

05

Проявления индуцированной неустойчивости межфазных границ при термомиграции

© С.Ю. Князев¹, В.Н. Лозовский², В.С. Лозовский²,
Б.М. Середин²

¹ Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону

² Южно-Российский государственный политехнический университет

(НПИ) им. М.И. Платова, Новочеркасск

E-mail: seredinboris@gmail.com

Поступило в Редакцию 24 февраля 2016 г.

Описана методика обнаружения предсказанного теоретически эффекта переноса локального возмущения с одной межфазной границы плоской жидкой зоны на другую при ее термомиграции в кристалле. Описаны результаты экспериментальных исследований особенностей индуцированного возмущения и его влияние на стабильность плоской зоны в целом. Предложен метод использования эффекта индуцированной неустойчивости для получения кремниевых приборных структур.

Цель статьи — экспериментально обнаружить недавно предсказанный теоретически эффект индуцированного возмущения при термомиграции плоских жидких зон в кристалле и проанализировать возможность использования этого эффекта в технологии кремниевых приборных структур. Теория, позволившая предсказать указанный эффект, изложена в работах [1,2] и в данной статье не рассматривается.

При термомиграции включение жидкой фазы („жидкая зона“) движется в кристалле под действием внешнего градиента температуры. Характерный уровень температур, при которых возможно реализовать процесс термомиграции, определяется диаграммой состояния используемой системы. Например, для системы „алюминий–кремний“ (простая эвтектическая система) термомиграция жидкой фазы в кремнии осуществима в диапазоне от $\sim 580^\circ\text{C}$ (температура эвтектики) до $\sim 1400^\circ\text{C}$. Оптимальный диапазон температур $\sim 900\text{--}1250^\circ\text{C}$. Используемые градиенты температуры обычно превышают $10^\circ\text{C}/\text{cm}$. Для различных применений термомиграции типичен смешанный режим, когда ско-

рость миграции в сравнимой степени ограничена диффузией ростового вещества в жидкой фазе и кинетическими процессами растворения и кристаллизации на межфазных границах зоны. В этих условиях процесс термомиграции растворителя сквозь пластину кремния толщиной $\sim 400 \mu\text{m}$ длится не более часа.

Перекристаллизуемый жидкой зоной слой твердой фазы очищается от собственных примесей („зонная очистка“), легируется атомами вещества зоны и имеет обычно достаточно высокое совершенство в связи с квазиравновесным характером межфазных процессов растворения и кристаллизации при термомиграции [3]. Конфигурация полученного слоя и его легирование поддается регулированию техническими средствами. Поэтому метод термомиграции находит применение в технологии приборных полупроводниковых структур [4–6].

Эффективность любых применений термомиграции зависит от стабильности миграции жидкой зоны в кристалле. Неустраняемая техническими средствами нестабильность зоны связана со спонтанным возникновением и эволюцией локальных возмущений на ее межфазных границах (кристаллизующейся и растворяющейся). Исследованиям такого рода возмущений посвящены многие десятки теоретических работ. В итоге были сформулированы критерии динамической стабильности как отдельных границ кристаллизации и растворения, так и межфазных границ роста и растворения в составе мигрирующей жидкой зоны (см., например, [7]).

Однако для термомиграции технологически значим не столько сам факт нестабильности межфазной границы, сколько скорость ее эволюции. Если скорость эволюции нестабильности мала по сравнению со скоростью миграции зоны, то такой нестабильностью можно пренебречь для большинства приложений метода термомиграции. Зависимость скорости эволюции нестабильности от различных факторов исследовалась в предыдущих работах только для малых возмущений простой формы (полусфера, отрезок синусоиды), флуктуационно возникающих на одной межфазной поверхности, разделяющей идеальные среды. Взаимодействие массопотоков в жидкой фазе в близко расположенных растворяющейся и кристаллизующейся границах не рассматривалось. Такие условия не отвечают реальным условиям термомиграции. Поэтому в предыдущих исследованиях эффект индуцированной нестабильности не мог быть обнаружен. Этот эффект был обнаружен на основе теории [2,3] при детальном численном анализе [8] зависимости эволюции плоской

