

Разработка способа травления фотодиодных InAs/InAsSbP-гетероструктур

© А.А. Пивоварова, Н.Д. Ильинская, Е.В. Куницына, Ю.П. Яковлев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: Pivovarova.antonina@iropto.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 4 июля 2023 г.

В окончательной редакции 25 октября 2023 г.

Принята к публикации 4 ноября 2023 г.

Предложен способ травления фотодиодных InAs/InAsSbP-гетероструктур с помощью нового прецизионного травителя HBr:KMnO₄ с низкой постоянной скоростью травления. Изменение соотношения компонентов травителя дает возможность задавать скорость травления в диапазоне 0.1–1.6 мкм/мин без ухудшения качества боковой поверхности мезаструктуры. Применение HBr:KMnO₄ при создании InAs/InAsSbP-фотодиодов позволило снизить обратные темновые токи и уменьшить разброс их величины от прибора к прибору. Образцы с диаметром чувствительной площадки 300 мкм демонстрируют минимальную плотность тока $j = 5.7 \cdot 10^{-2}$ А/см² и типичную — $j = 15.5 \cdot 10^{-2}$ А/см². Максимальное значение R_0 при комнатной температуре составляет 1654 Ом, при этом R_0A — 1.17 Ом · см².

Ключевые слова: травитель, арсенид индия, фотодиод, обратные темновые токи, дифференциальное сопротивление.

DOI: 10.61011/FTP.2023.08.56972.5391

1. Введение

Фотодиоды на основе InAs и его твердых растворов, обладающие спектральной чувствительностью в среднем ИК диапазоне, успешно применяются в качестве оптоэлектронных компонентов в системах газового анализа, в частности в современных системах бесконтактной радиационной термометрии [1], а также в анализаторах CH₄, CO и других газов [2]. Портативность и низкое энергопотребление таких приборов позволяют использовать их в монолитных датчиках затухающих волн для различных жидкостей [3]. Появление гибких тонкопленочных фотодиодов на основе InAs открывает перспективы развития современных портативных систем медицинского мониторинга и биомедицинских тепловизоров нового поколения [4].

При создании фотодиодов на основе узкозонного материала InAs ($E_g = 0.36$ эВ при $T = 300$ К) важной проблемой является разработка постростовой технологии, обеспечивающей минимальный разброс параметров от прибора к прибору. Один из ключевых этапов постростовой технологии — химическое травление полупроводника. Важно, чтобы этот процесс был контролируемым и при необходимости проводился с прецизионной точностью, а также не ухудшал параметры приборов.

Известно, что для материалов на основе InAs наблюдается эффект выявления кристаллографических плоскостей, проявляющийся в той или иной степени для большинства известных травителей. Плоскость {111}А, состоящая из атомов In, наименее активна, так как все валентные электроны образующих ее атомов находятся в связанном состоянии. В свою очередь плоскость {111}В, состоящая из атомов As, каждый из которых имеет по

два неспаренных электрона, обладает более высокой реакционной способностью [5]. Таким образом, при локальном травлении рельеф определяется плоскостями с наименьшей скоростью травления, что сильно влияет на форму получаемой мезаструктуры. Данный эффект наблюдается при травлении в H₃PO₄:H₂O₂:H₂O (1:1:1) [6], а также H₂SO₄:H₂O₂:H₂O (3:1:1) [7].

Для полупроводников на основе InAs широко используется система Br₂–HBr [8], которая позволяет формировать круглые мезаструктуры с зеркальной боковой стенкой. Одним из способов получения такой системы является добавление окислителя в бромистоводородную кислоту HBr. При этом происходит химическая реакция окисления HBr до образования свободного брома Br₂. В результате в травителе присутствуют бромистоводородная кислота, какой-либо окислитель, вода и свободный бром. Количество Br₂ зависит от концентрации и окислительного потенциала вводимого окислителя, в качестве которого может использоваться водный раствор бихромата калия K₂Cr₂O₇ [9], азотная кислота HNO₃ [10], бихромат аммония (NH₄)₂Cr₂O₇ [11] и др. Наиболее распространенным окислителем является перекись водорода H₂O₂. Однако при добавлении такого сильного окислителя скорость травления существенно увеличивается [12], а также экспоненциально зависит от времени. Введение органического растворителя — этилового спирта в травитель HBr:H₂O₂ снижает скорость травления материалов на основе InAs почти в 2 раза, однако ее экспоненциальная зависимость от времени сохраняется, что не позволяет проводить прецизионное травление полупроводника [13].

