Влияние способа разделения и химического травления торцевых поверхностей на динамику темнового тока рентгеночувствительных HR-GaAs:Cr сенсоров

© *И.Д. Щербаков, В.В. Черненко, М.С. Трофимов, А.В. Шемерянкина, Т.А. Михайлов, О.П. Толбанов, А.В. Тяжев, А.Н. Зарубин, Ю.С. Петрова*

Томский государственный университет,
634050 Томск, Россия

E-mail: ivan_sherbakov94@mail.ru

Поступила в Редакцию 10 июля 2026 г.
В окончательной редакции 6 октября 2026 г.
Принята к публикации 15 октября 2026 г.

Исследовано влияние способа разделения и химической постобработки торцевых поверхностей на динамику темнового тока единичных сенсоров из высокоомного арсенида галлия, компенсированного хромом. Раскалывание по кристаллографическим плоскостям обеспечивало минимальный темновой ток, последующее травление в течение 1 и 2 мин повышало шероховатость, при этом плотность тока возрастала в 1.55 и 1.64 раза соответственно. Для образцов единичных сенсоров после дисковой резки травление, напротив, снижало плотность тока в 31 и 43 раза. Минимальный темновой ток наблюдался после 2 мин химической обработки торцевых поверхностей единичных сенсоров, сформированных дисковой резкой. К концу измерительного цикла темновой ток образцов после раскалывания, а также образцов после дисковой резки и последующего травления приближался к квазистационарному режиму. Для единичных сенсоров после дисковой резки без химической постобработки темновой ток, напротив, продолжал монотонно возрастать.

Ключевые слова: полупроводниковые сенсоры, арсенид галлия, темновой ток, краевая проводимость, химическое травление.

DOI: 10.61011/FTP.2026.10.64216.10353

1. Введение

Полупроводниковые сенсоры ионизирующих излучений являются основой современных систем регистрации рентгеновского и γ-излучения, медицинской и промышленной визуализации, спектрометрии, синхротронных экспериментов и радиационного мониторинга. Для ряда применений, особенно в области жесткого рентгеновского излучения, использование кремния ограничено сравнительно низкой поглощающей способностью, что стимулирует развитие сенсоров на основе соединений с более высоким эффективным атомным номером, в том числе CdTe, CdZnTe и GaAs [1]. Арсенид галлия, компенсированный хромом (GaAs:Cr), представляет в этом отношении особый интерес, поскольку сочетает сравнительно высокую поглощающую способность с возможностью получения высокоомного материала, пригодного для работы при комнатной температуре в многоэлементных сенсорных системах [2,3].

Высокоомный (HR-High Resistivity) GaAs:Cr получают компенсацией проводимости исходного n-GaAs электронного типа глубокими центрами хрома. В литературе для такого материала приводятся значения удельного сопротивления $\rho \geq 10^9$ Ом $\cdot$ см, что позволяет формировать сенсоры с достаточно малым объемным током при приложении рабочего напряжения к контактам сенсора [3,4]. В работах последних лет исследована стабильность отклика HR-GaAs:Cr материала при высоких потоках излучения [5,6], а также продемонстрирована возможность применения таких сенсоров в гибридных системах с зарядоинтегрирующим и счетным режимами считывания для рентгеновской и электронной микроскопии [7–10].

Однако, как и для других высокоомных полупроводников сложного состава, эксплуатационные характеристики HR-GaAs:Cr определяются не только объемными свойствами кристалла, но и состоянием контактов, торцевых поверхностей, дефектной структуры и пространственного заряда.

Одним из ключевых параметров сенсора является темновой ток. Его величина определяет уровень шумовой составляющей, допустимое рабочее напряжение и динамический диапазон регистрирующей электроники. В сенсорной структуре измеряемый темновой ток может включать как объемную компоненту, так и поверхностно-краевые токи, возникающие по торцевым граням кристалла и вблизи границы металл/полупроводник. Для GaAs эта проблема дополнительно связана с высокой чувствительностью поверхности к дефектам, оксидным слоям и состояниям, способным закреплять положение уровня Ферми [11]. Исследования HR-GaAs:Cr материала также показывают, что механическая и химическая обработка поверхности может изменять концентрацию поверхностных дефектных состояний и вклад поверхностной рекомбинации [12].

