

Использование углерода для формирования дискретных зон на основе алюминия при их термомиграции в кремнии

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

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова

346428 Новочеркасск, Россия

E-mail: seredinboris@gmail.com

Поступила в Редакцию 5 мая 2025 г.

В окончательной редакции 17 июля 2025 г.

Принята к публикации 18 июля 2025 г.

Система дискретных линейных зон в виде ортогональной сетки пересекающихся прямолинейных зон, колец или квадратов при их термомиграции через пластину кремния формирует эпитаксиальные каналы, образующие сквозные замкнутые ячейки, востребованные силовой электроникой. Экспериментальные исследования выявили специфические дефекты в виде бугорков шарообразной формы на стартовой поверхности зон. Наличие таких дефектов нарушает заданную топологию каналов, делает невозможным постмиграционную обработку. Установлены причины возникновения указанных дефектов и предложен способ их эффективного устранения с помощью тонкого слоя углерода в виде сажи.

Ключевые слова: термомиграция, сквозные каналы, дефекты, сажа.

DOI: 10.61011/FTP.2025.05.61478.8049

1. Введение

Перспективность применения в электронике пластин кремния *n*-типа проводимости со сквозными ячейками *p*-типа, полученных термомиграцией (ТМ) линейных зон на основе алюминия, обоснована в работах [1–6]. Наряду с определенными успехами в развитии метода ТМ в последнее время вскрыты серьезные проблемы, сдерживающие его освоение. В частности, с увеличением диаметра используемого кремния стали проблемными строгая однородность поля градиента температуры в пластине кремния и сохранение заданной топологии зон в процессе ТМ. Решению этих проблем посвящены работы [7,8]. Критически важными на данном этапе развития техники ТМ стали выявление причин образования и необходимость устранения шарообразных дефектов (бугорков) на стартовой поверхности зон.

Дефекты в форме бугорков впервые обнаружены в работах [3,5,6] при ТМ пересекающихся прямолинейных зон через пластину кремния с кристаллографической ориентацией (100). Бугорки, согласно данным авторов, состояли из оксида алюминия с включениями кремния и достигали 3 мм при ширине зон 0.1 мм. Количество таких дефектов на пластине кремния диаметром 125 мм обычно мало, не превышало десяти. Однако наличие даже одного бугорка нарушало планарность поверхности пластины и приводило к браку всей пластины с множеством ячеек при постмиграционной обработке. Авторы работ [3–5] пытались устранить эти дефекты оптимизацией температурно-временного режима ТМ, регулированием давления кислорода в защитной атмосфере азота и варьированием геометрии алюминиевых зон на стартовой поверхности пластины. Эти меры позволили сократить количество бугорков на пластине, но полностью избавиться от них и установить причину их

возникновения не удалось. Устранению специфического дефекта, возникающего при ТМ, посвящена настоящая работа.

2. Эксперимент

В экспериментах были использованы пластины кремния марки КЭФ–4.5 *n*-типа проводимости, кристаллографической ориентации (100), диаметром 100 мм, толщиной 0.6 мм, с плотностью дислокаций 10^2 см^{-2} . Процесс ТМ проводили в вакуумной водоохлаждаемой камере в нагревательном устройстве [9], обеспечивающем однородное поле градиента температуры 40–90 К/см при температуре 1300–1420 К. Для получения зон на стартовую поверхность пластины кремния магнетронным осаждением наносили слой алюминия толщиной 10 мкм. Затем с помощью фотолитографии создавали на стартовой поверхности пластины систему замкнутых алюминиевых полос в виде сетки, колец или квадратов. Площадь внутри ячейки, образованной этими полосами, варьировали от 1 до 14 мм², минимальное расстояние между ячейками составляло 0.2 мм, а ширина полос алюминия для зон — 0.1 мм. Следует отметить, что такая топология системы дискретных зон обеспечивает более высокую целостность зон при ТМ (~ 90 %), чем сетка пересекающихся линейных зон (~ 50 %).