Для проведения таких технологических операций, как утончение эпитаксиальных слоев, обработка гете-

роструктуры перед напылением контактов, формирование рельефа поверхности с высокой точностью и др. необходим травитель с низкой постоянной скоростью травления.

Известно, что способ обработки поверхности полупроводника влияет на величину темнового тока фотодиодов. В случае низкого теплового шума сопротивления нагрузки и низкого дробового шума, темновой ток обуславливает основную составляющую шумового тока и, соответственно, пороговую чувствительность фотодиода. Для сравнения приборов с различной площадью и полосой пропускания используется такая величина, как удельная пороговая чувствительность Φ^* (удельная эквивалентная мощность шума NEP*): $\Phi^* = \Phi / (A \Delta f) = S_I^{-1} i_n^{1/2} / (A \Delta f)^{1/2}$, где Φ — пороговая чувствительность, S_I — токовая монохроматическая чувствительность, i_n — шумовой ток, A — площадь фоточувствительной области, Δf — полоса частот. Таким образом, для достижения минимального уровня шума необходимо, чтобы фотодиод имел низкий темновой ток.

В свою очередь темновой ток состоит как из объемной, так и поверхностной компонент. С уменьшением площади фоточувствительной области вклад поверхностной компоненты возрастает и при небольших площадях $A \leq 3.0 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$ становится преобладающим. Величина поверхностной компоненты в значительной степени зависит от состояния поверхности полупроводника. Важно отметить, что при создании фотодиодов имеет значение не только сама величина темновых токов, но и ее разброс по пластине от прибора к прибору. В серийном производстве этот разброс будет влиять на воспроизводимость, процент выхода годных и в итоге определять рентабельность.

В случае преобладания тепловых шумов фотодиода удельная пороговая чувствительность Φ^* обратно пропорциональна квадратному корню из произведения дифференциального (динамического) сопротивления фотодиода и площади фоточувствительной области $(R_0 A)^{1/2}$. Для достижения пороговой чувствительности фотоприемных устройств, работающих в среднем ИК диапазоне, дифференциальное сопротивление фотодиода на основе InAs и его твердых растворов должно составлять $\geq 50 \text{ Ом}$ [14]. В настоящее время созданы фотодиоды с активной областью InAs и длиной волны максимальной чувствительности 3.3–3.4 мкм, R_0 которых при комнатной температуре достигает 1600 Ом для $A = 3.46 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$ [15]. Для получения максимально возможных величин параметра $R_0 A$, увеличение площади A не всегда оправдано, поскольку приводит к снижению быстродействия прибора. В связи с этим усилия разработчиков в первую очередь направлены на повышение значений R_0 , которое обратно пропорционально величине темнового тока при нулевом смещении и на практике определяется как $R_0 = (dI/dU)^{-1}$ при $U = \pm 10 \text{ мВ}$.

Нами был предложен прецизионный травитель на основе системы $\text{HBr}:\text{KMnO}_4:\text{H}_2\text{O}$, в котором используется водный раствор перманганата калия, являющийся более слабым окислителем [16]. В данной работе проведено детальное исследование разработанного травителя. Изучено его влияние на величину темновых токов InAs/InAsSbP-фотодиодов и разброс этой величины от прибора к прибору, а также на дифференциальное сопротивление.

2. Образцы и методы исследования

Работа проводилась в два этапа. На первом этапе было проведено исследование зависимости скорости травления n -InAs(100) от соотношения компонентов раствора и от температуры в предложенной системе $\text{HBr}:\text{KMnO}_4:\text{H}_2\text{O}$.

Приготовление травителя проводили путем смешивания различных объемных долей водного раствора KMnO_4 и концентрированной HBr . Методика эксперимента заключалась в травлении топологического рисунка полупроводника через маску фоторезиста с последующим измерением глубины вытравленного рельефа на профилометре DektakXT. Качество поверхности оценивалось с помощью оптического и растрового электронного микроскопов. Для получения температурных зависимостей скорости травления n -InAs(100) каждый компонент травителя нагревался до требуемой температуры, после чего компоненты смешивались, и в травитель опускался образец с маской фоторезиста. Для понижения температуры компонентов травителя ниже комнатной использовался лед и смесь диоксана со льдом (температура плавления диоксана 12°C).

