

Трансформация кольцевой зоны на основе алюминия при ее термомиграции в кремнии в направлении $\langle 100 \rangle$

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

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова,
346428 Новочеркасск, Россия

E-mail: seredinboris@gmail.com

Поступила в Редакцию 26 апреля 2024 г.

В окончательной редакции 20 июля 2024 г.

Принята к публикации 30 октября 2024 г.

Непересекающиеся кольцевые зоны на основе алюминия позволяют формировать методом термомиграции в пластине кремния систему сквозных замкнутых эпитаксиальных каналов p -типа проводимости с высокой воспроизводимостью. Обычно используемая для этих целей сетка прямолинейных зон характеризуется разрывами в местах пересечений. Экспериментально выявлены особенности трансформации кольцевых зон на различных этапах миграции в кремнии в направлении $\langle 100 \rangle$. Наблюдаемые изменения формы зон и эпитаксиальных каналов вызваны асимметрией фронта растворения жидкой зоны, связанной с особенностями огранки, обусловленной изгибом линейной зоны. При этом подавляется огранка на внутреннем контуре зоны и сохраняется на внешнем.

Ключевые слова: термомиграция, градиент температуры, кремний.

DOI: 10.61011/FTP.2024.09.59308.6414A

1. Введение

Термомиграция (ТМ) жидких зон в твердых телах под действием градиента температуры давно известна как метод создания электрически гетерогенных структур в объеме кристалла [1,2]. Процессы и явления, определяющие и сопровождающие ТМ, до сих пор активно исследуются [3,4]. Попытки реализации ТМ в силовой электронике [5] подтвердили уникальные возможности метода для формирования в пластинах кремния системы сквозных эпитаксиальных однородно легированных каналов в виде замкнутых ячеек. Замкнутые квадратные ячейки p -типа проводимости в этом случае получали с помощью ортогональной сетки прямолинейных зон на основе алюминия, мигрирующих через пластину кремния. Однако возникающие разрывы линейных зон вблизи их пересечений не обеспечили сохранение заданной топологии ячеек и необходимую при промышленном производстве воспроизводимость ТМ.

Известно, что сохранение заданной топологии системы прямолинейных зон требует однородного поля градиента температуры, перпендикулярного пластине, и выполнения определенных ориентационных условий, учитывающих анизотропию кристалла [2,6]. Согласно указанным условиям, сетка ортогональных линейных зон на стартовой поверхности пластины должна иметь направления $\langle 110 \rangle$.

Траектория движения прямолинейной зоны может не совпадать с направлением градиента температуры. Такое отклонение наблюдается, если огранка приводит к несимметричной форме фронта растворения относительно градиента температуры [2]. Силовая модель ТМ [7] позволяет оценить значение угла отклонения траектории

движения зоны от нормали. Согласно модели, силы сопротивления атомно-кинетическим процессам растворения на отдельных участках фронта растворения пропорциональны площадям участков и перпендикулярны им. Отклонение векторной суммы этих сил от направления градиента температуры приводит к тангенциальному смещению зоны. Использование изолированных замкнутых линейных зон в форме квадрата при ТМ позволяет избежать пересечений и способствовать воспроизводимости метода ТМ [8]. Цель настоящей работы — экспериментально изучить этапы трансформации кольцевой зоны при ее миграции в кремнии в направлении $\langle 100 \rangle$ и объяснить асимметрию поперечного сечения зоны, являющуюся причиной трансформации.

2. Эксперимент

Кольцевые зоны диаметром от 1 до 5 мм создавали на стартовой поверхности кремниевой пластины методом магнетронного осаждения слоя алюминия толщиной 10 мкм с последующей проекционной фотолитографией. Использовали монокристаллические пластины КЭФ-4.5 $(100) \pm 0.5^\circ$ диаметром 100 мм и толщиной 0.5 и 0.8 мм с плотностью дислокаций 10^2 см^{-2} . Ширина колец алюминия составляла 100 мкм. ТМ проводили в вакуумной водоохлаждаемой камере при температурах 1270–1570 К и градиентах температуры 20–100 К/см в течение 20–240 мин. Специально разработанное нагревательное устройство [9] обеспечивало однородное поле градиента температуры в пластине кремния (тангенциальная составляющая градиента температуры $\leq 1 \text{ К/см}$). Форму зон и каналов изучали металлографически на планарных и поперечных шлифах пластин.

