

СВЧ ВЫСОКОЛОКАЛЬНЫЙ СКАНИРУЮЩИЙ РАЗОГРЕВ В ТЕХНОЛОГИИ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

Ю. Е. Гордиенко, М. И. Пятайкина, А. В. Полищук
*Харьковский национальный университет радиоэлектроники,
г. Харьков*

Поступила в редакцию 17.04.2015

В статье представлены результаты численного исследования высоколокального СВЧ разогрева тонких пленок полупроводников и диэлектриков на высокоомной подложке кремния. Сравнение с ранее опубликованными нами результатами исследования разогрева кремниевых подложек показывает, что в связи с высокой теплопроводностью кремния влияние подложки на величину температуры разогреваемой пленки будет существенным при уменьшении толщины пленки. Влияние диэлектрической проницаемости пленки также имеет место и связано с изменением СВЧ тепловыделения в ней. С учетом зависимости локализации СВЧ поля от радиуса сферического острия процесс тепловыделения можно локализовать только в пленке, а величиной локального разогрева подложки управлять выбранной толщиной пленки. Это позволит раздельно формировать локальный разогрев пленки и подложки.

Ключевые слова: высоколокальный СВЧ нагрев, модификация, тонкопленочная структура, СВЧ микромодификатор, температурная зависимость.

НВЧ ВИСОКОЛОКАЛЬНИЙ СКАНУЮЧИЙ РОЗІГРІВ У ТЕХНОЛОГІЇ МИКРО- ТА НАНОЕЛЕКТРОНІКИ

Ю. О. Гордієнко, О. В. Поліщук, М. І. Пятайкина

У статті наведені результати чисельного дослідження високолокального НВЧ нагріву тонких напівпровідникових та діелектричних плівок на високоомній підкладці кремнію. Порівняння з нашими раніше опублікованими результатами дослідження розігріву кремнієвих підкладок показує, що у зв'язку з високою теплопровідністю кремнію вплив підкладки на величину температури плівки, що розігрівається, буде суттєвим при зменшенні товщини плівки. Вплив діелектричної проникності плівки також має місце і пов'язане зі зміною НВЧ тепловиділення в ній. Враховуючи залежність локалізації НВЧ поля від радіуса сферичного вістря процес тепловиділення можна локалізувати тільки в плівці, а величиною локального розігріву підкладки управляти обраною товщиною плівки. Це дозволить окремо формувати локальний розігрів плівки і підкладки.

Ключові слова: високолокальний НВЧ нагрів, модифікація, тонкоплівкова структура, НВЧ мікромодифікатор, температурна залежність.

UHF HIGH LOCAL SCANNING HEATING AT THE TECHNOLOGY MICRO- AND NANOELECTRONICS

Yu. Ye. Gordienko, O. V. Polishchuk, M. I. Pyataikina

The article presents the results of a numerical research high resolution microwave heating of thin layers of semiconductors and dielectrics for high resistivity silicon substrate. Comparison with previously published our results of heating silicon substrates shows that due to the high thermal conductivity of silicon substrate influence on the magnitude of the temperature of the heated layer will be substantially with decreasing layer thickness. Influence permittivity of the layer also has place to be due with the change of the microwave heat there in. Taking into account weak localization of the microwave field depending on the radius of the spherical tip the process of heat can be localized only in the layer and can be control the selected film thickness by the magnitude of local heating of the substrate. This will enable separate form local heating of the layer and the substrate.

Keywords: high local microwave heating modification, thin-film structures, microwave micro modifier, temperature dependence.

ВВЕДЕНИЕ

Прогресс электронной элементной базы в настоящее время связывается с применением наноструктур и нанотехнологий. Наноразмерность элементов и физических процессов, определяющих их функционирование, предопределяют революционный характер изменения технологии. На смену традиционной литографии приходят сканирующие зондовые процессы [1–3]. Они основаны на наномодификации поверхности функционального материала твердотельным зондом сканирующих зондовых микроскопов (СТМ, АСМ и др.). Такие микроскопы позволяют не только визуализировать поверхностные свойства материалов с атомарным разрешением, но и активно воздействовать на нее. Разработаны приемы удаления, замещения атомов и молекул и т. п. Сканирующие зондовые нанотехнологии базируются на ряде физических и физико-химических явлений, возникающих в области наноконтакта. К ним, в первую очередь, относятся: локальное смещение атомов и молекул, разогрев, поляризация, пластическая деформация, отжиг и др. В целом, раздельное или совместное их использование позволяет создавать условия для различной наномодификации материалов [2, 4–5]. Однако, подобные нанотехнологии пока только апробируются.

В производстве современных интегральных схем до сих пор широко используются хорошо разработанные кремниевые технологии. Можно отметить, что проблемы повышения быстродействия интегральных схем, степени их интеграции и плотности упаковки еще решаются с помощью переходных субмикронных технологий и мезоструктур. При этом появляются разработки, демонстрирующие эффективность применения СВЧ технологий [6, 7]. В первую очередь, с ними связывают модификацию материала на малой глубине, т. е. работу с субмикронными пленочными структурами. Здесь уместно напомнить, что наряду с СТМ и АСМ разработаны так называемые сканирующие микроволновые микроскопы (СММ) [9–11]. Их применение в субмикронных технологиях начало обсуждаться теоретически нами в работах [12, 13]. Экспериментальным подтверждением реальности высказанных новых

положений могут служить представленные в работах [7, 8] результаты применения СВЧ зондовых аппликаторов для сверления отверстий в кремнии. Следует заметить, что размерность получаемых при этом отверстий не менее 1 мм, поэтому необходимо развитие таких исследований для теоретического и экспериментального доказательства возможности достижения субмикронной локальности.

