

10. Ueyli B., Kheyn T., Snayder G., Nemet E. Unix i Linux: rukovodstvo sistemnogo administratora [Unix and Linux: System Administrator's Guide]. 4th ed. Izd-vo: Dialektika-Vil'yams, 2018, 1314 p.
11. Ber Bibo, Ieguda Kats. *jQuery*. Podrobnoe rukovodstvo po prodvnutomu JavaScript [A comprehensive guide to advanced JavaScript]. 2nd ed. Izd-vo «Simvol-Plyus», 2023, 612 p.
12. Jos Dirksen. Learn Three.js. 4 ed. Packt Publishing Ltd, 2023, 554 p.
13. Lukas D.K. Testirovanie JavaScript [JavaScript testing]. Izd-vo «Manning», 2023, 592 p.
14. Krivaya Bez'e [Bezier curve]. Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Krivaya\\_Bez'e](https://ru.wikipedia.org/wiki/Krivaya_Bez'e) (accessed 20 June 2022).
15. Kedlek T. Adaptivnyy dizayn. Delaem sayty dlya lyubykh ustroystv [Adaptive design. We make websites for any device]. Saint Petersburg: Izd-vo «Pi-ter», 2013, 289 p.
16. Sizova O.V. Sistemy podderzhki prinyatiya resheniy: ucheb. posobie [Decision support systems: textbook]. Izd-vo: IGKhTU – Ivanovo, 2017, 61 p.
17. Gladkov L.A., Kazharov A.A. Gibridnyy nechetko-geneticheskiy algoritm dlya resheniya zadachi kommvoyazhera [Hybrid fuzzy-genetic algorithm for solving the traveling salesman problem] *Tr. IV-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Integrirovannye modeli i myagkie vychisleniya v iskusstvennom intellekte"* [Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference "Integrated Models and Soft Computing in Artificial Intelligence"]. Kolomna, 2009.
18. Render (Rendering) – chto eto takoe, kak rabotaet i zachem nuzhen v 3D, video i igrakh [Rendering (Rendering) - what it is, how it works and why it is needed in 3D, video and games]. Available at: <https://dzen.ru/a/YMmwcJgx3UYavMSP> (accessed 10 July 2023).
19. Kureychik V.M., Kazharov A.A. Roeffoy intellekt v reshenii grafovyykh zadach [Swarm intelligence in solving graph problems]. *Mezhdunar. konf. po myagkim vychisleniyam i izmereniyam (SCM'2013): Sb. trudov* [International Conference on Soft Computing and Measurement (SCM'2013): Proceedings]. Saint Petersburg, 2013, pp. 31-34.
20. ODuo Batteries: pervyy sayt kastomnykh batarey [ODuo Batteries: the first custom battery site]. Available at: <https://dzen.ru/media/id/632630e9302fdb6e65085791/oduo-batteries-pervyi-sait-kastomnykh-akb-632634dc47b76016e2b5e850> (accessed 12 August 2023).

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.П. Малуков.

**Кажаров Аскер Артурович** – Южный федеральный университет; e-mail: aakazharov@sfedu.ru; с. Александрова Коса, Россия; тел.: +79064233689; кафедра САПР; к.т.н.; старший преподаватель.

**Kazharov Asker Arturovich** – Southern Federal University; e-mail: aakazharov@sfedu.ru; Alexandrova Kosa, Russia; phone: +79064233689; the department of CAD; cand. of eng. sc.; senior lecturer.

УДК 621.315.592

DOI 10.18522/2311-3103-2023-4-200-210

**Б.М. Середин, В.П. Попов, А.В. Малибашев, А.А. Скиданов, М.Б. Зиненко**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА В НАГРЕВАТЕЛЬНОМ УСТРОЙСТВЕ ДЛЯ ТЕРМОМИГРАЦИИ ЖИДКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В КРЕМНИИ**

*Жидкие включения мигрируют в твёрдых телах в направлении градиента температуры. Это даёт уникальную возможность формировать в пластинах кремния кристаллически совершенные структуры со сквозными легированными эпитаксиальными каналами или замкнутыми ячейками, представляющими интерес при конструировании силовых полупроводниковых приборов и фотоэлектрических преобразователей. Причем конкурентных методов изготовления таких структур нет, поскольку скорость термомиграции на четыре порядка превышает скорость твердотельной диффузии. Однако практическое применение метода термомиграции (ТМ) в полупроводниковой электронике сдерживается пере-*

иённой проблемой создания необходимого однородного поля градиента температуры в пластине кремния. Нарушение однородности градиента температуры приводит к отклонению траекторий движения дискретных жидких включений от нормали, искажает заданную топологию включений на стартовой поверхности пластины и делает невозможным применение групповой технологии для последующих операций изготовления приборов. В настоящей работе выполнено компьютерное моделирование процессов теплообмена в нагревательном устройстве с целью достижения в пластине кремния однородного поля градиента температуры, создаваемого плоским резистивным нагревательным элементом в виде спирали. Выявлены причины возникновения периодических и монотонных радиальных неоднородностей поля градиента температуры, искажающих траектории движения жидких включений и форму получаемых каналов. Предложены способы уменьшения и устранения этих искажений. Основными элементами управления конфигурацией поля градиента температуры в пластине кремния оказались кассета, удерживающая пластину на определённом расстоянии от нагревательного элемента и фронтальные экраны с отверстиями, соосными пластине кремния. Определены и экспериментально подтверждены размеры, взаимное расположение элементов нагревательного устройства, обеспечивающего требуемую однородность поля градиента температуры для промышленного применения термомиграции системы линейных включений (зон) на пластинах кремния диаметром 100 мм.