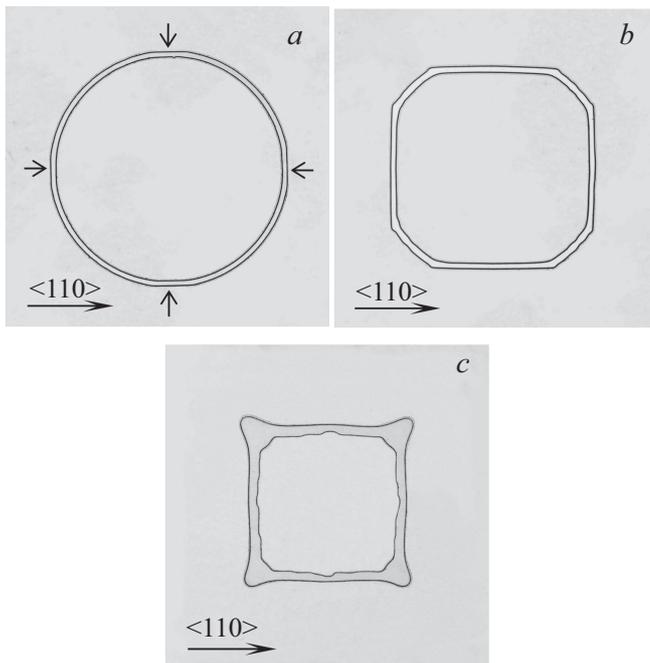


Рис. 1. Фотографии эпитаксиального канала, полученного при температуре ТМ 1400 К с помощью кольцевой зоны при ТМ на различных расстояниях от стартовой поверхности, мкм: 10 (а), 170 (b), 750 (c). Внешний диаметр кольцевой зоны — 2.2 мм.



Рис. 2. Фотография поперечного сечения замкнутой ячейки, сформированной кольцевой зоной. Сечение в направлении $\langle 110 \rangle$ по диаметру зоны. Финишная поверхность пластины внизу. Температура процесса ТМ — 1300 К.

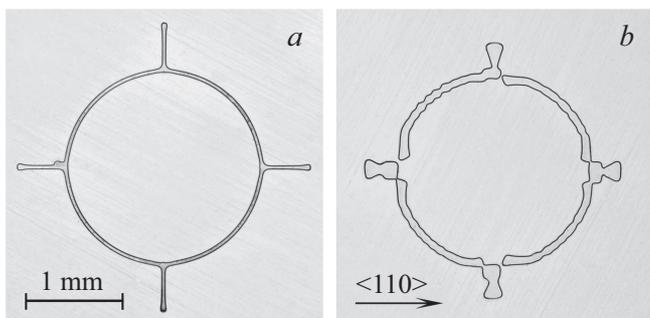


Рис. 3. Фотография эпитаксиального канала, полученного при температуре ТМ 1450 К с помощью кольцевой зоны с отрезками прямолинейных зон на различных расстояниях от стартовой поверхности, мкм: 50 (а) и 510 (b).

Установлено, что кольцевая зона при миграции изменяет свою форму и превращается в квадратную с углами, вытянутыми в направлении $\langle 100 \rangle$ (рис. 1). Трансформация кольцевой зоны начинается с появления огранки в четырех точках, расположенных симметрично на внешнем контуре кольцевой зоны (отмечены стрелками на рис. 1, а). В этих точках возникают прямолинейные участки зоны вдоль направлений $\langle 110 \rangle$, мигрирующие во внутрь зоны под углом $\alpha < 35^\circ$ относительно нормали к пластине (рис. 1, b). На внутреннем контуре зоны огранка не проявляется. Длины указанных участков монотонно возрастают вплоть до образования зоны в виде квадрата (рис. 1, c). Стороны квадрата при дальнейшей ТМ сближаются под теми же углами α , что и ограненные участки кольцевой зоны. Величина угла α уменьшалась от 33 до 15° с увеличением температуры процесса от 1270 до 1570 К. В результате формируется сквозная замкнутая ячейка сложной пирамидальной формы. Система кольцевых зон в исследованных условиях и диапазонах размеров мигрировала через пластину без нарушения целостности.