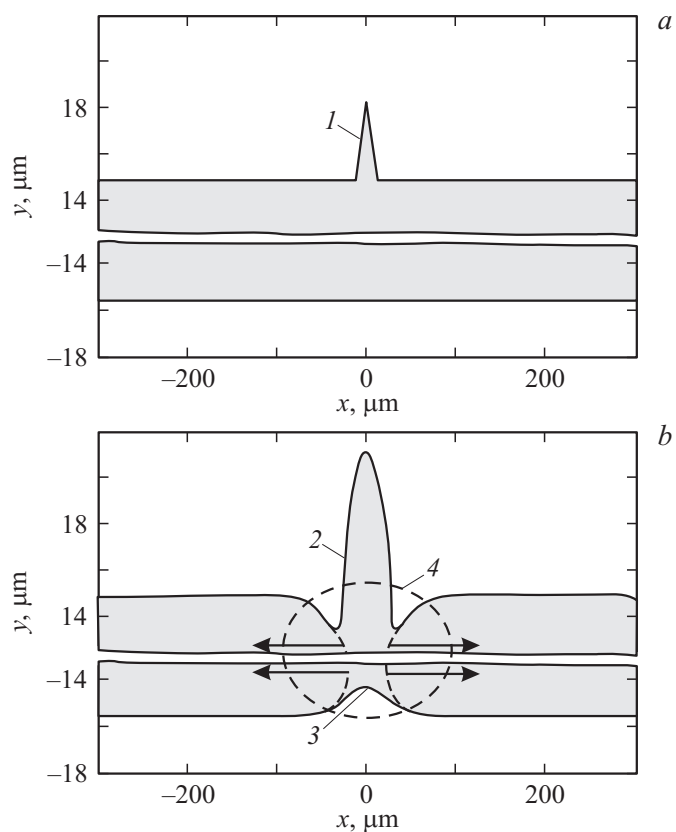


Рис. 1. *a* — начальное возмущение (*1*), заданное при теоретическом расчете [8] на плоской растворяющейся границе зоны. *b* — измененная форма начального возмущения *2* и индуцированные возмущения на кристаллизующейся границе *3*, после прохождения зоной расстояния, равного ее толщине *l*; область *4* — место будущего разрыва.

жидкой зоны, обогащенной алюминием и мигрирующей в кристалле кремния, от ее толщины, градиента температуры, коэффициента диффузии атомов ростового вещества в жидкой фазе, теплопроводности жидкой и твердой фаз, кинетических коэффициентов для процессов кристаллизации и растворения. При индуцированной неустойчивости

возмущения, возникшие спонтанно или созданные специально в локальной области на одной границе, самопроизвольно переносятся на противостоящую область второй границы. Типичная трансформация формы произвольного возмущения на границах перемещающейся зоны представлена на рис. 1. Первоначально заданные резкие очертания возмущения 1 приобретают плавные формы 2, адаптируясь в процессе движения зоны к особенностям окружающего концентрационного поля в жидкой фазе. При этом амплитуда возмущения увеличивается, если рассматриваемая межфазная поверхность динамически нестабильна, или уменьшается, если стабильна. Эволюция возмущения на нестабильной границе зоны 2 порождает локальные нарушения формы ее противоположной границы 3. При прохождении зоной малого пути индуцированное возмущение невелико и усиливается при дальнейшей миграции зоны. Исходное и индуцированное возмущения, совместно эволюционируя, быстрее приводят к разрыву жидкой зоны 4, чем одно исходное. Это объясняется тем, что оба возмущения создают встречно направленные искривления на противоположных межфазных поверхностях. Смыкаясь (пунктир внутри кружка на рис. 1, *b*), они порождают капиллярные силы (стрелки на рис. 1, *b*), ускоряющие разрыв зоны. Существует критическая толщина зоны (l_c). Индуцированное возмущение возникает, если $l < l_c$.

Непосредственное наблюдение эффекта индуцированной нестабильности затруднено его случайностью, скоротечностью и непредсказуемой локализованностью в объеме сэндвича „растворяющаяся пластина—зона—затравка“. Легко наблюдать только конечный результат рассматриваемого эффекта — разрыв зоны, который сохраняется до ее выхода на поверхность растворяющейся пластины. Это обстоятельство положено в основу методики, обеспечивающей пространственную привязку проявления индуцированной нестабильности и выявление ее особенностей. Для эксперимента выбрана система Si—Al, для которой был проведен рассмотренный выше численный анализ влияния различных параметров на кинетику термомиграции [8].