Целью данной работы является исследование особенностей локализации СВЧ зондового разогрева тонкопленочных структур на полупроводниковых подложках.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В обобщенном виде функциональную схему практической реализации высоколокального СВЧ разогрева отдельных полупроводниковых и диэлектрических объектов можно представить следующим образом (рис. 1). Наиболее принципиально важным ее элементом является СВЧ зонд (1), обеспечивающий локализацию электромагнитного поля на поверхности объекта (2) с заданной энергетикой и положением. Позиционирование зонда выполняется системой трехмерного перемещения объекта (3). СВЧ питание зонда производится специальным генератором (4) с отдельно выбираемым режимом управления выходной мощностью.

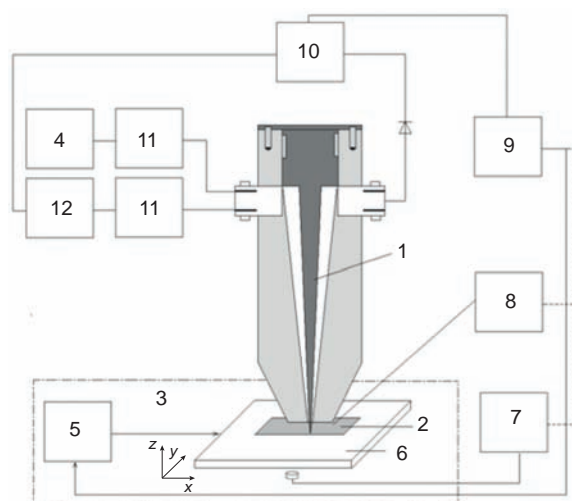


Рис. 1. Функциональная схема установки для СВЧ модификации объектов

В наиболее универсальных системах такого назначения может быть два фундаментально различающихся режима работы:

I — модифицирующий; II — контролирующей. В режиме I СВЧ зонд выполняет функцию локальной подачи СВЧ мощности от СВЧ генератора на объект. При этом режим подачи во времени может изменяться от непрерывного до импульсного с регулируемой длительностью и скважностью импульсов. Зонд должен быть хорошо согласован с выходом СВЧ генератора для полной передачи мощности в режиме I.

В режиме контроля II используется тот же СВЧ зонд и в той же позиции на объекте для исключения влияния погрешности установки. Однако, его функционирование соответствует принципу микроволнового микроскопа. Для этого зонд должен быть резонаторным, а питание малой измерительной мощностью осуществляется от другого СВЧ генератора с использованием системы АПЧ.

Другие элементы схемы в этом варианте имеют следующие назначения: система управления позиционированием (5) и координатный стол (6) служат для перемещения образца в трех направлениях; цифровой датчик для измерения температуры (7) регистрирует температуру нагрева под образцом; ПК (8) необходим как для управления

координатным столом, так и для сбора и обработки информации; система автоматической подстройки частоты (АПЧ) (9) служит для формирования информационных измерительных сигналов; измерительный СВЧ генератор (10), выполненный на диоде Ганна. Разогревающий СВЧ генератор может выполняться по транзисторной схеме [14].

Экспериментальные и теоретические исследования разрешающей способности СММ [15, 16] позволяют заключить, что на данном этапе разработан ряд эффективных способов локализации СВЧ поля с помощью сканирующего СВЧ зонда коаксиального типа. Они схематично изображены на рис. 2а. На этом рисунке зонд представлен острием внутреннего проводника коаксиала, а весь он изображен пунктиром только на рис. 2в. Различаются эти способы формой острия и типом контакта с объектом: идеально плотный контакт (а, б) и с зазором h_z (в).

На рис. 3 для примера приведены эпюры СВЧ поля в системе «зонд-объект», из которых следует, что зонд со сферической формой острия и идеальным контактом наиболее эффективен по степени локализации воздействующего поля.

