

## ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КРЕМНИЕВЫХ СТРУКТУР МЕТОДОМ ТЕРМОМИГРАЦИИ

© В. Н. Лозовский<sup>1</sup>, Б. М. Середин<sup>1</sup>, А. С. Полухин<sup>2</sup>, А. И. Солодовник<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132

<sup>2</sup>ООО «Элемент-Преобразователь», 69069, г. Запорожье, Днепронетровское ш., 9

Выполнен сравнительный анализ оборудования, используемого для формирования р-п-структур кремния методом термомиграции алюминиевых зон. Показано, что оборудование, основанное на адаптации к особенностям термомиграции используемых в полупроводниковой технологии методов и конструкций, уступает по эффективности оборудованию изначально ориентированному на применение термомиграции. Описаны методы и конструкции специальных установок для получения жидких зон и их термомиграции, показавших свою эффективность в производственных условиях.

**Ключевые слова:** термомиграция, оборудование для термомиграции, легирование, приборная структура

**Сведения об авторах:** Лозовский Владимир Николаевич, д.ф.-м.н., профессор, loz\_v\_n@mail.ru; Середин Борис Михайлович, доцент, к.т.н, seredinboris@gmail.com; Полухин Алексей Степанович, polukhin\_alex@mail.ru; Солодовник Анатолий Иванович, director@element.zp.ua

## EQUIPMENT FOR THE PRODUCTION OF SILICON STRUCTURES BY THE THERMOMIGRATION METHOD

V. N. Lozovsky<sup>1</sup>, B. M. Seredin<sup>1</sup>, A. S. Polukhin<sup>2</sup>, A. I. Solodovnik<sup>2</sup>

<sup>1</sup>South Russian State Polytechnic University(NPI) named after M. I. Platov, 346428, Novocherkassk, Prosvescheniya street, 132

<sup>2</sup>LLC «Element-Preobrazovatel», 69069, Zaporozhye, Dnepropetrovskoe highway, 9

A comparative analysis of the equipment used for the formation of silicon p-n-structures by the thermomigration of aluminum areas was performed. It is shown that equipment based on adaptation to the features of thermomigration process, used in semiconductor technology methods and designs, is inferior to the equipment, which is initially focused on the use of thermomigration. Effective methods and design of special instruments for the production of liquid areas and their thermomigration are described.

**Keywords:** thermomigration, thermomigration equipment, diffusion, doping, impurity concentration, device structure

**Data of authors:** Lozovsky Vladimir Nikolaevich, Sc.D., Professor, loz\_v\_n@mail.ru; Seredin Boris Mikhaylovich, Ph.D., Associate Professor, seredinboris@gmail.com; Polukhin Aleksey Stepanovich, polukhin\_alex@mail.ru; Solodovnik Anatoly Ivanovich, director@element.zp.ua

### Введение

Значительная часть перспективных приборов силовой электроники базируется на применении кремниевых структур, имеющих

резкие р-п-переходы. Перпендикулярные к плоскости кремниевой подложки разделительные р-п-переходы, возникающие на границе сквозной р<sup>+</sup>-области по периметру ак-

тивной части структуры, позволяют вывести р-п-переход на верхнюю сторону кристалла и, тем самым, организовать защиту структуры от поверхностного пробоя силовых полупроводниковых приборов (СПП) на токи до 100 А [1, 2]. Использование резких плоских р-п-переходов с толстым р<sup>+</sup>-слоем даёт возможность создания СПП с малыми падениями напряжения на подложках без ограничения их диаметра и толщины [3], а также радиационно-стойких СПП [4]. Существует также потребность в большем использовании объёма кристалла. Например, актуальна задача получения в кремниевой подложке узких, протяжённых р<sup>+</sup>-каналов сложной геометрической формы в виде различных сеток из р<sup>+</sup>-областей, что позволяет проектировать в сочетании с плоскими однородными слоями, легированными акцепторной примесью в широком диапазоне концентраций, новые типы СПП, в частности, силовые интеллектуальные модули. В отличие от метода термомиграции (ТМ) возможности дальнейшего совершенствования диффузионного способа получения указанных структур в значительной степени исчерпали себя [5-7].

Метод ТМ относится к ростовым жидкофазным методам получения полупроводниковых приборных структур и основан на перемещении жидкого включения (зоны) в кристалле под действием градиента температуры [8]. В простейшем случае жидкая зона может быть плоской, линейной или точечной. В более сложных случаях она представляет собой комбинацию простейших, например, сетку линейных зон, ансамбль точечных и т.д. Вдоль траектории движения зоны образуется перекристаллизованная область, форма, состав и свойства которой задаются условиями проведения ТМ. Скорость легирования методом ТМ экспоненциально изменяется с температурой, линейно растёт с увеличением её градиента и может достигать многих сотен, а при высоких температурах и тысяч микрометров в час, что значительно выше скорости легирования диффузией при тех же температурах.

Для исследования процесса ТМ используется и адаптируется к её особенностям

типичное вакуумное или наполняемое инертными газами термическое оборудование на базе агрегатов со стандартными технологическими камерами, источниками электропитания, аппаратурой для контроля и регулирования температуры и т.д. [9]. Указанная адаптация сводится к проектированию термического узла, создающего градиент температуры [10]. Однако разработчики сталкиваются с серьёзными трудностями при переходе к использованию ТМ для промышленного производства, когда решающее значение приобретает качество, процент выхода годных и себестоимость полученных полупроводниковых приборных структур. Известно [8], что высокий выход качественных приборных структур, полученных методом ТМ, определяется не только процессом миграции жидкой зоны, но и процессом её формирования. В этой связи возникает вопрос о принципиальной возможности оптимально адаптировать к этим двум процессам известные методы и оборудование, широко используемые в современной полупроводниковой технологии, или о необходимости разрабатывать для ТМ специальное оборудование. В настоящей статье выполнен сравнительный анализ представленных выше подходов на примере технологии структур кремниевых силовых приборов.