На втором этапе работы были изготовлены фотодиоды на основе гетероструктур InAs/InAsSbP с использованием нового травителя $\text{HBr}:\text{KMnO}_4$ и проведено исследование их характеристик.

Фотодиодные гетероструктуры n -InAs/ p -InAs_{0.55}Sb_{0.15}P_{0.3} выращивались методом МОГФЭ на подложке n -InAs(100). Осаждение проводилось в горизонтальном реакторе с резистивным типом нагрева при атмосферном давлении. При выращивании твердых растворов использовались металлоорганические соединения (триметилиндий TMIIn, триметилстибин TMSb) и гидридные газы (арсин AsH₃, фосфин PH₃). Соотношение между компонентами V и III группами задавалось потоком арсина в реакторе, активная область InAs не легировалась. В качестве источника легирующей акцепторной примеси для InAsSbP применялся диэтилцинк (DEZn). Толщина полученных слоев составляла 3 мкм для n -InAs и 1.9 мкм для p -InAs_{0.55}Sb_{0.15}P_{0.3}. Концентрация в InAs — $n \sim (3 \cdot 5) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$; в InAsSbP — $p \sim (1 \cdot 2) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

Фотодиоды изготавливались с помощью методов стандартной фотолитографии. Диаметр фоточувствительной площадки составлял 300 мкм. Омический контакт к

широкозонному слою InAsSbP формировался методом высоковакуумного термического послойного напыления системы Cr–Au–Ni–Au с последующим утолщением путем локального электрохимического осаждения золота до 2 мкм. Со стороны подложки после утончения последней проводилось напыление сплошного контакта методом высоковакуумного термического напыления системы Cr–Au–Ni–Au с последующим напылением системы Cr–Au до суммарной толщины ~ 0.6 мкм. Мезаструктуры травились на глубину ~ 7 мкм. Для удобства дальнейшего разделения пластины на чипы также проводилось жидкостное травление разделительной сетки.

Измерения спектров fotocувствительности исследуемых образцов фотодиодов проводились по схеме синхронного детектирования с использованием призменного монохроматора SPM2 (Carl Zeiss), механического модулятора и синхронного детектора Stanford Research SR830. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) фотодиодов исследовались с помощью автоматизированного измерителя ВАХ. Графики выводились в режиме реального времени на монитор компьютера. Дифференциальное сопротивление R_0 , определялось по наклону линейного участка ВАХ без освещения фотодиода в диапазоне ± 10 мВ. На практике данный метод также применяется для определения типичного шунтирующего сопротивления R_{sh} фотодиодов [17].

Для исследования влияния предложенного травителя HBr:KMnO₄ на величину обратных темновых токов фотодиодов были изготовлены приборы на одной и той же гетероструктуре *n*-InAs/*p*-InAsSbP. На стадии травления пластина была разделена на две части, одна из которых подвергалась обработке в стандартном травителе HBr:H₂O₂, а другая — в разработанном травителе HBr:KMnO₄. Проводилось сравнительное исследование вольт-амперных характеристик фотодиодов, изготовленных с помощью стандартного и разработанного травителей.

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

Полученные зависимости скорости травления подложек *n*-InAs(100) от соотношения компонентов (в объемных долях) травящего раствора в системе HBr:KMnO₄:H₂O представлены на рис. 1.

Как видно из рис. 1, с увеличением объемной доли водного раствора перманганата калия для каждой из приведенных концентраций скорость травления растет, и до достижения максимального значения (точка экстремума на графике) наблюдается зеркально-гладкая поверхность травления. При дальнейшем увеличении объемной доли водного раствора KMnO₄ скорость травления снижается и качество получаемой поверхности ухудшается, а после достижения некоторого критического соотношения происходит выпадение нерастворимого