Особую роль поверхностно-краевые эффекты играют на завершающих стадиях изготовления сенсоров, когда пластина разделяется на отдельные элементы. В технологии пиксельных матриц и микрополосковых сенсоров, как правило, требуется высокая точность геометрии, поэтому разделение выполняется методом прецизионной дисковой резки. Однако такая обработка может приводить к механически поврежденному приповерхностному слою, сколам, локальным напряжениям и дополнительным дефектам на боковой поверхности. В сенсорах со сплошной металлизацией верхней и нижней сторон, где требования к точности геометрических размеров менее жесткие, альтернативой может быть разделение раскалыванием по кристаллографическим плоскостям. В этом случае поврежденный слой может быть тоньше. Исследования полупроводниковых сенсоров показывают, что способ разделения, качество боковой поверхности и ее последующая пассивация могут существенно влиять на краевой ток утечки [13]. Авторами работы [14] показано, что режим резки GaAs-пластин определяет шероховатость боковой поверхности, образование сколов и величину остаточных механических напряжений.

Отдельного внимания требует временна́я динамика темнового тока после приложения напряжения. Дрейф и время жизни неравновесных носителей в HR-GaAs:Cr материале определяются процессами захвата и рекомбинации на глубоких центрах [12,15–17]. После включения напряжения изменение заполнения глубоких уровней и формирование пространственного заряда могут приводить к перераспределению внутреннего электрического поля [18,19]. Поэтому стационарное состояние тока после подачи напряжения может устанавливаться не мгновенно.

Цель настоящей работы состоит в экспериментальном исследовании влияния способа разделения HR-GaAs:Cr пластин на отдельные единичные сенсоры и химической постобработки торцевых поверхностей на величину и временну́ю динамику темнового тока.

2. Образцы и методика эксперимента

2.1. Исследуемые образцы

Для изготовления единичных сенсоров использовалась пластина исходного n-GaAs диаметром 76 мм, в которой высокоомное состояние формировалось высокотемпературной диффузией хрома (Cr). Хром в n-GaAs образует глубокие акцепторные центры, обеспечивающие компенсацию донорной проводимости. Для материала HR-GaAs:Cr, полученного аналогичным методом, ранее методом Холла было установлено, что концентрация дырок превышает концентрацию электронов и материал характеризуется p-типом проводимости [20].

Перед изготовлением сенсорных структур было измерено распределение удельного сопротивления ρ по пластине методом бесконтактного контроля на установке Corema WT (рис. 1). Для дальнейшей обработки выбиралась область с разбросом ρ не более 5% относительно среднего значения в пределах выбранного участка.

На обе стороны выбранного фрагмента HR-GaAs:Cr материала методом химического осаждения были нанесены сплошные никелевые (Ni) контакты толщиной ~ 200 нм, в результате формировалась структура металл–полупроводник–металл. Фрагмент разделяли на две полоски шириной 10 мм, из которых единичные сенсоры получены раскалыванием по кристаллографическим плоскостям или прецизионной дисковой резкой. Для каждого способа разделения (две группы) было изготовлено по 6 сенсоров размером 3.0×3.0 мм (воспроизводимость размеров образцов после раскалывания составляла ± 0.2 мм) и толщиной 500 ± 10 мкм. После первичного измерения темнового тока единичные сенсоры каждой группы подвергались химической обработке торцевых поверхностей при температуре $85 \pm 5\,^{\circ}$C в травителе [12,21] на основе серной кислоты (H_2SO_4), перекиси водорода (H_2O_2) и деионизованной воды (H_2O) в соотношении 3 : 1 : 1 (далее сернокислотный травитель). Ni-контакты предварительно были защищены химически стойким лаком. В каждой группе три сенсора травились в течение 1 мин, три в течение 2 мин. После травления лак удалялся, образцы промывались деионизованной водой, высушивались в атмосфере азота и повторно измерялся темновой ток.

2.2. Профилометрия образцов

Профилометрические измерения выполнены на оптическом профилометре Profilm 3D (Filmetrics). Глубина химического травления определена на тестовых HR-GaAs:Cr пластинах по высоте ступеньки между защищенной химически стойким лаком и протравленной областями поверхности.

Шероховатость торцевых поверхностей единичных сенсоров оценена по параметру S_a, соответствующему среднеарифметическому отклонению высот поверхности. Для каждого единичного сенсора измерялись четыре торцевые грани. В качестве результата использовалось среднее значение S_a, а указанное отклонение характеризует разброс полученных значений. Измерения выполнялись до и после химического травления, что позволяло сопоставить влияние способа разделения и последующей химической обработки на морфологию боковой поверхности единичных сенсоров.

