость от длительности нагрева.

На рис. 4 приведены зависимости распределения температуры на поверхности объекта под сферическим острием при различном значении длительности нагрева. Учитывая осесимметричность острия здесь и далее эти зависимости приводятся в виде распределения по радиусу при  $r > 0$ . Из них видно, что потери локальности по поверхности при сферическом острие не возрастают катастрофически при увеличении

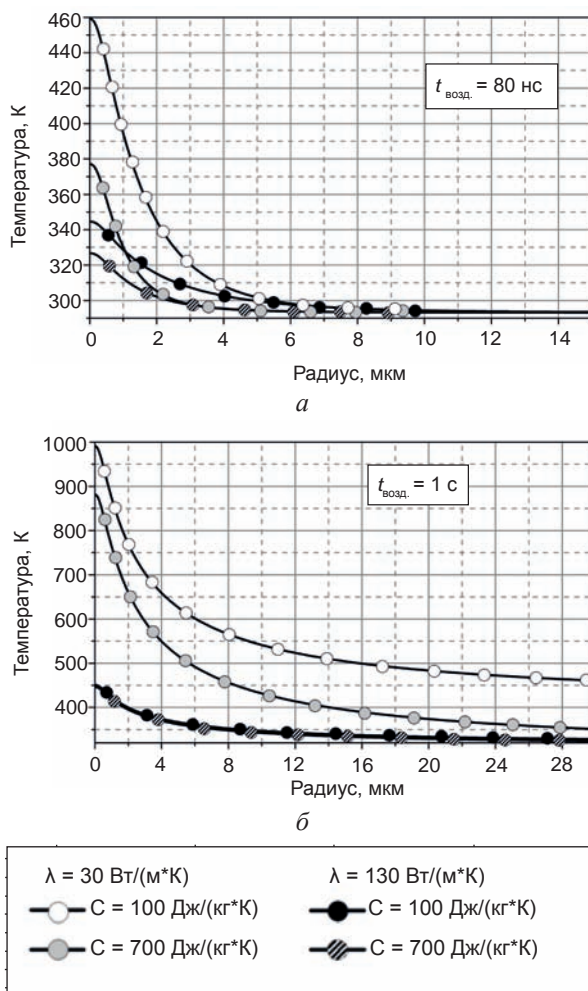


Рис. 4. Распределение температуры по поверхности при различной длительности СВЧ нагрева в зависимости от теплоемкости и теплопроводности материала объекта

длительности нагрева на несколько порядков (от  $10^{-7}$  до 1,0 с). При этом в несколько раз возрастает достижимая температура под острием. Однако, ее величина существенно уменьшается с увеличением теплопроводности материала объекта. Влияние теплоемкости имеет место, но менее значительно в количественном отношении. Теплопроводность материала существенно влияет на величину температуры нагрева.

Локализация по глубине для сферического острия также не сильно изменяется при вариации длительности нагрева (рис. 5).

В целом, для сферического острия характерна также слабая зависимость локальности взаимодействия острия с образцом по поверхности и глубине от величины радиуса острия. В диапазоне его изменения от 5 до 50 мкм локализация поля в объекте

