

УДК 621.315.592

Лозовский Владимир Николаевич, Лозовский Владимир Сергеевич,
Лунин Леонид Сергеевич, Середин Борис Михайлович,
Сысоев Игорь Александрович

ИНДУЦИРОВАННАЯ НЕСТАБИЛЬНОСТЬ МЕЖФАЗНЫХ ГРАНИЦ ПРИ ТЕРМОМИГРАЦИИ

В статье описана методика обнаружения предсказанного теоретически эффекта переноса локального возмущения с одной межфазной границы плоской жидкой зоны на другую при её термомиграции в кристалле. Приведены результаты экспериментальных исследований особенностей индуцированного возмущения и его влияние на стабильность плоской зоны в целом. Установлено, что эффект индуцированной неустойчивости может быть положен в основу метода формирования в объёме полупроводниковых пластин регулярных структур в виде ансамблей глубоких электронно-дырочных переходов и сквозных проводящих каналов. Предложен метод использования эффекта индуцированной неустойчивости для получения кремниевых приборных структур.

Ключевые слова: термомиграция, жидкая зона, межфазная граница, кристаллизация, растворение, локальное возмущение, перекристаллизованный слой, p-n-переход.

Vladimir Lozovskij, Vladimir Lozovskij, Leonid Lunin,
Boris Seredin, Igor Sysoev
INDUCED INSTABILITY IN INTERPHASE BOUNDARIES
THERMOMIGRATION

The article describes a method of detecting the predicted theoretically transfer local perturbation effect on one of the interface flat liquid zone to another when it thermomigration in the crystal. The results of experimental studies of the features of the induced perturbation and its impact on the stability of the flat zone as a whole. It was found that the effect of induced instability could be the basis for a method of forming semiconductor wafers in volume of regular structures in the form of bands of deep electron-hole transitions and through the conducting channels. A method of using induced instability effect for silicon device structures.

Key words: thermomigration, the liquid solvent zone, an interfacial boundary dissolution, crystallization, dissolution, local perturbation, recrystallized layer, a p-n junction.

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 [6]. Особенно широко этот метод используется при получении полупроводниковых приборных структур на основе кремния [1, 4, 10]. При этом обычно используются двухкомпонентные жидкие зоны «металл – кремний».

Эффективность любых применений термомиграции зависит от стабильности миграции жидкой зоны в кристалле. Неустраняемая техническими средствами неустойчивость зоны связана со спонтанным возникновением и эволюцией локальных возмущений на её 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 [3].

Однако для термомиграции технологически значим не столько сам факт неустойчивости межфазной границы, сколько скорость её эволюции. Если скорость эволюции неустойчивости мала по сравнению со скоростью миграции зоны, то такой неустойчивостью можно пренебречь для большинства приложений метода термомиграции. Зависимость скорости эволюции неустойчивости от различ-

ных факторов исследовалась в предыдущих работах только для малых возмущений простой формы (полусфера, отрезок синусоиды), флуктуационно возникающих на одной межфазной поверхности, разделяющей идеальные среды. Такие условия не отвечают реальным условиям термомиграции.

В работе [5] развита теория, описывающая эволюцию возмущений произвольной формы и амплитуды, возникающих на границах жидкой зоны при её термомиграции. В этой работе усовершенствован также метод точечных источников поля, позволяющий получать устойчивые численные решения уравнений, описывающих миграцию зоны и корректно анализировать эволюцию возмущений с учётом взаимодействия процессов межфазной неустойчивости на противоположных границах зоны. Использование указанной теории и метода точечных источников поля позволило детально исследовать [8] эволюцию произвольного возмущения на границах мигрирующей в кремнии плоской алюминиевой зоны в зависимости от её толщины, градиента температуры, коэффициента диффузии атомов ростового вещества в жидкой фазе, теплопроводности жидкой и твёрдой фаз, кинетических коэффициентов для процессов кристаллизации и растворения. Неожиданным результатом проведенного исследования явилось обнаружение неизвестной ранее индуцированной межфазной неустойчивости. При индуцированной неустойчивости возмущение, возникшее в локальной области одной границы, переносится на противостоящую область второй границы. Типичная трансформация формы произвольного возмущения на границах перемещающейся зоны, представлена на рис. 1а и 1б.

