

Особенности трансформации малых квадратных зон при их термомиграции через пластину кремния (100)

© Б.М. Середин¹, В.П. Попов¹, А.В. Малибашев¹, А.Д. Степченко¹,
А.А. Скиданов², А.В. Коновалов², Е.А. Царева²

¹ Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова,
346428 Новочеркасск, Россия

² АО „ВЗПП-Микрон“,
394033 Воронеж, Россия

E-mail: seredinboris@gmail.com

Поступила в Редакцию 5 мая 2026 г.

В окончательной редакции 22 июня 2026 г.

Принята к публикации 23 июня 2026 г.

Экспериментально обнаружен и изучен новый эффект при термомиграции через пластину кремния (100) алюминиевых зон, сформированных из линейных элементов в виде замкнутого квадрата со стороной < 520 мкм, проявляющийся в сложной трансформации жидкой зоны и формировании эпитаксиального канала бокалообразной формы. Границы канала образуют в пластине два криволинейных $p-n$ -перехода, обладающих разными электрофизическими свойствами. Внешний переход имеет участки с таким же знаком кривизны, как и на закруглениях обычных $p-n$ -переходов, полученных с помощью планарной диффузии. Внутренний $p-n$ -переход имеет противоположный (отрицательный) знак кривизны, недостижимый в обычных переходах. Показано, что такая кривизна внутреннего перехода приводит к расширению области пространственного заряда в слаболегированном материале n -типа и к увеличению пробивного напряжения $p-n$ -перехода.

Ключевые слова: термомиграция, кремний, квадратные зоны, трансформация, напряжение пробоя.

DOI: 10.61011/FTP.2026.05.63870.9729

Термомиграцией (ТМ) ортогональной сетки линейных зон на основе алюминия через пластину кремния формируют сквозные замкнутые эпитаксиальные каналы (ячейки), востребованные для изготовления силовых полупроводниковых приборов [1–3]. Однако воспроизводимость метода снижается из-за возможных иногда разрывов в местах их пересечения.

В работах [4,5] использовали линейные зоны без пересечений в виде несвязанных между собой квадратов — квадратных зон. Такие зоны обеспечивали высокую воспроизводимость формирования ячеек p -типа, но проявляли при ТМ синхронное сближение противоположных сторон квадратной зоны под углом $22\text{--}27^\circ$ к градиенту температуры, перпендикулярному пластине. Установлено, что отклонение зон от нормали вызвано различными механизмами растворения кристалла на внутреннем и внешнем контурах фронта растворения замкнутой зоны, приводящими к асимметричной огранке фронта, — причине отклонения траектории движения зоны. В результате ТМ квадратной зоны в пластине кремния получается ячейка в форме усеченной пирамиды, что не изменяет функциональную возможность ячейки, но снижает эффективность использования кремния при изготовлении приборов.

В настоящей работе экспериментально обнаружен новый эффект трансформации малых зон квадратной конфигурации с длиной стороны < 520 мкм. Как и ранее, перед нанесением слоев поверхность кремния подвергали ультразвуковой очистке. Затем методом магнетронного осаждения напыляли алюминиевую пленку

толщиной $8\text{--}10$ мкм, после чего с помощью фотолитографии и химического травления формировали замкнутые квадраты с шириной стороны $80\text{--}100$ мкм, которые ориентировали по кристаллографическим направлениям $\langle 110 \rangle$. Пластины кремния (100) марки КЭФ–4.5 имели плотность дислокаций $\sim 10^2 \text{ см}^{-2}$, толщину 0.5 мм и диаметр 100 мм. ТМ проводили в вакууме в нагревательном устройстве с однородным полем градиента температуры величиной $50\text{--}70$ К/см при температурах в диапазоне $1170\text{--}1370$ К соответственно в течение $120\text{--}30$ мин. После ТМ восстанавливали планарность пластин путем сошлифовывания с лицевой и тыльной поверхностей дефектных слоев толщиной по $30\text{--}50$ мкм. Концентрация алюминия в эпитаксиальном канале составила $(1\text{--}2) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

