

УДК 621.315.592

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ТЕРМОМИГРАЦИИ АНСАМБЛЯ ЛИНЕЙНЫХ ЗОН С ПОМОЩЬЮ ТРЕХМЕРНОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ, ПОСТРОЕННОЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ТОЧЕЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПОЛЯ

© 2015 г. Л.С. Лунин¹, С.Ю. Князев², Б.М. Середин³, А.С. Полухин⁴,
Е.Е. Щербакова²

Поступила 06.08.2015

Приводится описание трехмерной компьютерной модели термомиграции жидких зон растворителя, построенной на основе метода точечных источников поля. Моделирование термомиграции сводится к совместному численному решению уравнения теплопроводности для определения температуры на границах включения и уравнения диффузии, описывающего массоперенос в жидкой фазе линейной зоны. Модель позволяет исследовать стабильность процесса термомиграции ансамбля линейных зон сложной геометрической формы, движущихся одновременно сквозь кремниевую подложку различной кристаллографической ориентации.

Учет взаимовлияния межфазных границ показывает, что возмущение, возникшее на границе кристаллизации, может привести к нестабильности на противоположной, неустойчивой границе, которая, развиваясь, приводит к неустойчивости на границе кристаллизации. Следовательно, влияние различных физических параметров на устойчивость процесса термомиграции необходимо рассматривать, учитывая взаимодействие межфазных границ. Выявлено, что одним из основных параметров, существенно влияющих на устойчивость межфазных границ, является величина отношения градиентов температуры в жидкой и твердой фазах, которое для жидкой зоны определяется отношением коэффициентов теплопроводности этих фаз.

Результативность моделирования оценена путем экспериментальных исследований локального легирования кремния с помощью метода термомиграции на примере технологии получения чипов силовых полупроводниковых приборов (диодов, тиристоров, триаков), в которых анодный $p-n$ -переход выведен на верхнюю сторону чипа с помощью периферийной разделительной p^+ -области. Полученные данные о стабильности термомиграции при получении разделительных p^+ -областей на кремниевых подложках различной кристаллографической ориентации согласуются с результатами моделирования, что является прямым подтверждением правильности построения математической модели и эффективности примененных численных методов и алгоритмов расчета. Использование результатов моделирования позволяет создать более эффективную технологию локального легирования полупроводниковых кристаллов термомиграционным методом легирования вместо диффузионного, имеющего переменную концентрацию акцепторной примеси по глубине пластины и большие потери площади из-за боковой диффузии.

Ключевые слова: термомиграция, жидкая зона, метод точечных источников поля, моделирование, силовой полупроводниковый прибор.

ВВЕДЕНИЕ

Эффект термомиграции заключается в последовательной перекристаллизации частей твердого тела жидкой зоной раствора-расплава, движущейся

под действием градиента температуры, и является перспективным процессом изготовления полупроводниковых структур [1; 2]. Особенно широко этот метод используется при получении полупроводниковых приборных структур на основе кремния [3–6].

¹Южный научный центр Российской академии наук (Southern Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41; e-mail: lunin_ls@mail.ru.

²Донской государственный технический университет (Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation), 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1.

⁴Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова (Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russian Federation), 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132.

³ООО “Элемент-Преобразователь” (“Element-Preobrazovatel”, LTD, Zaporozhye, Ukraine), Украина, 69069, г. Запорожье, Днепрпетровское шоссе, 9.

При этом обычно используются двухкомпонентные жидкие зоны металл–кремний. В настоящее время метод востребован в технологии получения чипов силовых полупроводниковых приборов (диодов, тиристоров, триаков), в которых анодный p – n –переход выведен на верхнюю сторону с помощью разделительной p^+ -области по периметру чипа [4; 7–9]. Это техническое решение, реализуемое длительной двухсторонней диффузией бора, увеличивает пробивное напряжение высоковольтных p – n –переходов, обеспечивает эффективный теплоотвод, упрощает процесс контроля чипов на пластине и пайку их на основание, исключает деградацию обратной ветви вольт-амперной характеристики из-за механических напряжений в паяном шве и пр. Использование термомиграции жидкого расплава Si–Al в качестве альтернативы диффузионному легированию бором разделительных p^+ -областей позволяет существенно уменьшить время их получения (для кремниевой подложки стандартной толщины в 350 раз) [10].