*Термомиграция; нагревательное устройство; компьютерное моделирование; градиент температуры.*

**B.M. Seredin, V.P. Popov, A.V. Malibashev, A.A. Skidanov, M.B. Zinenko**

#### **INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER PROCESSES IN A HEATING DEVICE FOR THERMAL MIGRATION OF LIQUID INCLUSIONS IN SILICON**

*Liquid inclusions migrate in solids in the direction of the temperature gradient. This gives a unique opportunity to form crystal perfect structures in silicon wafers with through-doped epitaxial channels or closed cells, which are of interest in the design of power semiconductor devices and photovoltaic converters. Moreover, there are no competitive methods of manufacturing such structures, since the rate of thermal migration is four orders of magnitude higher than the rate of solid-state diffusion. However the practical application of the thermomigration (TM) method in semiconductor electronics is hindered by the unsolved problem of creating the necessary homogeneous temperature gradient field in a silicon wafer. Violation of the uniformity of the temperature gradient leads to a deviation of the trajectories of discrete liquid inclusions from the normal and distorts the specified topology of inclusions on the starting surface of the plate and makes it impossible to use group technology to obtain subsequent manufacturing operations of semiconductor devices. In this paper, a computer simulation of heat transfer processes in a heating device is performed in order to achieve a homogeneous temperature gradient field in a silicon wafer created by a flat resistive heating element in the form of a spiral. The causes of periodic and monotonous radial inhomogeneities of the temperature gradient field that distort the trajectories of liquid inclusions and the shape of the resulting channels are revealed. Ways to reduce and eliminate these distortions are proposed. The main controls for the configuration of the temperature gradient field in the silicon wafer turned out to be a cassette holding the wafer at a certain distance from the heating element and front screens with holes coaxial to the silicon wafer. The dimensions and mutual arrangement of the elements of a heating device providing the required uniformity of the temperature gradient field for industrial applications of thermal migration of a system of linear inclusions of zones on silicon wafers with a diameter of 100 mm have been determined and experimentally confirmed.*

*Thermomigration; heating device; computer modeling; temperature gradient.*

**Введение.** Термомиграция (ТМ) металлических жидких включений в полупроводниках известна давно [1]. Основные закономерности и принципиальные возможности метода ТМ изучены достаточно полно [2–7]. Для таких исследований высокая однородность поля температурного градиента не обязательна. В работах,

посвящённых исследованиям метода ТМ, градиент температуры создавали в пластине кремния с помощью плоского нагревательного элемента, расположенного параллельно пластине, в виде спирали из тугоплавкой проволоки [2] или графита [8–13]. Известны попытки применения для ТМ нагревателей на основе системы галогеновых ламп [3–5] или вспомогательной пластины, нагреваемой электронным лучом [6]. В некоторых нагревательных устройствах для выравнивания температурного поля пластину кремния вращали в процессе ТМ [14, 15]. Достигнутая однородность градиента температуры в указанных работах была недостаточной для эффективного промышленного применения метода ТМ, особенно на стандартных пластинах больших диаметров [16–18].

В настоящей работе изучена возможность создания однородного поля градиента температуры при помощи плоского резистивного нагревателя в виде параллельных полос. Для этого выполнено компьютерное моделирование и прецизионные эксперименты по контролю конфигурации температурного поля в пластинах кремния диаметром 100 мм.

**Постановка задачи.** Исследуемое нагревательное устройство состоит из корпуса, плоского нагревательного элемента, кассет для удержания пластин, системы фронтальных экранов и предназначено для одновременного проведения процесса ТМ на двух одинаковых пластинах кремния (рис. 1).

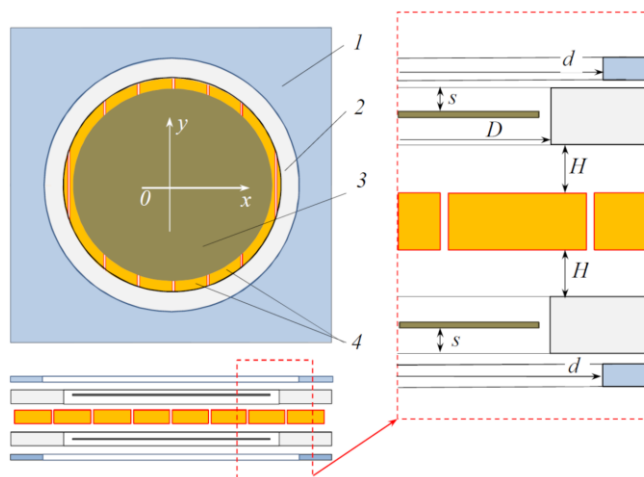


Рис. 1. Схематическое изображение нагревательного устройства для ТМ и его поперечного сечения: 1 – фронтальный экран; 2 – кассета; 3 – пластина кремния; 4 – полосы нагревательного элемента

Детали нагревательного устройства выполнены в основном из графита марки МПГ. В качестве изоляторов использовали алундовую керамику. Нагревательное устройство устанавливали в вакуумной водоохлаждаемой камере и оно обеспечивало на пластинах кремния температуру в интервале 1170–1570 К и градиент температуры 20–100 К/см. Потребляемая мощность не превышала 10 кВт.

