

07

## Исследование формирования антиотражающего покрытия каскадных солнечных элементов

© А.В. Малевская, Ю.М. Задиранов, А.А. Блохин, В.М. Андреев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: amalevskaya@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 7 июня 2019 г.

В окончательной редакции 27 июня 2019 г.

Принято к публикации 27 июня 2019 г.

Выполнены исследования формирования антиотражающего покрытия каскадных солнечных элементов на основе гетероструктур  $A_3B_5$ . Изучены режимы обработки поверхности гетероструктур с использованием методов плазмохимического, жидкостного химического и ионно-лучевого травления. Разработана технология создания антиотражающего покрытия на основе слоев  $TiO_x/SiO_2$ . Достигнуто улучшение параметров адгезии покрытия к поверхности гетероструктуры, а также снижение коэффициента отражения в каскадных солнечных элементах.

**Ключевые слова:** каскадный солнечный элемент, антиотражающее покрытие, гетероструктура  $A_3B_5$ .

DOI: 10.21883/PJTF.2019.20.48386.17916

Интерес к созданию каскадных солнечных элементов (КСЭ) на основе гетероструктур  $A_3B_5$  обусловлен их высокой эффективностью преобразования солнечного излучения в электрическую энергию [1,2]. Большое влияние на фотоэлектрические параметры КСЭ оказывает постростовая технология: материалы, используемые для создания омических контактов, способы формирования контактов, топология прибора, технология формирования антиотражающего покрытия и меза-структуры [3]. Основными путями увеличения эффективности КСЭ при разработке постростовой технологии является снижение омических и оптических потерь. Для снижения омических потерь проводятся разработки контактных систем с целью минимизации переходного контактного сопротивления, увеличения проводимости контактных шин, разработки технологии создания контактной сетки в соответствии с топологией прибора [4]. Для уменьшения оптических потерь проводятся исследования материалов антиотражающих покрытий с целью уменьшения коэффициента отражения солнечного излучения, проводятся разработки технологии подготовки поверхности гетероструктуры и непосредственно технологии осаждения слоев для улучшения адгезии покрытия к поверхности гетероструктуры [5,6].

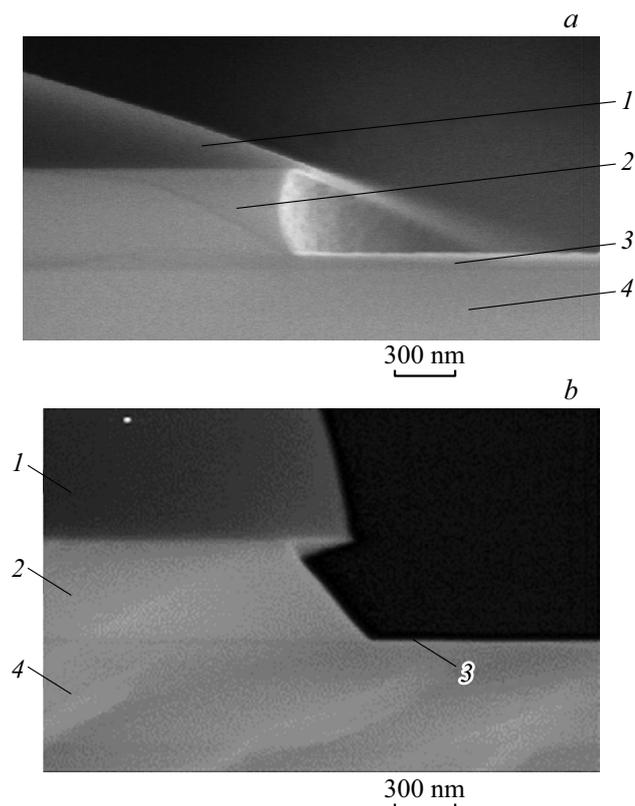
В настоящей работе выполнены исследования и разработка постростовой технологии создания антиотражающего покрытия на основе гетероструктуры  $GaInP/GaAs/Ge$  с широкозонным окном  $Al_{0.52}In_{0.48}P$  и контактным слоем  $GaAs$ , стравленным в местах, свободных от контактов.