Установлено, что при ТМ зоны квадратной конфигурации, кроме сближения противоположных сторон внешнего контура, претерпевают трансформацию внутреннего контура: он эволюционирует от квадрата к окружности, радиус которой уменьшается до нуля в процессе миграции. Это приводит к слиянию сторон зоны и формированию локальной (точечной) зоны, стабильно перемещающейся в направлении градиента температуры. В результате эпитаксиальный p^+ -канал принимает бокалообразную форму с неперекристаллизованной чашей n -кремния внутри. На рис. 1 приведены фотографии поверхности кремния с исходной алюминиевой зоной со стороной 465 мкм и трех последовательных сечений, параллельных плоскости пластины, на глубине 30 , 90 и 400 мкм от ее лицевой стороны, иллюстрирующих основные этапы трансформации.

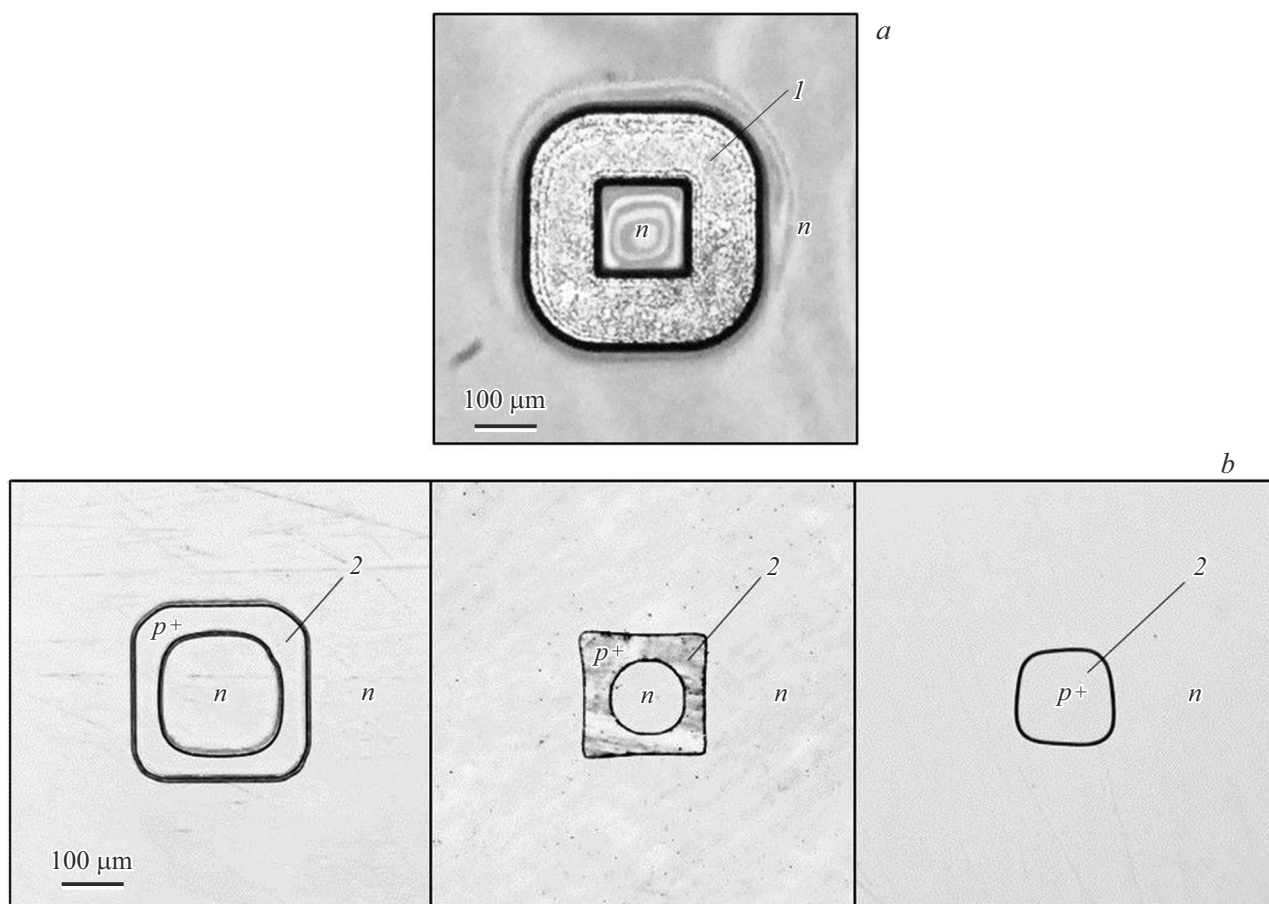


Рис. 1. Фотографии исходной поверхности пластины (а) с алюминиевой зоной (1) и эпитаксиального p^+ -канала (2), полученного ТМ малой квадратной зоны, на различной глубине (b).

На рис. 2, а представлены поперечные сечения каналов, полученных ТМ малых квадратных зон с размерами сторон: 365, 415, 465 и 520 мкм. Видно, что область исходного кремния внутри канала увеличивается как в ширину, так и в глубину пластины с увеличением размера квадратной зоны, сохраняя при этом плавные обводы. Если длина стороны квадратной зоны превышает 520 мкм, то формируется сквозная ячейка (рис. 2, б).