В конструкции нагревательного устройства заложена возможность изменения взаимного расположения составных частей, что позволяет управлять тепловыми потоками и однородностью поля градиента температуры. Регулируемыми параметрами выступают: расстояние  $H$  от кассеты до нагревательного элемента (диапазон изменения 2–10 мм); диаметр отверстия  $D$  в кассете для удержания пластины (102–104 мм); заглубление  $s$  пластины внутри кассеты (0–4,5 мм) и диаметр отверстия  $d$  во фронтальном экране (102–140 мм) (см. рис. 1).

Для анализа теплообменных процессов, определяющих температурное поле в пластине, было проведено компьютерное моделирование в универсальной программной системе анализа методом конечных элементов Ansys, с применением модуля комплексного термоэлектрического анализа (Thermal-Electric) [19]. В этом модуле реализована математическая модель физических процессов, а также численные методы, позволяющие рассчитать распределение температуры на элементах нагревательного устройства с учётом процессов теплопроводности в твёрдых телах и теплового излучения между ними и окружающей средой. Работа с модулем, а также взаимодействие между его элементами осуществлялось с помощью оболочки ANSYS Workbench. Была построена трехмерная модель рассматриваемого нагревательного устройства. В базу данных материалов добавлены графит, сапфир и кремний, внесены их физические свойства, используемые при расчетах, зависимости от температуры удельных теплоемкости, теплопроводности, электропроводности [20]. В разделе Steady State Thermal-Electric Conduction задавались параметры условий теплового обмена между нагревательным элементом, кассетой и пластиной; боковой поверхностью пластины и кассеты; поверхностью кассеты и фронтального экрана; боковой поверхности фронтального экрана и пластины, а также условия лучистого обмена со стенками водоохлаждаемой вакуумной камеры. Учитывалось различие оптических свойств материалов конструкции. Подаваемое на нагревательный элемент постоянное напряжение и токовая нагрузка резистивного нагревательного элемента определялись, исходя из температуры, формируемой им в центре пластины  $\sim 1375$  К.

**Результаты моделирования.** Компьютерное моделирование показало, что в стационарном режиме пластина кремния нагрета неравномерно, на ней проявляются периодические неоднородности, связанные со структурой нагревательного элемента, а также монотонные неоднородности, вызванные тепловым излучением с боковой поверхности пластины и приводящие к охлаждению её внешней части.

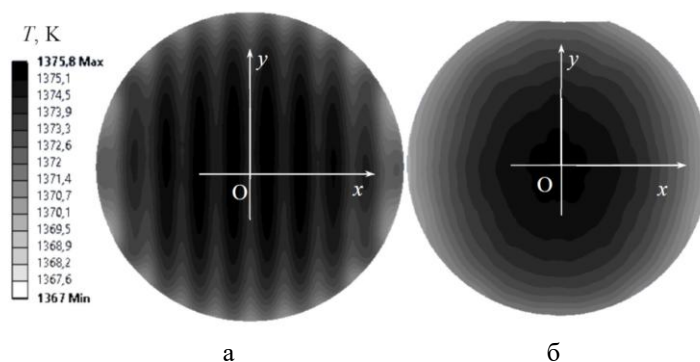


Рис. 2. Карты распределения температуры на стартовой поверхности пластины: а – периодические неоднородности температуры ( $H = 2$  мм,  $s = 4,5$  мм,  $D = 102$  мм); б – охлаждение периферийной части пластины ( $H = 6$  мм,  $s = 0$  мм,  $D = 102$  мм)

На рис. 2 приведены карты распределения температуры на стартовой поверхности пластины в стационарных условиях работы нагревательного устройства, иллюстрирующие неоднородности температурного поля. При близком расположении пластины и нагревательного элемента нагрев пластины вдоль оси  $Ox$  периодически неравномерный, величина нормального градиента температуры  $G_n$  отличается от среднего значения максимум на  $3$  К/см ( $\sim 5\% G_n$ ). Увеличение расстояния

от пластины до нагревателя устраняет эту неоднородность, но приводит к увеличению разности температур между центральной и периферийной областями пластины до 25 К и тангенциальному градиенту температуры  $G_\tau$  до  $\sim 30$  К/см ( $\sim 50\% G_n$ ). Критерием однородности поля градиента температуры следует считать значение тангенциальной составляющей градиента: в идеале эта составляющая должна отсутствовать.

