

РАДИОФИЗИКА, ЭЛЕКТРОДИНАМИКА. АНТЕННЫ И МИКРОВОЛНОВЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 536.331

*Ю.Е. ГОРДИЕНКО, д-р физ.-мат. наук, С.Ю. ЛАРКИН, канд. техн. наук,
Н.И. СЛИПЧЕНКО, д-р физ.-мат. наук, Е.Л. ЩЕРБАК*

КИНЕТИКА ЛОКАЛЬНОГО СВЧ РАЗОГРЕВА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

Введение

В настоящее время практическое использование сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона электромагнитных колебаний сравнимо с оптическим. Однако только недавно стала развиваться область СВЧ техники, связанная с ближнеполевым взаимодействием СВЧ источника с объектами. Особо перспективными ее направлениями являются сканирующая микроволновая микроскопия (СММ) [1, 2] и СВЧ микротехнологии (СМТ) [3, 4]. Последние еще только устанавливаются несмотря на известные достижения СВЧ нагрева крупноразмерных объектов.

СМТ может стать наиболее востребованной в технологии микроэлектроники, биофизики и биоинженерии. Техническая обеспеченность существенно возрастает благодаря развитию микроволновой микроскопии. В результате создания высоколокальных ближнеполевых СВЧ зондов [5] теоретически появилась возможность локализации СВЧ нагрева до 1 мкм. Практические достижения начали реализовываться с появлением работ [6, 7], в которых было показано применение нагревательных СВЧ аппликаторов миллиметрового размера на рабочих частотах 10 см диапазона. Следует подчеркнуть, что при этом использовался СВЧ излучатель с ближнеполевой коаксиальной апертурой.

В работах [4, 8] была рассмотрена возможность улучшения локализации на 2 – 3 порядка величины. Такая микролокализация позволяет предполагать использование рассматриваемого инструмента для микромодификации малых областей объектов. Поэтому в дальнейшем будет использоваться термин "СВЧ микромодификатор", более полно отражающий обсуждаемую специфику СВЧ технологии по сравнению с "СВЧ аппликатором". В цитированных выше работах по СМТ были приведены и подробно теоретически исследованы особенности установления распределения температуры в нагреваемом объекте. Однако в них практически отсутствует анализ временного установления температуры при СВЧ локальном воздействии. Такой анализ необходим в связи с тем, что в микротехнологиях длительность СВЧ воздействия может быть очень малой. Особенно актуальным это становится для оптимизации технологического режима по критерию максимальной локализации заданной температуры.

Цель статьи – установление количественных представлений о пространственно-временном распределении температуры в объекте под СВЧ микромодификатором с коаксиальной апертурой и обоснование оптимальных режимов его СВЧ питания.

Общие положения

В представленной работе проводится численное моделирование кинетики установления температуры в объекте под микромодификатором в зависимости от режима его СВЧ питания и от теплофизических параметров объекта.

На рис. 1 схематично представлены функциональная схема реализации СВЧ микронагрева и вид электродинамической структуры микромодификатора.

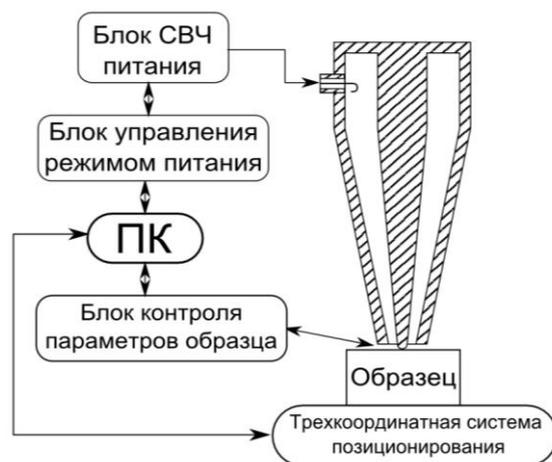


Рис. 1. Функциональная схема основных узлов СВЧ микромодификатора

Учитывая осесимметричность структуры, функционирование микромодификатора можно описать приведенной ниже системой уравнений Максвелла (1) – (3) и нестационарного уравнения теплопроводности (4).

