

УДК 621.315.592
EDN: OWZTFS

PACS: 61.72.uf



Трансформация криволинейных зон при их термомиграции через пластину кремния {100}

Б. М. Середин, В. П. Попов, А. В. Малибашев, А. Д. Степченко, И. В. Гаврус

Экспериментально обнаружена трансформация кольцевой зоны на основе алюминия в квадратную при термомиграции в кремнии в направлении $\langle 100 \rangle$. Квадратная зона при ТМ в пластине кремния проявляет синхронное сближение сторон квадрата и формирует замкнутый эпитаксиальный канал пирамидальной формы. Такая трансформация объясняется асимметрией фронта растворения жидкой зоны относительно градиента температуры. Асимметрия обусловлена огранкой внешнего контура и подавлением огранки на внутреннем контуре растворения криволинейной зоны. Изгиб линейной зоны приводит к отрицательной кривизне внутреннего контура растворения, на котором всегда присутствуют атомные ступени, препятствующие развитию сингулярной плоскости огранки. Оценка отклонения ограненных участков криволинейной зоны от градиента температуры сделана на основе силовой модели, учитывающей векторный характер сил сопротивления движению на фронте растворения зон.

Ключевые слова: кремний, термомиграция, криволинейные жидкие зоны.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-3-78-85

Введение

Метод термомиграции (ТМ) жидких включений (зон) в твердых телах под действием градиента температуры дает уникальную возможность получать эпитаксиальные каналы и электрически гетерогенные структуры в объеме пластины кремния [1, 2]. Формы зон при их миграции определяют форму сквозных каналов. Практический интерес представляют

зоны, протяженные в одном измерении – линейные зоны. Закономерности миграции прямолинейных зон в кремнии изучены во многих работах [2–14]. Установлено, что для сохранения заданной топологии системы прямолинейных зон необходимо однородное поле температурного градиента, ортогонального пластине, и выполнение определенных ориентационных условий, учитывающих анизотропию кристалла. При этом предполагается, что методика получения зон на стартовой поверхности пластины обеспечивает хорошую адгезию металла-растворителя и исключает его загрязнение или окисление.

Создание однородного градиента температуры G в пластине кремния даже при большой площади нагревательного элемента осложняется утечками тепла с периферии пластины. Необходимая коррекция температурного поля может быть достигнута с помощью специальной кассеты, удерживающей пластину, и фронтальных экранов с соосными отверстиями, диаметры которых превышают диаметр пластины [15].

Середин Борис Михайлович, зав. кафедрой, д.т.н.
E-mail: seredinboris@gmail.com

Попов Виктор Павлович, профессор, д.т.н.

Малибашев Александр Владимирович, доцент, к.т.н.

Степченко Артем Дмитриевич, ассистент.

Гаврус Игорь Викторович, ассистент.

ФГБОУ ВО «ЮРГПУ (НПИ) имени М. И. Платова».

Россия, 346428, Ростовская обл., г. Новочеркасск,

ул. Просвещения, 132.

Статья поступила в редакцию 1.03.2024

После доработки 21.03.2024

Принята к публикации 2.04.2024

Шифр научной специальности: 1.3.20

© Середин Б. М., Попов В. П., Малибашев А. В.,
Степченко А. Д., Гаврус И. В., 2024

Влияние анизотропии кристалла кремния проявляется в огранке фронта растворения зоны плотноупакованными плоскостями $\{111\}$. Фронт кристаллизации не проявляет огранки. Прямолинейная зона мигрирует в кремнии стабильно с сохранением формы в процессе ТМ, если одно из направлений $\langle 110 \rangle$ совпадает с осью зоны и перпендикулярно градиенту температуры [4, 16]. При миграции зон через пластину $\{100\}$ фронт растворения ограняется двумя плоскостями $\{111\}$, симметричными относительно оси зоны с углом между плоскостями 70° (значения углов здесь и далее округлены до градуса). Отклонения от указанных ориентаций оси зоны и градиента температуры приводят к нестабильному движению зоны с характерной фрагментацией вплоть до распада на отдельные части [4, 16].