Каскадные солнечные элементы преобразуют широкий спектральный диапазон солнечного излучения (350–1800 nm). Антиотражающие покрытия должны обладать минимальным коэффициентом отражения в

данном диапазоне, что может быть достигнуто при использовании многослойных антиотражающих покрытий, например, на основе  $TiO_x/SiO_2$  (где величина  $x$  близка к 2). Это антиотражающее покрытие обладает высокой химической и термической стойкостью, что дает возможность проводить осаждение методом магнетронного распыления с использованием технологии фотолитографии [7,8].

Постростовая технология формирования антиотражающего покрытия состоит из нескольких технологических этапов: создание маски фоторезиста, травление контактного слоя  $GaAs$ , обработка поверхности гетероструктуры, осаждение слоев антиотражающего покрытия, удаление маски фоторезиста.

Формирование антиотражающего покрытия на фоточувствительной области солнечного элемента проводится с использованием метода фотолитографии: на фронтальной поверхности гетероструктуры создается маска фоторезиста, далее проводится локальное селективное травление контактного слоя  $GaAs$  гетероструктуры для открытия фоточувствительной области КСЭ. Высокое качество поверхности травления и селективность травления контактного слоя  $GaAs$  и широкозонного окна верхнего субэлемента могут быть достигнуты методами плазмохимического и жидкостного химического травления. Основным преимуществом плазмохимического травления является возможность прецизионного травления материала структуры в направлении, перпендикулярном его поверхности, с минимальным уходом размеров, заданных маской. Травление контактного слоя  $GaAs$  проводится в плазме, содержащей  $BCl_3$  и  $SF_6$ , селективность достигается за счет образования трудноудаляемых фторидов индия при достижении слоя



**Рис. 1.** СЭМ-изображения (СЭМ — сканирующая электронная микроскопия) структуры после травления контактного слоя GaAs методом плазмохимического (*a*) и жидкостного химического (*b*) травления. 1 — маска фоторезиста, 2 — контактный слой, 3 — широкозонное окно AlInP, 4 — верхний субэлемент GaInP.

AlInP. Боковое подтравливание слоя GaAs под маску фоторезиста составляет менее 30 nm (рис. 1, *a*).

Недостатком плазмохимического травления является низкая селективность травления, что может приводить к образованию нарушенного слоя и дефектов на поверхности гетероструктуры.

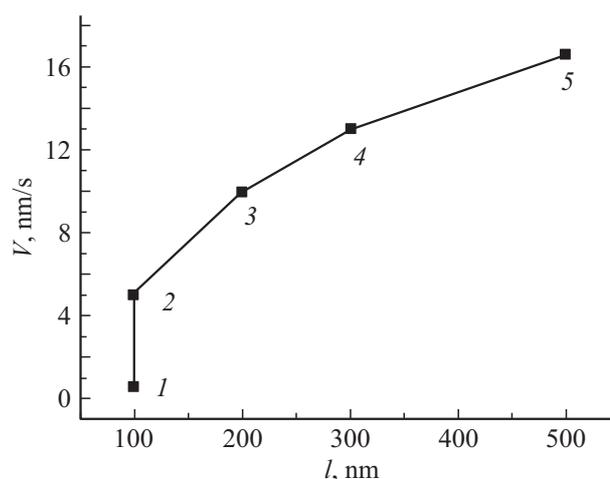
Альтернативным методом служит жидкостное химическое травление. Преимущество жидкостного травления состоит в высокой технологичности процесса, низкой стоимости оборудования, широком спектре химических реактивов для проведения травления различных слоев структуры. Высокая степень селективности травления контактного слоя GaAs достигается в травителях на основе аммиака и перекиси водорода разного состава и в травителе на основе лимонной кислоты и перекиси водорода. Однако химическое травление является изотропным, и травление осуществляется не только перпендикулярно поверхности структуры, но и горизонтально под маску фоторезиста, что приводит к снижению точности задания топологии КСЭ. Как видно из рис. 1, *b*, величина бокового подтравливания слоя GaAs при проведении жидкостного химического травления составляет порядка 200 nm. Проведено исследова-

ние влияния режимов травления на величину бокового подтравливания контактного слоя структуры (рис. 2). Регулирование скоростей травления проводилось путем изменения состава и концентрации травителей. Снижение бокового подтравливания до 100 nm достигнуто в двух травителях: лимонная кислота (550–570 g/l),  $H_2O_2$  (60–70 g/l);  $NH_4OH$  (3 g/l),  $H_2O_2$  (6 g/l).