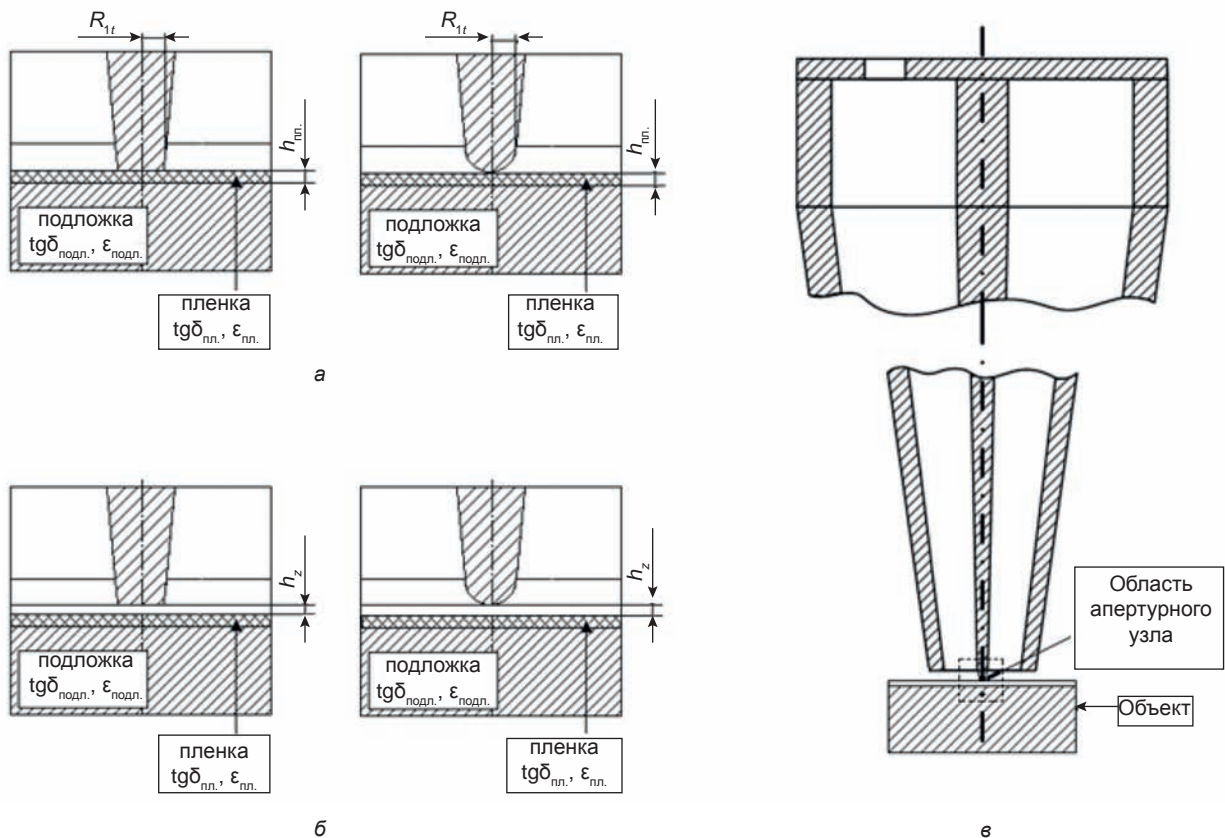


Рис. 2. Схематическое изображение СВЧ микромодификатора на основе конусного коаксиального резонатора (в) и варианты форм острия с идеально плотным контактом (а) и с зазором (б)

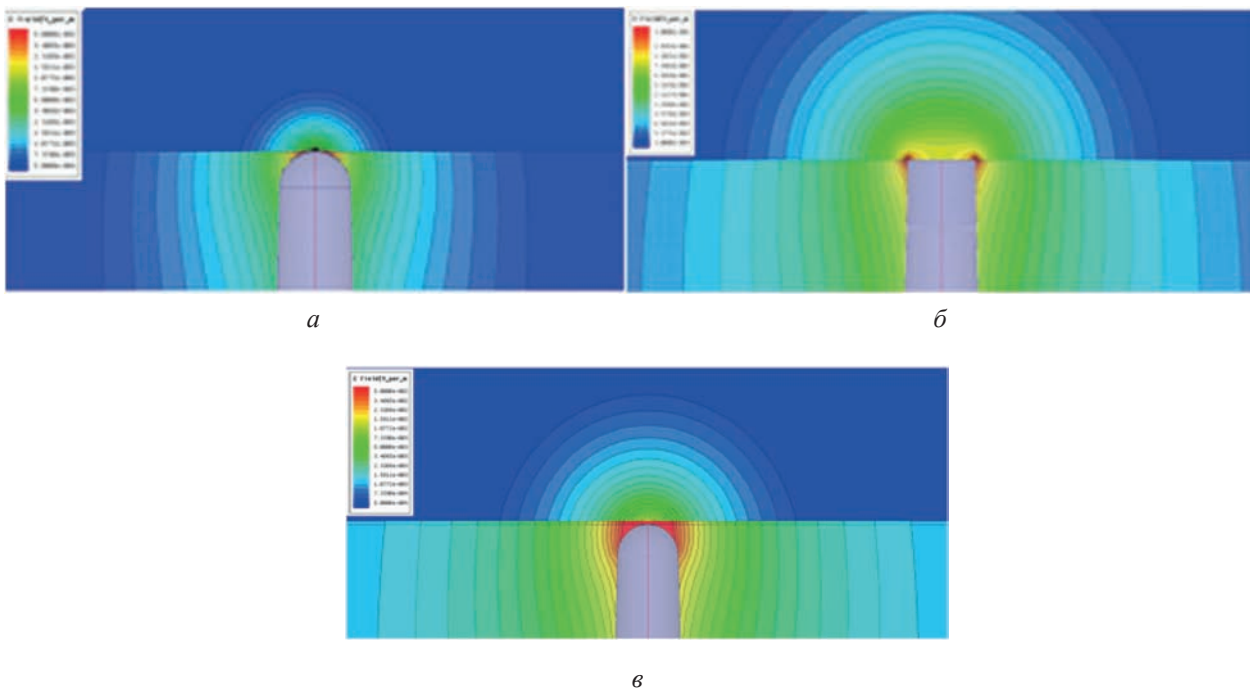


Рис. 3. Эпюры СВЧ поля для сферического (а) и плоского (б) острий без зазора и сферического острия с зазором (в) ($R_{\text{ш}} = 10 \text{ мкм}$)

Численные оценки СВЧ тепловыделения, распределения температуры в объекте и влияния на него параметров объекта производились из нахождения совместного решения уравнений Максвелла (или волнового уравнения) и теплопроводности, как описано нами в [13, 17]. Рис. 4 подтверждает приведенные выше распределения количественно, одновременно отображая неудобство плоского острия, проявляющееся в «трубчатости» его СВЧ поля [18]. Исходя из этого, в работе все исследования выполнялись для СВЧ коаксиального зонда со сферической формой острия.