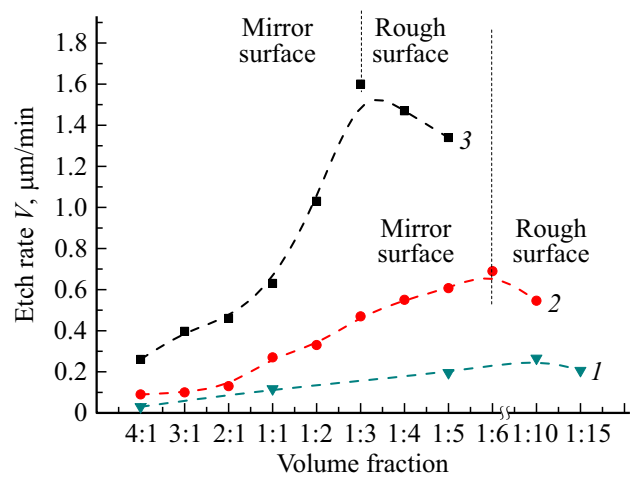


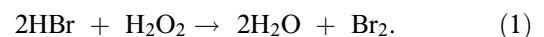
Рис. 1. Зависимости скорости травления V для *n*-InAs(100) в травителе HBr:KMnO₄ от объемной доли водного раствора перманганата калия при его различных концентрациях, %: 1 — 0.7, 2 — 1.5, 3 — 3.

осадка продуктов восстановления марганца. Уменьшение концентрации водного раствора окислителя приводит к уменьшению скорости травления. При использовании 0.7% водного раствора перманганата калия зеркальная поверхность наблюдалась во всем исследуемом диапазоне. Показано, что в зависимости от концентрации водного раствора KMnO₄ (от 0.7 до 3%) и его объемной доли в растворе можно получать различные скорости травления — от ~ 0.1 до ~ 1.6 мкм/мин.

Травление четверного твердого раствора *p*-InAsSbP на основе InAs имело схожий характер, что позволило в дальнейшем также получить зеркальную боковую поверхность InAs/InAsSbP-мезаструктуры.

Проведено сравнение зависимостей скорости травления от времени $V(t)$ для различных травителей. На рис. 2 представлены зависимости для широко используемого травителя HBr:H₂O₂, (кривая 4), травителя HBr:H₂O₂ с добавлением этиленгликоля (кривая 3) и разработанного нами травителя HBr:KMnO₄ с использованием 1.5% водного раствора KMnO₄ (кривые 1 и 2). Показано, что разработанный травитель позволяет на порядок снизить скорость травления, при этом его существенным преимуществом является постоянная скорость травления, наблюдаемая при ряде соотношений компонентов раствора.

Анализ химических реакций, протекающих при приготовлении травителей показал, что при смешивании компонентов HBr:H₂O₂ происходит реакция взаимодействия, сопровождающаяся сильным разогревом раствора и активным выделением свободного брома. Химическая реакция протекает следующим образом:



Как видно из реакции (1), при соединении компонентов травителя происходит окисление части HBr

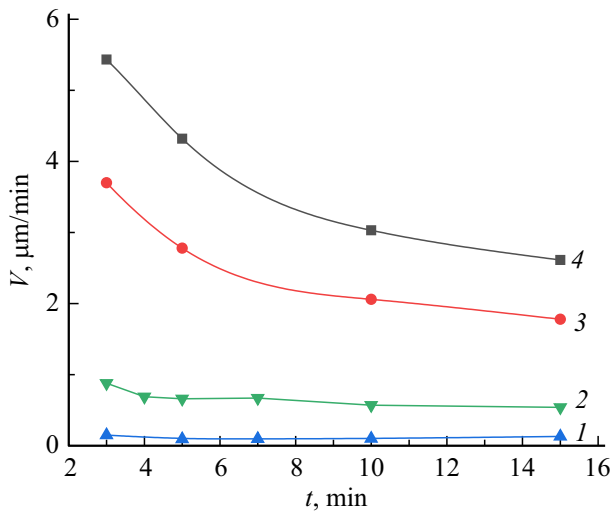
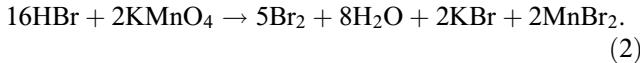


Рис. 2. Зависимость скорости травления V для n -InAs(100) от времени t для различных травителей: 1 — HBr:KMnO₄ (1.5%) 4:1, 2 — HBr:KMnO₄ (1.5%) 1:6, 3 — HBr:H₂O₂ 8:1, 4 — HBr:H₂O₂:C₂H₅OH 24:3:10.