Анизотропия кремния влияет не только на форму прямолинейной зоны, но и на траекторию ее движения, которая может не совпадать с направлением градиента температуры. Такое отклонение наблюдается, если огранка фронта растворения зоны несимметрична относительно оси зоны и градиента температуры [17].

Сетка ортогональных прямолинейных зон позволяет формировать систему сквозных замкнутых ячеек, востребованных для силовых полупроводниковых приборов [4–8]. Однако воспроизводимость метода недостаточна из-за разрывов зон вблизи их пересечений. Представляет интерес использование замкнутых криволинейных зон без пересечений, например, в форме колец или прямоугольников (квадратов). Миграция таких зон практически не изучена.

Известная теория термомиграции [18, 19] определяет скорость движения жидкой зоны под действием градиента температуры как результат трех взаимосогласованных процессов, протекающих в жидкой зоне и на ее границах: растворения, кристаллизации и диффузионного переноса атомов. В общем случае скорость движения зоны может быть представлена простой формулой [20]: $\mathbf{v} = \mathbf{F}/(R_d + R_c + R_t)$, где \mathbf{F} – движущая сила ТМ, а R_d , R_c и R_t – сопротивления процессам растворения, кристаллизации и переноса атомов. Анизотропия кристалла в этой формуле формально учитывается атомно-кинетическими коэффициентами растворения

и кристаллизации в выражениях для R_d и R_c . Однако известная теория не объясняет отклонение скорости движения зоны от направления движущей силы, совпадающей с градиентом температуры и трансформацию жидкой зоны в процессе миграции.

В настоящей работе экспериментально выявлены и объяснены закономерности изменения формы криволинейных кольцевой и квадратной зон на основе алюминия при их термомиграции в пластинах кремния (100).

Эксперимент

Использовали монокристаллические пластины кремния $(100) \pm 0,5^\circ$ диаметром 100 мм, толщиной 0,5–0,8 мм, марки КЭФ4,5, *n*-типа проводимости с плотностью дислокаций 10^2 см^{-2} . Для получения зон на стартовую поверхность пластины кремния магнетронным осаждением наносили слой алюминия толщиной 10 мкм. Затем с помощью фотолитографии на всей поверхности пластины формировали систему несоединенных между собой замкнутых линейных зон кольцевой или квадратной формы. Полосы алюминия для зон имели ширину 100 мкм. Процесс ТМ выполняли в вакуумной водоохлаждаемой камере при температурах 1300–1570 К и градиентах температуры 20–100 К/см. Нагревательное устройство обеспечивало однородное поле градиента температуры в пластине кремния, тангенциальная составляющая градиента не превышала 1 К/см.

Кольцевые зоны имели наружный диаметр от 0,5 до 5 мм. Установлено, что кольцевая зона при миграции в направлении $\langle 100 \rangle$ изменяет свою форму и постепенно превращается в квадратную форму (рис. 1).

Трансформация кольцевой зоны начинается с появления плоскостей огранки $\{111\}$ в четырех симметрично расположенных точках на внешнем контуре кольцевой зоны (отмечены стрелками на рис. 1). По мере миграции зоны в пластину в этих точках возникают прямолинейные участки зоны вдоль направлений $\langle 110 \rangle$. На внутреннем контуре зоны огранка не проявляется. Длина прямолинейных участков зоны при миграции монотонно возрастает вплоть до образования линейной зоны в виде квадрата. В результате в пластине кремния формируется замкнутый эпитакси-

альный канал с четырьмя треугольными сторонами, направленными под углом α к нормали, совпадающей с градиентом температуры. Величина этого угла слабо зависела от градиента температуры и существенно – от температуры процесса. Так, при температурах 1320,

1370, 1440 и 1570 К угол α имел значения 30, 25, 20 и 15 градусов соответственно. Следовательно, при более высоких температурах требуется большее расстояние, проходимое зоной в кристалле, для трансформации кольцевой зоны в квадратную.