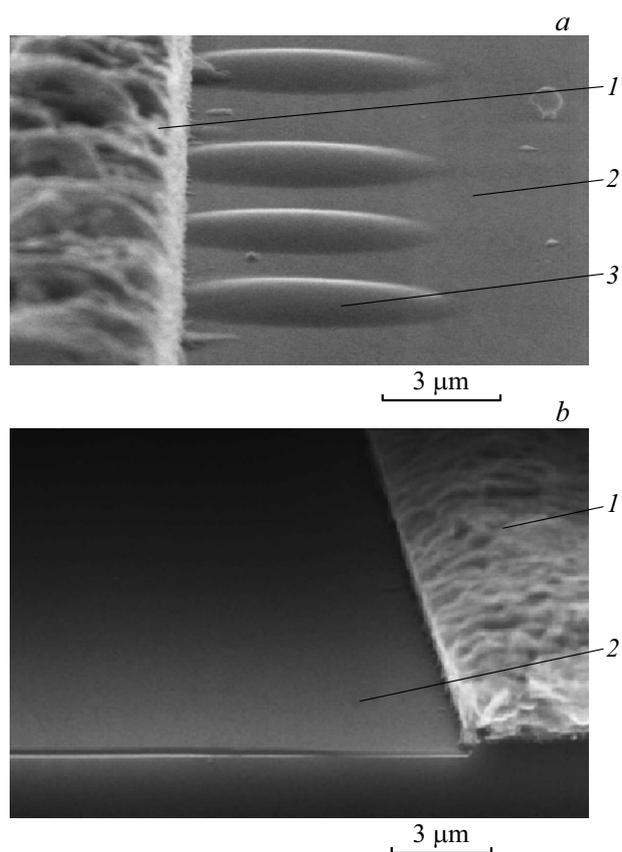
Недостатком жидкостного химического травления при обработке поверхности является возможность ухудшения качества поверхности за счет продуктов реакции и образования окислов. Состояние поверхности гетероструктуры оказывает существенное влияние на параметры антиотражающего покрытия — на адгезию слоев, при этом может происходить частичное скалывание или частичное отслоение областей покрытия (рис. 3, *a*). Нарушение сплошности антиотражающего покрытия приводит к увеличению коэффициента отражения падающего излучения и снижению эффективности КСЭ.

В настоящей работе для улучшения качества поверхности гетероструктуры после плазмохимического или жидкостного химического травления контактного слоя разработана технология дополнительной обработки поверхности слоя AlInP методом ионно-лучевого травления. Ионное травление обладает низкой селективностью, что позволяет удалять любые загрязнения, продукты реакций и окислы с поверхности гетероструктуры. Травление ионами не только очищает поверхность, но и активирует ее, создавая свободные поверхностные связи, которые при нанесении антиотражающего покрытия являются искусственными центрами зародышеобразования, что ведет к увеличению адгезии покрытия.

Непосредственно после проведения травления контактного слоя GaAs осуществлена обработка поверхности слоя AlInP методом ионно-лучевого травления



**Рис. 2.** Зависимость величины бокового подтравливания контактного слоя GaAs от скорости травления в разных травителях. 1 — лимонная кислота (550–570 g/l),  $H_2O_2$  (60–70 g/l); 2 —  $NH_4OH$  (3 g/l),  $H_2O_2$  (6 g/l); 3 —  $NH_4OH$  (5 g/l),  $H_2O_2$  (12 g/l); 4 —  $NH_4OH$  (10 g/l),  $H_2O_2$  (24 g/l); 5 —  $NH_4OH$  (3 g/l),  $H_2O_2$  (60 g/l).