Кассеты, в которых закреплены обрабатываемые пластины, являются основными элементами нагревательного устройства, влияющими на распределение температуры в пластине. Изменение расстояния от кассеты до нагревателя, а также заглабление пластины внутри отверстия кассеты оказывают наибольшее влияние на поле градиента температуры. При наименьшем расстоянии между кассетой и нагревательным элементом ( $H = 2$  мм,  $s = 4,5$  мм) возникают наибольшие периодические неоднородности градиента температуры, неустранимые теплопроводностью пластины (рис. 3.а). Моделирование показало, что при увеличении расстояния  $H$  до 6 мм неоднородности поля градиента температуры, связанные с проявлением периодической структуры нагревательного элемента, уменьшаются до  $G_\tau \sim 0,5$  К/см. Однако при этом остается существенной разность температур между центральной и периферийной частями пластины. Управление перегревом или охлаждением периферии пластины возможно путём изменения величины её заглабления в кассете при фиксированном расстоянии между кассетой и нагревательным элементом (рис. 3,б). При заглаблении пластины на величину 2,5 мм в кассете толщиной 5 мм краевые эффекты нивелируются (кривая 2 рис. 3,б).

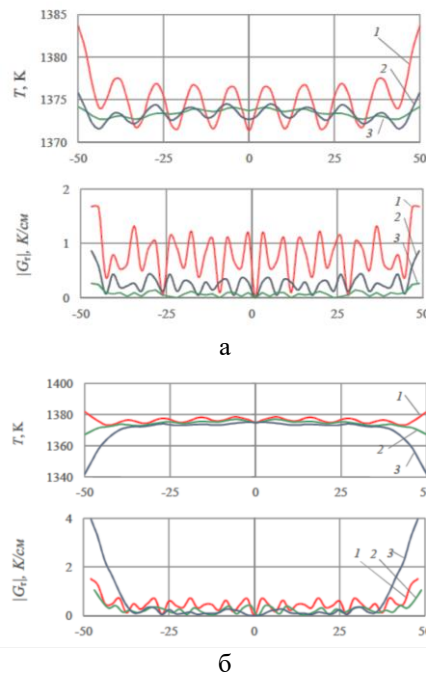


Рис. 3. Зависимости распределения температуры  $T$  и тангенциальной составляющей градиента температуры  $|G_\tau|$  вдоль оси  $Ox$  при различных значениях параметров: а –  $s = 4,5$  мм  $H = 2, 4, 6$  мм – кривые 1, 2, 3; б –  $H = 6$  мм;  $s = 4,5, 2,5, 0$  мм – кривые 1, 2, 3

Обнаруженное влияние кассеты на радиальные искажения температурного поля в пластине физически объясняется особенностями лучистого теплообмена между торцом пластины и стенками отверстия в кассете. Различие коэффициентов поглощения графита и кремния (0,9 и 0,65) приводит к более высокой температуре (на 30–50 К) поверхности кассеты относительно температуры поверхности кремния при одинаковых условиях нагрева. Градиент температуры в графите примерно в три раза ниже, чем в кремнии (из-за различия теплопроводностей этих материалов), а толщина кассеты в 10 раз больше толщины пластины кремния. Поэтому существует оптимальное значение заглубления пластины, соответствующее установлению теплового баланса между торцом пластины и стенкой отверстия в кассете, необходимого для предотвращения утечек тепла с периферии пластины и устранения радиальных неоднородностей температуры.

Недостатком регулирования температурного поля в пластине кремния варьированием заглубления является резкая зависимость конфигурации температурного поля от величины заглубления (особенно в точке теплового баланса), а также техническая сложность изменения этого параметра в нагревательном устройстве.

Кроме кассеты для устранения радиальных неоднородностей градиента температуры предложено использовать фронтальные экраны с отверстиями, размер которых превышает размер пластины кремния (см. рис. 1). Такие экраны не ограничивают тепловой поток через пластину кремния и, следовательно, не уменьшают нормальный градиент температуры и скорость ТМ. В то же время такие экраны уменьшают тепловой поток вокруг пластины кремния, подогревают кассету и нагревательный элемент за пределами пластины, что должно уменьшать тангенциальную составляющую градиента температуры. Компьютерное моделирование подтвердило эту идею. Видно, что наличие фронтального экрана с отверстием уменьшает охлаждение периферии пластины (рис. 4). Причём этот эффект тем сильнее, чем ближе диаметр отверстия экрана к диаметру пластины кремния. Один экран уменьшил тангенциальную составляющую на краю пластины с 17 К/см до 3,5 К/см. В общем, использование фронтальных экранов с подбираемыми отверстиями позволяет плавно и в широких пределах регулировать радиальные неоднородности температуры и производить точную настройку необходимой конфигурации поля градиента температуры.

