

05

Эффект трансформации линейной зоны в виде квадрата при ее миграции через пластину кремния ориентации {100}

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

Южно-Российский государственный политехнический университет им. М.И. Платова, Новочеркасск, Россия
E-mail: seredinboris@gmail.com

Поступило в Редакцию 15 ноября 2023 г.

В окончательной редакции 16 декабря 2023 г.

Принято к публикации 16 декабря 2023 г.

Экспериментально обнаружен эффект трансформации линейной зоны в виде квадрата с ориентацией сторон вдоль направлений $\langle 110 \rangle$ при термомиграции через пластину кремния ориентации {100}. Эффект проявляется в синхронном сближении сторон квадрата и формировании замкнутого эпитаксиального канала пирамидальной формы. Такая трансформация зоны объясняется асимметрией фронта растворения жидкой зоны относительно заданного градиента температуры, особенностями растворения и кристаллизации в изгибах линейной зоны в углах квадрата.

Ключевые слова: термомиграция, градиент температуры, кремний, анизотропия.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.07.57463.19805

Метод термомиграции (ТМ) жидких включений (зон) в твердых телах под действием градиента температуры позволяет получать эпитаксиальные каналы и электрически гетерогенные структуры в объеме пластины кремния [1,2]. Форма зон при их миграции через пластину определяет форму сквозных каналов. Практический интерес для их получения представляют линейные зоны, протяженные в одном измерении.

Закономерности миграции прямолинейных зон в кремнии изучены во многих работах [2–6]. Установлено [2], что для сохранения заданной топологии системы прямолинейных зон необходимо однородное поле градиента температуры G , ортогонального пластине, и выполнение определенных ориентационных условий, учитывающих анизотропию кристалла кремния. Влияние анизотропии проявляется в огранке фронта растворения зоны плотноупакованными плоскостями {111}. Фронт кристаллизации не проявляет огранки. Для сохранения прямолинейной формы зоны необходимо, чтобы направление $\langle 110 \rangle$ совпадало с осью линейной зоны и было перпендикулярно градиенту температуры [3,4]. При этом для пластин ориентации {100} фронт растворения жидкой зоны ограняется двумя плоскостями {111}, симметричными относительно оси зоны, с углом между плоскостями 70° (значение углов округляем до градуса). Если это условие не выполняется, то зона в процессе ТМ движется нестабильно, принимая характерную фрагментарную форму вплоть до распада на отдельные части. Анизотропия кремния влияет не только на форму прямолинейной зоны, но и на траекторию ее движения, которая может не совпадать с направлением градиента температуры при несимметричной огранке фронта растворения относительно градиента температуры. Сетка ортогональных прямолинейных зон, мигрирующих через пластину кремния ориентации {100}, позволяет форми-

ровать систему сквозных замкнутых ячеек, востребованных для силовых полупроводниковых приборов [6–9]. Однако воспроизводимость метода недостаточна из-за возникновения разрывов вблизи пересечений линейных зон. Представляет интерес использование замкнутых линейных зон без пересечений, например, в форме прямоугольника (квадрата), миграция которых практически не изучена.

В настоящей работе экспериментально исследована миграция линейных квадратных зон на основе алюминия через пластину кремния {100}. Обнаружен и объяснен эффект трансформации линейной зоны в виде квадрата при ее миграции, проявляющийся в сближении сторон квадратной зоны.

Были использованы пластины кремния марки КЭФ-4.5 диаметром 100 mm, толщиной 0.55 mm, ориентации (100) (с точностью $\pm 0.5^\circ$) с плотностью дислокаций, дефектов упаковки и микродефектов не более $1 \cdot 10^2$, $5 \cdot 10^2$ и $1 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-2}$ соответственно. На стартовую поверхность магнетронным осаждением наносили слой алюминия толщиной 10–15 μm . Затем с помощью фотолитографии создавали систему несоединенных между собой замкнутых линейных зон квадратной формы с длиной стороны квадрата 2.3 mm. Полосы алюминия для зон имели ширину 100 μm . Процесс ТМ проводился в вакуумной водоохлаждаемой камере при температурах 1300–1550 K и градиентах температур 20–100 K/cm. Время процесса подбиралось так, чтобы зоны выходили на противоположную (финишную) поверхность. Характер движения зон изучали металлографическим методом по форме эпитаксиальных каналов на шлифах, параллельных и перпендикулярных поверхности полученных структур.