2.3. Методика измерений динамики темнового тока

Темновой ток измерялся источником-измерителем Keithley 2410 в закрытой светонепроницаемой камере при температуре $T = 24 \pm 1\,^{\circ}$C. К противоположным контактам структуры Ni/HR-GaAs:Cr/Ni прикладывалось постоянное напряжение $U = 100$ В, отрицательный потенциал подавался на верхний контакт единичного сен-

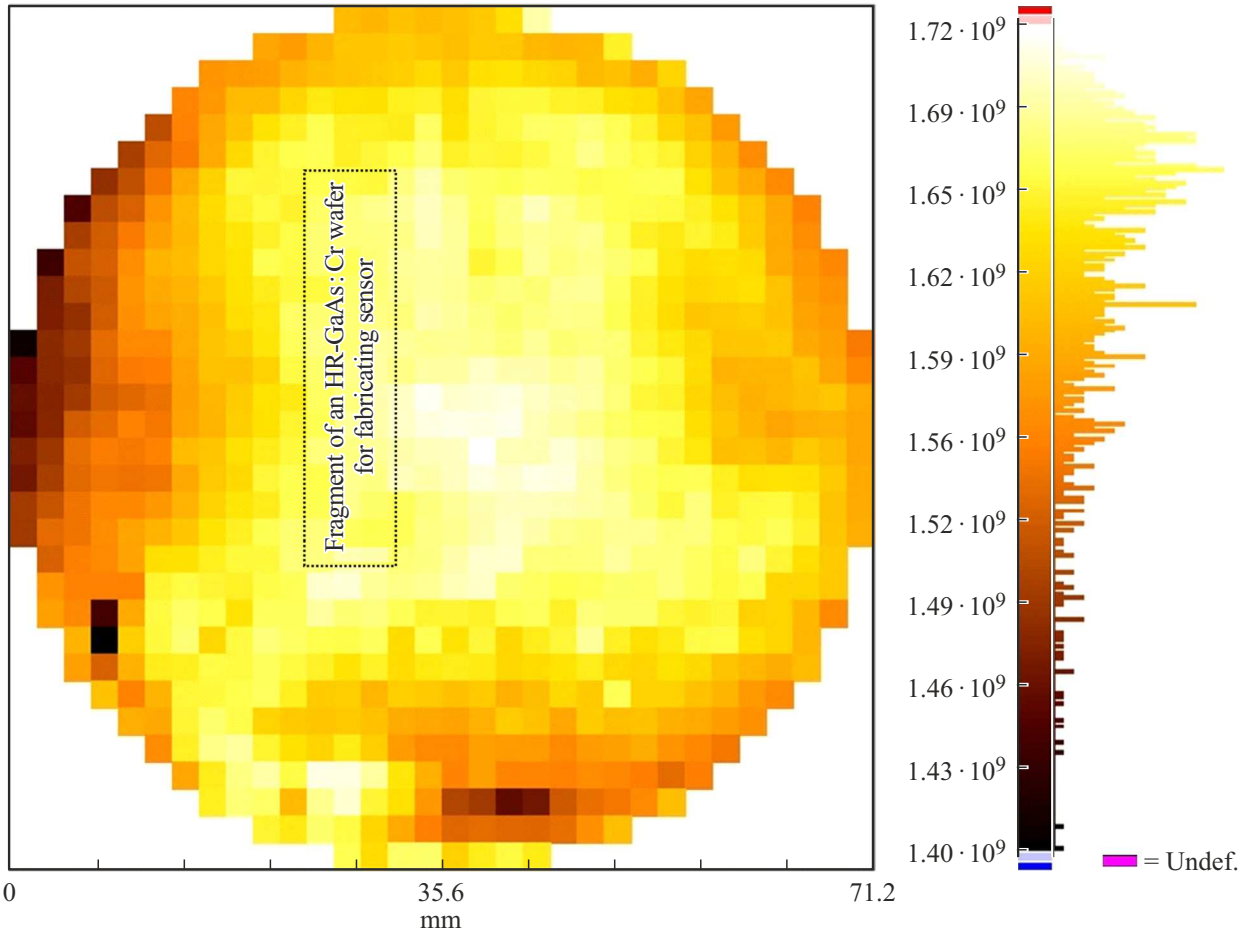

Рис. 1. Распределение удельного сопротивления по HR-GaAs:Cr пластине.

сора. При измерениях был использован двухпроводный режим подключения, время интегрирования 10 NPLC (Number of Power Line Cycles), фильтрация выполнялась в режиме повторного усреднения с числом отсчетов 2. Каждый участок регистрации содержал 300 точек с интервалом 2.81 с. Измерительный цикл включал регистрацию зависимости темнового тока от времени $I_{\text{dark}}(t)$ при приложенном напряжении в течение ~ 14 мин, выдержку без напряжения в течение 10 мин и повторную регистрацию в течение ~ 14 мин при той же величине и полярности напряжения.

Для сравнения единичных сенсоров с возможными отклонениями фактических размеров от номинальных измеренный темновой ток нормировался на площадь металлизированного контакта (размер кристалла):

$$J_{i,\text{dark}}(t) = \frac{I_{i,\text{dark}}(t)}{S_i}, \qquad (1)$$

где $J_{i,\text{dark}}(t)$ — плотность темнового тока i-го единичного сенсора, S_i — фактическая площадь Ni-контакта i-го сенсора.