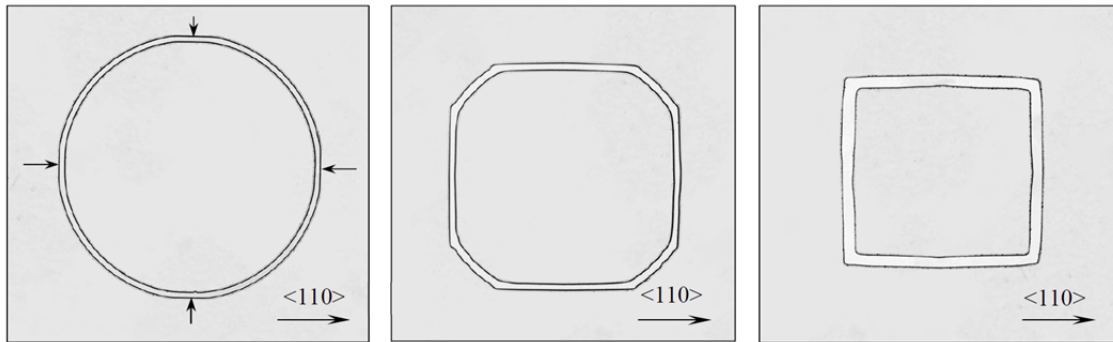


Рис. 1. Фотографии пластины кремния с эпитаксиальным каналом, иллюстрирующие последовательные стадии трансформации кольцевой зоны в квадратную при миграции в направлении $\langle 100 \rangle$ на различных расстояниях от стартовой поверхности пластины: 10, 170 и 480 мкм. Наружный диаметр кольца 2,5 мм

Квадратные зоны мигрировали через пластину кремния $\{100\}$, также воспроизводимо без нарушения целостности зон при условии ориентации сторон квадрата по направлениям $\langle 110 \rangle$, соответствующим стабильному движению и симметричной границе фронта растворения прямолинейных зон. Такие прямолинейные зоны должны двигаться в направлении градиента температуры. Однако обнаружено, что движение квадратных зон через пластину сопровождается синхронным смещением сторон квадрата вовнутрь (рис. 2). Форма линейной зоны в виде квадрата сохранялась на всей траектории движения (за исключением углов). Площадь замкнутой ячейки внутри квадратной зоны по мере миграции монотонно уменьшалась и эпитаксиальный канал принимал пирамидальную форму.

На углах канала появлялись выступы с плавными обводами, вытянутые вдоль направлений $\langle 100 \rangle$. Значения углов отклонения траекторий движения сторон квадрата от направления градиента температуры и их зависимость от температуры были такими же, как и для кольцевых зон.

Для выяснения влияния углов квадрата на его трансформацию проводили специальные опыты по миграции линейной зоны, изогнутой под прямым углом с длиной прямолинейных участков, равной длине сторон квадратной зоны. В этом случае также наблюдали отклонение траектории движения прямолинейных участков под тем же углом к нормали. Контрольные отдельные отрезки прямолинейных зон мигрировали нормально к пластине без отклонения от градиента температуры.