Квадратные зоны мигрировали через пластину кремния {100} воспроизводимо без нарушения целостности

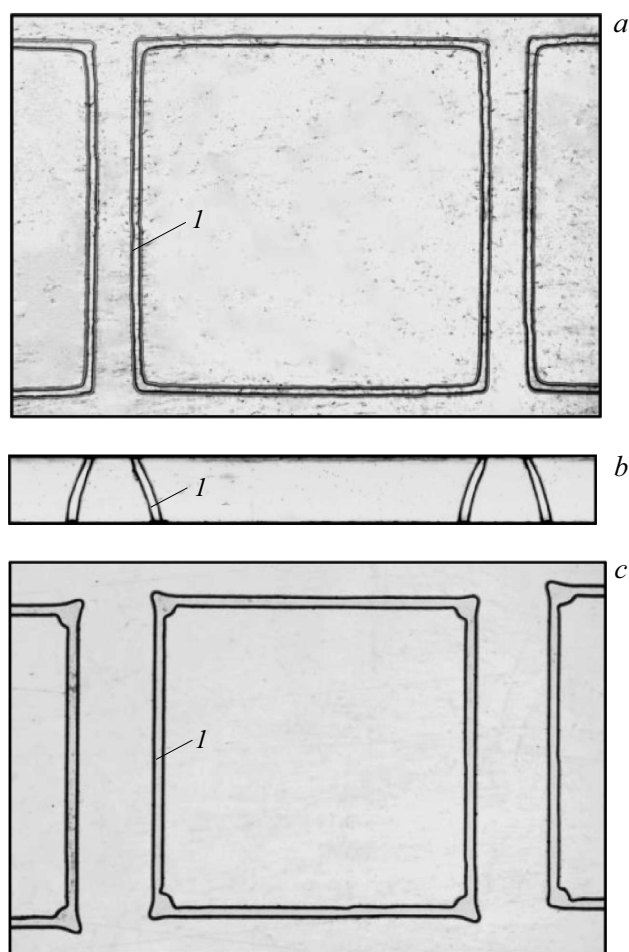


Рис. 1. Фотографии, иллюстрирующие трансформацию квадратных зон. *a* — на стартовой поверхности; *b* — поперечное сечение пластины с каналами *1*; *c* — на расстоянии $500\ \mu\text{m}$ от стартовой поверхности.

зон при условии ориентации сторон квадрата по направлениям $\langle 110 \rangle$, соответствующим стабильному движению и симметричной огранке фронта растворения прямолинейных зон. Такие прямолинейные зоны должны двигаться в направлении градиента температуры. Однако обнаружено, что движение квадратных зон через пластину сопровождалось синхронным смещением сторон квадрата внутрь под углом $\sim 25^\circ$ к нормали. Форма линейной зоны в виде квадрата сохранялась на всей траектории движения. Площадь замкнутой ячейки внутри квадратной зоны по мере миграции монотонно уменьшалась и эпитаксиальный канал принимал пирамидальную форму. Кроме того, на углах эпитаксиального канала появлялись выступы с плавными обводами, вытянутые вдоль направлений $\langle 100 \rangle$ (рис. 1).

Для выяснения роли углов при трансформации квадратной зоны проводились специальные опыты по ТМ линейных зон, изогнутых на стартовой поверхности под прямым углом с длиной прямолинейных участков, ориентированных вдоль направлений $\langle 110 \rangle$, равной

$2.3\ \text{mm}$. В этом случае также наблюдались отклонения траекторий движения прямолинейных участков под тем же углом к нормали. Контрольные отрезки прямолинейных зон мигрировали в пластине без отклонения от градиента температуры.

Формы поперечных сечений сторон квадратной зоны в глубине пластины отличались от таковых для отдельных прямолинейных зон (рис. 2). Видно, что фронт растворения стороны квадратной зоны ограничивается одной плоскостью $\{111\}$ с внешней стороны квадрата, а фронт растворения отдельной прямолинейной зоны — двумя симметричными плоскостями $\{111\}$. Толщина зоны в направлении движения для сторон квадратной зоны становится значительно больше ее ширины (рис. 2).

Экспериментально установлено, что изменение формы линейных зон при ТМ связано с асимметрией огранки фронта растворения. Наличие огранки фронта растворения или кристаллизации свидетельствует о послойном атомно-кинетическом механизме процесса [10]. Для продвижения ограненного фронта необходим источник атомных ступеней на вицинальной плоскости. Прямолинейная зона имеет 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 ступеней и ограничивается в кремнии плотноупакованными плоскостями $\{111\}$. Растворение такой плоскости происходит по дислокационному или зародышевому механизму [10].

