

## Архитектура мезы и эффективность InGaP/Ga(In)As/Ge солнечных элементов

© В.С. Калиновский, Е.В. Контрош,<sup>†</sup> Е.А. Гребенщикова, В.М. Андреев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия  
<sup>†</sup> e-mail: kontrosh@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 13 ноября 2020 г.

В окончательной редакции 26 января 2021 г.

Принято к публикации 3 февраля 2021 г.

Показано, что архитектура мезы и достигнутое качество боковых поверхностей мезаструктуры концентраторных многопереходных солнечных элементов обеспечивает повышение их эффективности до 36.7% при кратности концентрации до  $100 \times$  (AM0; 0.136 W/cm<sup>2</sup>). Создание архитектуры мезаструктур с последующим разделением эпитаксиальных пластин монолитных InGaP/Ga(In)As/Ge-наногетероструктур на чипы проводилось методом одноэтапного химического травления в растворе HBr:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:H<sub>2</sub>O (8:1:100), через маску из фоторезиста на глубину 12–18 μm. Определены условия одноэтапного травления, обеспечивающие формирование гладкой и ровной боковой поверхности мезы InGaP/Ga(In)As/Ge-наногетероструктуры, содержащей различные по составу и толщине слои. Определение энергии активации показало, что травление протекает в диффузионной области гетерогенного процесса. При повышении температуры травителя с 2 до 36 °C наблюдается изменение угла наклона в области Ge-подложки с 4.5 до 25°, что позволяет оптимизировать количество концентраторных солнечных элементов и их качество при финальном механическом разделении эпитаксиальной пластины на чипы.

**Ключевые слова:** многопереходные солнечные элементы, InGaP/Ga(In)As/Ge-структуры, эффективность, химическое травление A<sup>III</sup>B<sup>V</sup>, Ge-подложка.

DOI: 10.21883/JTF.2021.07.50946.312-20

### Введение

Многопереходные солнечные элементы (МП СЭ) на основе наногетероструктур полупроводниковых соединений A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> обладают высокой эффективностью (КПД) прямого преобразования энергии солнечного излучения в электрическую энергию [1]. В настоящее время активно ведутся работы по исследованию характеристик и созданию монолитных многопереходных фотопреобразователей мощного монохроматического излучения [2–4].

Для повышения эффективности и радиационной стойкости трехпереходных СЭ InGaP/Ga(In)As/Ge в средний Ga(In)As субэлемент может быть встроен отражатель Брегга (ОБ), что существенно усложняет всю гетероструктуру монолитного МП СЭ.

Многопереходные монолитные СЭ содержат более 25 эпитаксиальных слоев твердых растворов на основе соединений A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> с разной шириной запрещенной зоны и толщинами от единиц nm до нескольких μm. При падающем солнечном излучении кратностью менее  $10 \times$  (AM0), латеральные токи утечки (ЛТУ) оказывают существенное влияние на эффективность преобразования энергии [5]. Этот фактор становится особен-

но существенным при увеличении числа фотоактивных *p–n*-переходов в МП СЭ, так как пропорционально числу каскадов снижается плотность генерируемого фототока и доминирующими механизмами токопрохождения в структуре становятся туннельно-ловушечный (избыточный) и рекомбинационный (Sah-Noyce-Shockley) [5]. Наряду с малой суммарной толщиной фотоактивных областей СЭ, толщина подложки, например Ge, может быть уменьшена до величин менее 50 μm в зависимости от линейных размеров чипов СЭ. Вследствие этого состояния боковых поверхностей *p–n*-переходов и соединительных слоев фотоактивной части структуры оказывают все более заметное влияние на фотоэлектрические характеристики СЭ.

Снижения влияния ЛТУ на рабочие характеристики СЭ и фотопреобразователей можно достичь на этапе постростовой технологии, после завершения формирования фронтальной стороны структуры и создания омических контактов. Путем создания такой архитектуры мезы наногетероструктурного МП СЭ, которая обеспечивает снижение негативного влияния туннельно-ловушечного (избыточного) и рекомбинационного механизмов токопрохождения с последующим бездефектным разделением структуры на отдельные чипы.

Технология разделения структур прошла исторический путь, начиная с механической резки с помощью набора пил с алмазными лезвиями для разрезания кремниевых подложек, дополнившись позже лазерной резкой. Затем подход механической резки столкнулся с запросами новых технологий появившихся полупроводниковых устройств, с более строгим контролем качества и увеличением потока [6]. При разделении структур должны решаться определенные задачи, характер которых связан с видом структур. Поэтому в настоящее время применяются различные методы разделения многослойных структур на чипы, среди которых наибольшее распространение получили реактивное ионное травление в плазме (сухое травление), а также жидкостное химическое травление (ЖХТ). Применение плазменных технологий позволяет получить четкие стенки мез, качество поверхности которых влияет на электрические параметры фотодетекторов [7]. Метод ЖХТ обладает определенными преимуществами: не приводит к кристаллографическим повреждениям поверхности полупроводниковых материалов, сопутствующим методу реактивного ионного травления в плазме или возникновению радиационных дефектов, как при ионно-лучевом травлении гетероструктур  $A^{III}B^V$ , приводящим например к гашению люминесценции [8]. Метод ЖХТ позволяет, как селективно воздействовать на слои многослойных структур, так и осуществлять изотропное травление. Кроме того, при ЖХТ возможно варьирование скоростей травления в широких пределах за счет изменения концентрации реагентов травителя, температуры травления, скорости перемешивания раствора и т.д. [9,10]. Также к преимуществам метода ЖХТ можно отнести использование менее дорогостоящего и энергопотребляющего оборудования по сравнению с другими методами травления.