пероксидом водорода до воды и молекул свободного брома. При использовании в качестве окислителя водного раствора перманганата калия химическая реакция имеет следующий вид:



После смешивания компонентов их взаимодействие не приводит к значительному разогреву раствора, а в реакции (2), помимо воды и свободного брома, дополнительно образуются бромид калия и двухвалентный бромид марганца.

Мы полагаем, что линейная зависимость скорости травления от времени в разработанном травителе с преобладающим количеством HBr обусловлена установлением химического равновесия и поддержанием постоянной концентрации окислителя Br₂ в растворе.

Была определена энергия активации процесса травления n -InAs(100), по величине которой возможно судить о механизме протекания данного химического процесса. Для этого были получены температурные зависимости скорости травления в диапазоне от 3 до 50°C для двух составов с максимальной и минимальной скоростями травления.

Энергия активации химического процесса E_a , отнесенная к одному молю реагирующих частиц, определялась из полученных температурных зависимостей графическим методом по формуле Аррениуса [18]:

$$\ln k = \ln k_0 - \frac{E_a}{RT}, \quad (3)$$

где k — константа скорости химической реакции, k_0 — частотный фактор, характеризующий частоту активных столкновений реагирующих частиц в едини-

це объема, R — универсальная газовая постоянная ($8.314 \cdot 10^{-3}$ кДж/моль · К), T — температура (К).

Для травителя HBr:KMnO₄ 1:3 с использованием 3% водного раствора окислителя E_a составила 12.2 кДж/моль, а для состава 4:1 — 7.4 кДж/моль. Известно, что для диффузионного ограничения, при котором травитель является полирующим, характерна энергия активации ~ 8 –20 кДж/моль, а для кинетического ограничения, когда скорость травления различна для различных плоскостей, значение E_a составляет более 35–40 кДж/моль [19]. Как видно, для исследованных составов характерен диффузионный механизм травления, при котором поверхность InAs получается зеркальной.

Травитель, используемый при изготовлении фотодиодов с заданными размером и формой фоточувствительной площадки, может значительно влиять на величину обратного темнового тока, а именно его поверхностную компоненту, которая обусловлена в различной степени различными механизмами: генерацией и рекомбинацией через поверхностные состояния либо в приповерхностной обедненной области, туннелированием через поверхностные состояния, омическим шунтированием p – n -перехода на поверхности и др.

По результатам проведенных исследований, для создания фотодиодов на основе гетероструктур InAs/InAsSbP был выбран 1.5% водный раствор KMnO₄, позволяющий получать зеркальную поверхность полупроводника для составов от 4:1 до 1:6. При этом скорость травления составляла 0.1–0.7 мкм/мин в зависимости от состава травителя.

Изучение спектральных характеристик изготовленных InAs/InAsSbP-фотодиодов показало, что все образцы обладают спектральной чувствительностью в диапазоне 1.0–3.8 мкм.

Проведено исследование вольт-амперных характеристик (ВАХ) полученных приборов и показано влияние предложенного травителя на величину обратных темновых токов. На рис. 3. приведены типичные обратные ветви ВАХ InAs/InAsSbP-фотодиодов, изготовленных с помощью стандартного травителя HBr:H₂O₂ и разработанного травителя HBr:KMnO₄.

В таблице приведены значения параметров, полученных нами при анализе вольт-амперных характеристик InAs/InAsSbP-фотодиодов для каждого из травителей HBr:H₂O₂ и HBr:KMnO₄.