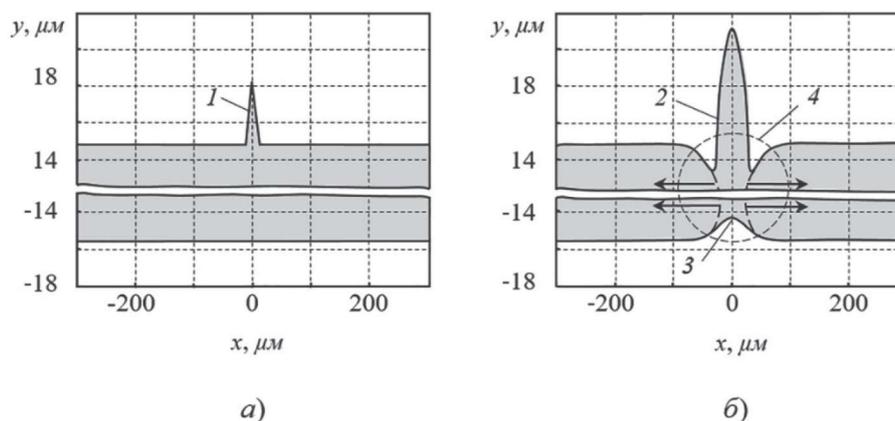


Рис. 1. Типичная трансформация формы произвольного возмущения на границах перемещающейся зоны: а) начальное возмущение (1), заданное (при расчёте методом МТИ) одним узлом на плоской растворяющейся границе; б) изменённая форма начального возмущения (2) и индуцированные возмущения на кристаллизующейся границе (3), после прохождения зоной расстояния, равного её толщине l ; область (4) – место будущего разрыва

Заданные резкие очертания возмущения (1) приобретают плавные формы (2), адаптируясь в процессе движения зоны к особенностям окружающего концентрационного поля. При этом амплитуда возмущения увеличивается, если рассматриваемая межфазная поверхность динамически неустойчива, или уменьшается, если стабильна. Эволюция возмущения на неустойчивой границе зоны (2) порождает локальное нарушение формы её 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 вну-

три кружка на рис. 1б), они порождают капиллярные силы (стрелки на рис. 1б), ускоряющие разрыв зоны (в численной модели капиллярные силы не учитывались). Существует критическая толщина зоны (l_k). Индуцированное возмущение возникает, если $l < l_k$.

Цель настоящей статьи – экспериментально обнаружить проявления эффекта индуцированного возмущения при термомиграции.

Непосредственное наблюдение эффекта индуцированной неустойчивости 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 её выхода на поверхность растворяющейся пластины. Это обстоятельство положено в основу методики, обеспечивающей пространственную привязку проявления индуцированной неустойчивости и выявление её особенностей. Для эксперимента выбрана система Si – Al, для которой был проведен рассмотренный выше численный анализ влияния различных параметров на кинетику термомиграции [8].

В плоскопараллельной жидкой алюминиевой зоне толщиной $l_0 > l_k$, что необходимо для её стабильной миграции, создавались регулярные серии участков, на каждом из которых выполнялось условие $l < l_k$ (рис. 2а). Локальные разрывы зоны наблюдались практически на всех таких участках (рис. 3а). В случае, если бы указанные разрывы были связаны не с индуцированной неустойчивостью, а с иными причинами (которых достаточно много [6]), то разрывы носили бы случайный характер, возникали бы 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.

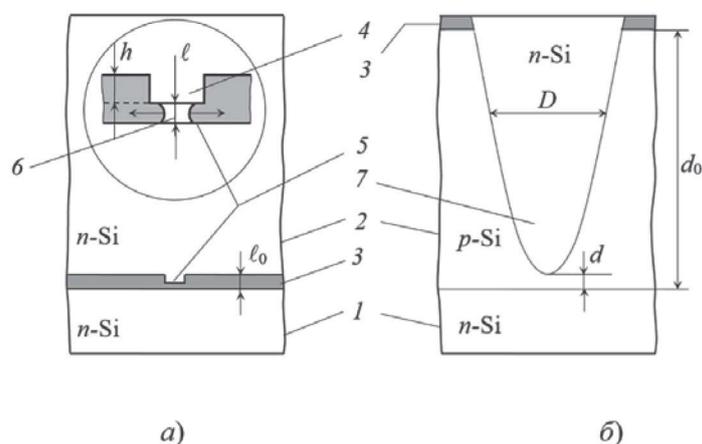


Рис. 2. Схематическое изображение участка сэндвича «подложка – жидкая зона – источник»:
 а) исходное положение жидкой зоны (выделена серым тоном); б) конечное положение жидкой зоны;
 1 – пластина-подложка; 2 – пластина-источник; 3 – плоская жидкая зона (толщиной l_0);
 4 – выступ на поверхности источника; 5 – участок жидкой зоны толщиной $l < l_k$;
 6 – разрыв зоны в области выступа, связанный с индуцированной неустойчивостью;
 7 – неперекристаллизованный участок кристалл – источник в области разрыва зоны