Причиной наблюдаемой трансформации внутреннего контура малой квадратной зоны, по-видимому, является поверхностное натяжение жидкой зоны. На это указывают зависимость эффекта от размера квадратной зоны, а также уменьшение площади поверхности жидкой зоны. По форме и размерам поперечного сечения линейной зоны и периметра квадрата определяли площадь поверхности жидкой зоны до ее погружения в кремний. После слияния внутренних сторон квадратной зоны и образования точечной зоны площадь ее поверхности оценивали по экспериментально наблюдаемым форме и размерам зоны. Использовали также условие сохранения объема жидкой фазы, пренебрегая потерей алюминия на испарение и легирование эпитаксиального канала. Выполненные оценки показали, что площадь поверхно-

сти жидкой зоны уменьшается при такой трансформации на 20–30 %. Действительно, превращение малой квадратной зоны в точечную энергетически выгодно, так как сопровождается минимизацией площади границы раздела фаз.

На границах формируемого канала возникают криволинейные резкие асимметричные p – n -переходы: внутренний и внешний. Последний имеет плоские и закругленные участки с таким же знаком кривизны (назовем ее положительной, так как центр кривизны находится в сильнолегированной области), как и на закруглениях обычных переходов, получаемых с помощью планарной диффузии. Влияние положительной кривизны p – n -перехода на его электрофизические свойства хорошо изучено [6]. На таких закругленных участках p – n -перехода сужается область пространственного заряда в слаболегированном материале подложки и снижается напряжение пробоя всего перехода. Противоположная (отрицательная) кривизна, т. е. вогнутая форма p – n -перехода в подложку, невозможна для планарно-диффузионной технологии и в литературе ранее не рассматривалась. Очевидно, что отрицательная кривизна должна приводить к расширению области простран-