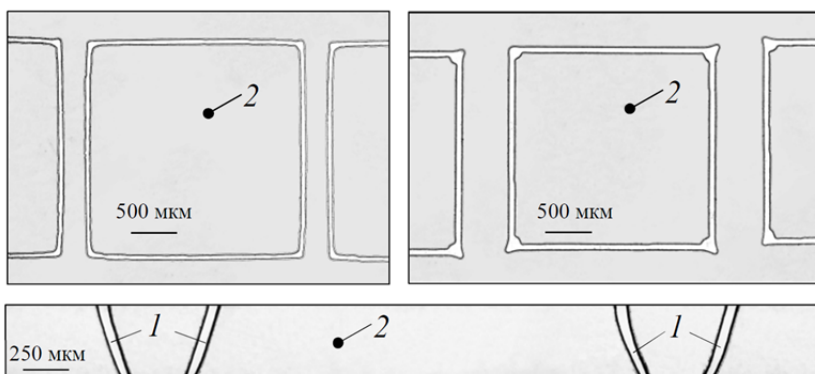


Рис. 2. Фотографии эпитаксиальных каналов (1), полученных с помощью квадратных зон, на стартовой (слева), финишной (справа) поверхностях и на поперечном сечении (внизу) пластины кремния (2)

Форма поперечного сечения сторон квадратной зоны в глубине пластины отличалась от таковой для отдельной прямолинейной зоны (рис. 3). Фронт растворения стороны квадратной зоны огранялся одной плоскостью $\{111\}$ с внешней стороны квадрата, а фронт растворения отдельной прямолинейной зоны – как известно, двумя симметричными плоскостями $\{111\}$.

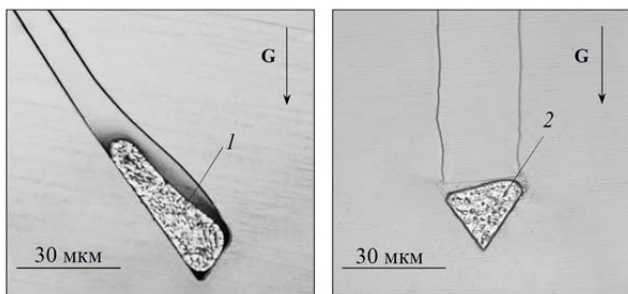


Рис. 3. Фотография поперечных сечений пластин с квадратной (1) и отдельной прямолинейной (2) зонами

Квадратные зоны с ориентацией сторон квадратов в направлениях $\langle 100 \rangle$ на пластинах кремния $\{100\}$ (эта ориентация на 45° отличается от рассмотренной выше) при ТМ претерпевали другую трансформацию. В углах квадратной зоны на внешнем контуре растворения возникала плоскость огранки $\{111\}$, ориентированная вдоль направления $\langle 110 \rangle$ в плоскости пластины. По мере миграции длина ограненных участков зоны на углах квадрата увеличивалась и первоначально квадратная зона превращалась в восьмиугольную. Траектории движения ограненных участков отклонялись от нормали вовнутрь на $\sim 30^\circ$ (при температуре ТМ 1320 К), остальные участки зоны фрагментировались, разрывались, при этом их траектории не отклонялись от нормали.

Обсуждение результатов

Для объяснения экспериментально установленного влияния огранки и асимметрии фронта растворения на направление миграции или деформацию жидкой зоны необходимо учесть векторный смысл сил сопротивления растворению кристалла на различных участках этого фронта. Движущая сила, вызванная градиентом температуры, распределяется на

три составные части: $F = F_d + F_c + F_t$ для реализации процессов растворения и кристаллизации на противоположных границах зоны и атомарного переноса внутри зоны (см. формулу для скорости ТМ, приведенную во введении). В стационарном режиме ТМ векторная сумма всех действующих сил и сил сопротивления указанным процессам должна равняться нулю. Силы сопротивления процессам кристаллизации и диффузии не проявляют анизотропии и их можно в первом приближении не учитывать при оценке отклонения скорости миграции от градиента температуры. Достаточно рассмотреть только часть движущей силы ТМ, действующей на фронте растворения: F_d .