Решающим моментом при разделении многослойных фоточувствительных структур является получение ровных гладких боковых поверхностей мезы в области фотоактивной части структуры. Определенный наклон боковых поверхностей мезы в области подложки обеспечивает не только высокое качество нанесения диэлектрического покрытия, но и позволит снизить механические напряжения, которые могут возникнуть при последующем механическом разделении эпитаксиальной InGaP/Ga(In)As/Ge-пластины на чипы СЭ [11].

Возможность управления углом наклона боковой поверхности мезы и инородной подложки может также найти применение при оптимизации оптоэлектронных интегральных схем на основе планарных монокристаллических фотоприемников и мощных вертикально интегрированных лазеров для волоконно-оптических систем связи и радиофотоники при разработке Ge-на-Si фотодетекторов, фокальных матриц и оптоэлектронных микросхем [12]. В частности, компактные по дизайну планарные структуры упрощают проблему межэлементного соединения для высокоскоростных и высокочастотных применений, так как такая технология снижает паразитное влияние пассивных элементов соединения [13].

Настоящая работа продолжает исследования, направленные на улучшение параметров МП СЭ на германиевой подложке. В [9] сообщалась постростовая технология создания мезоструктур трехпереходных InGaP/Ga(In)As/Ge СЭ. В настоящей работе определены условия одноэтапного травления, обеспечивающие формирование гладкой и ровной боковой поверхности мезы InGaP/Ga(In)As/Ge-наногетероструктуры, содержащей различные по составу и толщинам слои, рассмотрена возможность управления формой мезоструктуры в процессе одноэтапного разделения монокристаллической InGaP/Ga(In)As/Ge-структуры методом ЖХТ в травителе состава  $HBr:H_2O_2:H_2O$  (8:1:100).

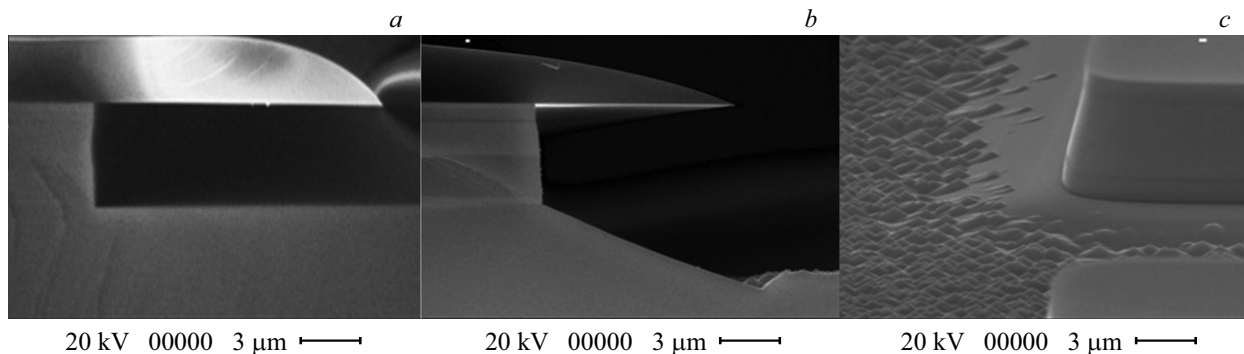
## 1. Методика эксперимента

Для экспериментов по разделительному травлению использовались монокристаллические наногетероструктуры InGaP/Ga(In)As/Ge, выращенные методом газовой эпитаксии из металлоорганических соединений (МОГФЭ) на *p*-Ge (100)-подложке с концентрацией акцепторов  $N_A \approx 2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , толщиной  $150 \mu\text{m}$ . Использование структуры аналогичны представленным в работе [1]. Часть исследованных структур содержала отражатель ОБ на основе AlAs–GaAs-сверхрешетки. Суммарная толщина фотоактивной части структуры составляла около  $6 \mu\text{m}$ .

После стандартной процедуры очистки на фронтальной поверхности структуры была фотолитографически сформирована маска из фоторезиста с рисунком в виде квадратов со стороной  $475 \mu\text{m}$ , разделенных полосами шириной  $25 \mu\text{m}$ . Для исследований по травлению из каждой структуры методом скальвания были изготовлены образцы площадью около  $1 \text{ cm}^2$ . Перед проведением травления подложка и торцы структуры были защищены слоем фоторезиста. Образцы размещались на подставках из тефлона и погружались в раствор травителя объемом  $\approx 80 \text{ ml}$  состава  $HBr:H_2O_2:H_2O$  в объемном соотношении 8:1:100. Травление проводилось в течение  $90 \text{ min}$  в термостатируемых емкостях без перемешивания раствора.

Для образцов с каждой из пластин (с ОБ и без ОБ) травление проводилось при шести значениях температур в интервале ( $\approx 2-36^\circ\text{C}$ ) с шагом  $4^\circ\text{C}$ . Таким образом, эксперименты по травлению были проведены для 12 температур. После травления профили боковой поверхности мез изучались с помощью оптического и электронного микроскопов, для каждого образца рассчитывалась масса удаленного вещества, приведенная к площади образца. При расчетах использовали значение плотности Ge-подложки  $\rho = 5.32 \text{ g/cm}^3$  и среднее значение плотности всех слоев структуры  $\rho_{cp} = 5.18 \text{ g/cm}^3$  на основании данных, приведенных в [14].

Для изучения фотоэлектрических характеристик проводилась подготовка образцов, согласно методике, описанной в [9].



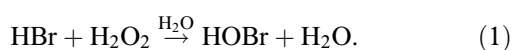
**Рис. 1.** СЭМ изображение боковой поверхности мезы InGaP/Ga(In)As/Ge-структур с ОБ (*a, b*) и без отражателя (*c*) после одностадийного травления: *a* — в травителе состава HBr:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (8:1), *t* = 2 min; *b, c* — в травителе состава HBr:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:H<sub>2</sub>O (8:1:100), *t* = 90 min.