Параметры InAs/InAsSbP-фотодиодов

Параметр	Травитель	
	HBr:H ₂ O ₂	HBr:KMnO ₄
I_{\min} , мкА ($U_{\text{rev}} = 0.5$ В)	80	40
I_{\max} , мкА ($U_{\text{rev}} = 0.5$ В)	920	570
$I_{\text{тип}}$, мкА ($U_{\text{rev}} = 0.5$ В)	157	107
$R_{0\min}$, Ом	457	617
$R_{0\max}$, Ом	1422	1654
$R_{0\text{тип}}$, Ом	993	1287

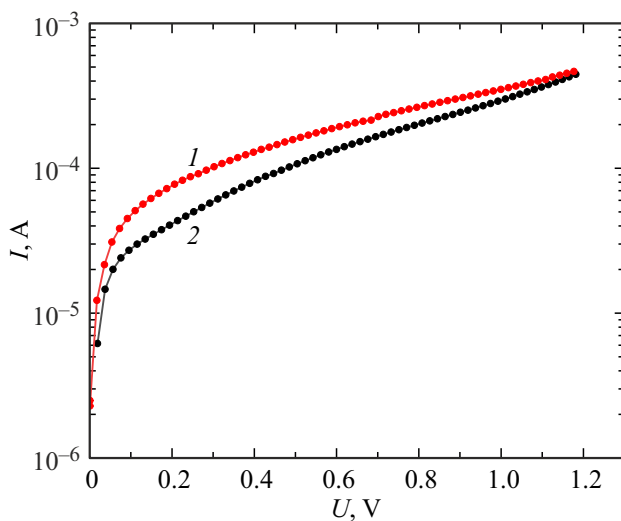


Рис. 3. Обратные ветви вольт-амперных характеристик InAs/InAsSbP-фотодиодов, изготовленных с помощью травителей: 1 — HBr:H₂O₂, 2 — HBr:KMnO₄.

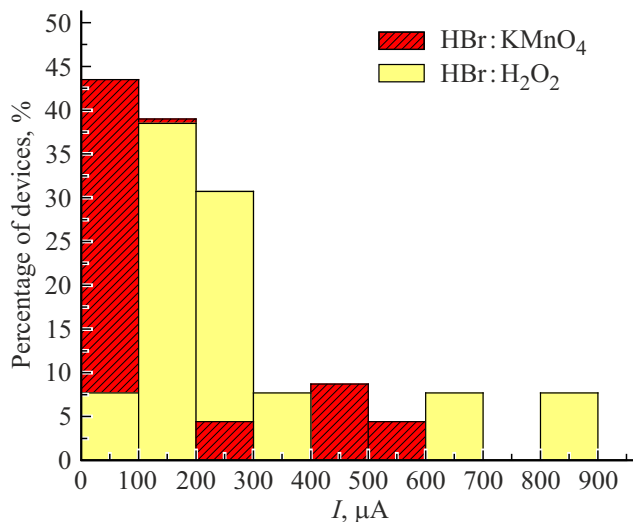


Рис. 4. Количественное распределение (%) InAs/InAsSbP-фотодиодов по величине обратных темновых токов при $U_{rev} = 0.5$ В для различных травителей: HBr:KMnO₄ — штриховка, HBr:H₂O₂ — без штриховки.

Как видно из таблицы, минимальное значение обратного темнового тока при напряжении обратного смещения $U_{rev} = 0.5$ В для исследованных образцов InAs/InAsSbP-фотодиодов составляет $I_{min} = 80$ мкА в случае травителя HBr:H₂O₂ и $I_{min} = 40$ мкА для HBr:KMnO₄. Типичные значения при $U_{rev} = 0.5$ В — $I_{typ} = 157$ мкА и $I_{typ} = 107$ мкА для стандартного и предложенного травителей соответственно.

В настоящее время современные InAs-фотодиоды диаметром 1 мм демонстрируют типичный обратный темновой ток ~ 800 мкА при $U_{rev} = 0.5$ В и $T = 25^\circ\text{C}$ [20], что соответствует плотности тока

$j = 10.2 \cdot 10^{-2}$ А/см². Представленные в работе фотодиоды диаметром 300 мкм, изготовленные с помощью HBr:KMnO₄, имеют минимальную плотность темнового тока $j = 5.7 \cdot 10^{-2}$ А/см² и типичную — $j = 15.5 \cdot 10^{-2}$ А/см².

Максимальное значение R_0 для таких образцов составляет 1654 Ом при диаметре чувствительной площадки 300 мкм, тогда фактор R_0A — 1.17 Ом · см² при комнатной температуре. Типичные значения R_0 и (R_0A) увеличиваются на 23% по сравнению с R_0 и (R_0A) фотодиодов, полученных при использовании стандартного травителя HBr:H₂O₂.