Считаем, что сила сопротивления атомно-кинетическим процессам растворения пропорциональна площади участка фронта растворения и перпендикулярна ему. По экспериментально наблюдаемой форме фронта растворения на поперечном сечении зоны определяем линейные размеры характерных участков фронта растворения и строим силы сопротивления процессам растворения. Определяем векторную сумму сил сопротивления. Если найденная сумма сил сопротивления на фронте растворения коллинеарна градиенту температуры, то она полностью сбалансирована силой F_d и миграция происходит в направлении градиента температуры. Если векторная сумма сил сопротивления на фронте растворения отклонена от градиента температуры, то сила F_d , действующая на фронте растворения, уравнивает только нормальную составляющую сил сопротивления. Возникает нескомпенсированная тангенциальная составляющая сил сопротивления, приводящая к отклонению направления движения от градиента температуры.

Для примера рассмотрим схему поперечного сечения квадратной зоны (рис. 4) и силы, действующие на фронте растворения F_1 и $F_2 = \sum F_{2i}$. Нормальная составляющая суммы сил сопротивления F_4 уравнивается термической силой F_d . Несбалансированная тангенциальная составляющая сил F_5 приводит к боковому смещению зоны и отклонению траектории движения зоны от градиента температуры на угол α . При боковом смещении зоны возникает дополнительная сила сопротивления, обусловленная процессами раство-

рения, кристаллизации и диффузионного переноса атомов, которая компенсирует силу F_5 . Выделить часть этой силы, приходящейся на

фронт растворения затруднительно. Поэтому, погрешность оценки угла α составляет не менее 10 %.

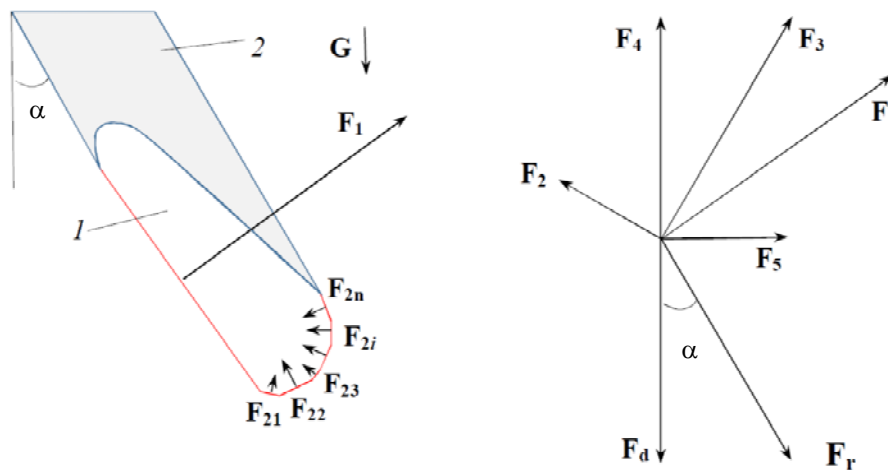


Рис. 4. Схема поперечного сечения стороны квадратной зоны (1) и рассматриваемых сил на фронте растворения: F_1 – сила сопротивления, обусловленная плоскостью огранки $\{111\}$; F_2 – сила сопротивления на закругленном участке ($F_2 = \Sigma F_{2i}$); F_3 – результирующая сила сопротивления; F_4, F_5 – нормальная и тангенциальная составляющие силы сопротивления; F_d – термическая сила, действующая на фронте растворения; $F_r = F_d + F_5$; α – угол отклонения канала (2) от градиента температуры. Красным и синим цветом на сечении зоны выделены границы растворения и кристаллизации

Таким образом, объясняется сближение сторон, ориентированных в направлениях $\langle 110 \rangle$, квадратной зоны при миграции через пластину кремния $\{100\}$. Однако отличие наблюдаемой при этом асимметрии фронта растворения сторон квадратной зоны от симметричного фронта растворения прямолинейной зоны, ориентированной в направлении $\langle 110 \rangle$ требует дополнительного объяснения. Наличие огранки фронта растворения или кристаллизации свидетельствует о послойном атомно-кинетическом механизме процесса [21]. Для продвижения ограненного фронта необходим источник атомных ступеней на сингулярной плоскости. Прямолинейная зона имеет относительно градиента температуры выпуклый фронт растворения и вогнутый фронт кристаллизации, поэтому на последнем всегда имеются ступени, облегчающие рост кристалла, и огранка не возникает. Выпуклый фронт растворения зоны исключает наличие естественных атомных ступеней и ограняется в кремнии плоскостями $\{111\}$. Растворение такой плоскости носит пороговый характер и происходит по дислокационному или зародышевому механизмам [21].