До химической обработки плотность темнового тока усреднялась по шести единичным сенсорам соответствующего способа разделения. После разделения каждой группы на две подгруппы результаты после травления в течение 1 и 2 мин представлены как среднее по трем единичным сенсорам соответствующей подгруппы. Усреднение выполнялось для каждого момента регистрации, исключая временной участок без приложенного напряжения:

$$\overline{J_{\text{dark}}(t)} = \frac{\sum_{i=1}^{n} J_{i,\text{dark}}(t)}{n}. \qquad (2)$$

На графиках зависимости плотности темнового тока представлены в виде среднеарифметического значения по измеренным образцам. Вертикальные отрезки показывают стандартное отклонение от среднего значения, рассчитанное отдельно для каждого момента времени регистрации тока.

3. Результаты эксперимента

3.1. Результаты профилометрии

Проведено профилометрическое измерение ступени, сформированной на тестовой HR-GaAs:Cr пластине по-

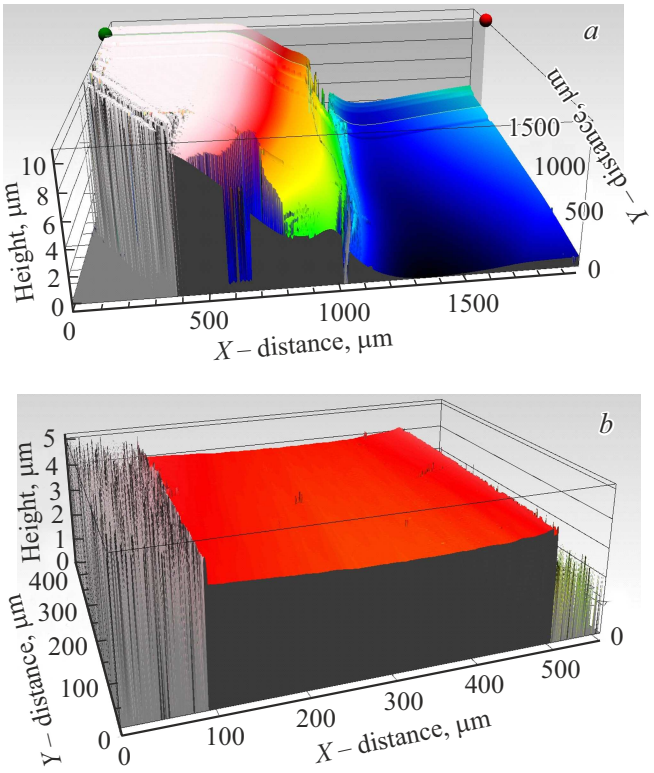

Рис. 2. *a* — глубина травления HR-GaAs:Cr материала; *b* — торцевая поверхность единичного сенсора, полученного методом дисковой резки.

сле химического травления, а также исследованы микрорельеф и шероховатость торцевых поверхностей единичных сенсоров. В качестве примера на рис. 2 представлен результат для тестовой пластины после травления в течение 1 мин (*a*) и результат сканирования состояния торцевой поверхности образца, полученного методом дисковой резки (*b*). Измерение высоты ступеньки на границе между защищенной и протравленной областями показало, что средние значения глубины травления, рассчитанные по результатам серии профилометрических измерений, составляли 9 ± 1 и 18 ± 2 мкм после 1 и 2 мин обработки соответственно. Полученные значения соответствуют средней скорости удаления материала ~ 9 мкм/мин.

Серия профилометрических измерений торцевых поверхностей показала, что исходное состояние граней существенно зависит от способа разделения единичных сенсоров. Минимальное значение параметра S_a было получено для образцов, сформированных раскалыванием по кристаллографическим плоскостям. До химической обработки среднее значение шероховатости таких граней составляло 2 ± 1 нм (см. таблицу). Для образцов, полученных прецизионной дисковой резкой, исходное среднее значение S_a было на порядок выше и составляло 20 ± 4 нм, что указывает на более выраженное нарушение морфологии боковой поверхности при резке HR-GaAs:Cr пластины. После травления шероховатость торцевых поверхностей увеличивалась для обеих групп образцов:

– для образцов, сформированных раскалыванием, среднее значение S_a возрастало до 60 ± 10 и 260 ± 18 нм после травления в течение 1 и 2 мин соответственно;

– для образцов, сформированных дисковой резкой, среднее значение S_a возрастало до 50 ± 10 и 100 ± 11 нм после травления в течение 1 и 2 мин соответственно.