## 2. Результаты эксперимента

### 2.1. Травление InGaP/Ga(In)As/Ge-структур

Исходный травитель состава HBr–H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, принадлежащий к группе неселективных травителей, хорошо зарекомендовал себя при жидкостном химическом травлении многослойных структур на основе твердых растворов A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> [15–17]. Но с его помощью нам не удалось достичь травления германиевой подложки при финальном разделительном травлении всей структуры. Он проявил свойства селективного травителя, стоп слоем которого служила Ge-подложка (рис. 1, *a*).

Травления германиевой подложки удалось достичь разбавлением водой исходных реагентов. Возможность одноэтапного травления всех слоев и подложки, по-видимому, обусловлена появлением в растворе сильного окислителя — бромноватистой кислоты HNOBr, которая известна только в разбавленных растворах и представляет собой неустойчивое соединение (1) [18]:



Помимо окислительного распада, для HNOBr характерна реакция по схеме (2):



ведущая к образованию бромноватой (HNO<sub>3</sub>) кислоты, которая с германием образует растворимый в воде оксид GeO<sub>2</sub>. Эти процессы являются причиной изменения характера травления.

В результате мы разработали и применили новую технологию разделения гетероструктуры на чипы, основанную на одноэтапном травлении структуры в растворе HBr:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:H<sub>2</sub>O (8:1:100), который для InGaP/Ga(In)As/Ge-структуры и Ge-подложки является неселективным травителем (рис. 1, *b, c*).

Подтрав под слой фоторезиста в сопоставлении с глубиной травления примерно соответствует отношению 1:1 (рис. 1, *b*). В область структуры непосредственно под нависающим слоем фоторезиста, при отсутствии перемешивания раствора поступление свежего реагента

затруднено, и процесс травления в этой области лимитируется диффузией реагентов, поэтому протекает в полирующем режиме. Шероховатая часть поверхности германиевой подложки расположена в открытой зоне травления, где фоторезист предварительно был засвечен и удален.

Для одноэтапного процесса травления InGaP/Ga(In)As/Ge-структуры и Ge-подложки в разбавленном растворе HBr:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:H<sub>2</sub>O (8:1:100) была определена величина энергии активации. Травление проводилось в закрытой системе, обменивающейся с окружающей средой только энергией, но закрытой для массообмена [19], т. е. концентрации веществ изменялись только в результате реакции. Для расчета энергии активации реакции (совокупности химических реакций травления отдельных слоев наногетероструктуры) применялось уравнение Аррениуса, в котором зависимость константы скорости химической реакции от температуры выражается экспоненциальной зависимостью (3)

$$k = A e^{-E/RT}, \quad (3)$$

где *A* — предэкспоненциальный множитель, *E* — энергия активации, *R* = 8.31 J/(mol·K) — универсальная газовая постоянная, *T* — абсолютная температура.

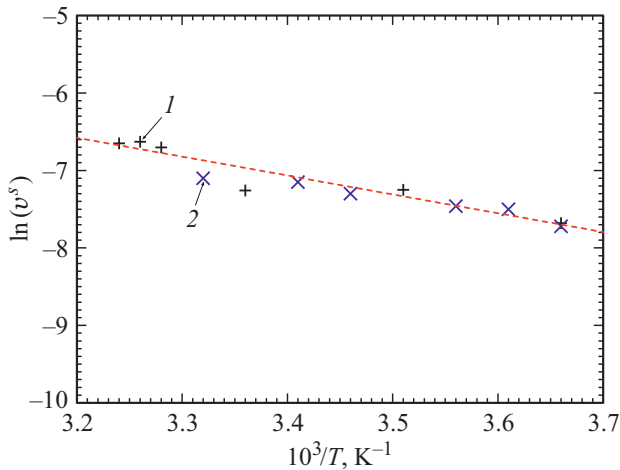
Данная зависимость строго выполняется для элементарных химических реакций, однако и большинство сложных реакций, также может подчиняться этому уравнению [20]. В нашем исследовании за скорость мы приняли отношение убыли массы вещества с единицы поверхности структуры ко времени *t*, за которое оно произошло, и получили скорость гетерогенного процесса (*v<sup>s</sup>*, g/min) (4):

$$v^s = \frac{\Delta m_i^s}{t S}. \quad (4)$$

С другой стороны, согласно закону действующих масс (5) для гетерогенной реакции:

$$V^s = K^s \Pi_i C_i^{n_i}, \quad (5)$$

где *K<sup>s</sup>* — константа скорости гетерогенного процесса, *C<sub>i</sub>* — концентрация *i*-го компонента жидкого травителя в растворе, [mol/l], *n<sub>i</sub>* — порядок реакции по *i*-му веществу, концентрации веществ в твердой фазе не



**Рис. 2.** Температурная зависимость логарифма скорости травления в разработанном одностадийном процессе химического травления: 1 (+) — структура МП СЭ с ОБ, 2 (×) — структура МП СЭ без ОБ.

учитываются, если травление проходит без изменения состава поверхности. Размерность  $K^s$  сложная и зависит от суммарного порядка реакции.

Если взят существенный избыток жидкого травителя, то в ходе травления все  $C_i \cong \text{const}$ :

$$V^s = K^s \text{const}^{(2)}, \quad v^s = K^s \text{const}^{(3)}, \quad (6)$$

Т.е. найденная скорость и реальная константа скорости строго пропорциональны (6). Иными словами, в координатах Аррениуса  $\ln(K^s) - (T^{-1})$  и  $\ln(v^s) - (T^{-1})$  будут иметь один и тот же тангенс угла наклона или энергию активации —  $E_a$ .