Температурно-временной режим легирования методом термомиграции определяется скоростью движения жидкой зоны. На скорость стабильной термомиграции зоны сложной геометрической формы по заданной траектории в твердом теле влияет достаточно много различных факторов. К ним относятся межфазные процессы на более нагретой границе зоны, диффузия атомов растворенного вещества в объеме жидкой фазы, межфазные процессы на более холодной границе включения, проявление порогового эффекта межфазных процессов, присутствие в жидкой фазе инородных микровключений, неравенство теплопроводностей жидкой и твердой фаз, испарение компонентов вещества жидкой фазы, анизотропия кристалла, а также тепловые эффекты на границах движущегося жидкого включения, термодиффузия (эффект Соре), проявление движущей силы, связанной с различием концентрации примесных атомов и(или) структурных дефектов в растворяющемся и кристаллизующемся слоях, и ряд других менее значимых факторов.

Для изучения термомиграции широко используются методы математического моделирования [11; 12], которые позволяют значительно снизить объем натуральных экспериментов, одновременно резко повысив их эффективность. Наиболее эффективные компьютерные модели термомиграции строятся с использованием метода точечных источников поля (МТИ) [13; 14]. Эти модели позволяют, в частности, производить исследование стабильности процесса. В [15; 16] приводятся результаты исследования стабильности плоских зон с помощью двумерных моделей термомиграции. В данной работе дается описание трехмерной компьютерной модели тер-

момиграции ансамбля линейных зон сложной геометрической формы, одновременно мигрирующих сквозь кремниевую подложку, с помощью которой изучается стабильность процесса получения p^+ -областей.

ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕРМОМИГРАЦИИ

Моделирование термомиграции сводится к совместному численному решению уравнения теплопроводности для определения температуры на границах включения и уравнения диффузии, описывающего массоперенос в жидкой фазе линейной зоны [11; 13]. Однако некоторые особенности термомиграции позволяют значительно упростить математическую модель процесса и повысить ее эффективность.

Для термомиграции линейных зон с сечением l можно ввести три характерных времени: время установления теплового равновесия в зоне (время тепловой релаксации) $t_T \approx l^2/a$, где a – теплопроводность расплава зоны; время диффузионной релаксации $t_D \approx l^2/D$, где D – коэффициент диффузии вещества кристалла в зоне; время t_v , за которое может заметно измениться форма включения, движущегося со скоростью v , $t_v \approx l/v$. Для типичных значений параметров термомиграции l , a , v , D между тремя характерными временами справедливы соотношения $t_v \gg t_D \gg t_T$. Из этих соотношений следует, что в стационарном режиме термомиграции концентрационное поле в объеме мигрирующего жидкого включения, а тем более температурное поле, можно считать установившимися при данной конфигурации зоны. А это, в свою очередь, означает, что температурные поля в объеме композиции кристалл–включение (зона) и концентрационное поле в объеме включения удовлетворяют уравнению Лапласа.

Построим компьютерную модель термомиграции линейной зоны диаметром l , движущейся в поле градиента температуры \vec{G} . Совместим начало координат с центром зоны, направив ось y перпендикулярно к оси симметрии зоны по направлению градиента температуры, а ось z – вдоль оси зоны (рис. 1). Выделим часть зоны длиной H и расположим на межфазной границе выделенной части зоны $N = N_z \cdot n_r$ узлов, размещенных на N_z равноотстоящих друг от друга окружностях диаметром l , центры которых расположены вдоль оси z с шагом dz . Число узлов на каждой окружности равно n_r . В центральной части участка H несколько узлов (возможно, один) моделируют начальное возмущение плоской межфазной границы с некоторой начальной амплитудой и длиной возмущения (рис. 1).

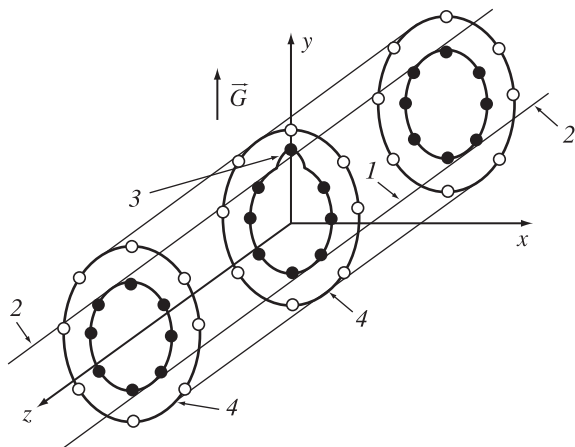


Рис. 1. Схематическое представление линейной зоны. 1 – часть межфазной границы зоны H с расположенными на ней узловыми точками; 2 – удаленные, недеформированные участки зоны (участки L); 3 – возмущение на растворяющейся границе зоны; 4 – точечные заряды, моделирующие концентрационное поле в объеме зоны

