

## ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ВЫБОР СТРУКТУРЫ ЭФФЕКТИВНЫХ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Усмонов Жафар Исроилович  
научный сотрудник Бухарского института управления  
природными ресурсами НИУ «ТИИИМСХ»,  
jafarusmonov1986@gmail.com

### Аннотация:

На сегодняшний день с помощью полупроводниковых солнечных элементов в настоящее время широко разработан научно и практически метод преобразования света в полезную энергию. Основной причиной, препятствующей получению эффективной энергии от естественного чистого солнечного света, является структурная структура фотоэлементов, рассматриваемая как решение проблемы. Одним из способов решения этой проблемы является удешевление разрабатываемых солнечных элементов, разработка передовых технологий или снижение стоимости сырья. Научные результаты, изложенные в данной диссертации, были проведены на основе арсенида галлия для анализа их данных по разработке эффективных солнечных элементов, выбору способа производства и изучению их свойств.

**Ключевые слова:** полупроводник, фотопроводимость, фотопроводник, фототок, эпитаксиальная, вакансия, кремний.

## MANUFACTURING TECHNOLOGY AND CHOICE OF THE STRUCTURE OF EFFICIENT PHOTOCONVERTERS

Usmonov Jafar Isroilovich  
scientific researcher of the Bukhara institute of natural resources management of the  
National research university of TIAME, jafarusmonov1986@gmail.com

### Abstract:

Today, using semiconductor solar elements, the method of converting light into useful energy is now widely developed scientifically and practically. The main reason that is hindered in obtaining effective energy from natural pure sunlight is the structural structure of photoelements is considered as a solution to the problem. One of the ways to solve this problem is to reduce the cost of developed solar elements, develop advanced technologies or reduce the cost of raw materials. The scientific results presented in this thesis were carried out on the basis of gallium arsenide to analyze their data on the development of effective solar elements, the choice of a method of production and the study of their properties.

**Keywords:** Semiconductor, photoconduction, photoconductor, photocurrent, epitaxy vacancy, silicon.

Метод преобразования солнечной энергии в электрическую с помощью полупроводниковых солнечных элементов (СЭ) является в настоящее время наиболее разработанным в научном и практическом плане. Основной причиной, сдерживающей развитие крупномасштабной солнечной электроэнергетики является относительно высокая стоимость энергии, вырабатываемой СЭ по сравнению с традиционными методами. Один из путей решения данной проблемы - снижение стоимости СЭ, разработка прогрессивных технологий или снижение стоимости исходных материалов. На данном этапе работы проведен анализ литературных данных по разработке и изготовлению эффективных солнечных элементов (СЭ) на основе арсенида галлия, выбор методики изготовления солнечных элементов, исследование их свойств.

Арсенид галлия – единственный полупроводник, который можно считать серьезным конкурентом кремнию, как материалу для изготовления солнечных элементов. По сравнению с кремнием арсенид галлия, ширина запрещенной зоны которого (1,43 эВ) близка к оптимальному значению, обладает более высокой эффективностью преобразования солнечной энергии, лучшими характеристиками при повышенных температурах и освещенностях.

Арсенид галлия в отличие от кремния – прямозонный полупроводник с большим коэффициентом оптического поглощения солнечного излучения. Высокая подвижность носителей заряда в арсениде галлия, что также существенно. Простота изготовления эпитаксиальных слоев твердых растворов на основе арсенида галлия с почти полным совпадением параметров решеток, отсутствие механических напряжений и рекомбинационных центров на межфазной границе в изотипном переходе AlGaAs – GaAs были использованы для изготовления эффективных солнечных элементов. Наибольшее распространение нашли СЭ на основе гетеросистем  $p\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As} - p\text{GaAs} - n\text{GaAs}$ , получаемой методом жидкофазной эпитаксии с одновременной термодиффузией акцепторной примеси цинка. Основной р-п переход, разделяющий носители заряда, расположен в базовой пластине арсенида галлия, а слой твердого раствора  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$  выполняет роль широкозонного окна - фильтра и благодаря изотипному р  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As} - p\text{GaAs}$  переходу на поверхности n GaAs практически устраняется потери на поверхностную рекомбинацию.