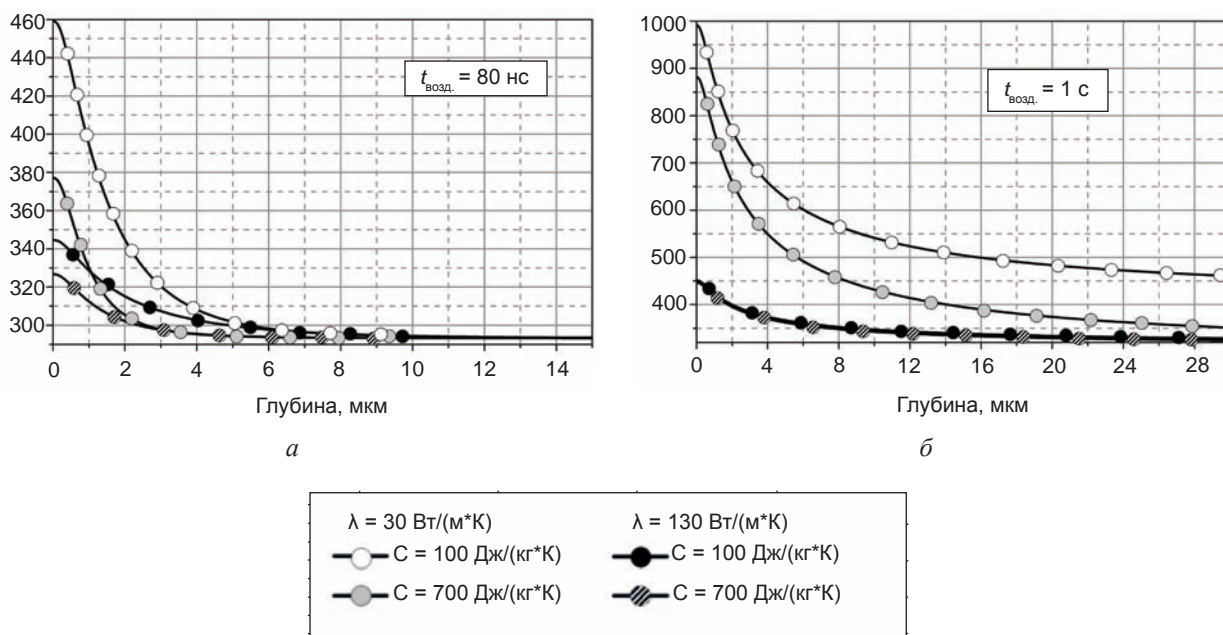


Рис. 5. Распределение температуры по глубине при различной длительности СВЧ нагрева в зависимости от теплоемкости и теплопроводности материала объекта

оказывается близка к  $1 \text{ мкм}^3$ . При уменьшении  $R_{1r} < 1 \text{ мкм}$  локальность улучшается становя менее  $1 \text{ мкм}^3$ , а энергетика поля возрастает. Это накладывает отпечаток на локальность и степень СВЧ нагрева таким острием.

Для конического острия характерно трубчатое распределение тепловыделения, а также поля и его локализация по периферии

[5]. Эта особенность накладывает отпечаток на локальность СВЧ нагрева при конической форме острия. Ниже приводятся результаты моделирования пространственного распределения температуры при различных значениях длительности нагрева и тепловых параметров (рис. 6).

В частности, на рис. 6 представлено поперечное распределение температуры для

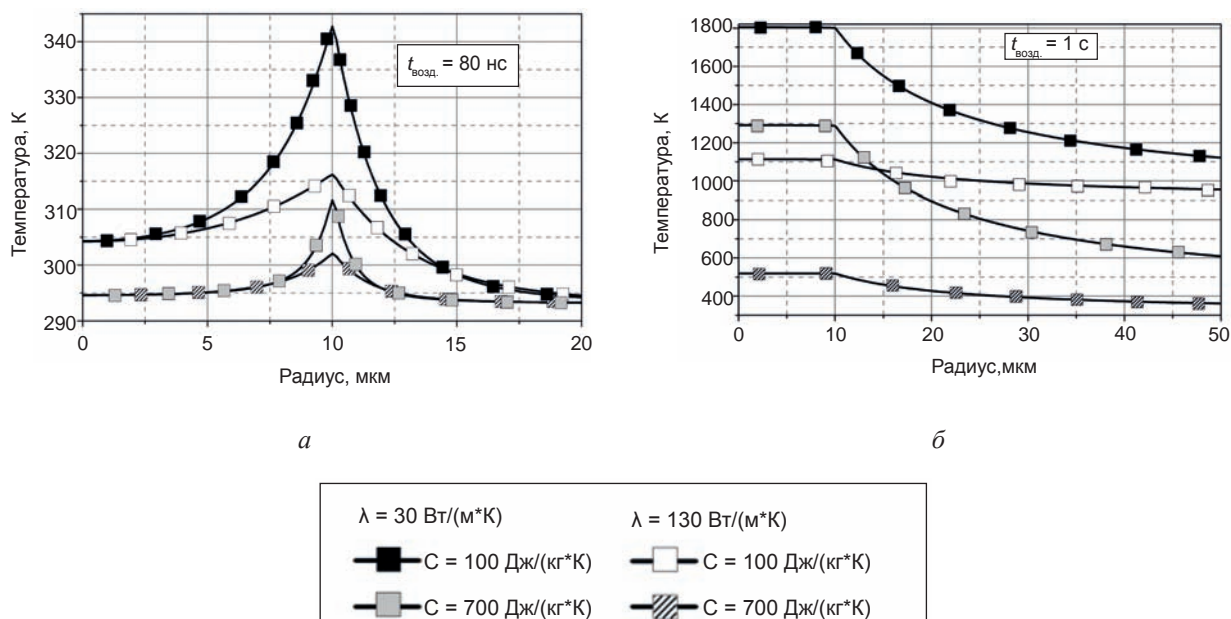


Рис. 6. Распределение температуры по глубине при различной длительности СВЧ нагрева в зависимости от теплоемкости и теплопроводности материала объекта

участков быстрого нарастания  $8 \cdot 10^{-8}$  с и последующего медленного установления (1 с).