Для устранения дефектов в форме бугорков предложено использовать слой углерода в виде сажи, нанесенной из пламени углеводорода на стартовую поверхность пластины кремния со сформированным алюминием для зон. Воспроизводимое нанесение сажи осуществляли с помощью установки, сконструированной на базе двухосевого манипулятора. Источник пламени (стеариновая свеча, керосиновая лампа или газовая горелка) распо-

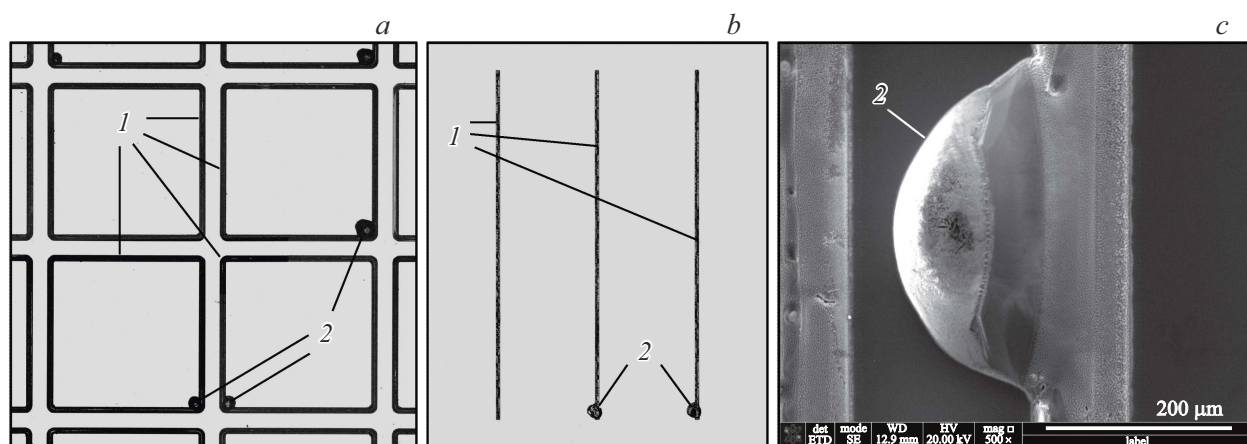


Рис. 1. Фотографии типичных фрагментов пластины с квадратными (а), прямолинейными (b) каналами 1 со стороны стартовой поверхности и с дефектом 2 в виде бугорка (с).