С разработкой СЭ с высоким КПД на основе арсенида галлия стало очевидным, что компенсировать их повышенную удельную стоимость можно путем применения их в системах, использующих концентрированные солнечные потоки, в которых высокая стоимость самого элемента составляет малую долю стоимости концентраторной системы.

Теоретический предел КПД СЭ на основе арсенида галлия в условиях солнечного освещения AM 1 составляет ~29 %. В работе /1/ (для 1984 г.) для СЭ на основе арсенида галлия приводятся следующие параметры: в условиях AM 1 ( $E = 107 \text{ мВт/см}^2$ )  $I_{sc} = 22 \text{ мА/см}^2$ ,  $U_{oc} = 0,97 \text{ В}$ ,  $FF = 0,73$ ,  $\text{КПД} = 14,5 \%$ . В работе /2/ (1987 г.) для СЭ сходной структуры получены параметры: в условиях AM 1 ( $E = 96,3 \text{ мВт/см}^2$ )  $I_{sc} = 22,95 \text{ мА/см}^2$ ,  $U_{oc} = 0,985 \text{ В}$ ,  $FF = 0,86$ ,  $\text{КПД} = 20,2 \%$ . При коэффициенте концентрации излучения равной 10 КПД возросло до значения 21,3 %. К 1992 году КПД СЭ на основе арсенида галлия достиг КПД равный более 25% /2<sup>a</sup>/. В обоих случаях применялся

изотермический метод жидкофазной эпитаксии, сходные контактные системы: на p – GaAs Au-Ge-Ni на p-GaAs Au-Be, а во второй работе Au-Be-Ag. Во второй работе в качестве просветляющего покрытия применялась ZnS-MgF<sub>2</sub>. В условиях AM 0 получены СЭ с КПД до 19 %.

Основная часть работ, посвященных технологии изготовления СЭ на основе арсенида галлия относится методу жидкофазной эпитаксии, который является в настоящее время самым простым, технологически доступным и высокопроизводительным способом. Кроме того, он легко контролируем, экономичен и экологически безопасен.

Выращивание методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) основано на растворении мышьяка в расплавах галлия и галлий-алюминия и последующем осаждении эпитаксиальных слоев Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As на кристаллическую подложку, определяющую кристаллографическую ориентацию слоев. Установки для выращивания обычно изготавливают из высокочистого кварца, а кассеты для выращивания из высокочистого графита, а сам процесс роста осуществляют в среде высокочистого водорода. Графитовая кассета для выращивания конструктивно состоит из как бы двух принципиальных частей. Верхняя часть кассеты, содержащая расплав галлия, скользит вдоль нижней части кассеты содержащей подложку и источник арсенида галлия. После насыщения расплава при температуре насыщения путем выдержки над источником арсенида галлия, верхнюю часть кассеты перемещают до совмещения расплава с подложкой и температуру снижают со скоростью 0,1-0,3 °С/мин. Этим методом получены скорости роста слоев GaAs и Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As 0,1-0,3 мкм/мин. Поскольку рост эпитаксиальных слоев происходит в почти равновесных условиях, выращиваются слои очень высокого качества и высокого структурного совершенства. В процессе выращивания относительно большой объем расплава галлия является стоком для сегрегированных примесей. С целью стабилизации роста иногда по нормали к фронту кристаллизации создают температурные градиенты с помощью устройств охлаждения. В этом случае слои однородны по толщине и не образуются поверхностные дефекты (бугорки).

На ранней стадии выращивания в ряде случаев создают условия для небольшого стравливания поверхности подложки арсенида галлия с целью обеспечения атомарно-чистой границы раздела. С помощью такого способа получают низкие скорости поверхностной рекомбинации, наблюдаемые на металлургической границе.