На участке  $t_{\text{возд.}} < 10^{-6}$  с проявляется трубчатость тепловыделения СВЧ поля в объекте. На участке  $t_{\text{возд.}} > 10^{-3}$  с видно сглаживание распределения температуры за счет теплопроводности с влиянием на процесс теплоемкости. Следует обратить внимание на то обстоятельство, что делокализация поверхностного распределения температуры также, как и для сферического острия не носит сильного характера.

Аналогично, распределение температуры по глубине изменяется в начальный период ( $t_{\text{возд.}} < 10^{-6}$  с) и стабилизируется при  $t_{\text{возд.}} > 1$  с.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований созданы предпосылки формирования общей теории высоколокального СВЧ нагрева полупроводников, диэлектриков и биообъектов.

В дополнение к ранее обоснованным зависимостям достижимой температуры от подаваемой на локализирующий СВЧ зонд мощности и диэлектрических свойств образцов получены количественные представления о кинетике установления температуры и делокализации ее в объекте. В частности, установлены количественные представления о зависимости нарастания температуры от длительности импульса СВЧ воздействия, а также потерь локальности нагрева от времени воздействия и термодинамических свойств материала.

Достойна особого внимания та особенность, что при сферической форме острия СВЧ зонда локальность нагрева по площади и глубине имеет практически неизменную размерность порядка 1 мкм при радиусе сферы острия от 1 мкм до 50 мкм и улучшается с уменьшением радиуса меньше 1 мкм. Потери локальности слабо увеличиваются при увеличении времени воздействия. Для острия с формой усеченного конуса зависимости проявляются более сильно. Однако, достижимые температуры при прочих равных условиях для сферической формы острия имеют меньшие значения по сравнению с конической.

Установлены также количественные представления о влиянии теплопроводности материала на отмеченные особенности характеристик локального СВЧ нагрева.

Показано, что зазор между острием и образцом сильно влияет на достижимую температуру. Следует вывод, что необходимо более подробно исследовать влияние зазора на другие характеристики СВЧ локального нагрева.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Thompson Keith. Millisecond microwave annealing: Driving microelectronics nano / Keith Thompson, J. H. Booske, R. L. Ives // Journal of vacuum Science and Technology. Microelectronics and Nanometer Structures. — 2005. — Vol. 23, No. 3. — P. 970–978.
2. Jerby. E. The microwave drill / E. Jerby, V. Dichtyar, O. Aktushev, U. Groszlick // Science. — 2002. — Vol. 298. — P. 587–589.
3. 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, No. 20. — P. 1899–1913.
4. Gordienko Y. E. Highly localized microwave heating of semiconductors and dielectrics / Y. E. Gordienko, D. A. Poletaev, A. M. Prokaza, N. I. Slipchenko // Applied Radio Electronics: Sci. Mag. — 2013. — Vol. 23, No. 3. — P. 426–430.
5. Гордиенко Ю. Е. Кинетика локального СВЧ разогрева полупроводников и диэлектриков / Гордиенко Ю. Е., Ларкина С. Ю., Слипченко Н. И., Щербака Е. Л. // Радиотехника: Всеукр. межвед. научн. -техн. сб. — 2014. — Вып. 177. — С. 98–104.
6. Неволин В. К. Зондовые нанотехнологии в электронике / В. К. Неволин // Техносфера. — Смоленск, 2014. — 176 с.

## LITERATURA

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, No. 3. — P. 970–978.
2. Jerby. E. The microwave drill / E. Jerby, V. Dichtyar, O. Aktushev, U. Groslick // Science. — 2002. — Vol. 298. — P. 587–589.
  3. 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, No. 20. — P. 1899–1913.
  4. Gordienko Y. E. Highly localized microwave heating of semiconductors and dielectrics / Y. E. Gordienko, D. A. Poletaev, A. M. Prokaza, N. I. Slipchenko // Applied Radio Electronics: Sci. Mag. — 2013. — Vol. 23, No. 3. — P. 426–430.
  5. Gordienko Yu. E. Kinetika lokalnogo SVCh razogreva poluprovodnikov i dielektrikov / Gordienko Yu. E., Larkina S. Yu., Slipchenko N. I., Scherbak E. L. // Radiotekhnika: Vseukr. mezhved. nauchn. -tehn. sb. — 2014. — Vyp. 177. — P. 98–104.
  6. Nevolin V. K. Zondovye nanotehnologii v elektronike / V. K. Nevolin // Tehnosfera. — Smolensk, 2014. — 176 p.