Выявлена особенность трансформации кольцевой зоны вблизи (60–100 мкм) финишной поверхности пластины: наклонные траектории движения сближающихся участков зоны становятся нормальными ($\alpha = 0^\circ$) поверхности (рис. 2). Этот эффект проявляется всегда и не зависит от того, на каком этапе трансформации зона достигает финишной поверхности.

Предпринята попытка устранить трансформацию кольцевой зоны в квадратную с помощью задания на стартовой поверхности пластины четырех радиальных отрезков зон в точках зарождения огранки (рис. 3). Отрезки зон ориентировали по направлениям $\langle 110 \rangle$. Видно, что зоны с такими отрезками сохраняли первоначальную кольцевую форму. Однако в местах примыкания прямолинейных отрезков зон к кольцевой зоне происходили разрывы. Исследования показали, что они инициируются появлением выступов на внутреннем контуре кольцевой зоны напротив отрезков на внешнем контуре в плоскости пластины. Развитие этих выступов в тангенциальном направлении и приводило к наблюдаемым разрывам зоны.

3. Обсуждение результатов

Объяснение трансформации кольцевой зоны при ТМ связано с особенностями асимметрии формы фронта растворения, вызванной огранкой на определенных участках кольцевой зоны (рис. 1). Наличие огранки фронта растворения или кристаллизации свидетельствует о послыном механизме процессов на межфазной границе, требующем большей движущей силы, чем на атомно-шероховатой границе. Огранка межфазного фронта не возникает, если имеется источник атомных ступеней на сингулярной поверхности. Вогнутый фронт растворения зоны исключает наличие естественных

атомных ступеней и ограничена сингулярными плоскостями $\{111\}$.

Трансформация зоны начинается в четырех точках на кольцевой зоне, касательные к которым совпадают с направлениями $\langle 110 \rangle$, где происходит зарождение плоскостей огранки на внешнем контуре растворения зоны. На внутреннем контуре симметричная плоскость огранки, характерная для прямолинейной зоны, не возникает из-за отрицательной кривизны внутреннего контура зоны, имеющего атомные ступени, облегчающие растворение кристалла. Поэтому в указанных четырех точках появляется боковая сила сопротивления движению, направленная внутрь кольцевой зоны и приводящая к образованию зоны квадратной формы. Наблюдаемый эффект сближения сторон квадратной зоны при дальнейшей ТМ определяется особенностями процесса растворения и кристаллизации в углах квадратов. Угол на внешнем контуре зоны затрудняет растворение, а угол на внутреннем контуре из-за отрицательной кривизны обеспечивает наличие атомных ступеней, облегчающих растворение. Атомные ступени в углу на внутреннем контуре зоны распространяются вдоль границы и препятствуют образованию плоскостей огранки на примыкающих прямолинейных участках внутреннего контура, при сохранении плоскости огранки на внешнем контуре. На фронте растворения возникает асимметричная огранка, объясняющая синхронное сближение сторон квадрата.

Обнаруженное изменение траектории движения прямолинейных участков первоначально кольцевой зоны вблизи финишной поверхности связано с атомной шероховатостью поверхности пластины. Как только жидкая зона касается финишной поверхности, атомные ступени распространяются с поверхности вдоль плоскости огранки на внешнем контуре и подавляют ее. Жидкая зона далее движется в направлении градиента температуры нормально пластине.