### *1. Анализ особенностей оборудования для термомиграции*

Стабильная миграция жидких зон в кристалле обеспечивается оборудованием для формирования зон необходимого состава и формы, а также оборудованием для их миграции в поле температурного градиента.

Для формирования зон используются два метода: термическое напыление слоя металла с последующим приданием ему необходимой формы, например, фотолитографией, и получение зон из заранее созданной жидкой фазы.

В первом методе жидкая зона создается расплавлением напыленного слоя, в результате чего содержит инородные включения (например, частицы окисла). Состав жидкой зоны значительно отличается от состава мигрирующей зоны, поэтому

начальная стадия погружения в кристалл зон, полученных термическим напылением, инициирует специфические нестабильности процесса ТМ. Подробнее недостатки этого метода создания зон описаны в статье [11].

Метод формирования зоны из предварительно подготовленной жидкой фазы необходимого состава лишён указанных недостатков и демонстрирует высокие технологические характеристики. Он основан на эффекте капиллярного втягивания или принудительного введения растворителя в предварительно подготовленный зазор [8]. Этот метод легко адаптируется к различным вариантам использования ТМ для получения полупроводниковых структур СПП. Для создания сквозных р<sup>+</sup>-областей в этих структурах требуется применение локальных (линейных) жидких зон, что подразумевает использование при ТМ одной пластины – подложки [12]. Формированию таких зон предшествует создание технологического рисунка в виде окон в оксиде кремния на поверхности подложки. При необходимости получения плоского р-п-перехода с заданными свойствами требуется применение плоских жидких зон и, соответственно, двух кремниевых пластин: источника и подложки [13]. В этом случае для формирования плоской зоны необходим технологический зазор в виде тонкого капилляра между двумя плоско параллельными пластинами крем-

ния. При получении локальных зон кроме эффекта капиллярного растекания жидкой фазы может использоваться сила, улучшающая процесс смачивания кристалла. Тогда рассматриваемый метод называют принудительным избирательным смачиванием. Силой, улучшающей смачивание, может быть, например, гидростатическое давление столба жидкой фазы в специальном тигле. Таким образом, будучи избирательным (алюминий соприкасается с кремнием только в окнах оксида), смачивание в рассматриваемом случае имеет частично принудительный характер. Добавление в исходный состав расплавленного алюминия компонентов, улучшающих смачиваемость кремниевой подложки, в частности галлия или олова, повышает процент выхода годных при использовании подложек большого диаметра [14].

Суть метода принудительного смачивания кремния для получения линейных зон поясняется в рис. 1.

Для получения жидкой зоны плоской формы осуществляется капиллярное втягивание расплавленного алюминия в зазор между источником и подложкой из специального резервуара (рис. 2). При этом плёнка Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, имеющаяся на поверхности расплава Al, не проникает в тонкий зазор между подложкой 1 и источником 2, что является одним из условий последующей стабильной термомиграции образовавшейся жидкой зоны 6.

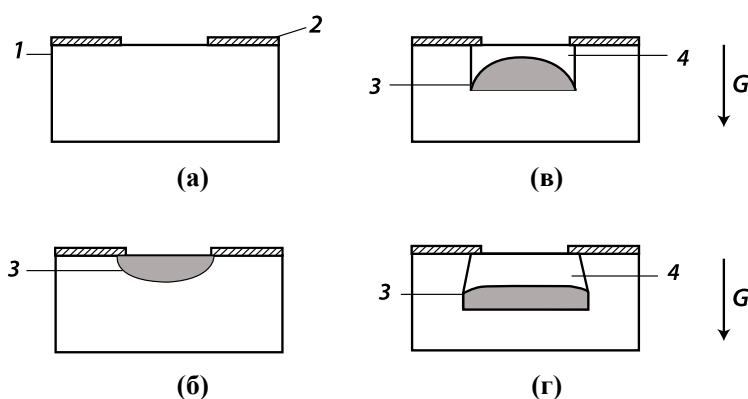


Рис. 1

Схематическое представление этапов процесса получения линейной зоны принудительным избирательным смачиванием: а) окисление и фотолитография; б) заполнение углублений растворителем; в) погружение растворителя в кристалл  $G > 0, T < T_{мкр}$ ; г) миграция зоны  $G > 0, T = T_{мкр}$ . (1 – подложка; 2 – слой двуокиси кремния; 3 – жидкий раствор кремния в алюминии; 4 – перекристаллизованный слой)

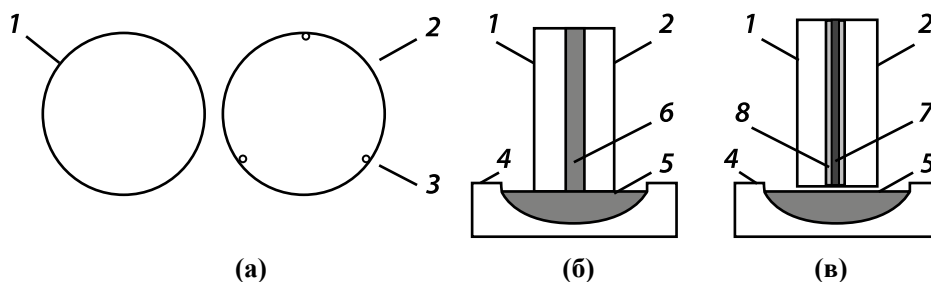


Рис. 2

**Схема формирования плоских зон с применением профилирования: 1 – подложка; 2 – источник; 3 – выступы, профилирующие источник; 4 – тигель; 5 – расплав; 6 – жидкая зона; 7 – слой затвердевшего растворителя; 8 – слой кремния, выкристаллизовавшегося из охлажденной зоны**

Универсальным способом задания толщины зазора является изготовление на источнике вблизи её периферии трёх и более [15] выступов 3 необходимой высоты (например, сформированных методом фотолитографии). После подъёма композиции (подложка с источником) от плоскости расплава температуру снижают. Образуется заготовка для последующего проведения процесса ТМ.