Добавляя небольшое количество цинка в расплав, содержащий алюминий и галлий, можно создать мелкозалегающий слой p-типа проводимости в подложке арсенида галлия одновременно с выращиванием слоя AlGaAs. В соответствии с другими способами слой p-GaAs выращивают из расплава галлия, легированного германием, магнием, бериллием непосредственно перед осаждением слоя AlGaAs.

Существуют несколько вариантов ЖФЭ. Осаждение можно осуществлять в условиях недостаточного насыщения, насыщения и пересыщения расплавов; в последнем случае, как правило, эпитаксиальные слои характеризуют малой диффузионной длиной неосновных носителей заряда. Геттерирование примесей из нижележащих слоев p- и p-типа в подложке с целью повышения значения длины диффузии неосновных носителей

заряда осуществляют путем отжига подложки в расплаве галлий алюминий до эпитаксиального выращивания.

В работах /3-7/ большое место уделяется теоретическому рассмотрению процесса ЖФЭ: разработана математическая модель процессов массопереноса в системе на различных этапах температурно-временного цикла для решения задач управления процессами эпитаксиального выращивания; проведено моделирование кинетики контактных явлений при ЖФЭ в системе  $Ga_{1-x}Al_xAs-GaAs$ ; теоретически рассмотрено влияние конвекции на толщину слаболегированного эпитаксиального слоя, полученного из тонкого слоя раствора-расплава;

За последние годы наблюдается использование более низких температур роста в методе ЖФЭ, о чем свидетельствуют работы /8-10/. Получены слои  $Ga_{1-x}Al_xAs$  методом низкотемпературной ЖФЭ при  $T < 550$  °C с толщинами менее  $(1-3) \cdot 10^{-2}$  мкм. При низкотемпературной ЖФЭ наблюдаются низкие скорости роста при формировании р-п перехода, более совершенные эпитаксиальные слои. Однако, проведение низкотемпературной ЖФЭ требует особо чистых технологических условий, особой чистоты используемых материалов и прецизионного оборудования.

Большое внимание уделяется вопросам определения концентрации алюминия в слое  $Ga_{1-x}Al_xAs$  /11-12/, профилю распределения алюминия по толщине твердого раствора. Рассматриваются вопросы контроля толщины слоев  $Ga_{1-x}Al_xAs$ , степени однородности структур в зависимости от температуры роста, определены оптимальные значения параметров роста, обеспечивающие получение плоскопараллельных пленок.

Исходя из анализа литературных данных, к настоящему времени, можно считать, что наиболее распространенной структурой, используемой для получения СЭ с КПД 18 % и более методом ЖФЭ (в условиях АМ 1), является гетероструктура р  $Ga_{1-x}Al_xAs$  - р  $GaAs$  - n  $GaAs$  - n<sup>+</sup>  $GaAs$  с различными вариациями получения гомо- р  $GaAs$  - n  $GaAs$  перехода.

С учетом наличия комплектующих технологических материалов, возможности технологического оборудования и оснастки, а также условия проведения технологического процесса и расчета её режимов, мы предлагаем выбор следующих параметров структуры СЭ на основе арсенида галлия.

### 1. n<sup>+</sup> GaAs - подложка

Легирующая примесь	Sn
Концентрация носителей заряда, см <sup>-3</sup>	$(1-2) \cdot 10^{18}$
Толщина, мкм	400
Плоскость ориентации	(100)

### 2. n GaAs – эпитаксиальный «буферный» слой

Легирующая примесь	Sn
Толщина, мкм	10-15
Концентрация носителей заряда, см <sup>-3</sup>	$(1-3) \cdot 10^{17}$
Плотность дислокаций, см <sup>-2</sup>	$< 10^4$

**3. p GaAs – диффузионный слой**

Легирующая примесь	Zn
Толщина, мкм	1-2
Концентрация носителей заряда, см <sup>-3</sup>	(5-7) 10 <sup>17</sup>
Плотность дислокаций, см <sup>-2</sup>	< 10 <sup>5</sup>