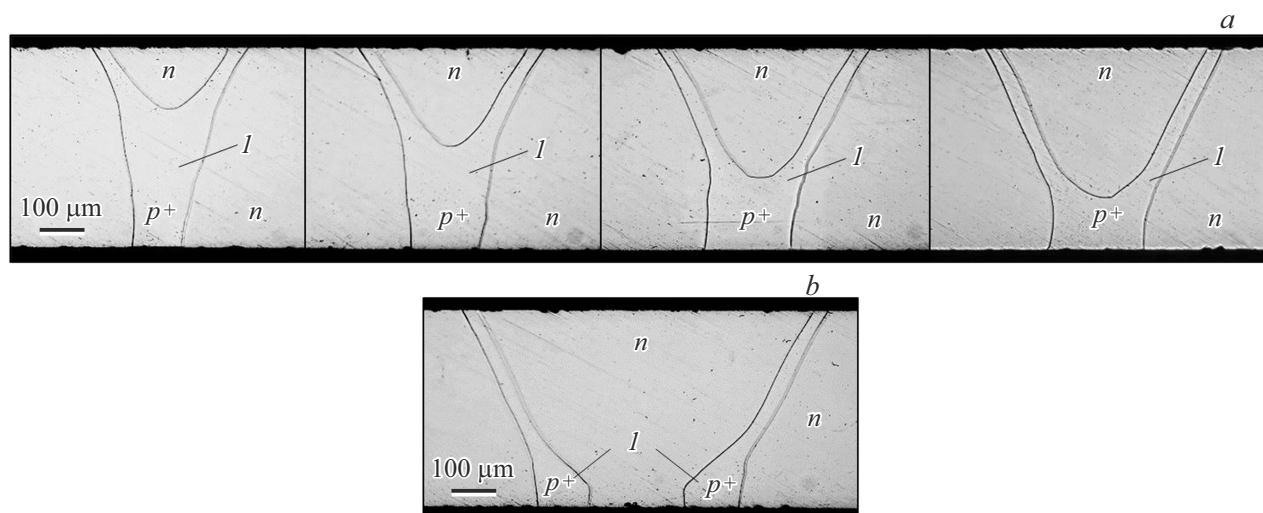


Рис. 2. Фотографии поперечного сечения каналов (I), полученных ТМ малых квадратных зон (a) и большой квадратной зоны (b). Толщина пластины кремния — 430 мкм.

ственного заряда, уменьшению напряженности электрического поля и повышению пробивного напряжения p – n -перехода.

Внутренний p – n -переход канала имеет отрицательную кривизну на всей площади, включая участки, выходящие на поверхность пластины. Для проверки влияния отрицательной кривизны на выпрямляющие свойства p – n -перехода снимали вольт-амперные характеристики (ВАХ) внутренних и внешних переходов, полученных ТМ малых и больших квадратных зон. Исследования ВАХ проводили зондовым методом с помощью измерителя параметров полупроводниковых приборов Л2-56. При этом один зонд размещали на p^+ -канале, а другой — на n -области (внутри или вне области, охватываемой эпитаксиальным каналом). На рис. 3 представлены типичные обратные ветви ВАХ исследуемых структур, характер изменения которых существенно зависел от геометрии сформированного p – n -перехода. Наибольшее напряжение пробоя (~ 250 В), как и ожидалось, соответствует внутреннему переходу бокалообразных каналов, обладающих отрицательной кривизной на всей площади (рис. 3, кривая 1). Меньшее напряжение пробоя (~ 200 В) имеет внутренний p – n -переход на сквозных ячейках, так как кроме участков с отрицательной кривизной он содержит плоские участки, снижающие напряжение пробоя всего перехода. Для внешних переходов (рис. 3, кривые 2, 4), имеющих участки с положительной кривизной, различие пробивных напряжений (~ 185 и ~ 180 В) связано с большей величиной кривизны канала, формируемого точечной зоной, по сравнению с кривизной канала, формируемого большой квадратной зоной.

Повышение пробивного напряжения p – n -переходов важно для приборов, использующих явления контролируемого лавинообразования: ограничительных диодов, стабилитронов, лавинных фотодиодов и др. Возможность регулирования глубины залегания внутреннего