Использование отрезков прямолинейных зон в четырех характерных точках кольцевой зоны останавливало развитие трансформации зоны. Разрывы кольцевой зоны с радиальными отрезками объясняются различием условий на внутреннем и внешнем контурах зоны в местах примыкания отрезков к кольцевой зоне. На внешнем контуре зоны образованы два угла, являющиеся источниками атомных ступеней. Это создает дополнительную движущую силу, обусловленную градиентом химического потенциала, приводящую к переносу кремния в жидкой зоне в тангенциальном направлении. На внутреннем контуре появляется выступ, а на внешнем — область растворения. Развитие этих процессов приводит к наблюдаемому на рис. 3 результату ТМ.

4. Заключение

Установлено, что кольцевая зона при термомиграции в кремнии в направлении $\langle 100 \rangle$ изменяет свою форму и

превращается в квадратную с последующим синхронным сближением противоположных сторон с образованием вытянутых углов в направлениях $\langle 100 \rangle$ в плоскости пластины. Вблизи финишной поверхности сближение сторон прекращается, а траектория движения зон становится нормальной поверхности. Наблюдаемые эффекты объяснены особенностями растворения кремния на внутреннем и внешнем контурах при изгибе линейной зоны в плоскости пластины. Найдено, что прямолинейные отрезки зон, примыкающие с внешней стороны кольцевой зоны в точках зарождения огранки, препятствуют трансформации кольцевой зоны в квадратную и могут приводить в процессе миграции к разрывам кольцевой зоны в местах примыкания.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования России в рамках государственного задания Южно-Российскому государственному политехническому университету (НПИ) им. М.И. Платова по теме FENN-2023-0005.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] W.G. Pfann. *Zone Melting* (Wiley, N.Y., 1963).
- [2] В.Н. Лозовский, Л.С. Лунин, В.П. Попов. *Зонная перекристаллизация градиентом температуры полупроводниковых материалов* (М., Металлургия, 1987).
- [3] S. Pawar, K.P. Wang, A. Yeckel, J.J. Derby. *Acta Mater.*, **228**, 117780 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2022.117780>
- [4] S.I. Garmashov. *J. Cryst. Growth*, **627**, 127532 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2023.127532>
- [5] O.S. Polukhin, V.V. Kravchina. *Technol. Design Electron. Equipment*, **1–2**, 34 (2023). <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2023.1-2.34>
- [6] T.R. Anthony, J.K. Boah, M.F. Chang, H.E. Cline. *IEEE Trans. Electron Dev.*, **23** (8), 818 (1976). DOI: 10.1109/T-ED.1976.18492
- [7] B.M. Seredin, V.P. Popov, A.V. Malibashev, I.V. Gavrus, S.M. Loganchuk, S.Y. Martyushov. *Silicon*, **16**, 3453 (2024). DOI: 10.1007/s12633-024-02921-0
- [8] Б.М. Середин, В.П. Попов, А.В. Малибашев. *Письма ЖТФ*, **50** (7), 17 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.07.57463.19805
- [9] Б.М. Середин, В.П. Попов, А.В. Малибашев, И.В. Гаврус, А.А. Скиданов. Патент РФ 2805459 (2023).

Редактор А.Н. Смирнов

Transformation of the circular zone during thermal migration in silicon in the direction $\langle 100 \rangle$

B.M. Seredin, V.P. Popov, A.V. Malibashev, A.D. Stepchenko

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI),
346428 Novocherkassk, Russia

Abstract Aluminum-based annular zones allow to form a system of end-to-end closed epitaxial channels with p -type conductivity in a silicon wafer without crossing adjacent zones. It eliminates the possibility of zone discontinuity peculiar for intersecting linear zones and increases the reproducibility of the thermomigration method. The features of ring zones transformation in silicon at various stages of migration in direction $\langle 100 \rangle$ have been experimentally revealed. The observed changes of the zones shape and epitaxial channels caused by asymmetry of dissolution front of the liquid zone due to the features of facet at the bending of the linear zone. Faceting on the inner contour of the zone is suppressed and preserved on the outer one.