**4. p Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As – фронтальный гетерослой (окно)**

Легирующая примесь	Zn
Толщина, мкм	0,5-2
Концентрация носителей заряда, см <sup>-3</sup>	(1-3) 10 <sup>18</sup>
Состав слоя ( x ), атомная доля	0,7-0,75
Ширина запрещенной зоны, эВ	2,06-2,08

Реализацию данной структуры обеспечивает способ неизотермической жидкофазной эпитаксии из растворов галлия и алюминия. В качестве установки формирования структуры СЭ выбрана установка выращивания с горизонтальным реактором на базе печи СДО – 80/4 рис.1 и графитовой оснасткой кассетного типа со скользящим подложкодержателем (слайдером).

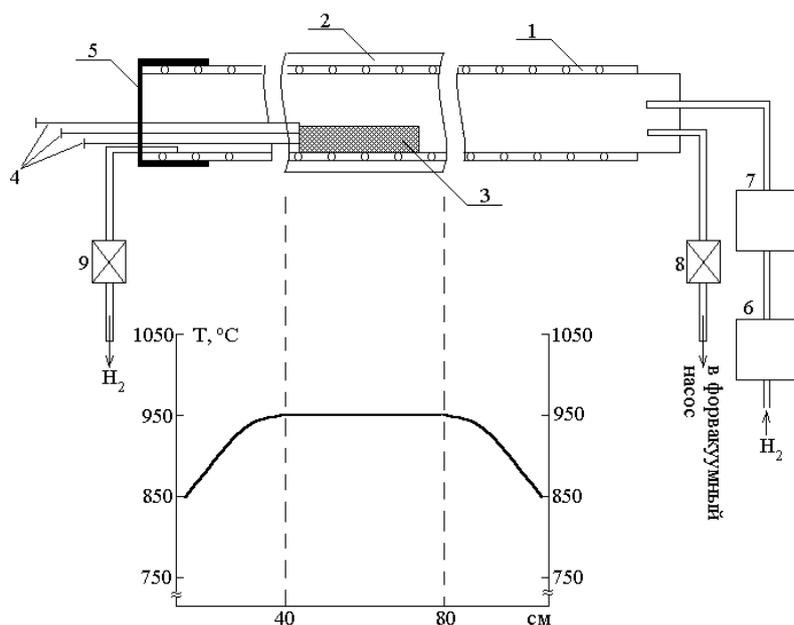


Рис.1. Принципиальная схема установки выращивания эпитаксиальных слоев методом жидкофазной эпитаксии.

- 1- нагреватель; 2 – зона ЖФЭ;  
3 – графитовый контейнер;  
4 – штоки управления;  
5 – уплотнитель вакуума;  
6 – палладиевая очистка;  
7 – галлиевая очистка водорода;  
8 – вакуумный вентиль;  
9 – барботер.

Для исключения низкотемпературной кристаллизации пленок предусмотрена конструкция графитовой кассеты, обеспечивающая полное удаление раствора при температурах выращивания эпитаксиальных слоев. Данная кассета позволяет выращивать при необходимости в одном технологическом процессе эпитаксиальные структуры с площадью до более 50 см<sup>2</sup>. Выращивание эпитаксиальных производилось из ограниченного объема раствора (объем раствора из которого производится выращивание ограничивается двумя параллельно расположенными подложками

арсенида галлия, образующими зазор), причем толщина раствора между подложками арсенида галлия площадью  $23 \times 23 \text{ мм}^2$  изменяется в пределах 400-1000 мкм.