Сравним теперь два существующих подхода в создании высокотемпературных градиентных установок для проведения процесса ТМ: адаптация установок, существующих в полупроводниковой технологии, и разработка установок, изначально ориентированных на использование для ТМ. Речь идёт, главным образом, о нагревательном узле высокотемпературной вакуумной или наполняемой газом установки. Особенностью ТМ является необходимость обеспечения однородного теплового поля в плоскости нагреваемых композиций и заданное значение градиента температуры в направлении, перпендикулярном этой плоскости [8]. Такая конфигурация теплового поля позволяет осу-

ществить стабильную и геометрически идентичную миграцию слоя растворителя по всему диаметру композиции. Для этого обычно создают термические узлы, в которых размеры теплового поля, создаваемого плоским излучателем того или иного типа 1, заметно больше диаметра подложки 2 (рис. 3).

Пример, представленный на рис. 3, иллюстрирует типичный подход, используемый при адаптации обычной высокотемпературной установки к процессу ТМ [16, 17]. Заполняя пространство между 1 и 3 инертным газом, можно существенно увеличить градиент температуры. Вместо галогенных ламп могут использоваться резистивный или любые другие нагреватели. Однако при таком способе нагрева подложек до 50 % потребляемой мощности теряется на излучение с его тыльной стороны. Это один из существенных недостатков рассматриваемого подхода. Для ослабления теплопотерь используют различные отражатели и экраны, что можно видеть на схеме (рис. 4) одной из наиболее совершенной установок с галогенными лампами, адаптированной

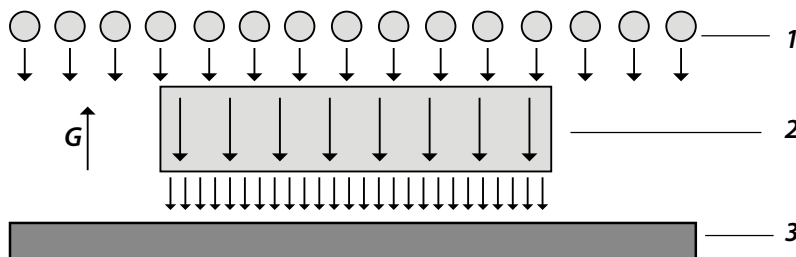


Рис. 3

**Принципиальная схема однопозиционного нагревательного узла с галогенными лампами: 1 – источник теплового излучения; 2 – пластина-подложка; 3 – поглощающая тепловой поток система**

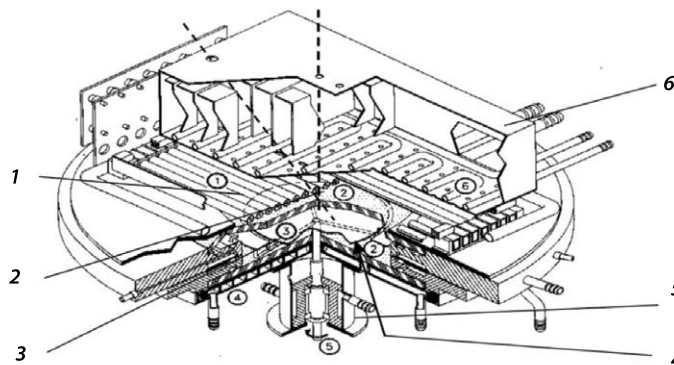


Рис. 4

**Однопозиционный нагревательный узел установки для термомиграции фирмы ST Microelectronic & LAAS [11]: 1 – галогенные лампы; 2 – кварцевое стекло; 3 – подложка; 4 – водоохлаждаемый нижний радиатор; 5 – механизм вращения пластины; 6 – верхний отражатель**

для использования процесса ТМ при получении кремниевых структур СПП [11].

На рис. 4 изображён градиентный тепловой узел, использующий схему, представленную на рис. 3. Этот узел включает ряд галогенных ламп 1, установленных над камерой с образцом. Лампы охлаждаются за счёт принудительной конвекции воздуха, всасываемого турбиной в область отражателя из медного радиатора, охлаждаемого водой 6. Рабочая камера изолирована от ламп и нижнего охладителя-радиатора 4 кварцевым стеклом 2. Пластина 3 располагается на опорах из кварца, закреплённых на оси вращения механизма 5, обеспечивающей десять оборотов в минуту. Однако введение охлаждаемой системы увеличивает теплопотери и приводит к необходимости повышать мощность установки для поддержания постоянной температуры в подложке. Оценка, проведённая для температуры примерно 1200 °С, показывает, что необходимое увеличение достигает 66 % и значительно увеличивается при температурах около 1300 °С. Этот недостаток усугубляется при переходе к пластинам большого диаметра, что является общей тенденцией современной технологии полупроводниковых приборов и существенно затрудняет переход на многопозиционные установки рассматриваемого типа.