$$\frac{\partial E_{ri}}{\partial t} = (\varepsilon_i \varepsilon_0)^{-1} \left(\frac{\partial H_{\phi i}}{\partial z} + \sigma_i E_{ri} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial E_{zi}}{\partial t} = (\varepsilon_i \varepsilon_0)^{-1} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial (r H_{\phi i})}{\partial r} - \sigma E_{zi} \right], \quad (2)$$

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

$$c \rho \frac{\partial T(r, z)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[k r \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial z} \right] + q(r, z, t), \quad (4)$$

где ε_0 и μ_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; ε_i и μ_i – диэлектрическая и магнитная проницаемости материала заполнения; σ_i – электропроводность заполнения; c – удельная теплоемкость материала объекта; k – коэффициент его теплопроводности; ρ – удельная плотность материала; $q(r, z, t)$ – удельная мощность СВЧ тепловыделения.

При расчете тепловых процессов в объекте необходимо для начала произвести расчет тепловых источников, которые распределяются в нем исходя из решения электродинамической задачи. Удельная мощность тепловыделения источников выражается так:

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

Численное моделирование в работе базируется на самосогласованном решении приведенной системы уравнений в строгой постановке граничных условий с использованием прямого метода конечных разностей во временной области (FDTD). Подробное описание граничных условий, алгоритма алгебраизации и вида матричных элементов представлено в работе [8].

Адекватность модели и достоверность получаемых численных результатов устанавливалась путем сравнения с данными, которые получались из решений этой системы методом конечных элементов, реализованном в программном пакете COMSOL Multiphysics.

Результаты моделирования или экспериментального исследования подобного микро-модификатора по нашим сведениям у других авторов отсутствуют.

Результаты и их анализ

На первом этапе исследований важно было оценить количественно некоторые фундаментальные процессы установления температуры. В частности, физически очевидно, что при импульсном возбуждении СВЧ микромодификатора выделение тепла будет мгновенно локализоваться в объекте под ним, а значение температуры – увеличиваться в соответствии со значением теплоемкости материала C_p его удельной плотностью ρ и объемом локализации СВЧ излучения. Чем меньше эти величины, тем быстрее будет нарастать температура в указанном объеме. Отдельный отпечаток будет накладывать крутизна фронта возбуждающего импульса.

Наряду с этим процессом будут действовать процессы отвода тепла за счет теплопроводности материала k и конвекции его в окружающую среду. Они делокализуют СВЧ нагрев в объекте и ослабляют повышение температуры в нем.

Важные количественные представления о локализации СВЧ нагрева дают результаты моделирования, представленные на рис. 2 а, б. Они получены для микромодификатора с различной формой острия внутреннего стержня коаксиала в апертуре и для двух значений его диаметра. Величина тепловыделения в соответствии с выражением (5) контролируется значением ϵ и $\text{tg}\delta$ материала объекта. В частности, данные рис. 2 получены при $\epsilon = 12$; $\text{tg}\delta = 1$; $C_p = 700 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; $k = 130 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; $\rho = 2329 \text{ кг}/\text{м}^3$ соответствующие кремнию для $R_{\text{пит}} = 500 \text{ Вт}$.

Характерно, что плотность тепловыделения выше при сферической форме острия и сильнее локализуется в его центре, в отличие от плоского острия, для которого локализация происходит на периферии.