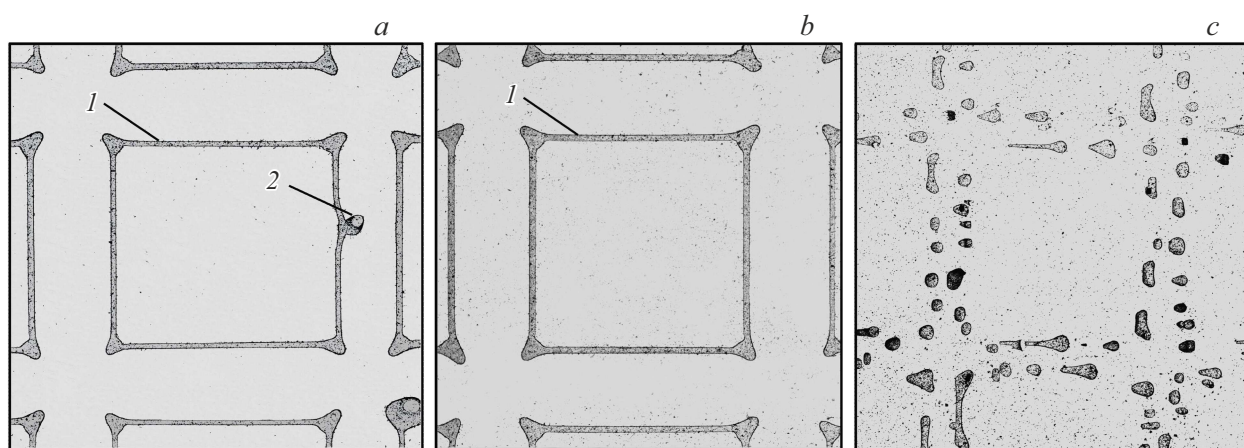


Рис. 2. Фотографии эпитаксиальных каналов 1 на расстоянии 30 мкм от финишной поверхности. а — с дефектом 2 в виде бугорка, b — без дефекта, с — разорванного на отдельные части, результат „холодного“ нанесения мелкодисперсного углерода.

лагали под пластиной кремния. Пластину перемещали со скоростью ~ 1 см/с, выполняя проходы над пламенем с заданным шагом согласно программе. Температуру нагрева поверхности пластины контролировали инфракрасным пирометром, и она не превышала 400°C . Тип используемого углеводорода не являлся критичным. Требовалось 5–6 проходов для нанесения сплошного слоя сажи толщиной 0.1 – 1 мкм.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведены фотографии фрагментов пластины кремния с дефектами в виде бугорков на стартовой поверхности квадратных и прямолинейных зон после ТМ. Установили, что бугорки возникают не на всех зонах ($\sim 60\%$) и всегда только один бугорок на одну зону независимо от условий ТМ, ориентаций зоны и градиента температуры в кристалле. Фотографии эпитаксиальных каналов вблизи финишной поверхности

после ее шлифовки и проявления химическим травлением в СР-4 показаны на рис. 2. Видно, что дефект в виде бугорка локально деформирует канал, формируемый ячейкой (рис. 2, а). Диаметр шарообразных бугорков составлял 0.2 – 0.3 мм, а сами бугорки, по данным энергодисперсионного анализа, представляли собой кремний, легированный алюминием. Визуальные наблюдения в процессе ТМ стартовой поверхности пластины с зонами через кварцевое стекло камеры показали, что все бугорки возникали на начальной стадии процесса — в течение 5–10 мин, тогда как время миграции зон через пластину составляло 60–90 мин в зависимости от выбранной температуры и величины температурного градиента.

Нанесение слоя углерода в виде сажи из пламени углеводорода на стартовую поверхность пластины с подготовленным алюминием для зон полностью устраняло дефекты в виде бугорков (рис. 2, b). При этом использование сажи не нарушало целостность миграции

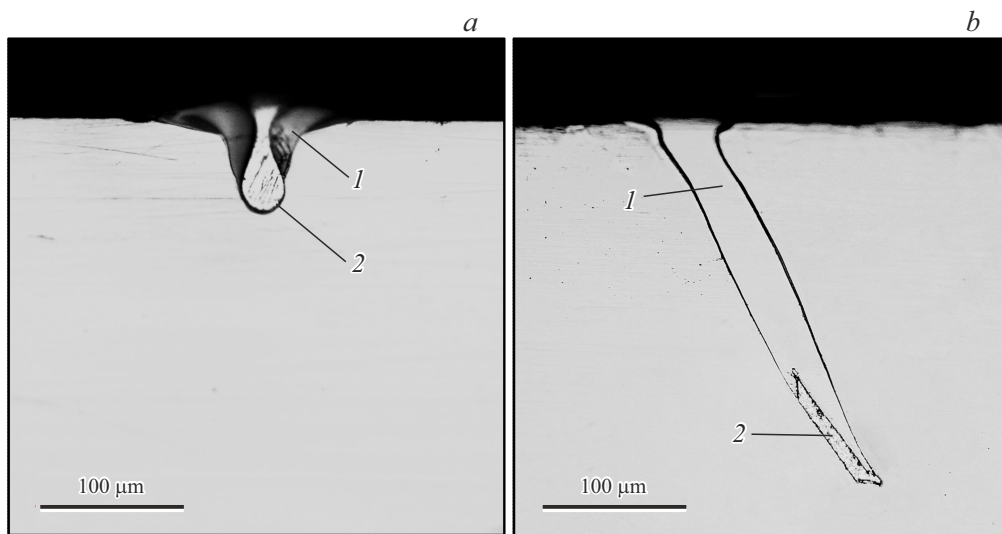


Рис. 3. Фотографии поперечных сечений зоны и канала на стадии погружения (*a*) и в стационарном режиме ТМ квадратной зоны (*b*); 1 — эпитаксиальный канал, 2 — „замороженная“ зона.