Недостатком установок для ТМ на пластинах большого диаметра с ИК нагревом является также необходимость в большом

количестве поддерживающих элементов – опор, которые искажают плоскооднородное поле температурного градиента на пластине, расположенной горизонтально. Это, в свою очередь, ведёт к искажению траектории миграции линейных зон. Не случайно использование таких установок ограничено получением структур с малой площадью (1 мм<sup>2</sup>) [11].

В отечественной промышленности отдаётся предпочтение разработке термического узла вертикального типа [18]. Для реализации стабильной ТМ за меньшее время при снижении энергоёмкости установок использовано вакуумное оборудование, резистивный нагреватель из тугоплавкого материала и вертикальное расположение подложек при термообработке (рис. 5). Этот подход к конструированию позволил в разы снизить мощность установок. Некоторое снижение градиента температуры компенсировано многопозиционностью рассматриваемой установки. Её основу составляет вертикальный резистивный трубчатый излучатель тепла с внешней рабочей поверхностью, который выполнен из молибденовой проволоки с равномерным шагом на каркасе типа «беличье колесо». Параллельно граням излучателя установлены элементы кассетного блока, в которых размещены графитовые вкладыши со сквозными отверстиями для фиксации кремниевых композиций. Благодаря такому расположению пластин практически 50 % тепловой энергии нагревателя остаётся в

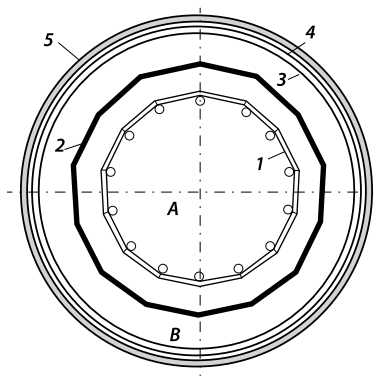


Рис. 5

Схематичный вид в разрезе устройства с вертикальным трубчатым излучателем тепла в вакуумной камере: 1 – нагреватель; 2 – кассетный блок с подложками; 3, 4 – цилиндрические экраны; 5 – водоохлаждаемый кожух вакуумной камеры. А, В – внутренняя и наружная области нагревательного узла

области А и выводится в зону В через установленные на пути излучения подложки.

Достоинством трубчатого излучателя является подобие его формы форме рабочей вакуумной камеры, которая обычно выполняется в виде кругового цилиндра, что позволяет с наибольшей эффективностью использовать её рабочий объём, создавать многопозиционные держатели образцов и снижать теплопотери с их тыльной стороны, то есть в области А. Тепло рассеивается из этой области только через торцы трубчатого нагревателя, площадь которых по сравнению с поверхностью нагревателя невелика. Производительность описанной установки  $K$  определяется  $N$ -числом граней трубчатой

печи нагревателя и  $n$ -количеством образцов, располагающихся на одной грани ( $K = Nn$ ).

## 2. Формирование линейных зон

Схема устройства для получения жидких дискретных зон принудительным смачиванием (п. 1) приведена на рис. 6. Это устройство размещается в вакуумной камере (на рис. 6 не показана) и состоит из двух бункеров – накопителей 1 и 6, слайдера 3 и тигля 4 с растворителем 5. В загрузочный бункер 1 размещают партию обрабатываемых в одном цикле кремниевых пластин с окнами шириной  $h$  (рис. 1) в защитной маске на рабочей поверхности. Слайдер 3 исходно

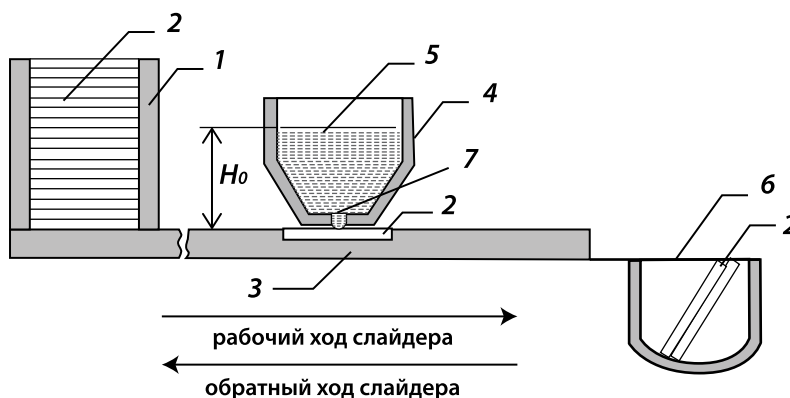


Рис. 6

Схематичное изображение устройства для избирательного смачивания: 1 – бункер загрузки пластин; 2 – кремниевая подложка, переведённая в положение для смачивания; 3 – слайдер, фиксирующий и перемещающий подложки при её смачивании; 4 – тигель с жидким алюминием; 5 – жидкий алюминий; 6 – бункер приёма пластин; 7 – капиллярная щель подачи жидкого алюминия в подложку