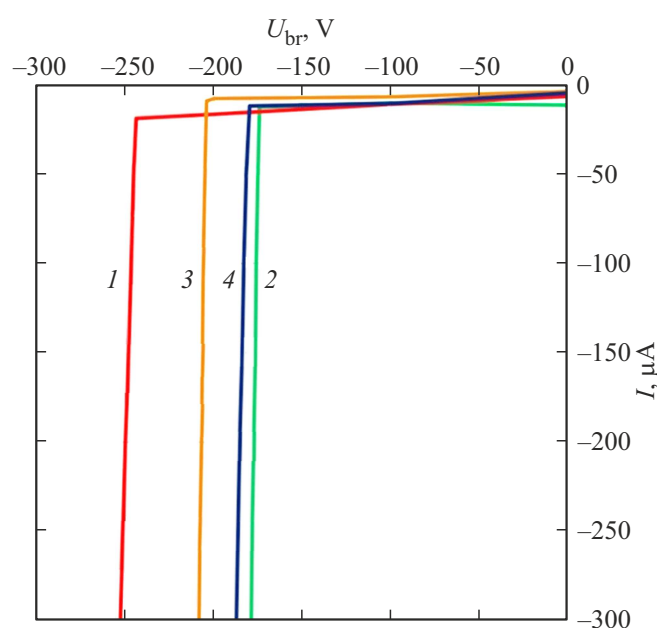


Рис. 3. Типичные ВАХ обратных ветвей внутреннего (1, 3) и внешнего (2, 4) p – n -переходов, полученных ТМ малых (1, 2) и больших (3, 4) квадратных зон.

p – n -перехода позволяет оптимизировать обратную ВАХ формируемой структуры. Система из множества параллельно функционирующих бокалообразных каналов при их отдельной вертикальной коммутации может быть основой для силового прибора с равномерно рассеиваемой тепловой мощностью в объеме пластины.

Таким образом, термомиграция малых квадратных зон через пластину кремния {100} дает возможность формировать криволинейные p – n -переходы с отрицательной кривизной с повышенным напряжением пробоя.

Финансирование работы

Работа соавтора А.Д. Степченко поддержана в рамках программы стратегического академического лидерства „Приоритет-2030“ в Южно-Российском государственном политехническом университете (НПИ) имени М.И. Платова.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] T.R. Anthony, J.K. Boah, M.F. Chang, H.E. Cline. IEEEIC Trans. Electron Dev., **23** (8), 818 (1976). DOI: 10.1109/T-ED.1976.18492
- [2] A. Audebert, B. Morillon, B.L. Borgne, G. Gautier. 2024 *Int. Semiconductor Conf. (CAS)* (Sinaia, Romania, 2024) p. 185. DOI: 10.1109/CAS62834.2024.10736804
- [3] B. Lu, G. Gautier, D. Valente, B. Morillon, D. Alquier. Microelectron. Eng., **149**, 97 (2016). DOI: 10.1016/j.mee.2015.10.004
- [4] Б.М. Середин, В.П. Попов, А.В. Малибашев. Письма ЖТФ, **50** (7), 17 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.07.57463.19805
- [5] Б.М. Середин, В.П. Попов, А.В. Малибашев, А.Д. Степченко, И.В. Гаврус. Прикл. физика, **3**, 78 (2024). DOI: 10.51368/1996-0948-2024-3-78-85
- [6] С. Зи. Физика полупроводниковых приборов (М., Мир, 1984) т. 1, с. 116.

Редактор А.Н. Смирнов

Features of the transformation of small square zones during their thermomigration through a silicon wafer (100)

B.M. Seredin¹, V.P. Popov¹, A.V. Malibashev¹,
A.D. Stepchenko¹, A.A. Skidanov²,
A.V. Konovalov², E.A. Tsareva²

¹ Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI),
346428 Novocherkassk, Russia
² Open Joint-Stock Company „VZPP-Micron“,
394033 Voronezh, Russia

Abstract A new effect has been experimentally discovered and studied during the thermomigration of a linear aluminum-based zone, shaped as a square with a side length below $520\text{ }\mu\text{m}$, through a {100} silicon wafer. The effect manifests itself in a complex transformation of the molten zone and the formation of an epitaxial channel with a goblet-like shape. The channel boundaries form two curvilinear p – n junctions within the wafer, each possessing distinct electrophysical properties. The outer junction contains segments with the same sign of curvature as the rounded edges of conventional p – n junctions produced by planar diffusion. The inner p – n junction exhibits the opposite (negative) curvature sign, which cannot be achieved in standard junctions. It is shown that such curvature of the inner junction leads to an expansion of the space-charge region in the lightly doped n -type material and to an increase in the breakdown voltage of the p – n junction.