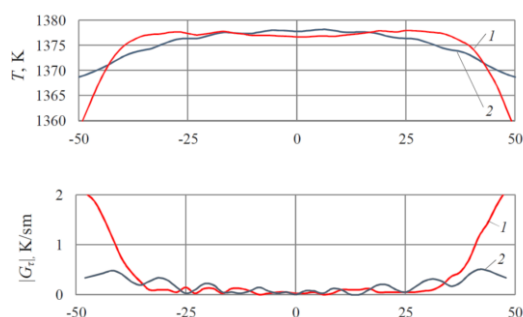


Рис. 4. Влияние фронтального экрана с отверстием на распределение температуры  $T$  и тангенциальной составляющей градиента температуры  $|G_t|$  вдоль оси  $Ox$ . Кривая 1 – без экрана ( $s = 0$  мм;  $H = 6$  мм); кривая 2 – с экраном ( $s = 0$  мм;  $H = 6$  мм;  $d = 104$  мм)

Компьютерным моделированием оценили также влияние на температурное поле в пластине кремния выравнивающей температуру (буферной) пластины, расположенной между нагревательным элементом и пластиной кремния. Буферные

пластины толщиной 1 мм из графита, кремния и сапфира дали примерно одинаковые результаты: они полностью устранили периодические, но увеличили монотонные радиальные неоднородности поля градиента температуры. Использование буферных пластин требовало увеличения температуры нагревательного элемента на 150–220 К для установления той же температуры на пластине кремния, что снижало в целом ресурс нагревательного устройства. Поэтому применение буферных пластин для повышения однородности нагрева нецелесообразно.

На завершающем этапе компьютерного моделирования изучили возможность уменьшения периодических неоднородностей температуры путем заполнения пропилов между полосами нагревательного элемента диэлектрическими вставками из алунда или сапфира. Действительно, нагревательный элемент с такими вставками давал более равномерное (сплошное) излучение и периодические неоднородности градиента температуры в пластине не проявлялись. На радиальные неоднородности диэлектрические вставки, как и ожидалось, не повлияли.

**Экспериментальные результаты.** Контроль конфигурации температурного поля в пластине кремния проводили по изучению траекторий ТМ системы точечных или линейных зон на основе алюминия по методике [21]. Для этого на кремниевую пластину с кристаллографической ориентацией (100) наносили магнетронным осаждением слой алюминия толщиной 10 мкм. Затем с помощью фотолинтографии получали систему дискретных зон, равномерно расположенных по всей пластине. Диаметр точечных зон на старте составлял 200 мкм, ширина линейных зон – 100 мкм. Расстояние между зонами выбирали от 0,2 до 5 мм. Линейные зоны образовывали ортогональную сетку или представляли систему несвязанных между собой квадратов. Линейные зоны ориентировали всегда по кристаллографическим направлениям  $\langle 110 \rangle$  и по осям относительно нагревательного элемента (см. рис. 1)  $Ox$ ,  $Oy$  или под углом  $45^\circ$  к ним. Температурно-временной режим ТМ задавали высокоточным регулятором Термодат-16Е.

Металлографический анализ траекторий движения зон, как в объёме пластины, так и на её финишной поверхности, позволял судить об искажениях поля температурного градиента. Особенно чувствительными к тангенциальным составляющим градиента температуры оказались траектории движения зон вдоль поверхности. Расстояние, пройденное зоной по поверхности пластины при достаточно большой выдержке после выхода зон, позволило оценить значение тангенциальной составляющей  $G_t$  с точностью до 0,1 К/см.

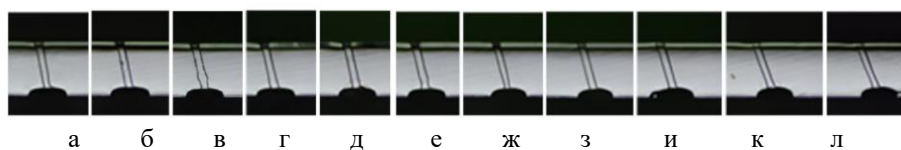
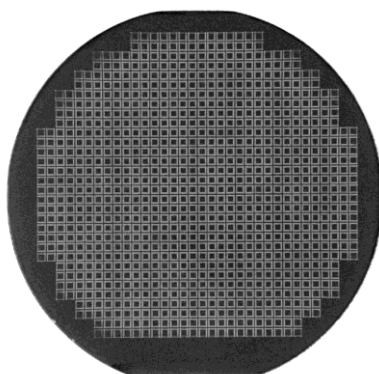


Рис. 5. Поперечные сечения эпитаксиальных каналов на различных расстояниях от центра пластины (мм): 18 (а), 20 (б), 22 (в), 24 (г), 26 (д), 28 (е), 30 (ж), 32 (з), 34 (и), 36 (к), 38 (л). Угол отклонения каналов от нормали монотонно изменяется от 8 до 20 градусов. Зоны двигались снизу-вверх. Толщина пластины кремния 500 мкм. ( $H = 6$  мм;  $s = 1$  мм) Фронтальный экран отсутствует

Экспериментально установлены как монотонные радиальные отклонения траекторий движения линейных зон от нормали, направленные к центру или периферии пластины, так и периодические разнонаправленные отклонения траекторий линейных зон, расположенных вдоль оси  $Oy$ . Для примера на рисунке 5 показан поперечный шлиф пластины кремния с выявленными каналами, полученными