Fig. 1. Schematic representation of the linear zone. 1 – part of H interphase zone with the location of the nodal points; 2 – distant, non-deformed areas of the zone (L areas); 3 – indignation at the dissolving boundary of the zone; 4 – point charges modeling the concentration field in the zone

Межфазные границы оставшейся части бесконечно протяженной плоской зоны (за исключением участка H) обозначим L . Ввиду удаленности участка L от возмущенной части межфазной границы его форма продолжает оставаться невозмущенной в виде кругового цилиндра и двигаться в направлении градиента температуры со скоростью v_0 , определяемой формулой Тиллера [1].

Применим МТИ для расчета температурного поля в объеме композиции кристалл–зона и концентрационного поля в объеме зоны. Здесь опишем подробно методику расчета концентрационного поля. Поле температур находится аналогичным образом.

Для концентрации, удовлетворяющей уравнению Лапласа, на межфазной границе S выполняется условие

$$\left. \frac{D}{1-C} \frac{\partial c}{\partial n} \right|_s = v(\Delta C) \Big|_s. \quad (1)$$

Величина недосыщения (пересыщения) расплава в данной точке границы определяется как

$$\Delta C = C^0(T|_s) - C_s, \quad (2)$$

$C^0(T|_s)$ – равновесная концентрация у межфазной границы, зависящая от температуры $T|_s$ в данной точке границы.

Связь между недосыщением (пересыщением) ΔC и нормальной составляющей скорости перемещения межфазной границы определяется механизмом межфазных процессов. При нормальном меха-

низме кристаллизации и растворения [1] эта связь определяется формулой

$$v = \mu_{p,k} \frac{dT}{dC} \Delta C, \quad (3)$$

где $\mu_{p,k}$ – кинетические коэффициенты межфазных процессов; индексы p и k относятся к процессу растворения и, соответственно, кристаллизации. Индекс p в формуле (3) используется при $\Delta C > 0$; в противном случае – индекс k . $\frac{dT}{dC}$ – наклон линии ликвидуса для системы кристалл – вещество зоны.

Классическая теория термомиграции Тиллера [1] позволяет найти концентрационное поле в линейной невозмущенной зоне (невозмущенное поле):

$$U_0(\mathbf{r}) = u_0 + G_c y, \quad (4)$$

где

$$G_c = \left(G - \frac{2(\mu_p + \mu_k) v_l}{\mu_p \mu_k l} \right) \frac{dC}{dT},$$

$$u_0 = \left(G \frac{dC}{dT} - G_c \right) \left(\frac{\mu_p}{\mu_k} - 1 \right) \frac{l}{2},$$

в которой G_c – градиент концентрации в зоне, v_l – скорость невозмущенной зоны, определяемая по формуле Тиллера [1].

Появление возмущения на межфазной границе приводит к искажению концентрационного поля (1). Запишем поле в зоне с возмущенными границами в виде

$$U(\mathbf{r}) = U_0(\mathbf{r}) + u(\mathbf{r}), \quad (5)$$

где $u(\mathbf{r})$ определяет искажение концентрационного поля при появлении на границе возмущения. Назовем его полем возмущения. Очевидно, что $u(\mathbf{r})$ локализовано вблизи от возмущенного участка межфазной границы. В удаленных от возмущения участках зоны поле возмущения $u(\mathbf{r})$ равно нулю.

Расположим точечные заряды концентрационного поля в кристалле на цилиндрической поверхности диаметром $d > l$, соосной линейной зоне (рис. 1). Число зарядов должно соответствовать числу узлов N на участке H границы зоны. Создаваемое зарядами внутри зоны поле возмущения

$$u(\mathbf{r}) = \sum_{j=1}^N q_j g(\mathbf{r}, \mathbf{r}_j), \quad (6)$$

где q_j – величина точечного заряда, расположенного в точке с координатой \mathbf{r}_j , $g(\mathbf{r}, \mathbf{r}_j) = \frac{1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_j|}$ – фундаментальные решения уравнения Лапласа. Поскольку заряды q_j расположены вне зоны, то (6) удовлетворяет уравнению Лапласа во всех внутренних и граничных точках зоны. Для нахождения зарядов q_j