**Рис. 3.** СЭМ-изображения поверхности солнечного элемента после нанесения антиотражающего покрытия  $\text{TiO}_x/\text{SiO}_2$ . *a* — без ионно-лучевой обработки, *b* — с ионно-лучевой обработкой. 1 — шина омического контакта, 2 — антиотражающее покрытие, 3 — нарушение адгезии антиотражающего покрытия.

Спектральная зависимость коэффициента отражения от поверхности широкозонного окна гетероструктуры  $\text{AlInP}/\text{GaInP}/\text{GaAs}/\text{Ge}$  с антиотражающим покрытием, созданным с использованием ионно-лучевой обработки

Длина волны $\lambda$ , nm	Коэффициент отражения, %
400	1.7
500	1.5
600	0.7
700	0.2
800	1.9

на глубину 10–20 nm низкоэнергетическими ионами аргона (100 eV). Данные режимы травления позволяют очистить поверхность гетероструктуры от продуктов химических реакций и окислов, не разрушая нижележащие слои структуры. Далее проведено осаждение двухслойного антиотражающего покрытия  $\text{TiO}_x/\text{SiO}_2$  методом магнетронного распыления. Совмещение процессов плазмохимического или жидкостного химического травления, ионно-лучевого травления с нанесением ан-

тиотражающего покрытия приводит к существенному улучшению параметров КСЭ за счет улучшения адгезии и формирования сплошных однородных слоев антиотражающего покрытия (рис. 3, *b*).

Результатом проведенных исследований стало достижение низких значений коэффициента отражения (до 0.2% при  $\lambda = 700$  nm) от поверхности КСЭ (с разработанным антиотражающим покрытием  $\text{TiO}_x/\text{SiO}_2$ ) в диапазоне длин волн 400–800 nm, наиболее важном для достижения максимального КПД каскадных солнечных элементов (см. таблицу).

Проведены исследования этапов формирования антиотражающего покрытия для каскадных солнечных элементов. Исследованы методы обработки поверхности гетероструктуры с использованием плазмохимического, жидкостного химического и ионно-лучевого травления. Достигнуто увеличение точности задания топологии КСЭ, улучшение адгезии антиотражающего покрытия к поверхности широкозонного окна гетероструктуры, что позволяет снизить коэффициент отражения падающего излучения (при площади гетероструктур до  $20 \text{ cm}^2$ ), повысить эффективность КСЭ и увеличить выход годных приборов.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] *Alferov Zh.I., Andreev V.M., Rumyantsev V.D.* // Concentrator photovoltaics / Eds A. Luque, V. Andreev. Springer Ser. in Optical Sciences. 2007. V. 130. P. 25–50.
- [2] *Bett A.W., Dimroth F., Siefer G.* // Concentrator photovoltaics / Eds A. Luque, V. Andreev. Springer Ser. in Optical Sciences. 2007. V. 130. P. 67–88.
- [3] *Моро У.* Микролитография. М.: Мир, 1990. Ч. 1. 605 с. Ч. 2. 632 с.
- [4] *Малевская А.В., Хвостиков В.П., Солдатенков Ф.Ю., Хвостикова О.А., Власов А.С., Андреев В.М.* // Письма в ЖТФ. 2019. Т. 45. В. 1. С. 12–15. DOI: 10.21883/PJTF.2019.01.47148.17544
- [5] *Levinson H.J.* Principles of lithography. 3rd ed. Washington: SPIE, 2010. 504 p.
- [6] *Константинов Ю.А.* Антиотражающие покрытия для солнечных батарей // Научные исследования: от теории к практике. Материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. Чебоксары: ЦНС „Интерактив плюс“, 2016. С. 198–200.
- [7] *Андреев В.М., Малевская А.В., Ильинская Н.Д., Задиранов Ю.М.* Патент № 2687501. 30.05.2018.
- [8] *Suzuki K., Smith B.W.* Microlithography. Science and Technology. 2nd ed. Abingdon: Taylor & Francis Group, 2007. 864 p. DOI: 10.1201/9781420051537