Следует заметить, что при этом не учитывалась температурная зависимость параметров объекта. Как показано в [19], возможна такая комбинация температурных зависимостей теплопроводности и тангенса угла СВЧ потерь, при которой имеет место самолокализация СВЧ тепловыделения. Однако этот процесс трудно управляем и применим только при СВЧ сверлении и плавлении.

Кроме того, необходимо отметить, что для СВЧ зонда со сферической формой острия характерна слабая зависимость локализации поля от радиуса закругления острия при возрастании напряженности с его уменьшением [13, 17] (так называемый эффект «громоотвода»).

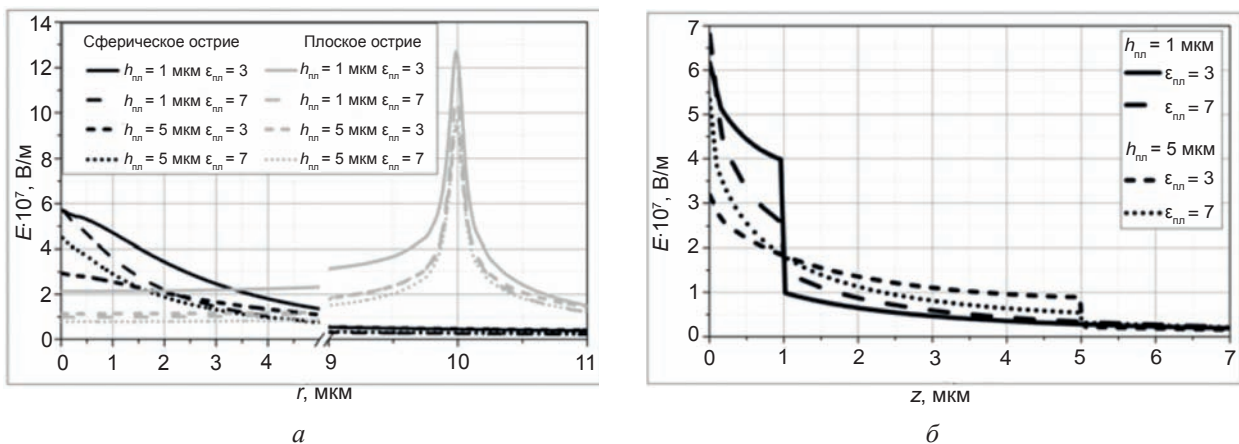


Рис. 4. Распределение СВЧ электрического поля вдоль радиуса острия микромодификатора (а) и по глубине образца (б) ($R_{\text{ш}} = 10 \text{ мкм}$, $\text{tg} \delta_{\text{пл}} = 0,1$, $\tau = 10 \text{ нс}$)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

Исследования выполнялись на рабочей частоте СВЧ модификатора $f = \omega/2\pi = 8$ ГГц. Мощность на входном порту составляла 10 Вт. СВЧ воздействие осуществлялось одиночным импульсом с длительностью от 10^{-8} до 10^{-3} с. Радиус острия СВЧ модификатора $R_{lr} = 10$ мкм. Объектом исследования является тонкая пленка на подложке, параметры которой имеют следующие значения: удельная теплоемкость $C_{\text{подл}} = 703$ Дж/(кг·К); удельная теплопроводность $\lambda_{\text{подл}} = 163$ Вт/(м·К); диэлектрическая проницаемость $\epsilon_{\text{подл}} = 12$. Зазор между острием модификатора и объектом считался нулевым. Также пренебрегалось теплоотводом модификатора.

Неотъемлемой частью решения тепловой задачи является исследование пространственно-временного распределения тепловых источников. На рис. 5 в качестве количественного примера представлено распределение тепловыделения в пленке