Для расчета энергии активации были получены экспериментальные данные по убыли массы вещества структуры с единицы поверхности за время  $t = 90 \text{ min}$ . Трав-

ление структур с ОБ (1) и без отражателя (2) в травителе  $\text{HBr}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$  (8:1:100) проводилось в интервале температур 2–36°C, с шагом 4°C.

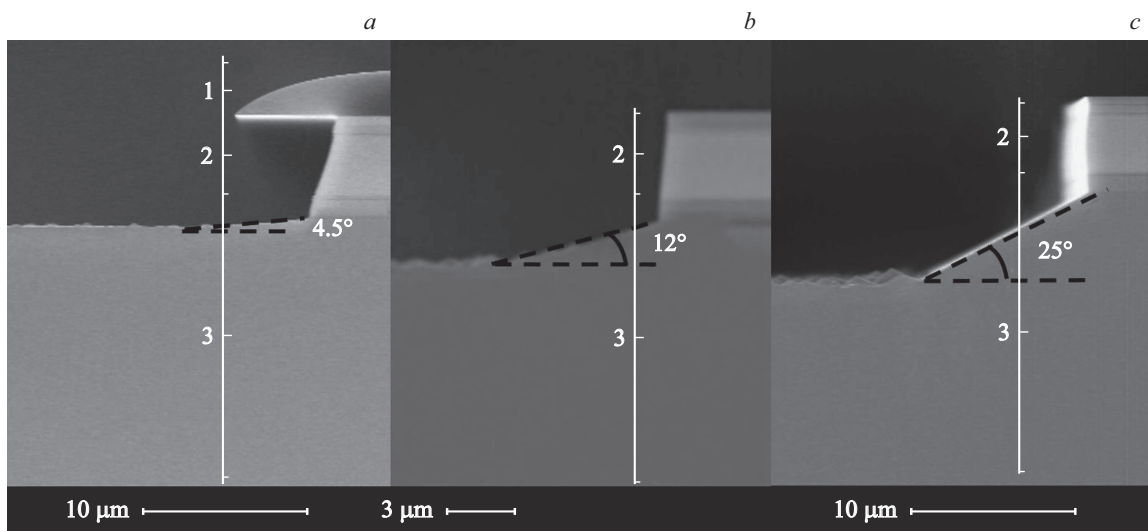
Если уравнение (3) справедливо для исследуемой системы, то на графике в координатах  $\ln v^s - 1/T$  экспериментальные точки располагаются на прямой линии, под углом  $\theta$  к оси абсцисс и с угловым коэффициентом (тангенсом угла наклона), равным  $E_a/R$ , откуда

$$E_a = -R \text{tg } \theta. \quad (7)$$

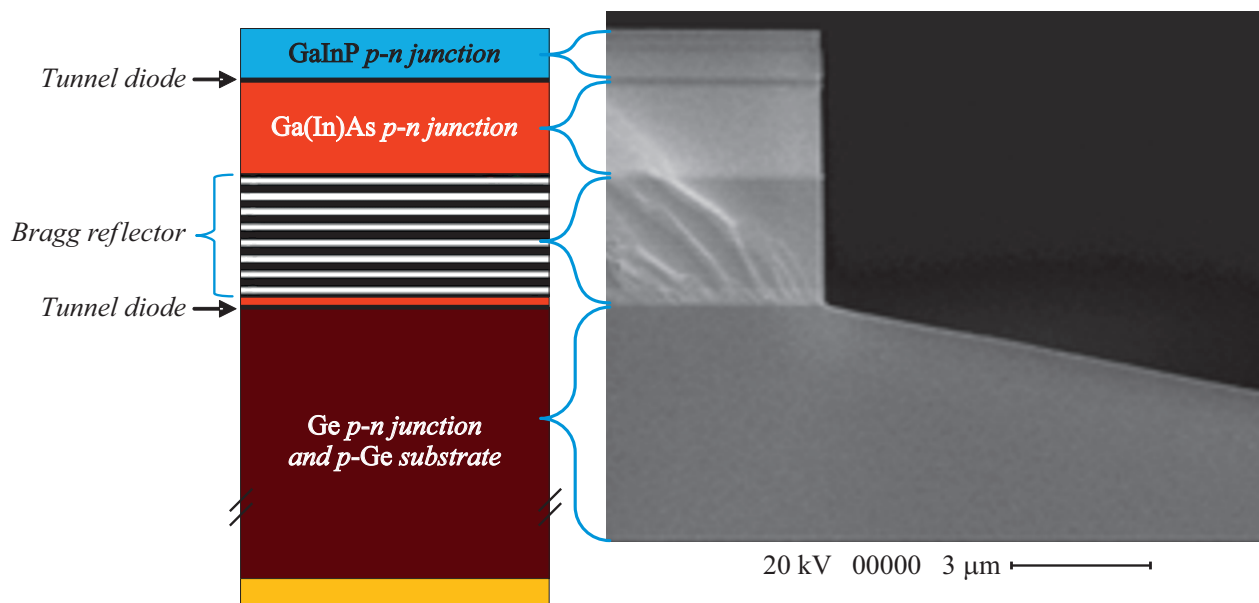
По величине энергии активации можно судить о механизме гетерогенного процесса.