В плоскопараллельной, обогащенной алюминием жидкой зоне толщиной $l_0 > l_c$, что необходимо для ее стабильной миграции, создавались регулярные серии участков, на каждом из которых выполнялось условие $l < l_c$ (рис. 2, *a*). Локальные разрывы зоны наблюдались практически на всех таких участках (рис. 3, *a*). В случае, если бы указанные разрывы были связаны не с индуцированной нестабильностью, а с иными

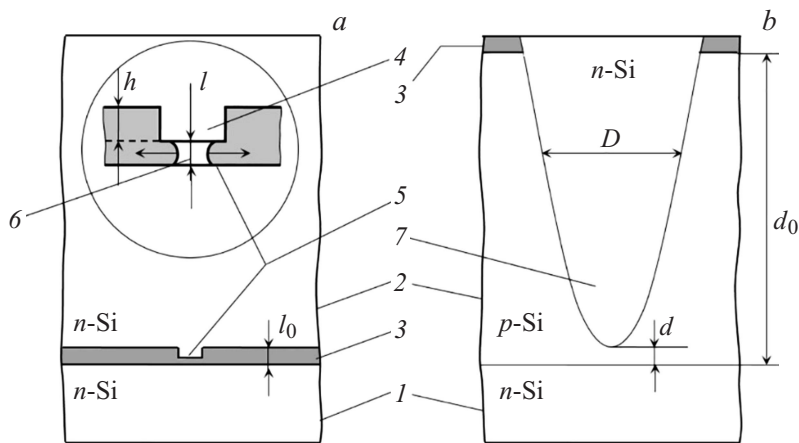


Рис. 2. Схематическое изображение участка сэндвича „подложка–жидкая зона–источник“. *a* — исходное положение жидкой зоны (выделена серым тоном). *b* — конечное положение жидкой зоны; 1 — пластина-подложка; 2 — пластина-источник; 3 — плоская жидкая зона (толщиной l_0); 4 — выступ на поверхности источника; 5 — участок жидкой зоны толщиной $l < l_c$; 6 — разрыв зоны в области выступа, связанный с индуцированной неустойчивостью; 7 — неперекристаллизованная часть источника в области разрыва зоны.

причинами (которых достаточно много [3]), то разрывы носили бы случайный характер, возникали не на всех подготовленных для проявления индуцированной неустойчивости участках и наблюдались бы и вне этих участков. Поэтому полученный результат представляется достаточно убедительным экспериментальным подтверждением существования эффекта индуцированной неустойчивости.

Экспериментальным объектом служил сэндвич, состоящий из Si-подложки *n*-типа (рис. 2, *a*), плоской жидкой алюминиевой зоны толщиной $l_0 > l_c$ и пластины-источника *n*-типа проводимости. На растворяющейся пластине создавалась методом фотолитографии упорядоченная система выступов высотой h_0 (на рис. 2, *a* не показаны). Высота части выступов уменьшалась до некоторого значения $h < h_0$ дополнительным травлением. Зона формировалась капиллярным втягиванием жидкого алюминия в зазор между пластиной-источником и подложкой [9]. При этом пластины образующегося сэндвича прижимались друг к другу

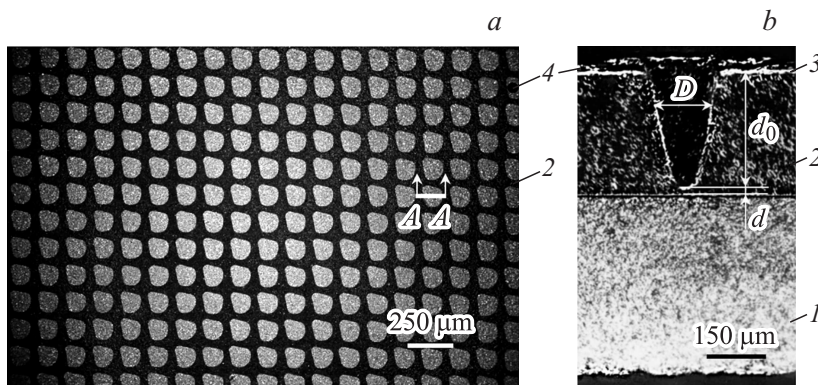


Рис. 3. Фото шлифов: *a* — поверхности перекристаллизованного источника после удаления слоя растворителя *3* (*2* — темное поле; *p*-кремний) с неперекристаллизованными областями (*4* — светлое поле; *n* — источник); *б* — поперечного сечения А–А одного неперекристаллизованного участка *n*-источника (использованы те же обозначения, что и на рис. 2).

капиллярными силами до упора о выступы большей высоты h_0 . Этим задавалась толщина плоской зоны ($l_0 = h_0$).