используем граничные условия (1). Подставив (6) в (1) с учетом (2)–(5) и записав полученное при этом выражение для каждого граничного узла, получим систему линейных уравнений

$$\sum_{j=1}^N \left(\frac{D}{1-C_0} \frac{\partial g(\mathbf{r}_j \mathbf{R}_j)}{\partial n} + \mu_{p,k} g(\mathbf{r}_i \mathbf{R}_j) \right) q_j = t(\mathbf{r}_i) \frac{dC}{dT} - \frac{D}{1-C_0} \frac{\partial U_0(\mathbf{r}_i)}{\partial n} - \mu_{p,k} U_0(\mathbf{r}_i). \quad (7)$$

После решения системы (7) и нахождения зарядов q_j с помощью (6), (5) вычисляем концентрации, а затем с помощью формул (3) – скорости миграции в узловых точках, смещаем узлы в новое положение и находим форму возмущенной границы на новом временном уровне.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И АПРОБАЦИЯ МОДЕЛИ

Эффективность моделирования оценена численно и экспериментально при локальном легировании кремния с помощью метода термомиграции на примере технологии силовых полупроводниковых приборов (СПП) на кремнии. В производстве СПП метод термомиграции конкурирует с диффузионным при формировании так называемых разделительных p^+ -областей. Разделительные p^+ -области пронизывают насквозь кремниевую пластину n -типа, образуя в ней ячейки, одинаковые по своим планарным размерам.

Численные эксперименты производили при значениях параметров, типичных для термомиг-

рации в системах типа Si–Al: $D = 2 \cdot 10^{-5}$ см²/с, $\frac{dC}{dT} = 2 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹, $C_0 = 0,5$, $G = 10$ К/см. Диаметр зоны, движущейся со скоростью, равной половине скорости диффузионного режима, полагали равным $l_{0,5} = 40$ мкм. Начальные диаметры зон менялись в широком диапазоне (от 1 до 500 мкм) таким образом, чтобы экспериментом были охвачены основные режимы термомиграции – кинетический, смешанный и диффузионный. Начальное возмущение межфазной границы моделировалось несколькими узлами (или одним узлом) в средней части участка H (см. рис. 1), смещенными от плоской границы кристаллизации или растворения в стороны жидкой или твердой фаз. Кристаллографическая анизотропия учитывалась зависимостью кинетических коэффициентов $\mu_{p,k}$ от направления нормали в данной точке межфазной границы. Проведенные численные эксперименты показали, что наиболее стабильная миграция наблюдается при движении зоны в изотропном кристалле. В этом случае наибольшая скорость роста наблюдается для возмущений, образующихся на переднем участке зоны, на котором происходит растворение. Этот результат согласуется с выводами теории Зайденстикера [1; 17]. При наличии кристаллографической анизотропии скорость роста возмущения может значительно увеличиваться даже для возмущений, возникающих на боковых участках зоны. Это следует из рисунка 2, на котором представлен рост амплитуды возмущения со временем при миграции линейных зон в кристалле с учетом анизотропии процессов растворения и кристаллизации и кинетического коэффициента от угла φ между нормалью к меж-

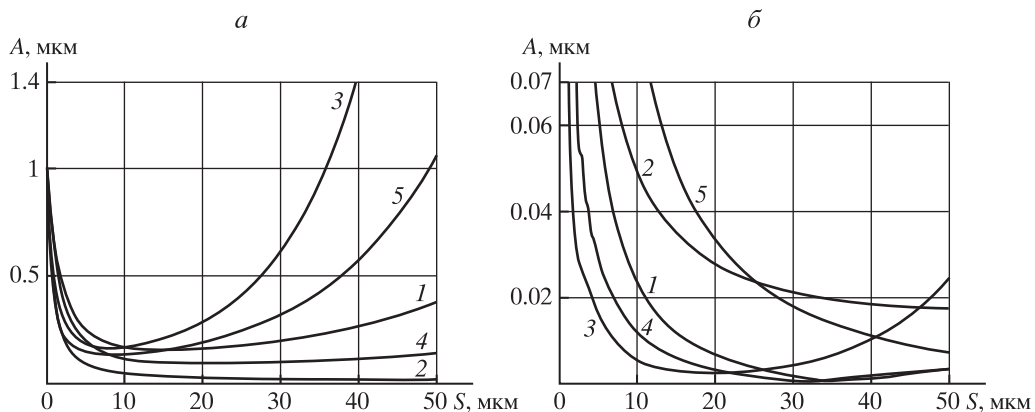


Рис. 2. Зависимости амплитуды возмущения A от пройденного зоной пути S . a – начальное возмущение задано на границе растворения, b – начальное возмущение задано на границе кристаллизации при следующих значениях физических параметров: $l = 20$ мкм, $G = 10$ К/см. 1 – $\mu_p/\mu_k = 1$, $k_L/k_S = 1$ (1); $\mu_p/\mu_k = 1$; $k_L/k_S = 0,25$ (2); $\mu_p/\mu_k = 1$; $k_L/k_S = 6$ (3); $\mu_p/\mu_k = 0,25$; $k_L/k_S = 1$ (4); $\mu_p/\mu_k = 4$; $k_L/k_S = 1$ (5)