График в координатах  $\ln v^s - 1/T$ , построенный по результатам эксперимента, приведен на рис. 2. Из рисунка видно, что в координатах  $\ln(v^s)$  от  $1000/T$  линейная аппроксимация совпадает с полученными экспериментальными значениями. Это подтверждает возможность использования уравнения Аррениуса для расчета энергии активации предложенного одноэтапного метода жидкостного травления  $\text{InGaP/Ga(In)As/Ge}$ -структуры. Используя формулу (7), получили величину энергии активации  $E_a \approx 20 \text{ kJ/mol}$ . Таким образом, в данном случае реакция травления находится в диффузионной области гетерогенного процесса [20]. Это позволяет, меняя условия проведения травления, а именно температуру, влиять на форму боковой поверхности мезы.

Так, при одинаковой продолжительности травления, но с разной температурой раствора можно получить профиль боковой поверхности мезы с разным наклоном в области германиевой подложки, сохранив при этом ровной и вертикальной боковую стенку наногетероструктуры. Подтверждением этому служат фотографии (рис. 3), полученные с помощью электронного микроскопа.



**Рис. 3.** Изменение угла наклона боковой поверхности мезы  $\text{InGaP/Ga(In)As/Ge}$ -структуры и  $\text{Ge}$ -подложки при финальном одноэтапном разделении МП СЭ без ОБ в зависимости от температуры ( $t$ ) травителя  $\text{HBr}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$  (8:1:100):  $a - t \approx 2^\circ\text{C}$   $b - t = 24^\circ\text{C}$ ,  $c - t = 33^\circ\text{C}$ , 1 — фоторезист; 2 — структура  $\text{InGaP/Ga(In)As}$ ; 3 —  $p-n\text{-Ge}$ -переход и германиевая подложка. Продолжительность травления 90 min.



**Рис. 4.** Архитектура мезы при разделении InGaP/Ga(In)As/Ge-структуры МП СЭ с ОБ методом одностадийного травления в растворе  $\text{HBr:H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$  (8:1:100) (температура раствора  $2^\circ\text{C}$ , продолжительность травления 180 min).

Из табл. 1 видно, что повышение температуры травителя от  $2$  до  $36^\circ\text{C}$  приводит к увеличению скорости травления в 2.5 раза. В табл. 2 приведены результаты травления InGaP/Ga(In)As/Ge-структур в обсуждаемом травителе. Из таблицы видно, что скорости травления в вертикальном и горизонтальном направлениях как для наноразмерных слоев, так и для германиевой подложки достаточно близки. Это и обеспечивает ровную и гладкую боковую поверхность мезы наногетероструктуры. Угол наклона боковых стенок мезы изменяется от продолжительности травления (рис. 4), что видно из изменения общей ширины вытравленного полоска и ширины плоского участка дна разделительной канавки (табл. 2). Таким образом, варьируя температуру травителя или продолжительность травления в растворе  $\text{HBr:H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$  (8:1:100) можно получать мезы разной архитектуры, с контролируемым наклоном боковой стенки мезы.

Показано, что если глубина травления структуры меньше  $10\ \mu\text{m}$ , то при финальном механическом разделении (дисковой резкой) структуры на чипы в структуре могут возникать дефекты вследствие образования сколов по кромкам реза и гидродинамических явлений, происходящих в зоне разделения пластины на чипы, с последующим ухудшением фотоэлектрических характеристик и деградации МП СЭ [21]. При увеличении глубины травления более  $30\ \mu\text{m}$  эпитаксиальная пластина становится механически менее прочной, что затрудняет выполнение последующих технологических операций и снижает выход годных чипов. Травление InGaP/Ga(In)As/Ge-структуры разработанным травителем  $\text{HBr:H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$  (8:1:100) при различных температурах, как показано

**Таблица 1.** Результаты травления наноразмерных слоев и германиевой подложки структуры InGaP/Ga(In)As/Ge без ОБ в травителе состава  $\text{HBr:H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$  (8:1:100)

Температура травителя, $^\circ\text{C}$	Исходная ширина открытого полоска для травления, $\mu\text{m}$	Скорость травления по вертикали, $\mu\text{m/h}$
2	25	4.5
12	25	6.0
24	25	5.8
32	25	6.7
33	25	7.8
36	25	11.3

Примечание. Продолжительность травления 90 min.

на рис. 3, позволяет менять угол наклона боковой поверхности мезы и ширину разделительной канавки в германиевой подложке. Это позволяет оптимизировать глубину травления для успешного проведения последующих технологических операций — нанесения пассивирующего покрытия на боковые стенки мезы МП СЭ и механического разделения эпитаксиальной пластины на чипы. Возможность оптимального выбора режима разделительного травления эпитаксиальной структуры приводит к снижению влияния поверхностных токов утечки и отсутствию деградации чипов МП СЭ при механическом разделении.

При этом боковые поверхности мезы в области InGaP/Ga(In)As наноструктуры остаются ровными, обеспечивая сохранение высококачественной пассивации боковой поверхности мезы МП СЭ (рис. 4).

**Таблица 2.** Результаты травления наноразмерных слоев и германиевой подложки структуры InGaP/Ga(In)As/Ge в травителе состава HBr:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:H<sub>2</sub>O (8:1:100)

Время травления, min	Исходная ширина открытого для травления полоска, $\mu\text{m}$	Глубина травления, $\mu\text{m}$	Ширина общая по верху, $\mu\text{m}$	Растрав в ширину (в одном направлении), $\mu\text{m}$	Ширина плоского участка дна, $\mu\text{m}$
10	10	6	18	4.0	—
20	10	7	21	5.5	15
30	10	9	27	8.5	18
60	10	12	36	13.0	15
90	10	15	39	14.5	12
120	10	18	48	19.0	9