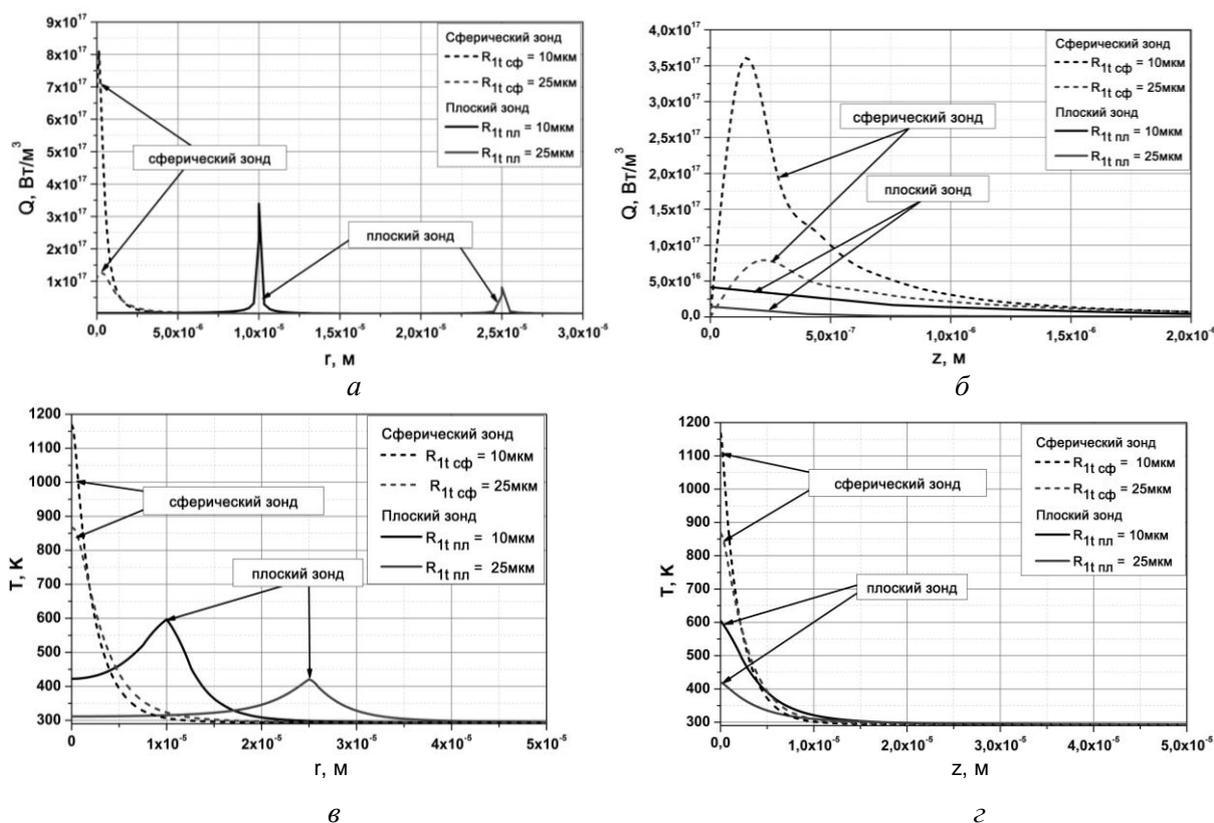


Рис. 2. Распределение тепловыделения (а, б) и температуры (в, г) в объекте для сферического и плоского зондов на поверхности (а, в) и по глубине (б, г)

Очевидно, что плотность СВЧ тепловыделения существенно пространственно неоднородна и отражает распределение ближнего поля в апертуре модификатора. Кроме того, заметим, что, как показали отдельные исследования [4], зазор между острием и объектом сильно уменьшает величину тепловыделения по глубине объекта. Наиболее сильные изменения имеют место уже при очень малых зазорах. Для микронных сечений острия уменьшение тепловыделения происходит более чем на порядок при величине зазора более 0,5 мкм и практически не искажает характера поперечного распределения тепловыделения.

С учетом приведенных на рис. 2, а, б данных следует предполагать, что кинетика нарастания температуры в объекте будет различна в разных его точках. Характерными можно считать точки на поверхности ($z = 0$) и в глубине ($z = R_{1t}$), а также в центре и на периферии острия: $r = 0$ и $r = R_{1t}$. Для сферической формы острия тепловыделение при $r=R_{1t}$ и $z=R_{1t}$ незначительно. Поэтому имеет смысл рассмотреть вместо указанных точек более близкие к центру острия ($r=0.3R_{1t}$ и $z=0.3R_{1t}$).