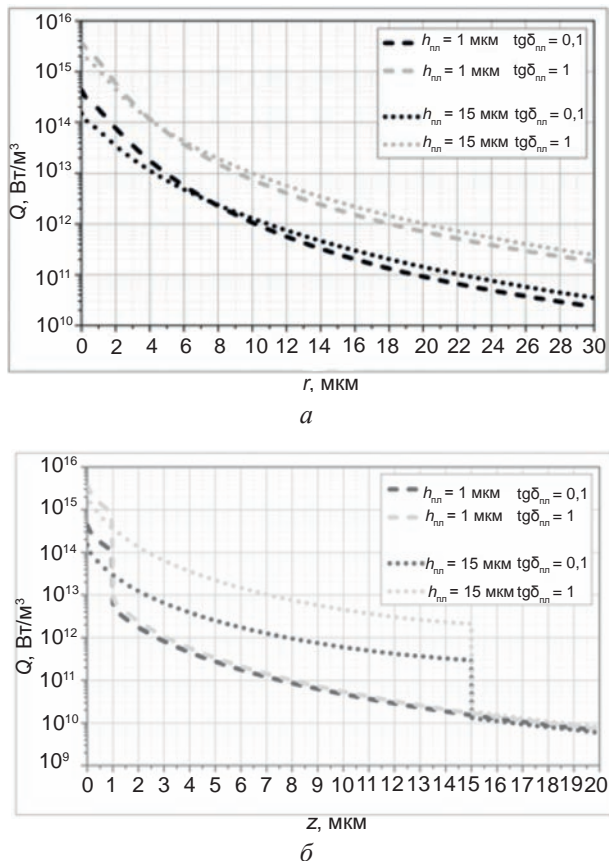


Рис. 5. Влияние толщины пленки и $\text{tg}\delta_{\text{пл}}$ на распределение тепловыделения по поверхности объекта (а) и по его глубине (б) ($R_{lr} = 10$ мкм, $\lambda_{\text{пл}} = 1,14$ Вт/(м·К), $C_{\text{подл}} = 859$ Дж/(кг·К), $\tau = 10$ мкс)

различной толщины ($h_{\text{пл}}$) при двух существенно отличающихся значениях $\text{tg}\delta$ материала пленки. Очевидно его соответствие распределению напряженности СВЧ поля модификатора и сильная зависимость от $\text{tg}\delta_{\text{пл}}$. Отметим также, что тепловыделение в данном случае, подобно лазерному, практически безинерционно в отличие от других способов нагрева. Однако, распределением его по глубине можно управлять, выбирая разный конструктив модификатора.

Установление температуры в пленке и подложке является инерционным процессом. На рис. 6 показана характерная кинетика ее нарастания, которая в полубесконечном объекте определяется в основном его теплоемкостью и плотностью [18]. В данном случае она существенно зависит еще и от толщины и теплопроводности пленки, а также от теплопроводности подложки. Результаты, приведенные на рис. 6, были получены при параметрах, указанных под рисунком.

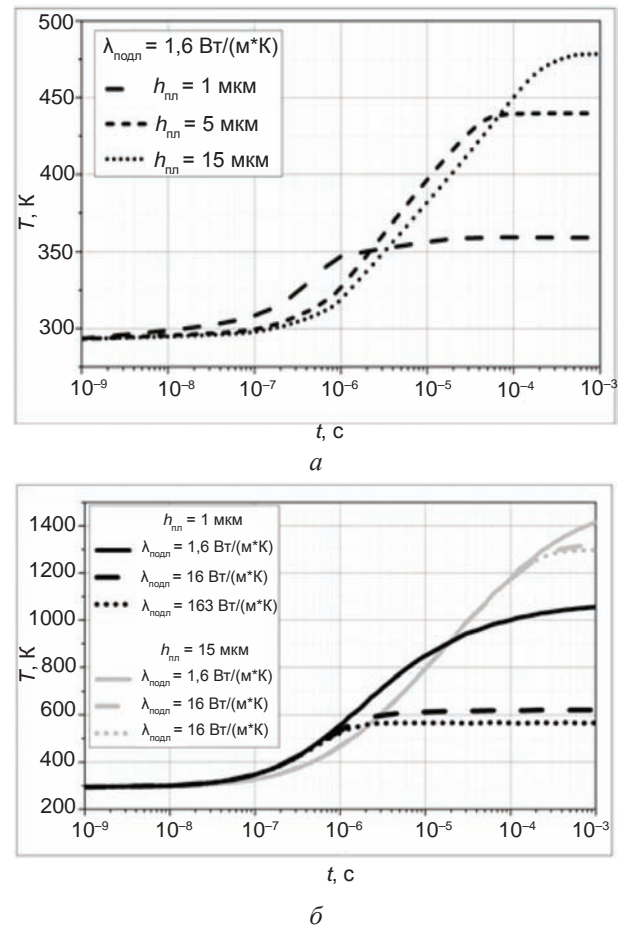


Рис. 6. Кинетика установления пространственного распределения температуры ($R_{lr} = 10$ мкм, $P = 10$ Вт; $C_{\text{пл}} = 859$ Дж/(кг·К), $\text{tg}\delta_{\text{пл}} = 0,1$)

Уменьшение устанавливаемой температуры в пленке при уменьшении ее толщины (не смотря на слабые изменения тепловыделения) следует, по нашему мнению, объяснять увеличением теплоотвода подложкой. При уменьшении теплопроводности последней влияние толщины пленки уменьшается. Этот эффект также ослабляется при уменьшении теплопроводности пленки.

Специфика влияния параметров пленки на пространственное распределение устанавливаемой температуры показана на

рис. 7–8. Распределение температуры по толщине пленки (рис. 7 и рис. 8б) кроме уже затронутого выше аспекта показывает, что значение диэлектрической проницаемости пленки также существенно влияет на величину устанавливаемой температуры и не проявляется в ее распределении. Это объясняется пространственным разнесением тепловыделения и тепловых потерь, которые существенно зависят от теплопроводности и не связаны с диэлектрической проницаемостью материала. В совокупности