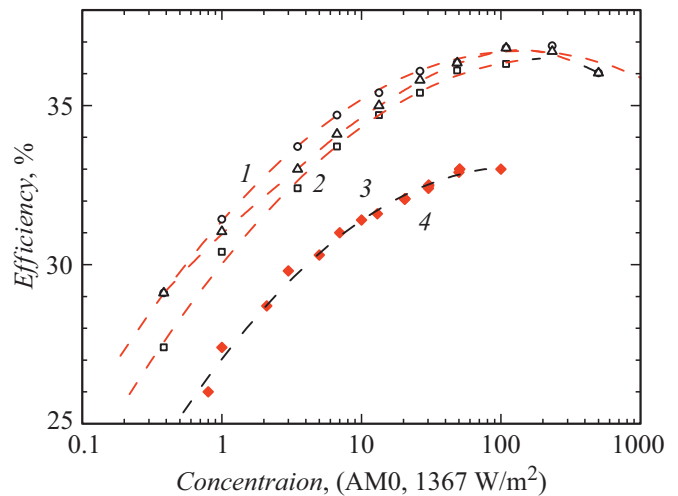
Примечание. Температура раствора травителя 36°C.

## 2.2. Фотоэлектрические измерения InGaP/Ga(In)As/Ge-структур

Для СЭ, полученных из InGaP/Ga(In)As/Ge-структур с использованием одноэтапного травления при комнатной температуре (24°C, угол наклона стенки мезы в области Ge-подложки — 12°), были проведены измерения фотовольтаических характеристик. Данная температура травления была выбрана с точки зрения упрощения технологического процесса производства СЭ. Измерения фотовольтаических характеристик были выполнены на импульсном имитаторе солнечного излучения (СИ) при кратности концентрации в диапазоне до 250×, (AM0; 1367 W/m<sup>2</sup>). На рис. 5 приведены зависимости эффективности (КПД) от кратности концентрации СИ для образцов МП СЭ, изготовленных из одной и той же InGaP/Ga(In)As/Ge эпитаксиальной пластины двумя разными методами финального разделительного травления, одностадийным и двухстадийным. Измерения показали, что при однократном СИ достигнута эффективность более 30%, при кратности 10× эффективность составила 35%, и при кратности 100× превысила 36% (AM0; 1367 W/m<sup>2</sup>).

В отличие от традиционного метода травления МП СЭ в два этапа [22], применение одноэтапного метода позволило существенно уменьшить „эффективную“ площадь боковой поверхности мезы СЭ за счет ее выравнивания, что привело к существенному снижению влияния ЛТУ на рабочие характеристики СЭ. Из рис. 5 видно, что эффективность для образцов СЭ после одностадийного химического травления (кривые 1–3) более чем на 4% выше эффективности, полученной для МП СЭ, изготовленных двухстадийным (кривая 4) комбинированным методом травления [22].

Для оценки качества и надежности пассивирования диэлектриком Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> боковой поверхности мезы 450 × 450  $\mu\text{m}$ , образцы МП СЭ с ОБ были подвергнуты термоциклированию при температурах 77 и 300 К. Термоциклирование проводилось одновременно для образцов МП СЭ, полученных двумя вышеупомянутыми методами травления с последующим нанесением пассивирующего покрытия Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Продолжительность одного



**Рис. 5.** Зависимости эффективности (КПД) от кратности концентрации солнечного излучения (AM0; 1367 W/m<sup>2</sup>) для образцов InGaP/Ga(In)As/Ge СЭ с ОБ, полученных двумя методами разделительного химического травления: кривые 1–3 — одностадийный метод травления; кривая 4 — двухстадийный метод травления.

термоцикла составляла 6 min. До и после проведения термоциклирования проводилось измерение прямых темновых вольт-амперных характеристик (ВАХ) образцов МП СЭ.

В общем виде плотность прямого темнового тока для фотоактивных *p-n*-переходов из материалов A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> складывается из трех компонент экспоненциального вида, соответствующие механизмам токопрохождения в области объемного заряда (ОПЗ): туннельно-ловушечному „избыточному“ [23], рекомбинационному (Sah-Noyce-Shockley) [24] и диффузионному (Shockley) [25], и описывается выражением (8):

$$J = J_{0r}(\exp(V_{\phi}/A_r \varepsilon) - 1) + J_{0r}(\exp(V_{\phi}/A_r \varepsilon) - 1) + J_{0d}(\exp(V_{\phi}/A_d \varepsilon) - 1), \quad (8)$$

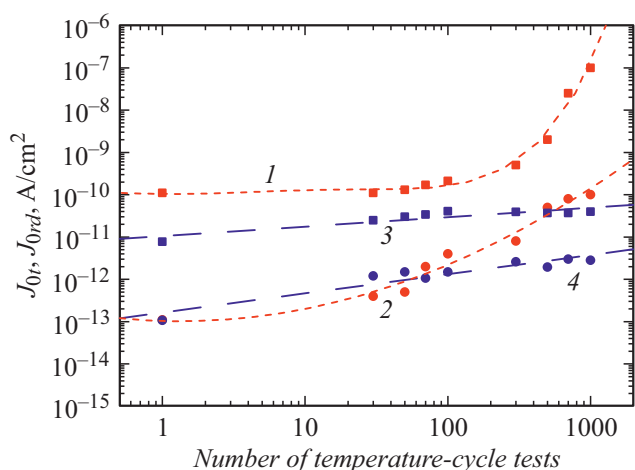
где  $\varepsilon \equiv kT/q$ ,  $V_{\phi}$  — напряжение на ОПЗ *p-n*-перехода, равное разности квазиуровней Ферми на границах и

внутри ОПЗ,  $A_t, A_r, A_d$  — диодные коэффициенты (коэффициенты идеальности), а  $J_{0t}, J_{0r}, J_{0d}$  — предэкспоненциальные множители, соответствующие туннельно-ловушечному „избыточному“, рекомбинационному и диффузионному механизмам токопрохождения,  $k$  — постоянная Больцмана,  $q$  — заряд электрона  $T$  — абсолютная температура.