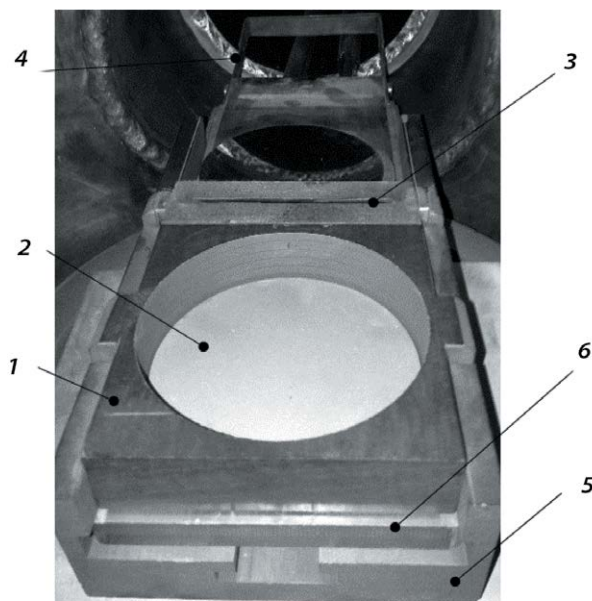


Рис. 7

Устройство для формирования линейных зон: 1 – бункер для подложек; 2 – подложки со вскрытыми окнами окисла; 3 – тигель с алюминием; 4 – привод слайдера; 5 – корпус формователя; 6 – слайдер

находится в среднем положении, а при работе обеспечивает плавное возвратно-поступательное движение поочередно одной из пластин 2. В тигле 4 со щелевым отверстием в виде капилляра длиной, равной диаметру используемой пластины, размещают алюминий 5. Тигель нагревают до температуры процесса формирования локальных зон. Слайдер в этом положении предотвращает вытекание алюминия из тигля.

После достижения необходимой температуры в тигле образуется жидкий расплав алюминия высотой  $H_0$ , который вблизи капиллярной щели образует мениск. Слайдер 3 перемещают влево. После захвата пазом слайдера пластины 2 его перемещают слева направо, протягивая пластину кремния под мениском жидкого алюминия 7. При контактировании жидкого алюминия с поверхностью пластины происходит смачивание поверхности кремния в окнах защитной маски. Происходит растворение кремния алюминием через вскрытые окна. Этот этап сопровождается диффузионным переносом атомов кремния в зону растворителя. Одновременно с растворением вытравленные участки подложки заполняются жидкой фазой, обогащённой кремнием. Металл,

попавший в углубление, дополнительно растворяет его стенки до равновесного состава в соответствии с фазовой диаграммой Al-Si. На следующем этапе движения слайдера пластина доставляется в бункер приёмки 6. Все перечисленные этапы слиты воедино и выполняются за достаточно короткое время. В бункере 6 при снижении температуры избыточный кремний кристаллизуется на стенках пазы. Подготовленные таким образом структуры передаются на ТМ, где растворитель мигрирует сквозь подложку. Основной фрагмент устройства для формирования алюминиевых линейных зон на пластинах кремния, принцип действия которого описан с использованием схемы, изображенной на рис. 6, представлен на рис. 7.

С помощью такого устройства формировались алюминиевые зоны шириной  $h_0$  (рис. 1) в диапазоне 50-70 мкм в производстве кремниевых СПП. Использовались пластины, ориентированные по кристаллографическим плоскостям (111) и (100), толщиной 450-500 мкм и диаметром 100 мм. Толщина защитной маски оксида кремния составляла 0,8-1,2 мкм, температура процесса смачивания – 700-900 °С. Скорость протяжки изменялась в пределах 15-20 мм/с.

Миграция жидких зон, полученных описанным методом, характеризовалась большей воспроизводимостью, чем миграция аналогичных зон, полученным методом напыления, что связано в основном с улучшением стабильности ТМ линейных зон, полученных методом принудительного смачивания.

### 3. Формирование плоских зон растворителя

Схема формирования плоской зоны капиллярным заполнением зазора между пластиной-подложкой и источником расплава (рис. 2) реализована для системы Si-Al в виде устройства, представленного на рис. 8. Устройство включает каркас для удержания пакета композиций 1 «подложка-источник» в рабочем объеме термического модуля; двух пакетов торцевых экранов, обеспечивающих теплоизоляцию и жесткость каркаса; контейнера 2 для зонообразующего материала 3; механизма для перемещения контейнера в вертикальном направлении. Основу каркаса составляют горизонтально расположенные стержни 5, на двух из которых установлены графитовые гребёнки 4 с пазами для композиций. Механизм вертикального перемещения контейнера (до 10 мм) обеспечивает воспроизводимый контакт жидкой фазы с кромками композиций. Рассматриваемая конструкция помещается в кварцевую камеру и нагревается внешним или расположенным внутри камеры нагревателем. Описанное устройство обеспечивает получение одновременно десятков сэндвичей «подложка-зона-источник» (в зависимости от длины области однородного нагрева внутри устройства).

### 4. Оборудования для термомиграции

Анализ особенностей оборудования для ТМ, проведённый в п. 2 показал, что на современном уровне развития аппаратного оснащения метода ТМ, перспективным направлением повышения производительности в условиях промышленного производства, не имеющим пока альтернативы, является применение вертикальных цилиндрических нагревающих устройств. При

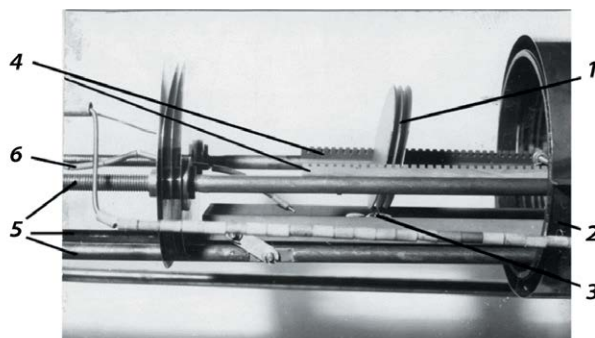


Рис. 8

**Фотография фрагмента формирователя плоских зон: 1 – композиции «подложка-источник»; 2 – контейнер; 3 – навеска растворителя; 4 – графитовые гребёнки; 5 – несущие стержни; 6 – термопара**

этом максимально полно используется рабочий объём вакуумных камер и возникает возможность конструировать излучатели тепла с высокой экономичностью и однородностью теплового поля в зоне нагрева. На рис. 9 изображено вертикальное нагревающее устройство, предназначенное для ТМ на пластинах диаметром до 150 мм.