На рис. 3 представлен количественно вид кинетики нарастания температуры в пластине кремния в указанных точках для различных форм острия. На рис. 3, в приведена кинетика нарастания для сферического острия радиусом 10 мкм при различных значениях теплопроводности материала и в двух точках на образце: непосредственно под зондом в точке соприкосновения и на удалении 3 мкм от него по поверхности. Характерно, что с увеличением теплопроводности скорость роста и величина температур увеличиваются пропорционально.

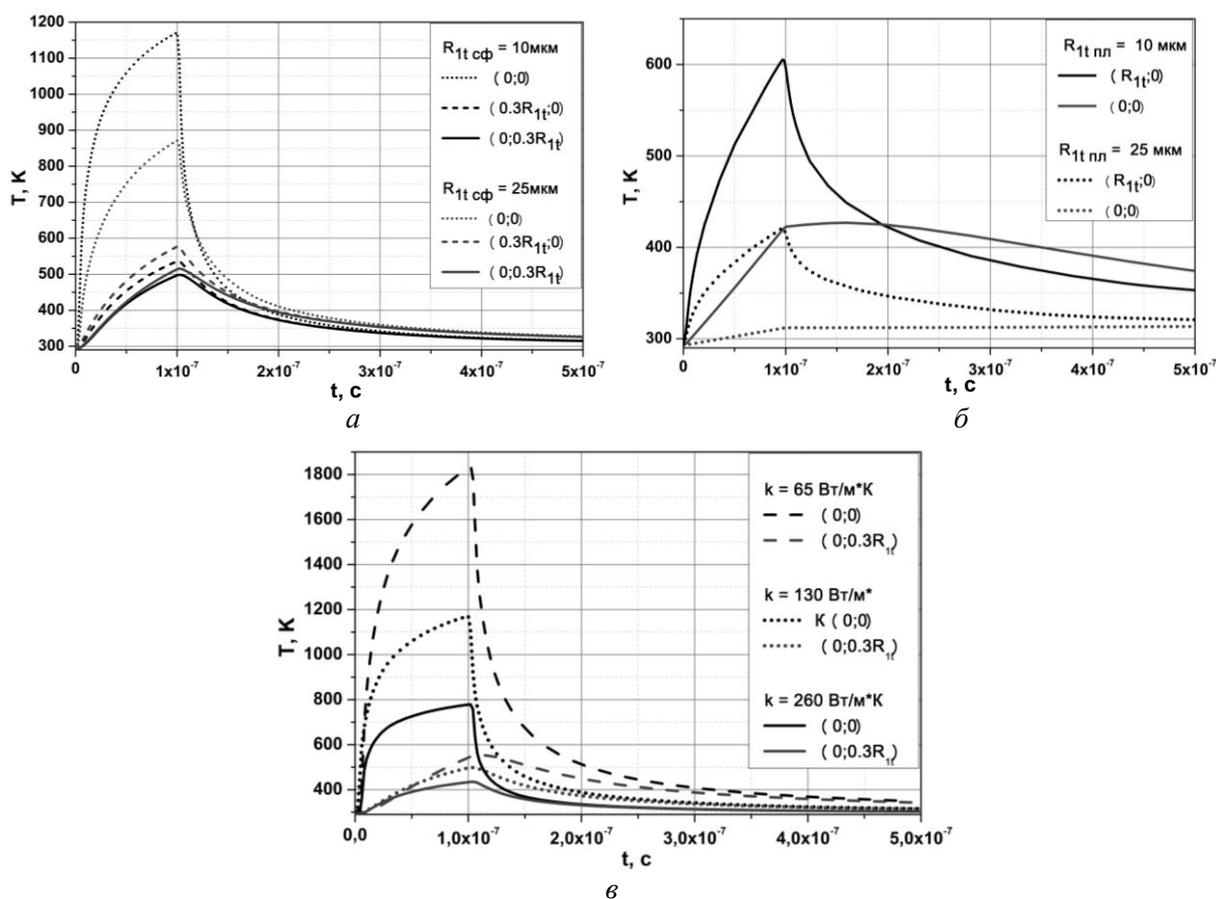


Рис. 3. Кинетика распределения температуры в образце для сферического (а) и плоского (б) зонда, в – зависимость от теплопроводности образца