Конструктивно InGaP/Ga(In)As/Ge солнечный элемент состоит из трех, последовательно включенных фотоактивных  $p$ – $n$ -переходов (ФАП), соединенных между собой двумя туннельными  $p$ – $n$ -переходами (ТП), и резистора —  $R_S$  эквивалентного омическому сопротивлению всей структуры МП СЭ. Параметры, полученные из экспериментальных темновых характеристик МП СЭ, рассчитывались по методике, изложенной в работе [5] с определением значений токов „насыщения“ —  $J_{0i}$  и диодных коэффициентов —  $A_i$ , соответствующих характерным участкам прямой ветви темновой ВАХ InGaP/Ga(In)As/Ge СЭ с определением доминирующих на них механизмов токопрохождения.

На рис. 6 показана зависимость роста токов „насыщения“ для  $J_{0t}$  — туннельно-ловушечного и  $J_{0rd}$  — смешанного, рекомбинационного [24] и диффузионного [25] механизмов токопрохождения в процессе термоциклирования образцов МП СЭ характеризующих деградацию пассивирующего покрытия мез ростом ЛТУ.

Из рис. 6 видно, что после выполнения  $10^3$  термоциклов, рост токов насыщения —  $J_{0t}$  и  $J_{0rd}$  для образцов МП СЭ, полученных одностадийным методом жидкостного травления, на порядки меньше чем у образцов, полученных двухстадийным методом, сочетающим жидкостное и электрохимическое травление [22].



**Рис. 6.** Зависимости роста токов „насыщения“ туннельно-ловушечного (избыточного) —  $J_{0t}$  (кривые 1, 3) и смешанного рекомбинационного (Sah-Noyce-Shockley) с диффузионным (Shockley) —  $J_{0rd}$  механизмов токопрохождения, (кривые 2, 4), полученных из расчета прямых темновых ВАХ при термоциклировании образцов МП СЭ с БО, изготовленных двухстадийным (кривые 1, 2) и одностадийным (кривые 3, 4) методами травления.

Полученные результаты позволяют считать, что данная постростовая технология может быть полезна при создании на основе многослойных гетероструктур  $A^{III}B^V$  на Ge-подложке не только СЭ, а также каскадных фотопреобразователей лазерного излучения и вертикально-интегрированных полупроводниковых лазерных диодов [26,27], где требуется высокая идентичность и однородность мез при интегрировании каскадных оптоэлектронных полупроводниковых приборов.

## Заключение

В результате проведенных исследований был разработан метод разделения на чипы многослойной наногетероструктуры InGaP/Ga(In)As/Ge за один этап. Оптимальные условия для „полирующего“ режима травления гетероструктуры и Ge-подложки достигнуты в растворе травителя  $HBr:H_2O_2:H_2O$  (8:1:100). Эти условия обеспечивают неселективное равномерное травление всех слоев многослойной наногетероструктуры InGaP/Ga(In)As/Ge, что приводит к ровной боковой поверхности по всей высоте мезы с возможностью изменения архитектуры мезы СЭ.

На основании экспериментально полученной величины энергии активации  $E_a = 20$  кДж/мол, установлено, что химическое травление многопереходной InGaP/Ga(In)As/Ge-наногетероструктуры протекает в диффузионной области гетерогенного процесса на границе фаз. Это позволяет, меняя условия проведения процесса травления, в частности, температуру раствора травителя, изменять архитектуру мезы с возможностью получения структуры с контролируемым наклоном боковых стенок и угла травства в Ge-подложке.

В результате открывается возможность управления архитектурой мезаструктуры на основе соединений  $A^{III}B^V$  на инородной Ge-подложке.

Применение одноэтапного разделительного травления позволило существенно на порядки снизить латеральные токи утечки и улучшить параметры МП СЭ, обеспечив надежное качество нанесения пассивирующего покрытия  $Si_3N_4$  и высокую термостабильность в широком диапазоне температур.

Проведенные измерения показали, что для InGaP/Ga(In)As/Ge СЭ со встроенным отражателем Брегга, изготовленных одноэтапным разделительным травлением, достигнуты эффективности: более 30% при освещении однократном СИ, ( $AM0; 1367$  W/m<sup>2</sup>), 35% при кратности около  $10\times$  и 36.7% при кратности до  $100\times$ , что почти на 4% выше эффективности, полученной для МП СЭ, изготовленных по двухэтапной технологии разделительного травления.

Разработанная постростовая технология может быть применима не только при создании многопереходных СЭ, каскадных GaAs фотопреобразователей оптического излучения, а также вертикально-интегрированных ла-

зерных диодов в оптоэлектронных полупроводниковых устройствах.