Таким образом, химическая обработка в сернокислотном травителе состава H_2SO_4:H_2O_2:$H_2O = 3:1:1$ при температуре $85 \pm 5\,^{\circ}C$ и длительности травления 1 и 2 мин сопровождалась увеличением шероховатости и развитием рельефа торцевых поверхностей. Наиболее выраженное увеличение шероховатости наблюдалось для граней, сформированных раскалыванием по кристаллографическим плоскостям, с исходно наименьшим значением $S_a = 2 \pm 1$ нм.

Следует учитывать, что параметр S_a характеризует геометрический рельеф торцевой поверхности и может быть связан прежде всего с поверхностно-краевой составляющей темнового тока. При этом S_a не характеризует концентрацию и пространственное распределение электрически активных дефектов в приповерхностной области. В случае образцов после дисковой резки под нарушенным приповерхностным слоем далее понимается механически поврежденная область, сформированная в процессе разделения. Поэтому результаты профилометрии следует рассматривать совместно с измерениями темнового тока.

3.2. Динамика темнового тока

На рис. 3 приведены зависимости средней плотности темнового тока от времени для единичных сенсоров,

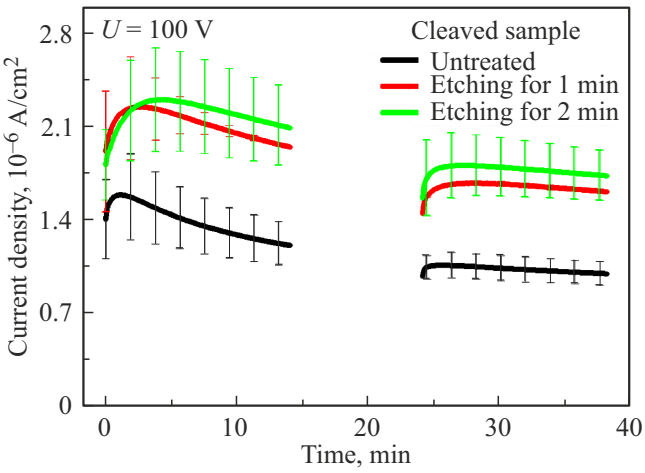

Рис. 3. Динамика плотности темнового тока единичных сенсоров, полученных методом раскалывания (кривые линии — средние значения плотности темнового тока, вертикальные отрезки — стандартное отклонение по образцам соответствующей группы).

Средние значения параметра шероховатости торцевых поверхностей единичных сенсоров до и после травления

Способ разделения	S_a до обработки, нм	S_a после травления 1 мин, нм	S_a после травления 2 мин, нм
Раскалывание	2 ± 1	60 ± 10	260 ± 18
Дисковая резка	20 ± 4	50 ± 10	100 ± 11

полученных методом раскалывания, до травления и после химической обработки. Для всех трех состояний сохраняется близкий характер временно́й зависимости:

– после подачи напряжения наблюдается переходный процесс;

– после выдержки без напряжения повторное включение приводит к зависимости того же типа. К концу второго участка регистрации зависимость $J_{\text{dark}}(t)$ становилась более пологой, что позволяет говорить о приближении к квазистационарному режиму в пределах используемого временно́го окна измерения. Наблюдаемый характер зависимости согласуется с изменением заполнения глубоких уровней и перераспределением пространственного заряда после приложения напряжения [18,19].

Полученный результат указывает на то, что для единичных сенсоров, сформированных методом раскалывания, химическая обработка не приводит к качественному изменению вида временно́й зависимости темнового тока в пределах использованного измерительного цикла. Стоит отметить, что при этом наименьшая плотность темнового тока наблюдалась для образцов без химической обработки. Для количественной оценки влияния травления дополнительно рассчитано среднее значение плотности темнового тока по всем точкам регистрации. По сравнению с исходным состоянием средняя по времени плотность темнового тока образцов, полученных методом раскалывания, после травления в течение 1 и 2 мин увеличилась в 1.55 и 1.64 раза соответственно. Рост тока после травления коррелирует с увеличением параметра S_a. Возможной причиной является изменение состояния боковой поверхности, включая развитие микрорельефа и изменение плотности поверхностных состояний [11,12].

Для образцов единичных сенсоров, полученных дисковой резкой, наблюдалась противоположная тенденция (рис. 4). До химической обработки единичные сенсоры характеризовались более высоким уровнем темнового тока по сравнению с травлеными образцами. Для количественной оценки влияния травления рассчитана средняя по времени плотность темнового тока по всем зарегистрированным точкам двух участков измерения. По сравнению с исходным состоянием средняя по времени плотность темнового тока образцов, полученных дисковой резкой, после травления в течение 1 и 2 мин снизилась в 31 и 43 раза соответственно. Минимальный уровень темнового тока был зарегистрирован после травления в течение 2 мин. Снижение темнового тока