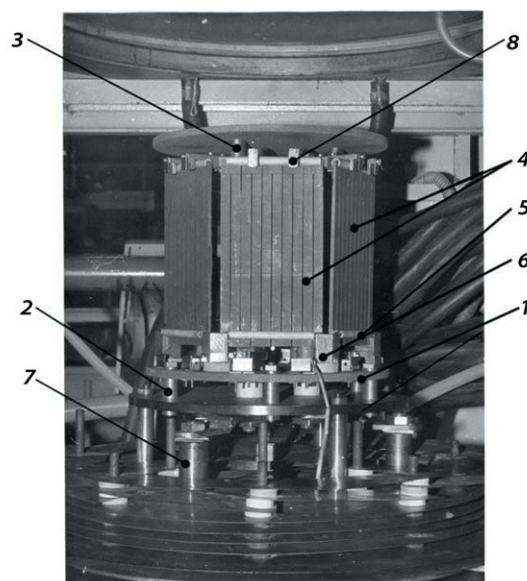


Рис. 9

**Внешний вид шестипозиционного нагревающего устройства для эпитаксии в поле температурного градиента (кассеты с подложками не показаны для наглядности устройства): 1 – опорная плита; 2 – опорный стержень; 3 – соединительные стержни; 4 – графитовые нагреватели; 5 – изоляция; 6 – графитовые переключки; 7 – тоководы; 8 – держатели кассет с подложками**



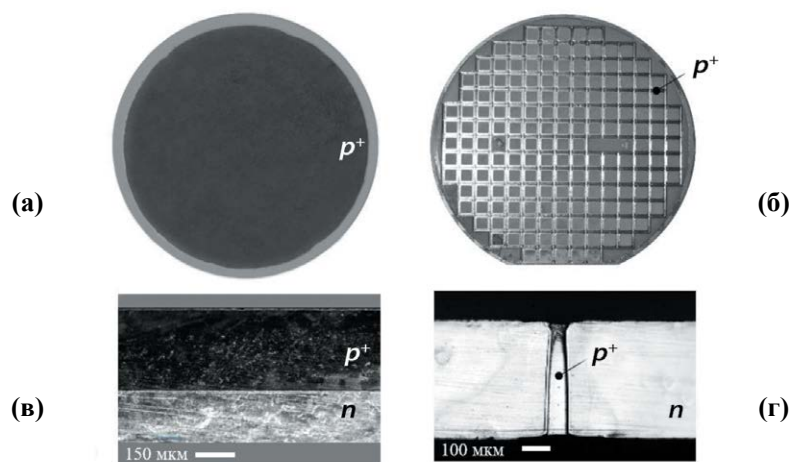


Рис. 10

Фотографии финишной поверхности пластин диаметром 100 мм со сформированным сплошным  $p^+$ -слоем (а) и  $p^+$ -областями в виде сетки (б); микрошлифы сечений «подложка-слой» (в) и разделительной  $p^+$ -области (г) в  $n$ -подложке;  $p^+$ -кремний перекристаллизован методом ТМ

Испытания шестипозиционного нагревающего устройства в условиях серийного производства ООО «Элемент-Преобразователь» (г. Запорожье) подтвердили правильность технических решений, заложенных в его конструкцию. Устройство обеспечивает стабильную миграцию различных по геометрической форме жидких зон растворителя на основе Al, а также более сложных составов ( $Ga_xAl_{1-x}$  и  $Sn_xAl_{1-x}$ ) в кремниевых композициях диаметром до 150 мм. В совокупности с оборудованием для формирования линейных и плоских зон, описанным в п. 3 и 4, нагревательное устройство для ТМ позволяет получать монокристаллические локальные области (глубиной более 50 мкм) и слои (толщиной, определяемой толщиной пластины кремния), легированные акцепторной примесью в диапазоне от  $10^{18}$  до  $4 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup>. Диапазон рабочих температур при ТМ находится в пределах 1000-1250 °С.

На рис. 10 приведены фотографии поверхностей и сечений кремниевых пластин, обработанных на оборудовании для ТМ. На рис. 10 (а, в) демонстрируется перекристаллизованный с помощью ТМ  $p^+$ -слой, который для наглядности окрашен в темный цвет химическим травителем и использована  $n$ -подложка меньшего диаметра (подложку на фотографии не видно). В этом

случае применение ТМ обеспечивает возможность получения резких  $n$ - $p^+$ -переходов большой площади, которые могут быть использованы для получения радиационно-стойких СПП [19] и СПП на большие токи с низким прямым падением напряжения [20]. На рис. 10 (б, г) показан результат применения оборудования для ТМ жидких линейных зон при получении разделительных каналов для СПП прямой полярности [2, 3]. На фотографии и микрошлифе сечения пластины показаны выделенные химической обработкой  $p^+$ -области в виде сетки, пронизывающей  $n$ -подложку насквозь.

Описанную конструкцию нагревательного узла для ТМ можно использовать в качестве исходного модуля для создания установки с большей производительностью, увеличивая её высоту и размещая в ней нагреватели на несколько серий композиций.