Данные рис. 4 а, б, в иллюстрируют локализацию температуры при сферической форме острия для различных длительностей возбуждающего импульса. Из них очевидно, что величина устанавливающейся температуры и ее локализации противоположно зависят от време-

ни воздействия. Также из рис. 3 и 4 очевидно, что на делокализацию температуры в первую очередь влияет теплопроводность материала. Его теплоемкость оказывает влияние на начальную скорость нарастания температуры.

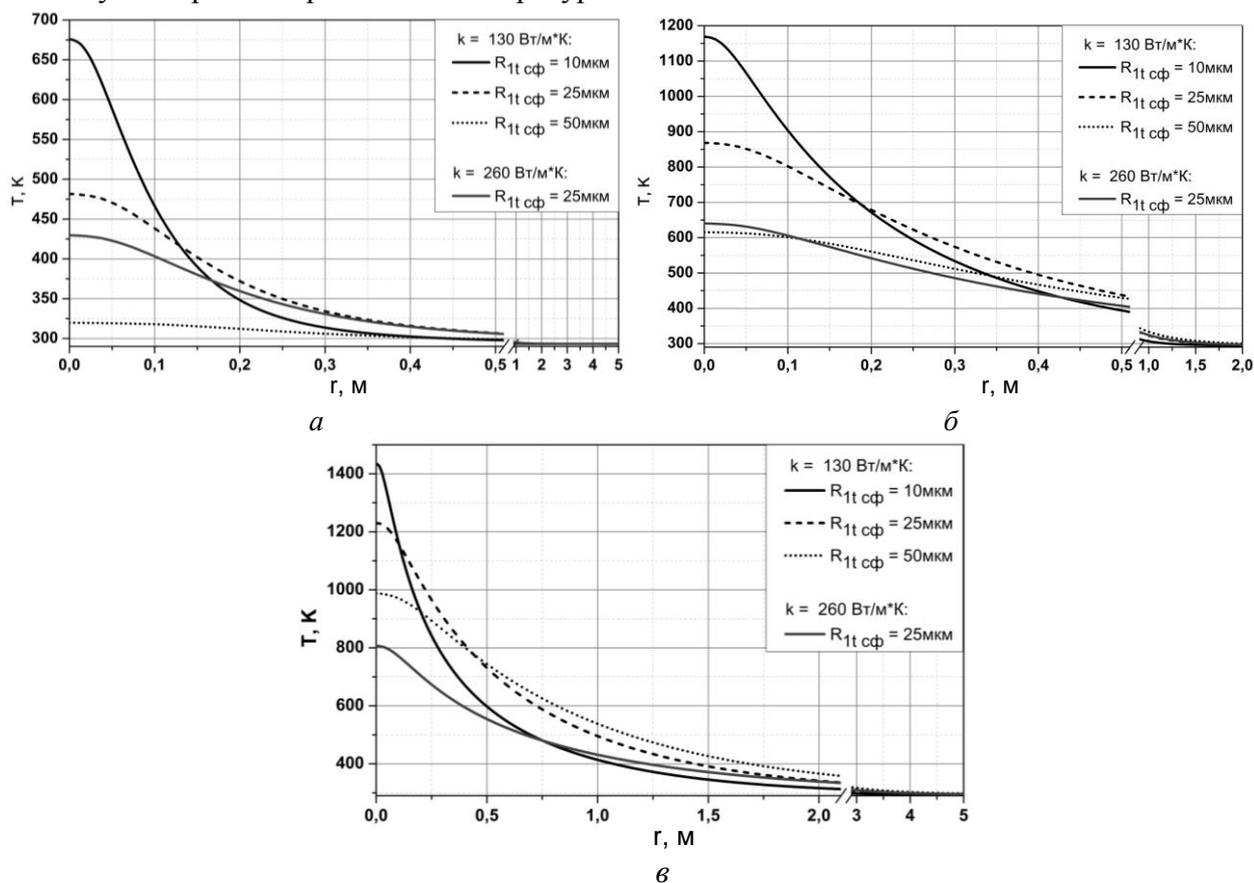
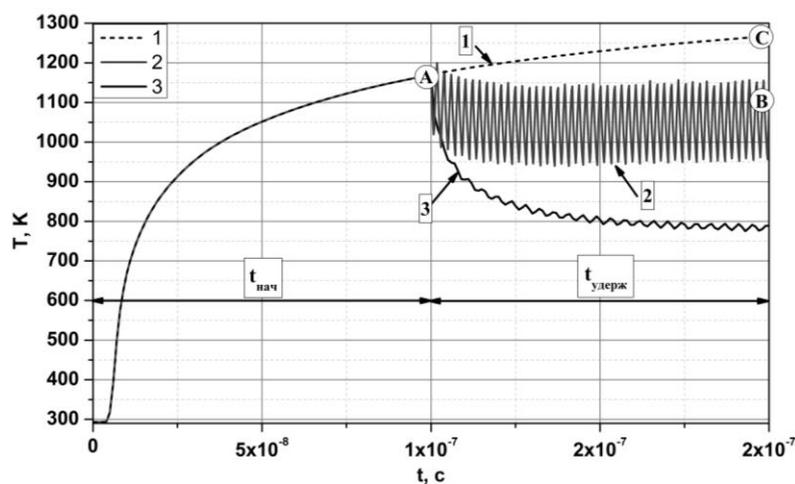