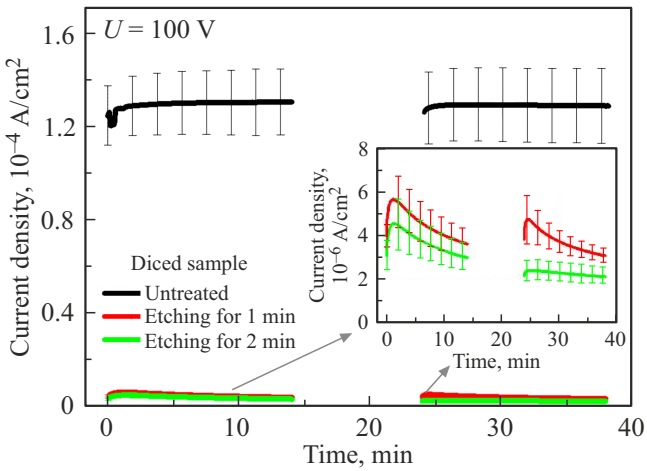

Рис. 4. Динамика плотности темнового тока единичных сенсоров, полученных методом дисковой резки (кривые линии — средние значения плотности темнового тока, вертикальные отрезки — стандартное отклонение по образцам соответствующей группы).

после травления образцов, сформированных дисковой резкой, происходит несмотря на увеличение параметра S_a (см. таблицу). Поскольку S_a характеризует геометрический рельеф торцевой поверхности, отсутствие прямой корреляции между этим параметром и плотностью темнового тока показывает, что наблюдаемое изменение тока не может быть объяснено только изменением шероховатости торца. Полученный результат согласуется со снижением поверхностно-краевой составляющей темнового тока вследствие удаления части механически поврежденного приповерхностного слоя, сформированного при дисковой резке. Такой слой может характеризоваться повышенной концентрацией электрически активных дефектов и локально поврежденных областей, способствующих краевой проводимости.

Сопоставление изменения темнового тока с глубиной травления, определенной на тестовых HR-GaAs:Cr пластинах, показывает, что обработка в режиме, соответствующем удалению ~ 9 мкм материала, сопровождается существенным снижением темнового тока. Увеличение глубины травления до ~ 18 мкм также привело к снижению тока. Это согласуется с предположением о наличии электрически активной поврежденной области у образцов, сформированных дисковой резкой. Однако глубина этой области в данной работе оценивается косвенно (по изменению темнового тока после травления).

Анализ временно́й зависимости плотности темнового тока показал, что для химически необработанных образцов, полученных дисковой резкой, наблюдался монотонный рост $J_{\mathrm{dark}}(t)$, отличающийся от релаксационного поведения травленых единичных сенсоров. Такое различие согласуется с дополнительным нестационарным вкладом поврежденной торцевой области, однако имеющиеся данные не позволяют однозначно отделить его от объемных процессов. После травления зависимости приобретают более выраженный релаксационный характер, согласующийся с известными особенностями дрейфа и захвата носителей в HR-GaAs:Cr сенсорах [15–17]. Это также согласуется со снижением вклада технологически индуцированных краевых токов после удаления нарушенного слоя.

4. Заключение

В работе установлено влияние способа разделения HR-GaAs:Cr сенсоров со сплошными Ni-контактами и последующего химического травления торцевых поверхностей на шероховатость и динамику темнового тока.

После приложения напряжения во всех группах единичных сенсоров наблюдалась релаксация темнового тока (за исключением необработанных единичных сенсоров, полученных дисковой резкой). Наблюдаемая временна́я зависимость может быть обусловлена изменением заполнения глубоких и поверхностных состояний и соответствующим перераспределением внутреннего электрического поля. Для образцов, сформированных методом раскалывания, а также для травленых единичных сенсоров, полученных дисковой резкой, зависимость темнового тока к концу измерительного цикла становилась более пологой, что позволяет говорить о приближении к квазистационарному режиму в пределах использованного временно́го окна. Установлен рост тока во всем интервале регистрации для образцов без химической постобработки, полученных методом дисковой резки, что указывает на дополнительный нестационарный вклад поврежденной торцевой области.

Профилометрические измерения показали, что травление HR-GaAs:Cr материала в сернокислотном травителе приводит к удалению слоя толщиной ~ 9 и 18 мкм за 1 и 2 мин соответственно. Показано, что химическая обработка не сглаживает торцевые поверхности, а приводит к увеличению их шероховатости.

Установлено, что влияние травления на уровень темнового тока существенно зависит от способа разделения единичных сенсоров. Наименьшие значения плотности темнового тока наблюдались для образцов, полученных методом раскалывания, без химической постобработки. Показано, что химическая обработка торцевых граней единичных сенсоров, полученных методом раскалывания, привела к увеличению темнового тока в 1.55 и 1.64 раза после травления в течение 1 и 2 мин соответственно. Это коррелирует с ростом шероховатости торцевых поверхностей и указывает на отсутствие положительного эффекта такой постобработки для исходных граней, сформированных раскалыванием по кристаллографическим плоскостям.