### Благодарности

Авторы выражают благодарность проф. Н.А. Чарыкову за полезные обсуждения и С.И. Трошкову за проведение измерений наногетероструктур на сканирующем электронном микроскопе.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] Zh.I. Alferov, V.M. Andreev, V.D. Rumyantsev. Springer Series Opt. Sci., **140**, 101 (2008).
- [2] E.V. Kontrosh, V.S. Kalinovskiy, G.A. Gusev, A.N. Sumarokov, G.V. Klimko, S.V. Ivanov, V.S. Yuferev, T.S. Tabarov, V.M. Andreev. IOP Conf. Series: J. Phys.: Conf. Series 993 (2018).
- [3] S. Fafard, M.C.A. York, F. Proulx, C.E. Valdivia, M.M. Wilkins, R. Arés, V. Aimez, K. Hinzer, D.P. Masson. Appl. Phys. Lett., **108**, 071101 (2016).
- [4] В.А. Миличко, А.С. Шалин, И.С. Мухин, А.Э. Ковров, А.А. Красилин, А.В. Виноградов, П.А. Белов, К.Р. Симовский. УФН, **186** (8), 801 (2016).
- [5] V.S. Kalinovskiy, V.V. Evstropov, V.M. Lantratov, P.V. Pokrovskiy, V.M. Andreev. Proc. 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (Valencia, Spain, 2010), p. 979.
- [6] Wei-Sheng Lei, Ajay Kumar, Rao Yalamanchili. J. Vacuum Sci. Technol. B, **30**, 040801 (2012).
- [7] D. Smoczynski, K. Czuba, E. Papis-Polakowska, P. Kozlowski, J. Ratajczak, Iwona Sankowska, A. Jasik. Mater. Sci. Semicond. Proces., **118**, 105219 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2020.105219>
- [8] Я.В. Левицкий, М.И. Митрофанов, Г.В. Вознюк, Д.Н. Николаев, М.Н. Мизеров, В.П. Евтихийев. ФТП, **53** (11), 1579 (2019). [Ya.V. Levitskii, M.I. Mitrofanov, G.V. Voznyuk, D.N. Nikolayev, M.N. Mizerov, V.P. Evtikhiev. Semiconductors, **53** (11), 1545 (2019). <https://doi.org/10.1134/S1063782619110101>]
- [9] В.М. Андреев, Е.А. Гребенщикова, П.А. Дмитриев, Н.Д. Ильинская, В.С. Калиновский, Е.В. Контрош, А.В. Малевская, А.А. Усикова. ФТП, **48** (9), 1249 (2014). [V.M. Andreev, E.A. Grebenshchikova, P.A. Dmitriev, N.D. Ilinskaya, V.S. Kalinovskiy, E.V. Kontrosh, A.V. Malevskaya, A.A. Usikova. Semiconductors, **48** (9), 1217 (2014). <https://doi.org/10.1134/S1063782614090024>]
- [10] В.В. Мамутин, В.М. Устинов, J. Boettcher, H. Kuenzel. ФТП, **44** (7), 995 (2010). [V.V. Mamutin, V.M. Ustinov, J. Boettcher, H. Kuenzel. Semiconductors, **44** (7), 962 (2010). <https://doi.org/10.1134/S1063782610070225>]
- [11] A. Turala, A. Jaouad, D.P. Masson, S. Fafard, R. Arés, V. Aimez. „Isolation of III-V/Ge Multijunction Solar Cells by Wet Etching“, Hindawi Publishing Corporation International Journal of Photoenergy, 2013, Article ID 583867, 7 p. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/583867>
- [12] А.М. Филачев, И.И. Таубкин, М.А. Трищенко. Твердотельная фотозлектроника. Фотодиоды (Физматкнига, М., 2011), 445 с. ISBN 878-5-89153-203-6
- [13] M. Razeghi. A Survey of GaInAsP-InP for Photonic and Electronic Applications The MOCVD Challenge (IOP Publishing Ltd., 1989), v. 1, p. 277.
- [14] Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.matprop.ru>
- [15] В.В. Мамутин, Н.Д. Ильинская, Д.А. Бедарев, Р.В. Левин, Б.В. Пушный. ФТП, **48** (8), 1132 (2014). [V.V. Mamutin, N.D. Ilinskaya, D.A. Bedarev, R.V. Levin, B.V. Pushnyi. Semiconductors, **48** (8), 1103 (2014). <https://doi.org/10.1134/S1063782614080181>]
- [16] D. Hofstetter, F.R. Giorgetta, E. Baumann, Q. Yang, C. Manz, K. Köhler. APL, **93**, 221106 (2008).
- [17] Q. Song, H. Cao, S.T. Ho, G.S. Solomon. APL, **94**, 061109 (2009).
- [18] В.В. Некрасов. Основы общей химии в 2-х томах, (Fundamentals of General Chemistry in 2 vols.) (in Russian), (Khimiya, M., 1973 vol. I, p. 273)
- [19] И.А. Дибров. Неорганическая химия (Лань, СПб., 2001) 432 с. ISBN 5-8114-0325-9]
- [20] A.G. Stromberg, D.P. Semchenko. Fizicheskaya Khimiya (in Russian), (Moscow, 2001)
- [21] В.А. Сычик. Технология сборки полупроводниковых приборов и интегральных схем (БНТУ, Минск, 2014)
- [22] A.V. Malevskaya, N.D. Ilinskaya, V.M. Andreev. Pis'ma v Zh. Tekh. Fiz., **45** (24), 14 (2019).
- [23] L. Esaki. Phys. Rev. **109** (2), 603 (1958).
- [24] Chih-Tang Sah, Robert N. Noyce, William Shockley. Carrier Generation and Recombination in P-N Junctions and P-N Junction Characteristics, Proceedings of the IRE, p. 1228 (1957).
- [25] W. Shockley. The Bell System Tech. J. **28** (3), 435 (1949).
- [26] D.M. Demidov, A.L. Ter-Martirosyan, K.A. Bulashevich, O.V. Khokhlev, S.Yu. Karpovzh-I, Nauchnoe priborostroenie, **23** (2), 129 (2013).
- [27] В.П. Коняев, А.А. Мармалюк, М.А. Ладугин, Т.А. Багаев, М.В. Зверков, В.В. Кричевский, А.А. Падалица, С.М. Сапожников, В.А. Симаков. ФТП, **48** (1), 104 (2014). [V.P. Konayev, A.A. Marmalyuk, M.A. Ladugin, T.A. Bagaev, M.V. Zverkov, V.V. Krichevsky, A.A. Padalitsa, S.M. Sapozhnikov, V.A. Simakov. Semiconductors, **48** (1), 99 (2014).]