Fig. 2. Dependences of the amplitude of A perturbation of the traversed path S (Fig. 2a – initial perturbation is set at the border of dissolution, Fig. 2b – initial perturbation is set at the border of crystallization) with the following physical parameters: $l = 20$ μm , $G = 10$ K/cm. 1 – $\mu_p/\mu_k = 1$; $k_L/k_S = 1$; 2 – $\mu_p/\mu_k = 1$; $k_L/k_S = 0,25$; 3 – $\mu_p/\mu_k = 1$; $k_L/k_S = 6$; 4 – $\mu_p/\mu_k = 0,25$; $k_L/k_S = 1$; 5 – $\mu_p/\mu_k = 4$; $k_L/k_S = 1$

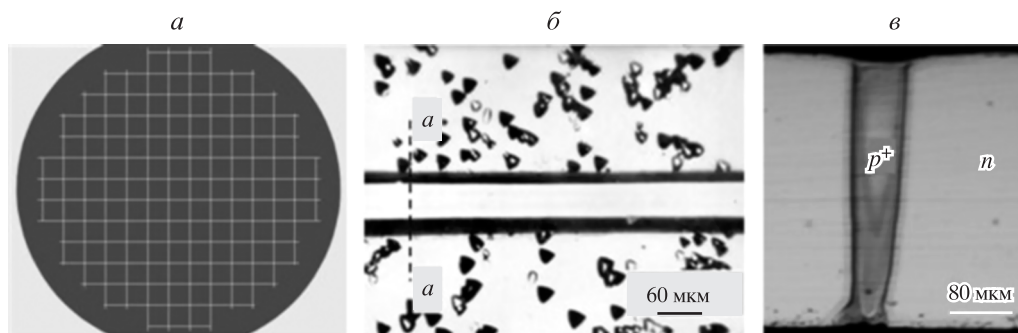


Рис. 3. Вид поверхности кремниевой пластины (111) с p^+ -областями в виде одностенной сетки (а), микрофотографии шлифов финишной поверхности (б) и сечения $a-a$ разделительной p^+ -области (в); p^+ -области получены методом термомиграции

Fig. 3. View of the surface of a silicon wafer (111) with p^+ -areas in the form of a single mesh (a), the micrograph of thin section of the finish surface (b) and $a-a$ section of the separating p^+ -region (c); p^+ -region obtained by the thermomigration method

фазной границе зоны и направлением градиента температуры G .

Учет взаимовлияния межфазных границ показывает, что возмущение, возникшее на границе кристаллизации, может привести к неустойчивости на противоположной, неустойчивой границе, которая, развиваясь, приводит к неустойчивости на границе кристаллизации. Следовательно, влияние различных физических параметров на устойчивость процесса термомиграции необходимо рассматривать, учитывая взаимодействие межфазных границ. Одним из основных параметров, существенно влияющих на устойчивость межфазных границ, является величина отношения градиентов температуры в жидкой и твердой фазах, которое для жидкой зоны определяется отношением коэффициентов теплопроводности k_L/k_S этих фаз. Вычислительный эксперимент позволяет сделать выводы, касающиеся устойчивости процесса термомиграции: с увеличением толщины зоны увеличивается ее морфологическая устойчивость; увеличение коэффициента теплопроводности жидкой фазы по отношению к коэффициенту теплопроводности твердой фазы увеличивает неустойчивость зоны; увеличение кинетического коэффициента растворения по отношению к кинетическому коэффициенту кристаллизации увеличивает неустойчивость зоны в случае, когда возмущение возникает на границе растворения; увеличение кинетического коэффициента кристаллизации по отношению к кинетическому коэффициенту растворения увеличивает неустойчивость зоны в случае, когда возмущение возникает на границе кристаллизации; увеличение градиента температуры увеличивает неустойчивость зоны.