Для образцов, полученных методом прецизионной дисковой резки, наблюдалась противоположная тенденция. Химическая обработка привела к снижению плотности темнового тока в 31 и 43 раза после травления в течение 1 и 2 мин соответственно. Минимальный уровень тока был зарегистрирован после травления образцов, сформированных дисковой резкой, в течение 2 мин. Снижение темнового тока при одновременном увеличении параметра шероховатости показывает, что наблюдаемое изменение тока не может быть объяснено только изменением геометрического рельефа торцевой поверхности. Предполагается, что существенную роль играет электрически активный поврежденный приповерхностный слой, сформированный при дисковой резке. Удаление части такого слоя согласуется со снижением вклада краевой проводимости.

Таким образом, для HR-GaAs:Cr сенсоров со сплошной металлизацией метод раскалывания по кристаллографическим плоскостям позволяет получать образцы с низким темновым током без дополнительной химической обработки торцевых поверхностей. При использовании прецизионной дисковой резки травление является эффективной постобработкой, поскольку уменьшает вклад технологически индуцированных краевых токов. Полученные результаты показывают, что выбор режима обработки торцевых поверхностей должен определяться способом разделения HR-GaAs:Cr сенсоров.

Финансирование работы

Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам технологического отдела Центра исследований и разработок „Перспективные технологии в микроэлектронике“ Томского государственного университета за изготовление образцов сенсоров для проведения исследований.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] A. Owens, A. Peacock. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, **531** (1–2), 18 (2004). DOI: 10.1016/j.nima.2004.05.071

[2] M.C. Veale, S.J. Bell, D.D. Duarte, M.J. French, A. Schneider, P. Seller, M.D. Wilson, A.D. Lozinskaya, V.A. Novikov, O.P. Tolbanov, A.V. Tyazhev, A.N. Zarubin. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A **752**, 6 (2014). DOI: 10.1016/j.nima.2014.03.033