Рис. 4. Распределение температуры по поверхности образца при различных радиусах сферического острия для длительностей импульса 10 нс (а), 100 нс (б) и 1 мкс (в)

Как следует из рис. 4, с уменьшением радиуса острия R_{1t} достижимая температура возрастает. Таким образом, для повышения локальности и быстродействия СВЧ микромодификатора следует уменьшать радиус острия R_{1t} . Вопрос о нижнем допустимом его значении связан с учетом условий СВЧ пробоя и требует отдельных исследований.

Представленные на рис. 3 и 4 результаты оценки кинетики СВЧ локального нагрева показывают, что продолжительность удержания заданного значения температуры и локализации разогретой области являются отдельной проблемой. С увеличением времени удержания заданной температуры область разогрева растекается. Решить эту проблему, по-видимому, можно выбором специального режима питания СВЧ микромодификатора. На рис. 5 показаны результаты исследования кинетики при сложном временном режиме, включающем наличие временного интервала начала вывода на заданную температуру $t_{нач}$ и последующего удержания $t_{удерж}$. На участке удержания СВЧ питание микромодификатора осуществляется последовательностью коротких импульсов с оптимальной длительностью и скважностью. Необходимая оптимизация осуществляется с учетом значения теплоемкости и теплопроводности материала по критериям удержания заданной температуры и локальности.

Представление о возникающих потерях локальности при увеличении времени удержания заданной температуры дают результаты исследования пространственного распределения температуры для двух значений времени удержания, представленные на рис. 6.



1 – моноимпульсное питание 500 Вт;
 2 – комбинированное питание ($P_{\text{нач}} = 500\text{Вт}$ и $P_{\text{удерж}} = 650\text{Вт}$);
 3 – комбинированное питание ($P_{\text{нач}} = 500\text{Вт}$ и $P_{\text{удерж}} = 500\text{Вт}$)