Экспериментальные исследования стабильности процесса термомиграции проводили на всех полученных образцах путем металлографического изучения поперечных шлифов композиций с различными значениями толщины зоны и ориентации

ей используемых подложек, поверхностей роста и растворения, а также подсчетом числа разрывов плоской зоны при выводе ее на поверхность пластины-источника. Кроме того, композиции просматривали на просвет в инфракрасном микроскопе, что позволяло выявлять возможные разрывы внутри эпитаксиального слоя. Ниже приводятся примеры практического использования результатов проведенного исследования с целью определений условия стабильной миграции растворителя в виде сетки линейных зон.

На рисунке 3а приведен пример одностенных квадратных ячеек со стороной 4,5 мм для силовых кремниевых тиристоров на токи до 100 А, полученных по технологии, физико-технические основы которой разрабатывалась с участием авторов настоящей статьи. Система ячеек получена миграцией перпендикулярно плоскости кремниевой пластины в ориентации (111) жидкого кремний-алюминиевого включения в форме плоской сетки в виде локальных зон толщиной 20–25 мкм и шириной 50–60 мкм.

Разделительные p^+ -области, образующиеся при использовании термомиграции с указанными выше параметрами, однородны по концентрации акцепторов ($\sim 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$) и по толщине (см. рис. 3в – шлиф). Концентрация дислокаций в этих областях не превышает таковую в исходной кремниевой пластине (см. рис. 3б).

Для сравнения на рисунке 4 приведены схемы приборных структур с p^+ -областями, полученными термомиграцией (см. рис. 4а), и аналогичные им диффузионные области, которые резко неоднородны по концентрации акцепторов и по толщине пластины h (см. рис. 4б) и имеют повышенную дефектность (требуется дополнительное применение n^+ -геттера на аноде). Разделительные p^+ -области в структуре силового тиристора на рисунке 4 выделены пунктирными овалами. Использование

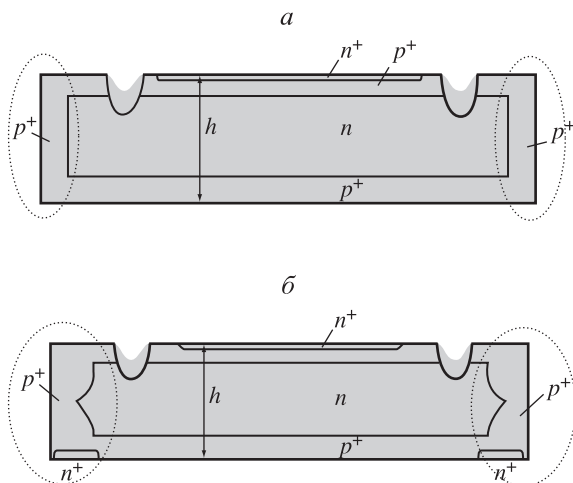


Рис. 4. Схематическое представление разделительных p^+ -областей в составе силового тиристора, полученных термомиграцией (а) и двусторонней диффузией (б)

Fig. 4. Schematic pattern of the separating p^+ -regions within the power thyristor, obtained thermomigration (a) and bilateral diffusion (b)

термомиграционного метода легирования вместо диффузионного позволяет создавать более эффективную технологию локального легирования полупроводниковых кристаллов.