[3] D. Budnitsky, A. Tyazhev, V. Novikov, A. Zarubin, O. Tolbanov, M. Skakunov, E. Hamann, A. Fauler, M. Fiederle, S. Procz, H. Graafsma, S. Ryabkov. J. Instrum., **9**, C07011 (2014). DOI: 10.1088/1748-0221/9/07/C07011
[4] I.D. Chsherbakov, I.I. Kolesnikova, A.D. Lozinskaya, T.A. Mihaylov, V.A. Novikov, A.V. Shemeryankina, O.P. Tolbanov, A.V. Tyazhev, A.N. Zarubin. J. Instrum., **13**, C01030 (2018). DOI: 10.1088/1748-0221/13/01/C01030
[5] P. Smolyanskiy, P. Burian, M. Sitarz, B. Bergmann. Sensors, **23** (15), 6886 (2023). DOI: 10.3390/s23156886
[6] D. Greiffenberg, K.A. Paton, J. Mulvey, A. Bergamaschi, M. Bruckner, P. Busca, M. Del Mar Carulla, R. Dinapoli, S. Ebner, E. Frojdh, V. Gautam, S. Hasanaj, J. Heymes, V. Hinger, T. King, K. Ferjaoui, P. Kozlowski, C. Lopez Cuenca, D. Mezza, K. Moustakas, M. Muller, A. Mozzanica, Ch. Ruder, M. Ruat, B. Schmitt, P. Sieberer, D. Thattil, X. Xie, J. Zhang. J. Instrum., **20**, P01031 (2025). DOI: 10.1088/1748-0221/20/01/P01031
[7] D. Greiffenberg, M. Andra, R. Barten, A. Bergamaschi, M. Brückner, P. Busca, S. Chiriotti, I. Chsherbakov, R. Dinapoli, P. Fajardo, E. Frojdh, S. Hasanaj, P. Kozlowski, C. Lopez-Cuenca, A. Lozinskaya, M. Meyer, D. Mezza, A. Mozzanica, S. Redford, M. Ruat, C. Ruder, B. Schmitt, D. Thattil, G. Tinti, O. Tolbanov, A. Tyazhev, S. Vetter, A. Zarubin, J. Zhang. Sensors, **21** (4), 1550 (2021). DOI: 10.3390/s21041550
[8] K.A. Paton, M.C. Veale, X. Mu, C.S. Allen, D. Maneuski, C. Kubel, V. O Shea, A.I. Kirkland, D. McGrouther. Ultramicroscopy, **227**, 113298 (2021). DOI: 10.1016/j.ultramic.2021.113298
[9] S. Chiriotti, R. Barten, A. Bergamaschi, M. Bruckner, M. Carulla, I. Chsherbakov, R. Dinapoli, E. Fröjdh, D. Greiffenberg, S. Hasanaj, V. Hinger, T. King, P. Kozlowski, C. Lopez-Cuenca, A. Lozinskaya, F. Marone, D. Mezza, K. Moustakas, A. Mozzanica, C. Ruder, B. Schmitt, D. Thattil, O. Tolbanov, A. Tyazhev, A. Zarubin, J. Zhang. J. Instrum., **17**, P04007 (2022). DOI: 10.1088/1748-0221/17/04/P04007
[10] P. Zambon, G.V. Montemurro, S. Fernandez-Perez, R. Schnyder, N. Lehmann, T. Sakhelashvili, S. Burkhalter, M. Meffert, A. Jensen, P. Wursch, P.A. Jud, A. Dudina, S. Kaspar, C. Schulze-Briese. Commun. Eng., **5**, 36 (2026). DOI: 10.1038/s44172-026-00607-6
[11] W.E. Spicer, P.W. Chye, P.R. Skeath, C.Y. Su, I. Lindau. J. Vac. Sci. Technol., **16** (5), 1422 (1979). DOI: 10.1116/1.570215
[12] I.A. Kolesnikova, D.A. Kobtsev, R.A. Redkin, V.I. Voevodin, A.V. Tyazhev, O.P. Tolbanov, Y.S. Sarkisov, S.Y. Sarkisov, V.V. Atuchin. Photonics, **8** (12), 575 (2021). DOI: 10.3390/photonics8120575
[13] M. Christophersen, V. Fadeyev, S. Ely, B.F. Phlips, H.F. Sadrozinski. Solid-State Electron., **81**, 8 (2013). DOI: 10.1016/j.sse.2012.12.006
[14] S. Cai, Y. Ding, M. Ding, Q. Song, Z. Zhang, S. Zhang, K. Zhang, Y. Hou, S. Yue, H. Shi, M. Li, W. Duan, Z. Zhang. Adv. Sci., **13** (7), e15347 (2026). DOI: 10.1002/advs.202515347
[15] Д.Л. Будницкий, В.А. Новиков, О.П. Толбанов, И.А. Прудаев. Изв. вузов. Физика, **51** (5), 84–88 (2008). DOI: 10.1007/s11182-008-9071-9
[16] P. Smolyanskiy, B. Bergmann, T. Billoud, P. Burian, M. Sitarz, C. Sondergaard, S. Pospisil. J. Instrum., **16**, C12023 (2021). DOI: 10.1088/1748-0221/16/12/C12023
[17] М.С. Трофимов, И.Д. Щербаков. Изв. вузов. Физика, **67** (12), 7 (2024).
[18] E. Belas, R. Grill, J. Pipek, P. Praus, J. Bok, A. Musiienko, P. Moravec, O. Tolbanov, A. Tyazhev, A. Zarubin. J. Phys. D: Appl. Phys., **53**, 475102 (2020). DOI: 10.1088/1361-6463/aba570
[19] P. Zambon. AIP Adv., **11**, 075006 (2021). DOI: 10.1063/5.0055782
[20] I.D. Chsherbakov, L.K. Shaimerdenova, A.V. Shemeryankina, M.S. Skakunov, O.P. Tolbanov, A.V. Tyazhev, A.N. Zarubin, M.S. Trofimov. Russ. Phys. J., **66** (6), 626 (2023). DOI: 10.1007/s11182-023-02985-2
[21] I. Barycka, I. Zubel. J. Mater. Sci., **22**, 1299 (1987). DOI: 10.1007/BF01233125

Редактор Г.А. Оганесян

Effect of the Singulation Method and Chemical Etching of Sidewalls on the Dark Current Dynamics of HR-GaAs:Cr X-Ray Sensors

I.D. Chsherbakov, V.V. Chernenko, M.S. Trofimov, A.V. Shemeryankina, T.A. Mikhailov, O.P. Tolbanov, A.V. Tyazhev, A.N. Zarubin, Y.S. Petrova

Tomsk State University,
634050 Tomsk, Russia

Abstract The effect of the singulation method and chemical etching of sidewalls on the dark current dynamics of pad high-resistivity chromium compensated gallium arsenide sensors was investigated. Cleaving along crystallographic planes provided the lowest dark current; subsequent etching for 1 and 2 min increased the surface roughness and raised the current density by factors of 1.55 and 1.64, respectively. In contrast, etching of diced sensors reduced the current density by factors of 31 and 43. The lowest dark current was observed after 2 min of chemical treatment of the sidewalls of diced sensors. By the end of the measurement cycle, the dark current of cleaved samples and diced samples subjected to subsequent etching approached a quasi-steady-state regime. In diced sensors without chemical post-treatment, the dark current continued to increase monotonically.