Наблюдаемый эффект смещения сторон квадратных зон, ориентированных в направлениях $\langle 110 \rangle$, вовнутрь квадрата определяется особенностями процессов растворения и кристаллизации в углах квадратов. Угол на внешнем контуре зоны затрудняет растворение, а угол на внутреннем контуре из-за вогнутости (отрицательной кривизны) обеспечивает наличие атомных ступеней и облегчает растворение кристалла. Присутствующие атомные ступени в углу на внутреннем контуре зоны распространяются вдоль границы и препятствуют образованию плоскости огранки на примыкающих прямолинейных участках внутреннего контура зоны при сохранении ограняющей плоскости $\{111\}$ на внешнем контуре. Поэтому на фронте растворения возникает асимметричная огранка, объясняющая синхронное сближение сторон квадрата.

Стороны квадратных зон, ориентированные в направлениях $\langle 100 \rangle$, не соответствуют условию стабильной миграции прямолинейных зон в кремнии, фрагментируются и распадаются на отдельные части. Каждый фрагмент имеет симметричную огранку фронта растворения и не отклоняется от градиента

температуры. Касательные к углам на внешнем контуре растворения квадратных зон совпадают с направлениями $\langle 110 \rangle$ и генерируют плоскости огранки $\{111\}$. На внутреннем контуре растворения огранка не проявляется в силу отрицательной кривизны в углах зоны. В результате в углах квадратной зоны возникает асимметричная огранка фронта растворения и, как следствие, отклонение направления миграции этих участков от градиента температуры вовнутрь квадрата.

Трансформация кольцевой зоны в квадратную при ТМ в направлении $\langle 100 \rangle$ связана с наличием четырех точек на кольцевой зоне, касательные к которым совпадают с направлениями $\langle 110 \rangle$, где происходят зарождения плоскостей огранки $\{111\}$ на внешнем контуре растворения зоны под углом 35° к нормали пластины. На внутреннем контуре симметричная плоскость огранки, характерная для прямолинейной зоны, не возникает из-за отрицательной кривизны внутреннего контура зоны. Поэтому в указанных четырех точках появляются боковые силы сопротивления движению, направленные внутрь кольцевой зоны. Длина ограненных на внешнем контуре растворения прямолинейных участков при ТМ увеличивается, и кольцевая зона превращается в квадратную. Дальнейшая трансформация квадратной зоны сопровождается, как уже рассматривалось, сближением сторон квадрата.

Кольцевые и квадратные зоны, стороны которых ориентированы вдоль направлений $\langle 110 \rangle$, обладают при ТМ высокой устойчивостью к разрывам, что важно для формирования сквозных замкнутых ячеек в пластине кремния.

Заключение

Выявлены при ТМ в кремнии в направлении $\langle 100 \rangle$ закономерности трансформации кольцевых и квадратных зон. Кольцевые зоны превращаются в квадратные, а квадратные зоны при ориентации сторон квадрата в направлениях $\langle 110 \rangle$ проявляют синхронное сближение сторон без существенного искажения квадратной формы. Причиной наблюдаемых трансформаций являются особенности огранки отдельных областей фронта растворения зоны. В них возникает асимметричная форма