Полученные теоретические результаты согласуются с имеющимися экспериментальными данными, что является прямым подтверждением правильности использованной физико-математической модели и эффективности примененных численных методов и алгоритмов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лозовский В.Н., Лунин Л.С., Попов В.П. 1987. *Зонная перекристаллизация градиентом температуры полупроводниковых материалов*. М., Металлургия: 232 с.
2. Alfimova D.L., Lunin L.S., Lunina M.L. 2014. Influence of growth conditions on the surface quality and structural perfection of multicomponent heterostructures based on group A_3B_5 compounds. *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 8(3): 612–621.
3. Лозовский В.Н., Даровский Н.И., Балюк А.В. 1983. Многопозиционный способ вертикальной жидкофазной эпитаксии. *Электронная техника. Сер. 7. Технология и организация производства оборудования*. 3(118): 13–14.
4. Полухин А.С., Балюк А.В., Середин Л.М., Середин Б.М. 2003. Структуры с разделенными p^+ -областями для силовых полупроводниковых приборов на токи до 100 А. В кн.: *Кристаллизация и свойства кристаллов. Межвузовский сборник научных трудов Южно-Российского государственного технического университета*. Новочеркасск, Набл: 120–124.
5. Лунин Л.С., Лозовский В.Н., Середин Б.М. 2015. Стабилизация термомиграции профилированием растворяющейся пластины кремния. *Вестник Южного научного центра*. 11(2): 10–16.
6. Lunin L.S., Chebotarev S.N., Pashchenko A.S. 2013. Structure of Ge nanoclusters grown on Si (001) by ion beam crystallization. *Inorganic Materials*. 49(5): 435–438.
7. Полухин А.С., Зуева Т.К., Солодовник А.И. 2006. Использование термомиграции в технологии структур силовых полупроводниковых приборов. *Силовая электроника*. 3(9): 110–112.
8. Полухин А.С. 2008. Термомиграция неориентированных линейных зон в кремниевых пластинах (100) для производства чипов силовых полупроводниковых приборов. *Компоненты и технологии*. 11: 97–100.
9. Полухин А.С. 2013. Анализ технологических факторов процесса термомиграции. *Силовая электроника*. 5(9): 118–120.
10. Лозовский В.Н., Середин Б.М. 2015. Физические аспекты выбора термомиграции в качестве метода локального легирования кристаллов. *Фундаментальные исследования*. 3: 111–118.
11. Князев С.Ю., Лозовский В.Н., Малибашев А.В. 2002. Компьютерное моделирование кинетики движения жидкой зоны при термомиграции. *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. (Спецвыпуск): 49–52.
12. Князев С.Ю., Лозовский В.Н., Малибашев А.В. 2005. *Компьютерное моделирование термомиграции*. Новочеркасск, Набл: 183 с.
13. Бахвалов Ю.А., Князев С.Ю., Щербаков А.А. 2008. Математическое моделирование физических полей методом точечных источников. *Известия РАН. Серия физическая*. 72(9): 1259–1261.
14. Князев С.Ю. 2006. Моделирование термомиграции с помощью метода граничных элементов и точечных источников поля. *Известия вузов. Электромеханика*. 8: 67–71.
15. Князев С.Ю., Щербакова Е.Е. 2007. Численное исследование стабильности термомиграции плоских зон. *Известия вузов. Электромеханика*. 1: 14–19.
16. Бахвалов Ю.А., Князев С.Ю., Лозовский В.С. 2010. Исследование устойчивости термомиграции с помощью трехмерной модели, построенной на основе метода точечных источников поля. В кн.: *Системы управления и информационные технологии*. 12(39): 289–291.
17. Seidensticker R.G. 1966. Kinetic Effects in Temperature Gradient Zone melting. *J. Electrochim Soc.* 113(2): 152.

THE STUDY OF STABILITY OF THERMOMIGRATION OF AN ENSEMBLE OF LINEAR ZONES USING A THREE-DIMENSIONAL COMPUTER MODEL CONSTRUCTED ON THE BASIS OF THE FIELD POINT SOURCES METHOD

L.S. Lunin, S.Yu. Knyazev, B.M. Seredin, A.S. Polukhin, E.E. Shcherbakova

The description of the three-dimensional computer model of thermomigration of liquid zones of the solvent, constructed on the basis of point sources of the field is given. The modeling process of thermomigration is reduced to the joint numerical solution of the heat equation to determine the temperature on the boundaries of inclusion and the diffusion equation describing the mass transfer in the liquid phase of the linear zone. The model allows investigating the stability of the thermomigration process of the ensemble of linear zones of complex geometric shapes moving simultaneously through the silicon substrate with different crystallographic orientation.

Accounting for the interaction of phase boundaries indicates that the disturbance that occurred at the crystallization border may lead to instability at the opposite unstable boundary which develops and leads to the instability at the border of crystallization. Therefore, the influence of various physical parameters on the stability of the process of thermomigration should be considered, taking into account the interaction of interphase boundaries. It is revealed that one of the main parameters significantly affecting the stability of interphase boundaries is the value of the ratio of temperature gradients in liquid and solid phases, which is defined for the fluid zone by the ratio of the heat conductivity of these phases.

The results of the simulation are evaluated through experimental research of the local doping of silicon using the thermomigration method following the example of chips technology for power semiconductor devices (diodes, thyristors, triacs), in which the anode of the p - n -junction is displayed on the upper side of the chip with the peripheral separating p^+ -region. The obtained data on the thermomigration stability upon the receipt of the separating p^+ -regions on silicon substrates with different crystallographic orientations are consistent with the simulation results, which is a direct confirmation of the correctness of a mathematical model and efficiency of the applied numerical methods and computational algorithms. The simulation results allow developing a more effective thermomigration technology of local doping of semiconductor crystals by thermomigration doping method instead of diffusion doping, which has variable concentration of the acceptor impurity in the depth of the plate and great loss of the total area due to lateral diffusion.