Рис. 5. Кинетика роста температуры при различном временном режиме

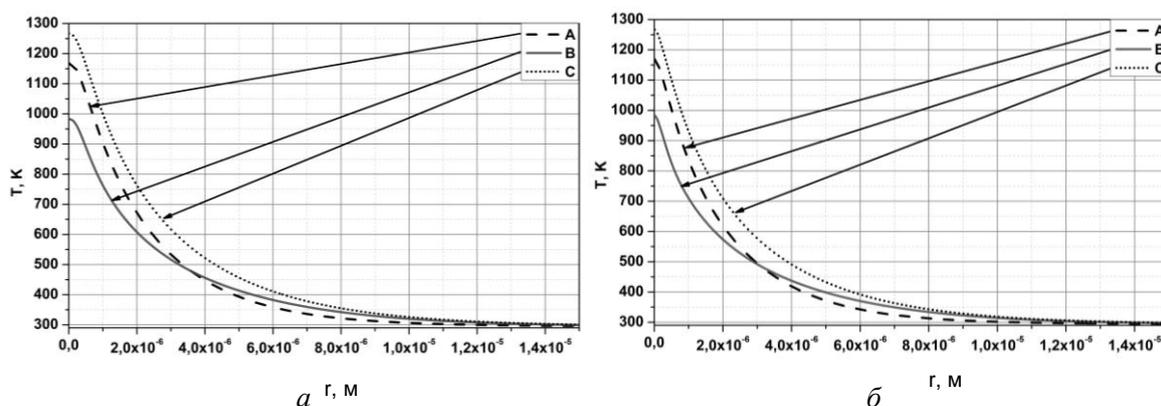


Рис. 6. Сравнение распределение температуры по поверхности (а) по глубине (б) объекта при различных режимах питания (А, С – моноимпульсный при $t=t_{\text{нач}}$; В – комбинированный)

Из представленных данных можно сделать предварительный вывод о том, что использование комбинированного питания частично снимает обсуждаемую проблему.

Выводы

В результате количественных исследований можно считать установленными основные физические особенности кинетики высоколокального разогрева полупроводниковых и диэлектрических объектов с помощью СВЧ ближнеполевых зондовых модификаторов.

Скорость и локализация нагрева, при заданной СВЧ мощности питания модификатора, резко возрастают для сферической формы острия при уменьшении его сечения до единиц микрон. При плоскоконусной форме локальность и скорость нагрева оказываются существенно ниже.

Теплопроводность материала объекта является параметром, ограничивающим локализацию и скорость нагрева. Увеличение времени нагрева позволяет повышать достижимую температуру, но существенно делокализирует действие модификатора.

Предложено частично снимать проблему удержания заданной температуры и минимизации потерь локальности путем использования усложненного (комбинированного) СВЧ питания модификатора, включающего режим вывода на заданную температуру (моноимпульсный) и режим удержания (последовательность коротких импульсов). Получено количественное подтверждение эффективности использования такого режима.

Список литературы: 1. *Anlage S. M.* Principles of near-field microwave microscopy / S. M. Anlage, V. V. Talanov, A. R. Schwartz // Scanning probe microscopy. Electrical and electromechanical phenomena at the nanoscale. – 2007. – Vol.I. – P. 215 – 253. 2. *Гордиенко Ю. Е.* Ближнеполевая сканирующая сверхвысокочастотная микродиагностика объектов в технологии электроники / Ю. Е. Гордиенко // Нові технології : наук.вісник ІЕНТ. – 2002. – № 1. –С. 3–63. *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. 4. *Гордиенко Ю. Е.* Высокочастотный СВЧ нагрев полупроводников и диэлектриков / Ю. Е. Гордиенко, Д.А. Полетаев, А.М. Проказа, Н.И. Слипченко // Прикладная радиоэлектроника. – 2013. – Т 11, №3. – С.426-430. 5. *Гордиенко Ю. Е.* Ближнеполевой СВЧ датчик на основе конусного коаксиального резонатора / Ю. Е. Гордиенко, С. Ю. Ларкин, А. М. Яцкив // Радиотехника. – 2009. – Вып. 159. – С. 309–314. 6. *Yaron A.* Coupled Thermal-Electromagnetic model for Microwave Heating of temperature-Dependent Dielectric Media / A. Yaron, E. Jerby // IEEE Transactions on Plasma Science. – 1999. – Vol. 27, N 2. – P. 555–562. 7. *Jerby, E.* The microwave drill / E. Jerby, V. Dichtyar, O. Aktushev, U. Groszlick // Science. – 2002. – Vol. 298. – P. 587 – 589. 8. *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.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 14.03.2014