### Выводы

1. Проведён анализ особенностей оборудования, используемого в производстве кремниевых силовых приборов методом ТМ жидких алюминиевых зон.

2. Показано, что тенденция адаптировать к процессам получения зон и их термомиграции стандартное высокотехнологическое оборудование с плоскими нагре-

вателями фактически исчерпала потенциал своего дальнейшего совершенствования.

3. Предложен и реализован в виде специальных устройств капиллярный метод формирования плоских и линейных жидких зон, обеспечивающий оптимальное совмещение процессов формирования жидкой зоны с процессом её последующей термомиграции.

4. Предложена и испытана конструкция эффективной многопозиционной установки с вертикальным цилиндрическим нагревательным узлом для ТМ; установка продемонстрировала свою эффективность в серийном производстве приборных структур для силовых кремниевых приборов.

### Литература

1. Полухин А. С., Зуева Т. К., Солодовник А. И. Использование термомиграции в технологии структур силовых полупроводниковых приборов // Силовая электроника. – 2006. – № 3 (9). – С. 110-112.
2. Полухин А. С. Термомиграция неориентированных линейных зон в кремниевых пластинах (100) для производства чипов силовых полупроводниковых приборов // Компоненты и технологии. – 2008. – № 11. – С. 97-100.
3. Лозовский В. Н., Лунин Л. С., Середин Б. М. Особенности получения силовых кремниевых приборов методом термомиграции // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2015. – Вып. 2-3 (236-237). – С. 103-115.
4. Лозовский В. Н., Середин Б. М. Исследование возможности создания кремниевых структур силовых радиационно-стойких приборов методом термомиграции // Сборник тезисов докладов 18-й Всероссийской научно-технической конференции по радиационной стойкости электронных систем «СТОЙКОСТЬ-2015», Лыткарино, 2015. – С. 16.
5. Лозовский В. Н., Середин Б. М. Физические аспекты выбора термомиграции в качестве метода локального легирования кристаллов // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 3. – С. 111-118.
6. Лозовский В. Н., Лунин Л. С., Середин Б. М. Технологические особенности легирования кремния методом термомиграции // Материалы XIV Всероссийской научно-технической конференции. «Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА», г. Москва, 7-9 октября 2015, с. 58-61.
7. Лозовский В. Н., Середин Б. М., Архипова Н. Ю. Сравнение термомиграционного и диффузионного методов получения разделительных областей силовых полупроводниковых приборов // Материалы XIV Всероссийской научно-технической конференции. «Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА», г. Москва, 7-9 октября 2015, с. 204-207.
8. Лозовский В. Н., Лунин Л. С., Попов В. П. Зонная перекристаллизация градиентом температуры полупроводниковых материалов. – М.: Металлургия, 1987. – 232 с.
9. Середин Б. М., Балюк А. В. Термическое оборудование для получения кремниевых эпитаксиальных n(p)-p+ структур // Рукопись деп. в ВИНТИ 14–В29 от 06.01.93. Новочерк. политехн. ин-т; Новочеркасск, 1993, 16 с.
10. Князев С. Ю., Середин Б. М., Середин Л. М., Балюк А. В. Численное моделирование теплового поля градиентного нагревателя для жидкофазной эпитаксии кремния // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. – 2002. – Специальный выпуск. – С. 80-83.
11. Benjamin Morillon 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 and nanotechnologies. Microelectronics. INSA de Toulouse, 2002, 222 p. URL: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00010945>. (дата обращения: 05.11.2014).
12. Середин Л. М., Середин Б. М., Князев С. Ю. Исследование причин невоспроизводимого формирования дискретных зон избирательным смачиванием // Изв. вузов. Сев. Кав. регион. Технические науки. – 2014. – № 1 (176). – С.125-130.
13. Середин Б. М., Благин А. В. Исследование процессов деформации плоских слоёв растворителя при термомиграции через кремниевые подложки // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. – 2013. – № 6. – С. 122-127.
14. Середин Б. М. Исследование кинетики термомиграции при введении добавок Ga в зонообразующий материал Si-Al // Изв. вузов. Сев. Кав. регион. Технические науки. – 2014. – Вып. 1 (176). – С. 103-109.
15. Лунин Л. С., Лозовский В. Н., Середин Б. М. Стабилизация термомиграции профилированием растворяющейся пластины кремния // Вестник Южного научного центра РАН. – 2015. – № 11 (2). – С. 10-16.
16. Chang M., Kennedy R. The application of temperature gradient zone melting to silicon wafer processing // J. Electrochem. Soc., 1981, vol. 128, no. 10, pp. 2193-2198.