Наблюдаемый эффект смещения сторон квадратных зон, ориентированных вдоль направлений $\langle 110 \rangle$, внутрь 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) облегчает растворение кристалла. Присутствующие атомные ступени в углу на внутреннем контуре зоны распространяются вдоль границы и препятствуют образованию плоскости огранки на прилегающем прямолинейном участке внутреннего контура зоны при сохранении ограничивающей плоскости $\{111\}$ на внешнем контуре. Поэтому на фронте растворения возникает асимметричная огранка, стороны квадратной зоны отклоняются от градиента температуры, углы отстают от сторон, в пластине кремния формируется замкнутый канал пирамидальной формы с характерными искажениями углов (рис. 1). Плавность обвода углов обусловлена силами поверхностного натяжения.

Отметим высокую воспроизводимость формирования сквозных замкнутых ячеек с помощью непересекающихся линейных зон квадратной формы: из 868 сформированных ячеек нарушения целостности каналов обнаружались не более чем в пяти ячейках (0.6%).

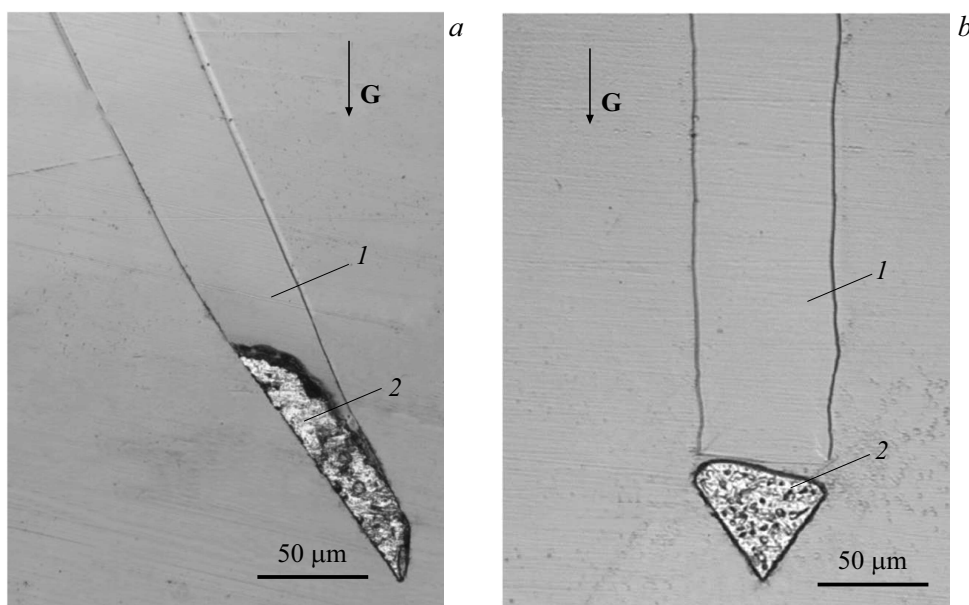


Рис. 2. Поперечное сечение пластины кремния с каналом 1 и зоной 2. *a* — для зоны в форме квадрата, *b* — для прямолинейной зоны.

Финансирование работы

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] W.G. Pfann, *Zone melting*, 2nd ed. (Wiley and Sons, N.Y., 1963), p. 113.
- [2] В.Н. Лозовский, Л.С. Лунин, В.П. Попов, *Зонная перекристаллизация градиентом температуры полупроводниковых материалов* (Металлургия, М., 1987), с. 57.
- [3] В.Н. Лозовский, В.П. Попов, *Кристаллография*, **15** (1), 116 (1970).
- [4] H.E. Cline, T.R. Anthony, *J. Appl. Phys.*, **47** (6), 2332 (1976). DOI: 10.1063/1.323009
- [5] B. Lu, G. Gautier, D. Valente, B. Morillon, D. Alquier, *Microelectron. Eng.*, **149**, 97 (2016). DOI: 10.1016/J.mee.2015.10.004
- [6] O.S. Polukhin, V.V. Kravchina, *Technology and design in electronic equipment*, N 1-2, 34 (2023). DOI: 10.15222/TKEA2023.1-2.34
- [7] O.S. Polukhin, V.V. Kravchina, *TKEA*, N 5-6, 33 (2021). DOI: 10.15222/TKEA2021.5-6.33
- [8] V.V. Kravchina, O.S. Polukhin, *Radio electronics, computer science, control*, N 3, 16 (2018). DOI: 10.15588/1607-3274-2018-3-2
- [9] А.С. Полухин, *Силовая электроника*, № 5, 118 (2013).
- [10] R.L. Parker, *Solid State Phys.*, **25**, 151 (1970). DOI: 10.1016/s0081-1947(08)60009-0