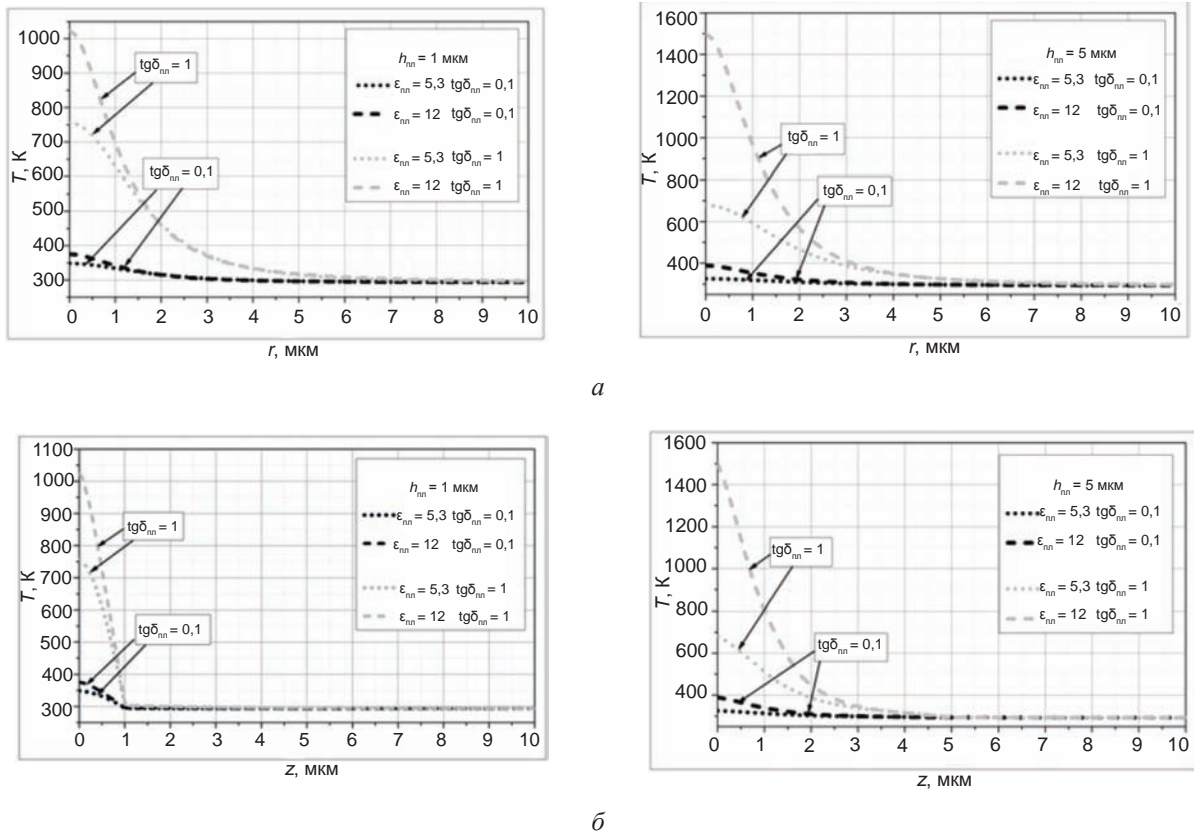


Рис. 7. Пространственное распределение температуры по поверхности (а) и по глубине объекта (б) ($R_{\text{пл}} = 10 \text{ мкм}$, $\lambda_{\text{пл}} = 1,14 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, $C_{\text{пл}} = 859 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, $\tau = 10 \text{ мкс}$)

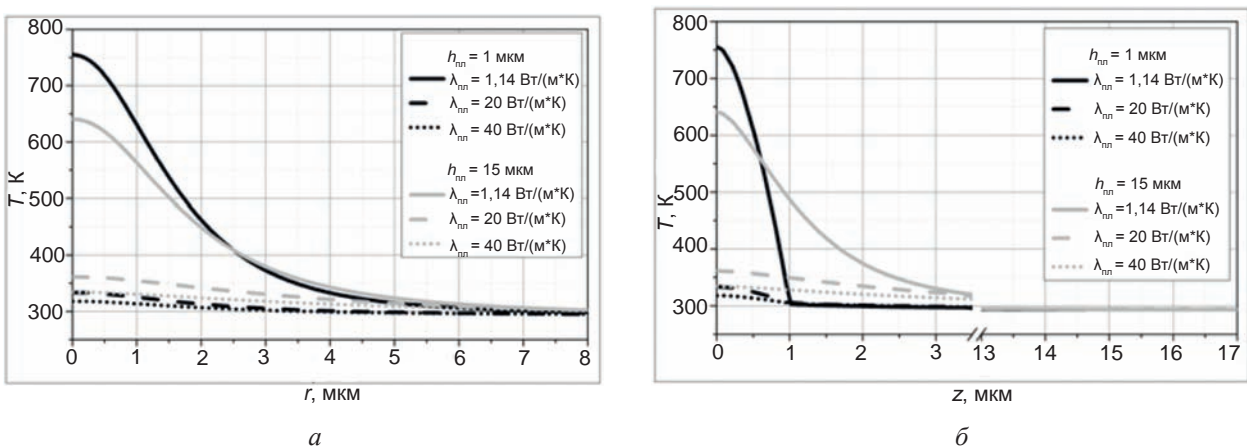


Рис. 8. Влияние теплопроводности пленки на распределение температуры по поверхности (а) и по глубине объекта (б) ($R_{\text{пл}} = 10 \text{ мкм}$, $\text{tg} \delta_{\text{пл}} = 1$, $C_{\text{пл}} = 859 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, $\tau = 10 \text{ мкс}$, $\epsilon_{\text{пл}} = 5,3$)

распределение этих процессов по толщине пленки будет определяться влиянием подложки, которое при ее значительной теплопроводности ухудшает локальность СВЧ нагрева и эффективность модификации в целом.