17. Молчанов Б. В., Рудаков В. И. Установка для термо-градиентной обработки полупроводниковых пластин // Приборы и техника эксперимента. – 1996. – № 2. – С. 155-157.
18. Тарасов В. А., Калинин Э. Ф., Рагулин А. И. и др. Установка для получения полупроводниковых структур методом зонной перекристаллизации градиентом температуры // Электронная техника. Серия 7. Технология и организация производства и оборудования. – 1980. – № 6 (108). – С. 40-42.
19. Лозовский В. Н., Попов В. П., Середин Б. М. Сравнение диффузионных и эпитаксиальных методов получения радиационно-стойких структур силовых полупроводниковых приборов // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2015. – №3. – С. 57-61.
20. Лозовский В. Н., Лунин Л. С., Середин Б. М. Влияние профиля анодного перехода структур силовых приборов на прямое падение напряжения // Изв. вузов. Электромеханика. – 2015. – № 5 (541). – С. 54-58.
6. Lozovsky V. N., Lunin L. S., Seredin B. M. *Materialy XIV Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Tverdotelnaya elektronika. Slozhnye funktsionalnye bloki REA»* [Proceedings of XIV Russian scientific conference «Solid-state electronics. Complex functional REB»]. Moscow, 7-9th of October 2015, pp. 58-61.
7. Lozovsky V. N., Seredin B. M., Arkhipova N. Yu. *Materialy XIV Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Tverdotelnaya elektronika. Slozhnye funktsionalnye bloki REA»* [Proceedings of XIV Russian scientific conference «Solid-state electronics. Complex functional REB»]. Moscow, 7-9th of October 2015, pp. 204-207.
8. Lozovsky V. N., Lunin L. S., Popov V. P. *Zonnaya perekristallizatsiya gradientom temperatury poluprovodnikovyykh materialov* [Zone recrystallization by temperature gradient of semiconductor materials]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987, 232 p.
9. Seredin B. M., Balyuk A. V. Thermal equipment for production silicon epitaxial n(p)-p+ structures. The manuscript is deposited in VINITI. Issue 14-V29 on 06.01.93, 16 p.

## **References**

1. Polukhin A. S., Zueva T. K., Solodovnik A. I. Thermomigration in semiconductor power devices structure technology. *Silovaya elektronika* [Power Electronics], 2006, № 3 (9), pp. 110-112.
2. Polukhin A. S. Thermomigration of non-oriented linear regions of silicon wafers (100) for semiconductor power devices chips production. *Komponenty i tekhnologii* [Components and technologies], 2008, № 11, pp. 97-100.
3. Lozovsky V. N., Lunin L. S., Seredin B. M. Features get power silicon devices using the method of thermomigration *Elektronnaya tekhnika. Seriya 2. Poluprovodnikovyye pribory* [Electronic engineering. Series 2. Semiconductor devices], 2015, № 2-3 (236-237), pp. 103-115.
4. Lozovsky V. N., Seredin B. M. *Sbornik tezisov dokladov 18 Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii po radiatsionnoy stoykosti elektronnykh sistem «STOYKOST-2015»* [The book of abstracts of the 18th Russian scientific-technical conference on the radiation resistance of electronic systems «RESISTANCE -2015»], Lytkarino, 2015, 16 p.
5. Lozovsky V. N., Seredin B. M. The physical aspects of the choice of thermomigration as a method of local crystals doping. *Fundamentalnye issledovaniya* [Fundamental research], 2015, № 3, pp. 111-118.
10. Knyazev S. Yu., Seredin B. M., Seredin L. M., Balyuk A. V. Numerical simulation of thermal field gradient heater for liquid-phase epitaxy of silicon. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskije nauki* [University News. North-Caucasian Region. Technical Sciences Series], 2002, Special issue, pp. 80-83.
11. Benjamin Morillon. Etude de la thermomigration de l'aluminium dans le silicium pour la réalisation industrielle de murs d'isolation dans les composants de puissance bidirectionnels (Study of thermomigration of aluminum in the silicon for the industrial implementation of insulation in bidirectional power components). Micro and nanotechnologies / Microelectronics. INSA de Toulouse, 2002, 222 p. URL: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00010945> (accessed 5 November 2014).
12. Seredin L. M., Seredin B. M., Knyazev S. Yu. A study on the causes of irreproducible formation of discrete zones by the selective wetting. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskije nauki* [University News. North-Caucasian Region. Technical Sciences Series], 2014, № 1 (176), pp. 125-130.
13. Seredin B. M., Blagin A. V. Researching the processes of solvent's flat layers deformation during the thermomigration through the silicon substrates. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskije nauki* [University News. North-Caucasian Region. Technical Sciences Series], 2014, № 1 (176), pp. 122-127.

14. Seredin B. M. A study on the causes of irreproducible formation of discrete zones by the selective Si-Al wetting. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University News. North-Caucasian Region. Technical Sciences Series], 2014, № 1 (176), pp. 103-109.
15. Lunin L. S., Lozovsky V. N., Seredin B. M. Stabilization of thermomigration with the profiling of soluble silicon wafers. *Vestnik Yuzhnogo Nauchnogo Tsentra RAN* [Vestnik SSC RAS], 2015, № 11 (2), pp. 10-16.
16. Chang M., Kennedy R. The application of temperature gradient zone melting to silicon wafer processing // *J. Electrochem. Soc.*, 1981, № 128, no. 10, pp. 2193-2198.
17. Molchanov B. V., Rudakov V. I. Thermogradient installation for processing of semiconductor wafers. *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Instruments and experimental techniques], 1996, № 2, pp. 155-157.
18. Tarasov V. A., Kalinin E. F., Ragulin A. I. etc. Equipment for production of semiconductor structures by the method of zone recrystallization by the temperature gradient. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 7. Tehnologiya i organizatsiya proizvodstva i oborudovaniya* [Electronic engineering. Ser. 7. Technology and organization of production and equipment], 1980, № 6 (108), pp. 40-42.
19. Lozovsky V. N., Popov V. P., Seredin B. M. Comparison of diffusion and epitaxial methods of power semiconductor devices radiation-resistant structures obtaining. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser.: Fizika radiatsionnogo vozdeystviya na radioelektronnyuyu apparaturu* [Questions of atomic science and technics. Ser.: Physics of radiation effects on radio-electronic equipment], 2015, № 3, pp. 57-61.
20. Lozovsky V. N., Lunin L. S., Seredin B. M. The influence of anodic transition in power devices structures on the forward voltage drop. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [University News. Russian Electromechanics], 2015, № 5 (541), pp. 54-58.