линейных зон и не влияло существенно на скорость движения зон. Ширина получаемых при использовании сажи каналов увеличивалась на $\sim 20\%$.

Предприняты также попытки нанесения слоя углерода без использования пламени. Для этого применяли лакокрасочный графитовый спрей или суспензии, содержащие мелкодисперсный углерод (аквадаг, ультрадисперсный графит, гидрогенизированный фуллерен и сажа в ацетоне). Ни одно из этих веществ не дало положительного эффекта: линейные зоны разрывались на отдельные части (рис. 2, *c*) и каналы оказывались совершенно непригодными для изготовления полупроводниковых приборов.

Для понимания причин и механизма возникновения дефектов в виде бугорков необходимо учитывать, что они возникают в начале ТМ и связаны с особенностями погружения зоны в кристалл. Главной особенностью погружения является наличие границы жидкой зоны с вакуумом. Эта граница имеет минимальную температуру в зоне, но кристаллизация на ней затруднена из-за отсутствия центров кристаллизации. Кристаллизация возможна только на краях этой границы, где есть контакт с кремнием, и откуда происходит зарастание зоны при ее погружении. На фронте растворения зоны подобных ограничений нет. В результате „горячая“ граница зоны опережает „холодную“, зона вытягивается в направлении градиента температуры, а скорость движения зоны как целого замедляется. Об этом свидетельствует отсутствие огранки плоскостями типа $\{111\}$ фронта растворения зоны (рис. 3, *a*), характерной для движущегося фронта растворения [8].

После зарастания зоны кремнием на „холодной“ границе стадия погружения заканчивается, ограничения для кристаллизации снимаются и устанавливаются новые согласованные скорости процессов растворения, диффузии

и кристаллизации, необходимые для стационарного движения зоны. Установление стационарной формы жидкой зоны в объеме кристалла обусловлено большей затрудненностью атомно-кинетических процессов растворения по сравнению с процессами кристаллизации, это приводит к сжатию зоны в направлении движения и огранке фронта растворения сингулярными плоскостями $\{111\}$ (рис. 3, *b*). Различие сил сопротивления процессам растворения и кристаллизации уравнивается силой поверхностного натяжения деформированной зоны [10]. Избыточное давление в зоне может разрушить тонкий слой кремния вблизи заросшей стартовой поверхности зоны и выдавить каплю раствора-расплава на поверхность. Именно такая капля является причиной дефекта в виде бугорка: мигрируя вслед за зоной, капля задает шаровидный выступ на стартовой поверхности, локальную деформацию канала и нерегулярности на финишной поверхности пластины. Представленный механизм образования рассматриваемого дефекта согласуется как с нашими результатами для отдельных зон, так и с результатами [3–5] для системы пересекающихся (связанных) линейных зон.

Устранение дефекта в виде бугорков с помощью слоя сажи, возможно, объясняется тем, что сажа образует на границе жидкой зоны с вакуумом центры кристаллизации, облегчающие погружение зоны. Вытягивание зоны не происходит и деформация зоны, в связи с ограниченной скоростью растворения, завершается до ее полного погружения. Избыточное давление в зоне не возникает. Сажа имеет мелкокристаллическую структуру и обеспечивает хорошую адгезию к поверхности алюминия при „горячем“ нанесении. Частицы сажи имеют размеры в диапазоне 0.5–1 нм, что соответствует известным данным [11]. Другие использованные углеродосодержащие вещества имели значительно большие размеры кристал-

литов (0.5–100 мкм) и инициировали неравномерную кристаллизацию и разрывы зоны.