Толщина тонких участков зоны *l* задавалась высотой укороченных выступов — $l = l_0 - h < l_c$ (рис. 2, *a*). В слое жидкой фазы над этими выступами возникало индуцированное возмущение, приводящее через некоторое время τ к разрыву зоны (см. вставку на рис. 2, *a*). За время τ зона успевала (до момента разрыва) пройти путь d на ее тонком участке (рис 2, *b*). Зная d и общую толщину выращенного *p*-слоя (d_0), а также длительности термомиграции, можно оценить время развития индуцированной неустойчивости на тонком участке зоны до ее разрыва τ . Оно варьировалось от участка к участку, но не превышало 6 min. Таким образом, процесс эволюции индуцированной неустойчивости достаточно скоротечен. Однако разрыв тонкого участка зоны наследуется ее толстой областью и продолжает разрастаться при последующей миграции, что проявляется на схеме (рис. 2, *b*) в увеличении ширины D неперекристаллизованного участка пластины *n*-типа. Планарное изображение системы подобных участков приведено на фото шлифа финишной поверхности перекристаллизованного слоя (рис 3, *a*).

На этой поверхности величина D достигает максимального значения. Видно, что вариации D невелики (рис 3, *a*), что подчеркивает общность причины возникновения разрыва и согласуется с предположением, что такой причиной является индуцированное возмущение.

Из рис. 3, *a* следует, что эффект индуцированной неустойчивости может быть положен в основу метода формирования в объеме полупроводниковых пластин регулярных структур в виде ансамблей глубоких электронно-дырочных переходов и сквозных проводящих каналов. Пример глубоко залегающего p - n -перехода, созданного таким методом, представлен на рис. 3, *b*. Этот p - n -переход образуется на металлургической границе неперекристаллизованной n -области и выращенного при миграции алюминиевой зоны эпитаксиального p -слоя. В рассматриваемом случае неперекристаллизованная область n -типа остается внутри слоя p -типа. Если соответствующий участок слоя p -типа удалить (например, механической обработкой), то неперекристаллизованные области n -типа превратятся в систему сквозных каналов в эпитаксиальном слое p -типа. Минимальный диаметр таких каналов ограничен возможностью минимизировать размер сечения выступов, обеспечивающих возникновение эффекта индуцированного возмущения. Минимальное удельное сопротивление вещества в канале определяется выбором полупроводника n -типа. Определяющая роль фотолитографии и возможности широкого выбора материала для пластины-источника в минимизации соответственно диаметра и резистивных характеристик проводящего канала является существенным преимуществом нового метода по сравнению с известным методом (который связан с миграцией в пластине n -типа локальной зоны необходимого диаметра [10]).

Таким образом, в настоящей работе экспериментально доказана возможность переноса локального возмущения с одной межфазной границы плоской жидкой зоны на другую при ее термомиграции в кристалле, а также предложена методика, позволяющая использовать эффект индуцированной неустойчивости в технологии получения кремниевых приборных структур.

Список литературы

- [1] Князев С.Ю. // Изв. вузов. Электромеханика. 2006. № 8. С. 67–71.
- [2] Лукин Л.С., Князев С.Ю., Середин Б.М., Полухин А.С., Щербакова Е.Е. // Вестник ЮНЦ РАН. 2015. № 4. С. 9–15.

- [3] Лозовский В.Н., Лукин Л.С., Попов В.П. Зонная перекристаллизация градиентом температуры полупроводниковых материалов. М.: Металлургия, 1987. 232 с.
- [4] Лозовский В.Н., Лукин Л.С., Середин Б.М. // Электронная техника. Сер. 2. 2015. В. 2–3. С. 103.
- [5] Li V., Gautier G., Valente D. et al. // Microelectron. Eng. 2016. V. 149. P. 97.
- [6] Бучин Э.Ю., Денисенко Ю.И. // Нано- и микросистемная техника. 2005. № 9. С. 29.
- [7] Зайденстикер Р. // Устойчивость при зонной плавке: Сб. ст. М.: Мир, 1968. С. 197.
- [8] Лозовский В.С. Моделирование эволюции межфазных границ при термомиграции жидкой зоны в кристалле методом точечных источников: Дис. . . канд. техн. наук 05.13.18. Новочеркасск, 2012.
- [9] Середин Б.М., Благин А.В. // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. 2013. В. 6. С. 122.
- [10] Бучин Э.Ю., Денисенко Ю.И., Симакин С.Г. // Письма в ЖТФ. 2004. В. 5. С. 70.