Экспериментальным объектом служил сэндвич, состоящий из кремниевой подложки n-типа (рис. 2а), плоской жидкой алюминиевой зоны толщиной $l_0 > l_k$ и пластины-источника n-типа проводимости. На растворяющейся пластине создавалась методом фотолитографии упорядоченная система выступов высотой h_0 (на рис. 2а не показаны). Высота части выступов уменьшалась до некоторого

значения $h < h_0$ дополнительным травлением (рис. 3). Зона формировалась капиллярным втягиванием жидкого алюминия в зазор между пластиной-источником и подложкой [9]. При этом пластины образующегося сэндвича прижимались друг к другу 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 $l = l_0 - h < l_k$ (рис. 2а). В слое жидкой фазы над этими выступами возникало индуцированное возмущение, приводящее через некоторое время τ к разрыву зоны (вставка на рис. 2а). За время τ зона успевала (до момента разрыва) пройти путь d на её тонком участке (рис. 2б).

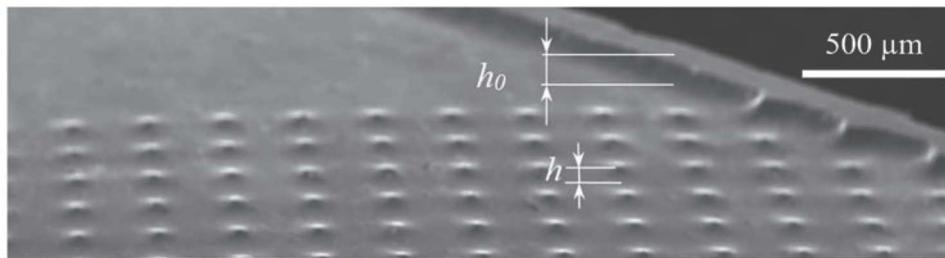


Рис. 3. 3D-изображение поверхности пластины-источника, полученное на растровом электронном микроскопе: h_0 – высота выступов, задающих толщину жидкой зоны; h – высота вспомогательных выступов, создающих возмущения; реализуется случай: $h < h_0$, создающих возмущения и уменьшающих толщину зоны до $l < l_k$, что необходимо для возникновения эффекта индуцированного возмущения

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 её разрыва τ . Оно варьировалось от участка к участку, но не превышало 6 минут. Таким образом, процесс эволюции индуцированной неустойчивости достаточно скоротечен. Однако разрыв тонкого участка зоны наследуется её толстой областью и продолжает разрастаться при последующей миграции, что проявляется на схеме (рис. 2б) в увеличении ширины D неперекристаллизованного участка пластины n -типа.

Планарное изображение системы подобных участков приведено на фото шлифа финишной поверхности перекристаллизованного слоя (рис. 4а). На этой поверхности величина D достигает максимального значения. Видно, что вариации D невелики (рис. 4а), что подчеркивает общность причины возникновения разрыва и согласуется с предположением, что такой причиной является индуцированное возмущение.

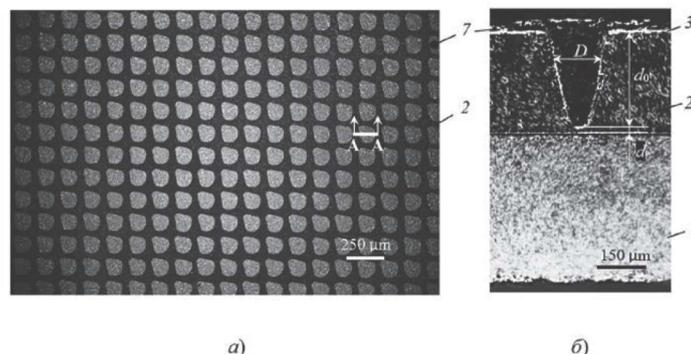


Рис. 4. Фото шлифов:

а) поверхности перекристаллизованного источника после удаления слоя растворителя 3 (2 – темное поле; p -кремний) с неперекристаллизованными областями (7 – светлое поле; n -источник); б) поперечного сечения А–А одного неперекристаллизованного участка n -источника (использованы те же обозначения, что и на рис. 2)

Отсутствие общей причины для возникновения разрывов зоны демонстрирует фотография на рис. 5, где приведен в качестве примера результат движения жидкой зоны с ярко выраженной нестабильностью миграции растворителя без использования профилирования пластины-источника. В этом случае толщина зоны $l < l_k$ задавалась естественным рельефом, который был сформирован механической обработкой шлифовальным порошком (M14).

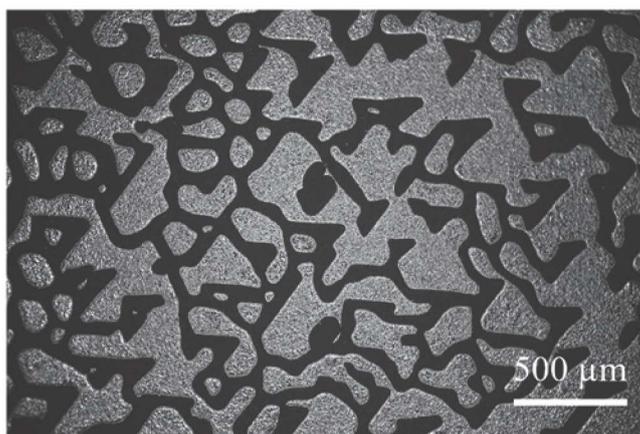


Рис. 5. Фото поверхности перекристаллизованного источника при задании толщины жидкой зоны естественным рельефом толщиной, меньшей l_k :
 темное поле – перекристаллизованный p-кремний; светлое поле источник n-кремний

Эффект индуцированной нестабильности может быть положен в основу метода формирования в объёме 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. 4б. 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 (рис. 4а). 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 [2]).

Литература

1. Бучин Э. Ю., Денисенко Ю. И. Использование процессов термомиграции в технологии МЭМС // Нано- и микросистемная техника. 2005. № 9. С. 29.
2. Бучин Э. Ю., Денисенко Ю. И., Симакин С. Г. Структура термомиграционных каналов в кремнии // Письма в ЖТФ. 2004. Вып. 5. С. 70.
3. Зайденстикер Р. Устойчивость поверхности раздела фаз при зонной плавке с градиентом температуры // Устойчивость при зонной плавке: сб. ст. М.: Мир. 1968. С. 197.

4. Князев С. Ю. Исследование стабильности термомиграции ансамбля линейных зон с помощью трехмерной компьютерной модели, построенной на основе метода точечных источников поля / С. Ю. Князев, Л. С. Лунин, Б. М. Середин, А. С. Полухин, Е. Е. Щербакова // Вестник Южного научного центра РАН. 2015. № 4. С. 9–15.
5. Князев С. Ю. Метод точечных источников для компьютерного моделирования физических полей в задачах с подвижными границами: дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.18 / Сергей Юрьевич Князев. Новочеркасск, 2011. 341 с.
6. Лозовский В. Н., Лунин Л. С., Попов В. П. Зонная перекристаллизация градиентом температуры полупроводниковых материалов. М.: Металлургия, 1987. 232 с.
7. Лозовский В. Н., Лунин Л. С., Середин Б. М. Особенности получения силовых кремниевых приборов методом термомиграции // Электронная техника. Сер. 2. 2015. Вып. 2–3. С. 103.
8. Лозовский В. С. Моделирование эволюции межфазных границ при термомиграции жидкой зоны в кристалле методом точечных источников: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18 / Владимир Сергеевич Лозовский. Новочеркасск, 2012. 185 с.
9. Середин Б. М., Благин А. В. Исследование процессов деформации плоских слоев растворителя при термомиграции через кремниевые подложки // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. 2013. №. 6. С. 122.
10. Lu B., Gautier G., Valente D., Morillon B., Alquier D. Etching optimization of post aluminum-silicon thermomigration process residues // Microelectronic Engineering 2016. V. 149. P. 97.