4. Заключение

Нанесение слоя углерода в виде сажи из пламени углеводорода на поверхность алюминиевой зоны оказалось эффективным средством устранения дефектов в форме бугорков, образующихся при термомиграции линейных зон. Дефекты возникали при выдавливании капли раствора-расплава из зоны избыточным давлением на стадии погружения зоны. Избыточное давление обусловлено различием сил сопротивления атомно-кинетическим процессам растворения и кристаллизации на границах дискретной зоны и особенностями ее погружения в кристалл. Слой сажи на поверхности жидкой зоны облегчает гетерогенную кристаллизацию, что приводит к трансформации зоны на стадии погружения без возникновения избыточного давления — причины возникновения исследуемого дефекта.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] H.E. Cline, T.R. Anthony. *J. Appl. Phys.*, **47** (6), 2332 (1976). DOI: 10.1063/1.323009
- [2] M. Chang, R.J. Kennedy. *Electrochem Soc.*, **128** (10), 2193 (1981). DOI: 10.1149/1.2127216
- [3] B. Morillon. *Etude de la thermomigration de l'aluminium dans le silicium pour la réalisation industrielle de murs d'isolation dans les composants de puissance bidirectionnels* (Micro and Nanotechnologies/Microelectronics, INSA de Toulouse, 2002) p. 222.
- [4] O.S. Polukhin, V.V. Kravchina. *Technol. Design Electronic Equipment*, **1–2**, 34 (2023). DOI: 10.15222/TKEA2023.1-2.34
- [5] B. Lu, G. Gautier, D. Valente, B. Morillon, D. Alquier. *Microelectron. Eng.*, **146**, 97 (2016). DOI: 10.1016/j.mee.2015.10.004
- [6] A. Audebert, B. Morillon, B.L. Borgne, G. Gautier. In *2024 Int. Semiconductor Conf. (CAS)*, ed. by G. Brezeanu, O. Buiu Sinaia, M.L. Ciurea, D. Cristea, M.A. Dinescu, D. Dobrescu, M. Dragoman, C. Kusko, C. Moldovan, A. Müller, R. Müller, D. Neculoiu. In Romania (Sinaia, 2024) v. 47, p. 185. DOI: 10.1109/CAS62834.2024.10736804
- [7] Б.М. Середин, В.П. Попов, А.Н. Заиченко, А.В. Малибашев, И.В. Гаврус, А.А. Минцев, А.А. Скиданов. *ФТТ*, **65** (12), 2051 (2023). DOI: 10.61011/FTT.2023.12.56720.4914k
- [8] 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
- [9] Б.М. Середин, В.П. Попов, А.В. Малибашев, А.Н. Заиченко, И.В. Гаврус, А.А. Скиданов. Патент на изобретение RU 2 805 459 C1.
- [10] В.Н. Лозовский, В.П. Попов, А.В. Балюк, А.М. Добкина. *Неорг. матер.*, **27** (9), 1790 (1991).
- [11] В.П. Зуев, В.В. Михайлов. *Производство сажи* (М., Химия, 1965) с. 7.

Редактор Г.А. Оганесян

Application of carbon for the formation of discrete aluminum-based zones during their thermomigration in silicon

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

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

Abstract A system of discrete linear zones in the form of an orthogonal grid of intersecting rectilinear zones, rings or squares, when they thermomigrate through a silicon wafer, forms epitaxial channels forming through-closed cells demanded by power electronics. Experimental studies have revealed specific defects in the form of spherical bumps in the zones from the starting surface. The presence of such defects violates the specified topology of the channels, making post-migration processing impossible. In this paper, the causes of these defects are established and a method is proposed for their effective elimination using a thin layer of carbon in the form of soot.