при ТМ системы параллельных линейных зон через пластину кремния. Видно, что траектории движения зон отклоняются от нормали к центру пластины, причем отклонение тем больше, чем дальше от центра располагается линейная зона. Такая картина типична также при нагреве пластины плоским нагревателем без использования специальной кассеты и фронтальных экранов с отверстием. При проведении экспериментов обнаружили ещё одну возможность применения фронтальных экранов для устранения аппаратных искажений температурного поля, связанных с наличием тоководов или крепёжных элементов. Так, тоководы, выведенные на один торец корпуса нагревательного устройства, понижали температуру пластины кремния вблизи этой области. Использование фронтального экрана с асимметричным отверстием грушевидной формы (подбираемой эмпирически) позволило устранить эту неоднородность нагрева, благодаря тому, что большая площадь отверстия экрана вокруг пластины кремния располагалась с противоположной стороны от тоководов.



*Рис. 6. Финишная поверхность пластины кремния с дискретными квадратными зонами*

Все описанные выводы, сделанные на основе компьютерного моделирования, нашли экспериментальное подтверждение в особенностях траекторий движения дискретных зон при ТМ. Достигнутая однородность поля градиента температуры позволила воспроизводимо получать структуры для силовых полупроводниковых приборов на токи до 100 А. На рис. 6 представлена фотография финишной поверхности пластины кремния с полученными сквозными замкнутыми ячейками в форме квадратов. Видно, что размеры, форма ячеек и расстояние между ними одинаковы, что возможно только при достаточно высокой однородности поля градиента температуры в пластине кремния при ТМ.

**Заключение.** Компьютерным моделированием процессов теплообмена в нагревательном устройстве и экспериментально по траекториям движения дискретных зон изучено температурное поле в пластине кремния при ТМ. Выявлены периодические и монотонные радиальные неоднородности распределения температуры в плоскости пластины кремния. Объяснены вызывающие их причины и найдены условия устранения этих неоднородностей. Установлено влияние на однородность поля градиента температуры кассеты, фронтальных экранов с отверстиями, выравнивающей пластины, электрических вставок в прорези нагревательного элемента. Наибольший эффект на конфигурацию температурного поля в пластине кремния оказывают удерживающая пластину относительно толстая кассета и фронтальные экраны со специальными отверстиями. Основным критерием однородности градиента температуры является величина его тангенциальной состав-



ляющей. При определенных геометрических соотношениях между элементами нагревательного устройства достигнуто значение тангенциальной составляющей градиента температуры  $\sim 0,5$  К/см, что обеспечивает синхронное движение системы дискретных зон нормально поверхности пластины кремния.

**Финансирование работы.** Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания Южно-Российскому государственному политехническому университету (НПИ) имени М.И. Платова по теме FENN-2023-0005.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Pfann W.G. Zone Melting. – 2nd ed. – New York, 1966. – 310 p.
2. Лозовский В.Н., Лукин Л.С., Попов В.П. Зонная перекристаллизация градиентом температуры полупроводниковых материалов. – М.: Металлургия, 1987. – 232 с.
3. Anthony T.R., Boah J.K., Chang M.F., Cline H.E. Thermomigration processing of isolation grids in power structures // IEEE Transactions on Electron Devices. – 1976. – Vol. 23, No 8. – P. 818-823.
4. Chang M., Kennedy R. The Application of Temperature Gradient Zone Melting to Silicon Wafer Processing // Journal Electrochem Soc. – 1981. – Vol. 128, No. 10. – P. 2193-2198.
5. Cline H.E. and Anthony T.R. High speed droplet migration silicon // Journal of Applied Physics. – 1976. – Vol. 47, No. 10. – P. 2325-2331.
6. Cline H.E. and Anthony T.R. Thermomigration of aluminium-rich liquid wires through silicon // Journal Appl. Phys. – 1976. – Vol. 47, No. 6. – P. 2332-2336.
7. Cline H.E. and Anthony T.R. On the thermomigration of liquid wires // Journal of Applied Physics. – 1978. – Vol. 49, No. 5. – P. 2777-2786.
8. Полухин А.С., Зуева Т.К., Солодовник А.И. Использование термомиграции в технологии структур силовых полупроводниковых приборов // Силовая электроника. – 2006. – Т. 3 (9). – С. 110-112.
9. Полухин А.С. Термомиграция неориентированных линейных зон в кремниевых пластинах (100) для производства чипов силовых полупроводниковых приборов // Компоненты и технологии. – 2008. – Т. 11. – С. 97-100.
10. Полухин А.С. Анализ технологических факторов процесса термомиграции // Силовая электроника. – 2013. – Т. 5 (9). – С. 118-120.
11. Лозовский В.Н., Середин Б.М., Полухин А.С., Солодовник А.И. Оборудование для получения кремниевых структур методом термомиграции // Электронная техника. Серия 2: Полупроводниковые приборы. – 2015. – № 5 (239). – С. 65-76.
12. Полухин О.С. Використання термоміграції в технології силових напівпровідникових приладів // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2018. – № 3. – С. 16-24.
13. Polukhin O.S., Kravchina V.V. Thermomigration of non-oriented aluminium-rich liquid zones through (110) silicon wafers // Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature. – 2021. – No. 5-6. – P. 33-40.
14. Pat. 4087239 United States, Int. C1.2 F27B 9/14. Apparatus for imparting combined centrosymmetric and noncentro-symmetric rotation to semiconductor bodies / Cline H.E., Anthony T.R. No.: 733239. – May 2, 1978.
15. Pat. 4523067 United States, Int. C1.3 H05B 6/10. Temperature gradient zone melting apparatus / Roger H. Brown, Kuen Chow, Norman W. Goodwin, Jan Grinberg. No.: 366901. – June 11, 1985.
16. Morillon B. Etude de la thermomigration de l'aluminium dans le silicium pour la réalisation industrielle de murs d'isolation dans les composants de puissance bidirectionnels // Micro et nanotechnologies/Microélectronique. INSA de Toulouse, 2002. Français.
17. Bin Lu. Realisation De Peripheries Innovantes De TRIAC Par Thermomigration D'aluminium Et Insertion De Silicium Poreux. Univerite Froacois – Rabelais De Tours, 2017
18. Lomov A.A., Seredin B.M., Gavrus I.V., Martyushov S.Yu. Aluminum doped thermomigrated silicon channels for high voltage solar cell: Structure and electrical properties // Proc. SPIE 12157, International Conference on Micro- and Nano-Electronics. – 2021. – P. 1215703.
19. Ansys: официальный сайт. – URL: <https://www.ansys.com>.