Результаты исследования разброса величины обратного темнового тока от фотодиода к фотодиоду приведены на гистограмме (рис. 4). Распределение образцов по величине обратных темновых токов продемонстрировано при обратном напряжении $U_{rev} = 0.5$ В.

Как видно из рис. 4, при использовании разработанного травителя HBr:KMnO₄ величину обратного тока $I_{rev} \leq 100$ мкА имеют 43.5% фотодиодов, тогда как в случае стандартного травителя HBr:H₂O₂ $I_{rev} \leq 100$ мкА — 7.7% приборов. При этом $I_{rev} \geq 200$ мкА демонстрируют 17.5% приборов при применении разработанного травителя и 53.8% — стандартного. Следует отметить, что токи величиной > 600 мкА наблюдаются только для фотодиодов (15%), созданных с помощью травителя HBr:H₂O₂.

Таким образом, фотодиоды, изготовленные при использовании HBr:KMnO₄, имеют меньший разброс значений темнового тока от прибора к прибору и, следовательно, большую воспроизводимость получаемых результатов.

4. Заключение

Предложен и исследован новый прецизионный травитель HBr:KMnO₄ для фотодиодных InAs/InAsSbP-гетероструктур. Изучено влияние соотношения его компонентов, концентрации водного раствора перманганата калия на скорость травления материалов на основе InAs и качество получаемой поверхности. Показано, что в зависимости от концентрации водного раствора KMnO₄ и его объемной доли в растворе можно получать скорости травления от 0.1 до 1.6 мкм/мин. Низкая и постоянная во времени скорость травления в предложенном травителе дает возможность решать технологические задачи, требующие прецизионного контролируемого травления полупроводниковых материалов.

При сравнении вольт-амперных характеристик InAs/InAsSbP-фотодиодов, было показано, что разработанный травитель HBr:KMnO₄ позволяет снизить темновые токи и уменьшить разброс их величины от прибора к прибору. Так, при применении разработанного травителя $I_{rev} \geq 200$ мкА демонстрируют 17.5% приборов, а стандартного — 53.8%. Созданные фотодиоды имеют минимальную

плотность тока $j = 5.7 \cdot 10^{-2} \text{ A/cm}^2$ и типичную — $j = 15.5 \cdot 10^{-2} \text{ A/cm}^2$.

Показано, что применение HBr:KMnO₄ позволяет увеличить значения R_0 и, соответственно, R_0A на 23%. Значение R_0A для лучших образцов составляет $1.17 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$.