Распределение температуры по радиусу (по плоскости пленки), представленные на рис. 7 характеризует поперечную локализацию СВЧ разогрева. Предельная ее возможность в первую очередь определяется локализацией тепловыделения (рис. 5а). Однако, теплопроводность материала пленки весьма существенно нивелирует исходную локализацию разогрева. При этом указанный эффект проявляется особенно сильно при увеличении толщины пленки.

ВЫВОДЫ

1. Сравнение результатов исследования кинетики локального СВЧ разогрева и пространственно-временного распределения устанавливаемой температуры объемных объектов и тонкопленочных структур показывает их существенное различие. Если осуществляется только разогрев пленок, то следует отметить наличие существенного влияния теплопроводности подложки при ее заметной величине и превышении теплопроводности материала пленки.

2. Для приближения параметров локального разогрева пленки к исходному СВЧ тепловыделению в ней необходимо уменьшать теплопроводность и увеличивать толщину самой пленки.

3. Если пленка играет служебную роль при локальном разогреве подложки, то выбор ее параметров может определяться формированием локального тепловыделения в пленке независимо от параметров подложки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Неволин В. К. Зондовые нанотехнологии в электронике // Техносфера. — 2006. — 160 с.
2. Корнилов, В. М., Лачинов А. Н. К вопросу о модификации поверхности кремния при ее исследовании методом сканирующей туннельной микроскопии // Физика и техника полупроводников. — 2003. — Т. 37, вып. 3. — С. 323–327.
3. Обухов, И. А. О возможности применения

СТМ-АСМ литографии для создания новых типов квантовых приборов // Микросистемная техника. — 2003. — № 6. — С. 34–37.

4. Dagata, J. A. Modification of hydrogen-passivated silicon by a scanning tunneling microscope operating in air // J. Appl. Phys. Lett. — 1990. — Vol. 56. — P. 2001–2003.
5. Garcia, R. Nano-chemistry and scanning probe nanolithographies // Chem. Soc. Rev. — 2006. — No. 35. — P. 29–38.
6. Thompson K., Booske J. H., Ives R. L., Gorelov Y., Kajiwara K. Millisecond microwave annealing: Driving microelectronics nano // J. Vac. Sci. Technol. — May/June 2005. — P. 970–977.
7. Meir Y., Jerby E. The localized microwave-heating (LMH) paradigm – theory, experiments, and applications // Conference: 2nd Global Congress on Microwave Energy Applications, At Long Beach, CA, USA. — P. 131–145.
8. 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.
9. Anlage S. M. Principles of near-field microwave microscopy / S. M. Anlage, V. V. Talanov, A. R. Schwartz, eds. S. V. Kalinin, A. Gruverman // Scanning probe microscopy: electrical and electromechanical phenomena at the nanoscale. — N. Y.: Springer-Verlag. — 2007. — P. 207–245.
10. Гордиенко Ю. Е. Ближнеполевая сканирующая сверхвысокочастотная микродиагностика объектов в технологии электроники // Нові технології : наук.вісник ІЕНТ. — 2002. — № 1. — С. 3–6.
11. Гордієнко Ю. О. Скануюча мікрохвильова мікроскопія як інтелектуальна вимірювальна система / Інтелектуальні вимірювальні системи на основі мікроелектронних датчиків нового покоління: монографія // за ред. Я. І. Лепіха, В. О. Романова, Одеса: Астропринт, 2011. — С. 176–246.
12. Гордиенко Ю. Е., Полетаев Д. А., Проказа А. М., Слипченко Н. И. Высоколокальный СВЧ нагрев полупроводников и диэлектриков // Прикладная радиоэлектроника. — 2013. — Т. 12, № 3. — С. 452–458.
13. Гордиенко Ю. Е., Пятайкина М. И., Ларкин С. Ю., Полищук А. В., Проказа А. М.,