20. Шелудяк Ю.Е., Кашипов Л.Я., Малинин Л.А., Цалков В.Н. Теплофизические свойства компонентов горючих систем: Справочник / под ред. Н.А. Силина; НПО "Информ ТЭИ". – М., 1992. – 92 с.
21. Вигдорovich В.Н., Гершианов В.Ю., Константинова Г.С., Лозовский В.Н., Попов В.П. Зонная плавка с градиентом температуры как метод физических исследований // Заводская лаборатория. – 1970. – № 11. – С. 1350-1364.

#### REFERENCES

1. Pfann W.G. Zone Melting. 2nd ed. New York, 1966, 310 p.
2. Lozovskiy V.N., Lumin L.S., Popov V.P. Zonnaya perekristallizatsiya gradientom temperatury poluprovodnikovyykh materialov [Zone recrystallization by temperature gradient of semiconductor materials]. Moscow: Metallurgiya, 1987, 232 p.
3. Anthony T.R., Boah J.K., Chang M.F., Cline H.E. Thermomigration processing of isolation grids in power structures, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1976, Vol. 23, No. 8, pp. 818-823.
4. Chang M., Kennedy R. The Application of Temperature Gradient Zone Melting to Silicon Wafer Processing, *Journal Electrochem Soc.*, 1981, Vol. 128, No. 10, pp. 2193-2198.
5. Cline H.E. and Anthony T.R. High speed droplet migration silicon, *Journal of Applied Physics*, 1976, Vol. 47, No. 10, pp. 2325-2331.
6. Cline H.E. and Anthony T.R. Thermomigration of aluminium-rich liquid wires through silicon, *Journal Appl. Phys.*, 1976, Vol. 47, No. 6, pp. 2332-2336.
7. Cline H.E. and Anthony T.R. On the thermomigration of liquid wires, *Journal of Applied Physics*, 1978, Vol. 479, No. 5, pp. 2777-2786.
8. Polukhin A.S., Zueva T.K., Solodovnik A.I. Ispol'zovanie termomigratsii v tekhnologii struktur silovyykh poluprovodnikovyykh priborov [The use of thermal migration in the technology of structures of power semiconductor devices], *Silovaya elektronika* [Power Electronics], 2006, Vol. 3 (9), pp. 110-112.
9. Polukhin A.S. Termomigratsiya neorientirovannykh lineynykh zon v kremnievykh plastinakh (100) dlya proizvodstva chipov silovyykh poluprovodnikovyykh priborov [Thermomigration of unoriented linear zones in silicon wafers (100) for the production of power semiconductor device chips], *Komponenty i tekhnologii* [Components and Technologies], 2008, Vol. 11, pp. 97-100.
10. Polukhin A.S. Analiz tekhnologicheskikh faktorov protsessa termomigratsii [Analysis of technological factors of the thermomigration process], *Silovaya elektronika* [Power Electronics], 2013, Vol. 5 (9), pp. 118-120.
11. Lozovskiy V.N., Seredin B.M., Polukhin A.S., Solodovnik A.I. Oborudovanie dlya polucheniya kremnievykh struktur metodom termomigratsii [Equipment for producing silicon structures by thermomigration], *Elektronnaya tekhnika. Seriya 2: Poluprovodnikovyye pribory* [Electronic technology. Series 2: Semiconductor devices], 2015, No. 5 (239), pp. 65-76.
12. Polukhin O.S. Vikoristannya termomigratsii v tekhnologii silovikh napivprovodnikovikh priladiv [Vicious thermomigration in the technology of power conductor devices], *Radioelektronika, informatika, upravlinnya* [Radioelectronics, informatics, control], 2018, No. 3, pp. 16-24.
13. Polukhin O.S., Kravchina V.V. Thermomigration of non-oriented aluminium-rich liquid zones through (110) silicon wafers, *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnai Apparature*, 2021, No. 5-6, pp. 33-40.
14. Cline H.E., Anthony T.R. Patent 4087239 United States, Int. C1.2 F27B 9/14. Apparatus for imparting combined centrosymmetric and noncentro-symmetric rotation to semiconductor bodies. No.: 733239. May 2, 1978.
15. Roger H. Brown, Kuen Chow, Norman W. Goodwin, Jan Grinberg. Patent 4523067 United States, Int. C1.3 H05B 6/10. Temperature gradient zone melting apparatus. No.: 366901. June 11, 1985.
16. Morillon B. Etude de la thermomigration de l'aluminium dans le silicium pour la réalisation industrielle de murs d'isolation dans les composants de puissance bidirectionnels, *Micro et nanotech nologies/Microélectronique. INSA de Toulouse, 2002. Français.*
17. Bin Lu. Realisation De Peripheries Innovantes De TRIAC Par Thermomigration D'aluminium Et Insertion De Silicium Poreux. Univerite Froacois Rabelais De Tours, 2017