Key words: thermomigration, liquid zone, method of point sources of the field, modeling, power semiconductor device.

REFERENCES

1. Lozovskiy V.N., Lunin L.S., Popov V.P. 1987. *Zonnaya perekristallizatsiya gradientom temperatury poluprovodnikovykh materialov. [Temperature-gradient zone of recrystallization of semiconductor materials]*. Moscow, "Metallurgiya" Publ.: 232 p. (In Russian).
2. Alfimova D.L., Lunin L.S., Lunina M.L. 2014. Influence of growth conditions on the surface quality and structural perfection of multicomponent heterostructures based on group A_3B_5 compounds. *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 8(3): 612–621.
3. Lozovskiy V.N., Darovskiy N.I., Balyuk A.V. 1983. [Multi-way vertical liquid epitaxy]. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 7. Tekhnologiya i organizatsiya proizvodstva oborudovaniya*. 3(118): 13–14. (In Russian).
4. Polukhin A.S., Balyuk A.V., Seredin L.M., Seredin B.M. 2003. [Patterns with separated p^+ -regions for semiconductor power devices at currents up to 100 A]. In: *Kristallizatsiya i svoystva kristallov. Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov Yuzhno-Rossiyskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. (NPI). [Crystallization and properties of crystals. Interuniversity collection of scientific papers of the Platov South Russian State Technical University]*. Novocherkassk, "Nabla" Publ.: 120–124. (In Russian).
5. Lunin L.S., Lozovskiy V.N., Seredin B.M. 2015. [Stabilization of thermo-migration by profiling a dissolving silicon wafer]. *Vestnik Yuzhnogo Nauchnogo Tsentra*. 11(2): 10–16. (In Russian).
6. Lunin L.S., Chebotarev S.N., Pashchenko A.S. 2013. Structure of Ge nanoclusters grown on Si(001) by ion beam crystallization. *Inorganic Materials*. 49(5): 435–438.
7. Polukhin A.S., Zueva T.K., Solodovnik A.I. 2006. [The use of thermomigration in the technology of structures of power semiconductor devices]. *Silovaya elektronika*. 3(9): 110–112. (In Russian).
8. Polukhin A.S. 2008. [Thermomigration undirected linear zones in silicon wafers (100) to manufacture chips of power semiconductor devices]. *Komponenty i tekhnologii*. 11: 97–100. (In Russian).
9. Polukhin A.S. 2013. [Analysis of the technological factors of the thermomigration process]. *Silovaya elektronika*. 5: 118–120. (In Russian).
10. Lozovskiy V.N., Seredin B.M. 2015. [The physical aspects of the choice of thermomigration as a method of local doping of crystals]. *Fundamental'nye issledovaniya*. 3: 111–118. (In Russian).
11. Knyazev S.Yu., Lozovskiy V.N., Malibashev A.V. 2002. [Computer modeling of the kinetics of motion of the liquid zone at thermomigration]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Tekhn. nauki. (Spetsvypusk)*: 49–52. (In Russian).
12. Knyazev S.Yu., Lozovskiy V.N., Malibashev A.V. 2005. *Komp'yuternoe modelirovanie termomigratsii. [Computer simulation of thermomigration]*. Novocherkassk, "Nabla" Publ.: 183 p. (In Russian).
13. Bakhvalov Yu.A., Knyazev S.Yu., Shcherbakov A.A. 2008. [Mathematical modeling of physical fields by means of point sources]. *Izvestiya RAN. Ser. fizicheskaya*. 72(9): 1259–1261. (In Russian).
14. Knyazev S.Yu. 2006. [Modeling of thermomigration using boundary element method and point sources of the field]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*. 8: 67–71. (In Russian).
15. Knyazev S.Yu., Shcherbakova E.E. 2007. [Numerical study of stability of thermomigration flat areas]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* 1: 14–19. (In Russian).
16. Bakhvalov Yu.A., Knyazev S.Yu., Lozovskiy V.S. 2010. [Investigation of the stability of thermomigration using three-dimensional model constructed on the basis of the field's point sources]. In: *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii (Management systems and information technologies)*. 12(39): 289–291. (In Russian).
17. Seidensticker R.G. 1966. Kinetic Effects in Temperature Gradient Zone melting. *J. Electrochim Soc.* 113(2): 152.