фронта растворения относительно градиента температуры, приводящая к возникновению тангенциальной составляющей силы, которая смещает участок зоны внутрь замкнутой криволинейной зоны. Оценка угла отклонения направления миграции отдельных участков криволинейной зоны от градиента температуры сделана на основе силовой модели, учитывающей векторный смысл сил сопротивления движению зоны на фронте растворения. Асимметричность огранки фронта растворения возникает за счет подавления одной из двух симметричных плоскостей огранки $\{111\}$, характерных для прямолинейной зоны. Этот эффект обусловлен изгибом прямолинейной зоны, приводящим к отрицательной кривизне внутреннего контура фронта растворения. Поэтому снимаются пороговые условия, необходимые для возникновения огранки, и внутренний контур растворения не проявляет огранки, а на внешнем контуре она сохраняется.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Pfann W. G. Zone Melting, 2nd ed. – New York, 1966.
2. Лозовский В. Н., Лукин Л. С., Попов В. П. Зонная перекристаллизация градиентом температуры полупроводниковых материалов. – М.: Металлургия, 1987.
3. Cline H. E., Anthony T. R. / J. Appl. Phys. 1976. Vol. 47. № 10. P. 2325–2331.
4. Cline H. E., Anthony T. R. / J. Appl. Phys. 1976. Vol. 47. № 6. P. 2332–2336.
5. Cline H. E., Anthony T. R. / J. Appl. Phys. 1978. Vol. 49. № 5. P. 2777–2786.
6. Anthony T. R., Boah J. K., Chang M. F., Cline H. E. / IEEE Transactions on Electron Devices. 1976. Vol. 23. № 8. P. 818–823.
7. Anthony T. R., Cline H. E. / J. Appl. Phys. 1977. Vol. 48. № 9. P. 3943–3949.
8. Morillon B., Dilhac J.-M., Ganibal C., Anceau C. / Microelectronics Reliability. 2003. Vol. 47. № 4. P. 565–569.
9. Lu B., Gautier G., Valente D., Morillon B., Alquier D. / Microelectronic Engineering. 2016. Vol. 149. P. 97–105.

10. Buchin E. Y., Denisenko Y. I., Simakin S. G. / Technical Physics Letters. 2004. Vol. 30. № 3. P. 205–207.
11. Norskog A. C., Warner Jr. R. M. / J. Appl. Phys. 1981. Vol. 52. № 3. P. 1552–1554.
12. Lomov A. A., Punegov V. I., Seregin B. M. / J. Appl. Cryst. 2021. Vol. 54. P. 588–596.
13. Полухин А. С. / Компоненты и технологии. 2008. № 11. С. 97–100.
14. Polukhin A. S. / Power electronics. 2013. Vol. 5. № 9. P. 118–120.
15. Середин Б. М., Попов В. П., Заиченко А. Н., Малибашев А. В., Гаврус И. В., Минцев А. А., Скиданов А. А. / Физика твердого тела. 2023. Т. 65. № 12. С. 2051–2054.
16. Lozovsky V. N., Popov V. P. / Sov. Phys. Crystallography. 1970. Vol. 15. № 1. P. 116–121.
17. Лозовский В. Н., Попов В. П., Малибашев Л. Я. / Кристаллография. 1975. Т. 20. № 5. С. 991–994.
18. Чернов А. А. и др. Современная кристаллография: в 4 томах Т. 3. – М.: Наука, 1980.
19. Tiller W. A. / Appl. Phys. 1963. Vol. 34. № 9. P. 2757–2762.
20. Попов В. П. / Sov. Phys Journal. 1988. Vol. 31. № 1. P. 45–50.
21. Лодиз Р., Паркер Р. Рост монокристаллов. – М.: Мир, 1974.