18. *Lomov A.A., Seredin B.M., Gavrus I.V., Martyushov S.Yu.* Aluminum doped thermomigrated silicon channels for high voltage solar cell: Structure and electrical properties, *Proc. SPIE 12157, International Conference on Micro- and Nano-Electronics*, 2021, pp 1215703.
19. Ansys. Available at: <https://www.ansys.com>.
20. *Sheludyak Yu.E., Kashporov L.Ya., Malinin L.A., TSalkov V.N.* Теплофизические свойства компонентов горючих систем: Справочник [Thermophysical properties of components of combustible systems: Handbook], ed. by N.A. Silina; NPO "Inform TEI". Moscow, 1992, 92 p.
21. *Vigdorovich V.N., Gershanov V.Yu., Konstantinova G.S., Lozovskiy V.N., Popov V.P.* Зонная плавка с градиентом температуры как метод физических исследований [Zone melting with a temperature gradient as a method of physical research], *Zavodskaya laboratoriya [Factory Laboratory]*, 1970, No. 11, pp. 1350-1364.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.В. Курейчик.

**Середин Борис Михайлович** – Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова; e-mail: [seredinboris@gmail.com](mailto:seredinboris@gmail.com); г. Новочеркасск, Россия; кафедра физики и фотоники; д. т. н.; заведующий.

**Попов Виктор Павлович** – e-mail: [popovnp@gmail.com](mailto:popovnp@gmail.com); кафедра физики и фотоники; д.т.н.; профессор.

**Малибашев Александр Владимирович** – e-mail: [a\\_malib@mail.ru](mailto:a_malib@mail.ru); кафедра физики и фотоники; к.т.н.; доцент.

**Зиненко Марина Борисовна** – e-mail: [p1648@yandex.ru](mailto:p1648@yandex.ru); кафедра физики и фотоники; аспирант.

**Скиданов Алексей Александрович** – Акционерное общество «ВЗПП-Микрон»; e-mail: [askidanov@vsp-mikron.com](mailto:askidanov@vsp-mikron.com); г. Воронеж, Россия; главный конструктор.

**Seredin Boris Mikhailovich** – South Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov; e-mail: [seredinboris@gmail.com](mailto:seredinboris@gmail.com); Novocherkassk, Russia; the department of physics and photonics; dr. of eng. sc.; head of the department.

**Popov Viktor Pavlovich** – e-mail [popovnp@gmail.com](mailto:popovnp@gmail.com); the department of physics and photonics; dr. of eng. sc.; professor.

**Malibashev Alexander Vladimirovich** – e-mail: [a\\_malib@mail.ru](mailto:a_malib@mail.ru); the department of physics and photonics; cand. sc.; associate professor.

**Zinenko Marina Borisovna** – e-mail: [p1648@yandex.ru](mailto:p1648@yandex.ru); the department of physics and photonics; Novocherkassk, Russia; postgraduate student.

**Skidanov Alexey Alexandrovich** – VSP-Micron Joint Stock Company; e-mail: [askidanov@vsp-mikron.com](mailto:askidanov@vsp-mikron.com); Voronezh, Russia; chief designer.

УДК 612.769

DOI 10.18522/2311-3103-2023-4-210-220

**А.В. Леонова, С.А. Синюгин, О.Ю. Шпаковская, З.А. Коков**

### **РАЗРАБОТКА АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ ГОТОВНОСТИ ВСАДНИКА И ЛОШАДИ К ИППОТЕРАПИИ**

*Иппотерапия является уникальным методом для восстановления и активного психофизического и психомоторного развития. Однако эффективность метода иппотерапии не доказана научно. Вследствие отсутствия объективных доказательств эффективности иппотерапии, данный метод вызывает сомнения у врачей; родителей детей с ограниченными возможностями здоровья (ОВЗ) из-за риска негативного влияния данного метода на организм человека, связанного с возможной травмой физического и психологического ха-*