Благодарности

Авторы выражают благодарность А.П. Ложкину за измерения вольт-амперных характеристик фотодиодов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Г.Ю. Сотникова, С.А. Александров, Г.А. Гаврилов. Успехи прикл. физики, **10** (4), 389 (2022). DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-4-389-403
- [2] <https://vigophotonics.com/product/pva-3-d1-2-smd-pal2o3-115/#specification>
- [3] S.A. Karandashev, T.S. Lukhmyrina, B.A. Matveev, M.A. Remennyi, A.A. Usikova, Phys. Status Solidi A: Appl. Mater., **219** (2), ArtNo: 2100456 (2022). DOI: 10.1002/pssa.202100456.
- [4] S. Woo, G. Ryu, S.S. Kang, T.S. Kim, N. Hong, J.-H. Han, R.J. Chu, I.-H. Lee, D. Jung, W.J. Choi. ACS Appl. Mater. Interfaces, 2021, **13** (46), 55648 (2021). DOI: 10.1021/acsami.1c14687.
- [5] *Физико-химические методы обработки поверхности полупроводников*, под ред. Б.Д. Луфт (М., Радио и связь, 1982) с. 37.
- [6] A.R.J. Marshall, C.H. Tan, J.P.R. David, J.S. Ng, M. Hopkinson. In: *Fabrication of InAs photodiodes with reduced surface leakage current*, ed. by J.G. Grote, F. Kajzar, M. Lindgren (Proc. SPIE, **6740**, 67400H, 2007). DOI: 10.1117/12.740700.
- [7] D. Pasquariello, E.S. Björln, D. Lasaosa, Y.-J. Chiu, J. Piprek, J.E. Bowers. J. Lightwave Techn., **24** (3), 1470 (2006).
- [8] Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, А.А. Усикова, Н.Д. Ильинская. *Способ изготовления диодов средневолнового ИК диапазона спектра*. Пат. № 2599905, Российская Федерация, приоритет изобретения 11 мая 2012 г.
- [9] А.В. Малевская, Н.Д. Ильинская, В.М. Андреев. Письма ЖТФ, **45** (24), 14 (2019). DOI: 10.21883/PJTF.2019.24.48795.17953 [A.V. Malevskaya, N.D. Il'inskaya, V.M. Andreev. Tech. Phys. Lett., **45**, 1230 (2019). DOI: 10.1134/S1063785019120241]
- [10] A.S. Kurochkin, A.V. Babichev, D.V. Denisov, L.Ya. Karachinsky, I.I. Novikov, A.N. Sofronov, D.A. Firsov, L.E. Vorobjev, A. Bousseksou, A.Yu. Egorov. J. Phys.: Conf. Ser., **993**, 012031 (2018). DOI: 10.1088/1742-6596/993/1/012031
- [11] I. Levchenko, V. Tomashyk, G. Malanych, I. Stratiychuk, A. Korchovi. Appl. Nanoscience, **12**, 1139 (2022). DOI: 10.1007/s13204-021-01784-w
- [12] J. Na, S. Lee, S. Lim. Surf. Sci., **658**, 22 (2017). DOI: 10.1016/j.susc.2017.01.002
- [13] А.А. Пивоварова, О.Ю. Серебrenникова, Н.Д. Ильинская. *Неделя науки СПбПУ: Матер. научной конференции с международным участием* (СПб., Россия, 2014) с. 246.
- [14] Г.А. Гаврилов, Б.А. Матвеев, Г.Ю. Сотникова. Письма ЖТФ, **37** (18), 50 (2011). [G.A. Gavrillov, B.A. Matveev, G.Y. Sotnikova. Phys. Lett., **37** (9), 866 (2011). DOI: 10.1134/S1063785011090197]
- [15] N. Dyakonova, S.A. Karandashev, M.E. Levinshtein, B.A. Matveev, M.A. Remennyi, A.A. Usikova. Infr. Phys. Technol., **117**, 103867 (2021). DOI: 10.1016/j.infrared.2021.103867
- [16] Н.Д. Ильинская, А.А. Пивоварова, Е.В. Куницына, Ю.П. Яковлев. *Способ изготовления фотоэлектрических преобразователей на основе многослойной структуры*. Пат. № 2783353, Российская Федерация, приоритет изобретения 10 марта 2022 г.
- [17] https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/si_pd_kspd9001e.pdf, p. 4.
- [18] К. Хаускрофт, Э. Констебл. *Современный курс общей химии*. Т. 1. Пер. с англ. под ред. Я.А. Ребане и др. (М., Мир, 2002) с. 513. [C.E. Housecroft, E.C. Constable. *Chemistry: An Integrated Approach* (Addison Wesley Longman Ltd., London, 1997)].
- [19] *Металлургия благородных металлов*, под ред. Л.В. Чугаева (М., Металлургия, 1987) с. 80.
- [20] https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/p10090-01_etc_kird1099e.pdf, p. 3.

Редактор А.Н. Смирнов

Development of a method foretching the InAs/InAsSbP photodiode heterostructures

A.A. Pivovarova, N.D. Il'inskaya, E.V. Kunitsyna, Yu.P. Yakovlev

loffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract A method for etching the InAs/InAsSbP photodiode heterostructures using a new precision etchant HBr:KMnO₄ with a low constant etching rate was proposed. The change in the ratio of the etchant components makes it possible to set the etching rate in the range of 0.1–1.6 μm/min without deterioration of the quality of the side semiconductor surface. The use of the new etchant resulted in reducing the reverse dark currents of the InAs/InAsSbP photodiodes as well as the spread of dark current value from the device to the device. Samples with a sensitive area diameter of 300 μm demonstrate the minimum current density $j = 5.7 \cdot 10^{-2} \text{ A/cm}^2$ and the typical current density $j = 15.5 \cdot 10^{-2} \text{ A/cm}^2$. The maximum value of R_0 at room temperature is 1654 Ohm, while the R_0A product reaches $1.17 \text{ Ohm} \cdot \text{cm}^2$.