- Слипченко Н. И. Численное моделирование высоколокального СВЧ теплового воздействия в технологии модификации полупроводниковых тонкопленочных структур // *Радиоэлектроника и информатика*. — 2013. — № 4(63). — С. 8–13.
14. Yehuda Meir and Eli Jerby Transistor-Based Miniature Microwave-Drill Applicator // *IEEE Transactions on Microwave theory and techniques*. — 2012. — Vol. 60(8). — P. 2665–2672.
 15. Atif Imtaiz, Steven M. Anlage, Effect of tip geometry on contrast and spatial resolution of the near-field microwave microscope // *Journal of applied physics*. — 2006. — Vol. 100. — P. 1–8.
 16. Гордиенко Ю. Е., Ларкин С. Ю., Шиян О. П. Количественный анализ разрешающей способности зондовой сканирующей микроволновой микроскопии // *Прикладная радиоэлектроника: Электронная техника и приборы*. — Т. 11, № 3. — 2012. — С. 426–430.
 17. Gordienko Yu. Ye., Taran Ye. P. The model of numerical investigation of highly localized thermal effect of the microwave electromagnetic field upon semiconductive substances // *Telecommunications and radio engineering*. — 2013. — Vol. 72, No. 20. — P. 1899–1913.
 18. Гордиенко Ю. Е., Ларкин С. Ю., Слипченко Н. И., Щербака Е. Л. Кинетика локального СВЧ разогрева полупроводников и диэлектриков // *Радиотехника: Всеукр. межвед. научн.-техн. сб.* — 2014. — Вып. 177. — С. 98–104.
 19. Jerby E., Herskowits R, Livshits P. Silicon heating by a microwave-drill applicator with optical thermometry // *Semiconductor and Technology*. — 2007. — Vol. 22. — P. 863–869.
 - STM-ASM litografii dlya sozdaniya novykh tipov kvantovyh priborov // *Mikrosistemnaya tehnika*. — 2003. — No. 6. — P. 34–37.
 4. Dagata, J. A. Modification of hydrogen-passivated silicon by a scanning tunneling microscope operating in air // *J. Appl. Phys. Lett.* — 1990. — Vol. 56. — P. 2001–2003.
 5. Garcia, R. Nano-chemistry and scanning probe nanolithographies // *Chem. Soc. Rev.* — 2006. — No. 35. — P. 29–38.
 6. Thompson K., Booske J. H., Ives R. L., Gorelov Y., Kajiwara K. Millisecond microwave annealing: Driving microelectronics nano // *J. Vac. Sci. Technol.* — May/June 2005. — P. 970–977.
 7. Meir Y., Jerby E. The localized microwave-heating (LMH) paradigm – theory, experiments, and applications // *Conference: 2nd Global Congress on Microwave Energy Applications, At Long Beach, CA, USA*. — P. 131–145.
 8. 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.
 9. Anlage S. M. Principles of near-field microwave microscopy / S. M. Anlage, V. V. Talanov, A. R. Schwartz, eds. S. V. Kalinin, A. Gruverman // *Scanning probe microscopy: electrical and electromechanical phenomena at the nanoscale*. — N. Y.: Springer-Verlag. — 2007. — P. 207–245.
 10. Gordienko Yu. E. Blizhnepolevaya skaniruyushchaya sverhvysokochastotnaya mikrodiagnostika obektov v tehnologii elektroniki // *Novi tehnologii: nauk.visnik IENT*. — 2002. — No. 1. — P. 3–6.
 11. Gordienko Yu. O. Skanuyucha mikrohvil'ova mikroskopiya yak intelektual'na vimiryuval'na sistema / *Intelektual'ni vimiryuval'ni sistemi na osnovi mikroelektronnih datchikov novogo pokolinnya: monografiya* // za red. Ya. I. Lepiha, V. O. Romanova, Odesa: Astroprint, 2011. — P. 176–246.
 12. Gordienko Yu. E., Poletaev D. A., Prokaza A. M., Slipchenko N. I. Vysokolokal'nyj SVCh nagrev poluprovodnikov i dielektrikov // *Prikladnaya radioelektronika*. — 2013. — T. 12, No. 3. — P. 452–458.
 13. Gordienko Yu. E., Pyatajkina M. I., Larkin S. Yu., Polischuk A. V., Prokaza A. M.,

LITERATURA

1. Nevolin V. K. Zondovye nanotehnologii v elektronike // *Tehnosfera*. — 2006. — 160 p.
2. Kornilov, V. M., Lachinov A. N. K voprosu o modifikacii poverhnosti kremniya pri ee issledovanii metodom skaniruyushej tunnel'noj mikroskopii // *Fizika i tehnika poluprovodnikov*. — 2003. Vol. 37, vyp. 3. — P. 323–327.
3. Obuhov, I. A. O vozmozhnosti primeneniya

- Slipchenko N. I. Chislennoe modelirovanie vysokolokal'nogo SVCh teplovogo vozdeystviya v tehnologii modifikatsii poluprovodnikovyyh tonkoplenochnyyh struktur // Radioelektronika i informatika. — 2013. — No. 4(63). — P. 8–13.
14. Yehuda Meir and Eli Jerby Transistor-Based Miniature Microwave-Drill Applicator // IEEE Transactions on Microwave theory and techniques. — 2012. — Vol. 60(8). — P. 2665–2672.
15. Atif Imtaiz, Steven M. Anlage, Effect of tip geometry on contrast and spatial resolution of the near-field microwave microscope // Journal of applied physics. — 2006. — Vol. 100. — P. 1–8.
16. Gordienko Yu. E., Larkin S. Yu., Shiyan O. P. Kolichestvennyy analiz razreshayuschej sposobnosti zondovoj skaniruyuschej mikrovolnovoj mikroskopii // Prikladnaya radioelektronika: Elektronnaya tehnika i pribory. — Vol. 11, No. 3. — 2012. — P. 426–430.
17. Gordienko Yu. Ye., Taran Ye. P. The model of numerical investigation of highly localized thermal effect of the microwave electromagnetic field upon semiconductive substances // Telecommunications and radio engineering. — 2013. — Vol. 72, No. 20. — P. 1899–1913.
18. Gordienko Yu. E., Larkin S. Yu., Slipchenko N. I., Scherbaka E. L. Kinetika lokal'nogo SVCh razogreva poluprovodnikov i di'elektrikov // Radiotekhnika: Vseukr. mezhved. nauchn. -tehn. sb. — 2014. — Vyp. 177. — P. 98–104.
19. Jerby E., Herskowits R, Livshits P. Silicon heating by a microwave-drill applicator with optical thermometry // Semiconductor and Technology. — 2007. — Vol. 22. — P. 863–869.