PACS: 61.72.uf

Transformation of curved zones during thermal migration through a silicon plate {100}

B. M. Seregin, V. P. Popov, A. V. Malibashev, A. D. Stepchenko and I. V. Gavrus

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)
132 Prosveshcheniya st., Novocherkassk, Rostovskaya obl., 346428, Russia
E-mail: sereginboris@gmail.com

Received 1.03.2024; revised 21.03.2024; accepted 2.04.2024

The transformation of an aluminum-based annular zone into a square one was experimentally detected during thermal migration in silicon in the direction $\langle 100 \rangle$. During migration, the square zone exhibits synchronous convergence of the sides of the square and forms a closed epitaxial channel of pyramidal shape in the silicon wafer. This transformation is explained by the asymmetry of the dissolution front of the liquid zone relative to the temperature gradient. The asymmetry is caused by the cutting of the outer contour and the suppression of the cut on the inner contour of the dissolution of the curved zone. The bending of the linear zone leads to a negative curvature of the inner dissolution contour, on which atomic steps are always present, preventing the development of a singular plane of faceting. The deviation of the faceted sections of the curved zone from the temperature gradient is estimated on the basis of a force model that takes into account the vector nature of the resistance forces to movement at the dissolution front of the zones.

Keywords: silicon, thermomigration, curved liquid zones.

REFERENCES

1. Pfann W. G. Zone Melting, 2nd ed. New York, 1996.
2. Lozovskii V. N., Lunin L. S. and Popov V. P. Zonnaya perekristallizatsiya gradientom temperatury poluprovodnikov materialov. Moscow, Metallurgiya, 1987.
3. Cline H. E. and Anthony T. R., J. Appl. Phys. **47** (10), 2325–2331 (1976).
4. Cline H. E. and Anthony T. R., J. Appl. Phys. **47** (6), 2332–2336 (1976).
5. Cline H. E. and Anthony T. R., J. Appl. Phys. **49** (5), 2777–2786 (1978).

6. Anthony T. R., Boah J. K., Chang M. F. and Cline H. E. **23** (8), 818–823 (1976).
7. Anthony T. R. and Cline H. E., *J. Appl. Phys.* **48**, 3943–3949 (1977).
8. Morillon B., Dilhac J.-M., Ganibal C. and Anceau C., *Microelectronics Reliability* **47** (4), 565–569 (2003).
9. Lu B., Gautier G., Valente D., Morillon B. and Alquier D., *Microelectronic Engineering* **149**, 97–105 (2016).
10. Buchin E. Y., Denisenko Y. I. and Simakin S. G., *Technical Physics Letters* **30** (3), 205–207 (2004).
11. Norskog A. C. and Warner Jr. R. M., *J. Appl. Phys.* **52** (3), 1552–1554 (1981).
12. Lomov A. A., Punegov V. I. and Seredin B. M., *J. Appl. Cryst.* **54**, 588–596 (2021).
13. Poluhin A. S., *Komponenty i tekhnologii*, № 11, 97–100 (2008) [in Russian].
14. Poluhin A. S., *Silovaya electronica (Power electronics)* **5** (9), 118–120 (2013) [in Russian].
15. Seredin B. M., Popov V. P., Zaichenko A. N., Malibashev A. V., Gavrus I. V., Mincev A. A. and Skidanov A. A., *Fizika tverdogo tela* **65** (12), 2051–2054 (2023) [in Russian].
16. Lozovsky V. N. and Popov V. P., *Sov. Phys. Crystallogy* **15** (1), 116–121 (1970).
17. Lozovskij V. N., Popov V. P. and Malibasheva L. Y., *Kristallografiya* **20** (5), 991–994 (1975) [in Russian].
18. Chernov A. A., *Sovremennaya kristallografiya*. Vol. 3. Moscow, Nauka, 1980.
19. Tiller W. A., *J. Appl. Phys.* **34** (9), 2757–2762 (1963).
20. Popov V. P., *Sov. Phys. Journal* **31** (1), 45–50 (1988).
21. Laudise R. A. and Parker R. L. *The growth of single crystals. Crystal growth mechanisms: energetics, kinetics and transport*. Prentice-Hall, 1970.