Процесс изготовления структуры СЭ состоит из **трех этапов**. На первом этапе формируется эпитаксиальный, изотипный с подложкой «буферный» слой, **n GaAs** толщиной около 10 мкм, являющийся базой СЭ. Концентрация носителей заряда составляла  $(1-3) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  при температуре начала эпитаксии  $840 \text{ }^\circ\text{C}$  и окончания роста при  $810 \text{ }^\circ\text{C}$ . Концентрация носителей заряда измерялась методом Холла и из измерения вольт-емкостных характеристик р-п структур на основе арсенида галлия. Исследования показывают, что в начале процесса роста «буферного слоя» при малых толщинах (2-3 мкм) его ещё наблюдаются дефекты роста, характерные для кристаллического направления (100). Увеличение толщины «буферного слоя» до 10 мкм приводит к улучшению структурного совершенства благодаря уменьшению плотности дефектов на порядок. Если учесть, что в материале из арсенида галлия полное поглощение солнечного излучения происходит на глубине около 5 мкм, то толщина «буферного слоя» около 10 мкм достаточна для получения СЭ с максимальным КПД.

На втором этапе формирования структуры СЭ были исследованы процессы диффузии цинка в «буферный» слой - **n GaAs** из раствора **Ga + Al + As + Zn** в атмосфере водорода при температурах  $720 - 800 \text{ }^\circ\text{C}$ . Необходимое значение концентрации носителей заряда и глубина залегания «диффузионного слоя» - **p GaAs** контролировался изменением температуры и временем проведения процесса диффузии при выбранной оптимальной температуре.

На третьем этапе формируется  $\text{pGa}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$  – фронтальный гетерослой (окно) с  $x \geq 0,7-0,75$  при температуре  $700-720 \text{ }^\circ\text{C}$  без отрыва от процесса формирования «диффузионного слоя» - **pGaAs**. Содержание алюминия в слое **pGa<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As** выбирали исходя из компромисса следующих противоречивых условий: 1) ширина запрещенной зоны окна должна быть по возможности большей ( $x = 1$ ); 2) Состав слоя должна обеспечивать возможность получения токосъемных контактов с хорошими контактными свойствами и хорошей адгезией; 3) Состав слоя должен обеспечивать стабильность его параметров во времени (т.е. со временем не должна изменяться свойства поверхности).

4) Выращивание твердого раствора состава  $x \geq 0,7-0,75$  обеспечивает практически неизменность содержания алюминия при выбранных температурах роста ( $700 - 720 \text{ }^\circ\text{C}$ ) по толщине эпитаксиального слоя, из-за близости коэффициента сегрегации алюминия к единице.

Толщина слоя **pGa<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As** составляла 1-2 мкм. Выявлено, что снижение температуры формирования слоя **pGa<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As** до  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  наряду с уменьшением толщины зазора между подложками позволяет получить слои толщиной менее 1 мкм. В этом случае необходимо будет решать вопрос достижения концентрации носителей заряда в слое **pGa<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As**, обеспечивающей возможность получения токосъемных контактов с омическими характеристиками.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Abdulkhaev O.A., Asanova G.O., Yodgorova D.M., Karimov A.V. Investigation of the photoelectric characteristics of photodiode structures with silicon-based potential barriers // Journal of Engineering Physics and Thermophysicsthis link is disabled, 2012, 85(3), стр. 709–715.
2. Abdulkhaev O., Yakubov A., Giyasova F., Khakimov A., Yodgorova D., Karimov A. Electrical properties and photosensitivity of multi-barrier photodiode structure based on semi-insulating GaAs // 2020 International Conference on Information Science and Communications Technologies, ICISCT 2020, 2020, 9351463.
3. Isroilovich, U. J. (2022). GAAS EPITAKSIAL QATLAMLARINING SUV BUG'REAKSIASI BILAN O'STIRISH MEKANIZMLARINI TADQIQ QILISH. Uzbek Scholar Journal, 10, 380-387.
4. Усманов, Ж. И., & Абдуллаев, М. Ш. (2022). СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ УСТРОЙСТВ. Universum: технические науки, (4-10 (97)), 37-40.
5. Усманов, Ж. И. (2021). Исследование влияния положения уровня ферми на фотопроводимость монокристаллического кремния Si< B, MN> с. Экономика и социум, (3-2 (82)), 494-498.
6. Usmonov J.I. SPECTRAL DEPENDENCE OF THE PHOTOCONDUCTIVITY OF SINGLE-CRYSTAL SILICON ON THE POSITION OF THE FERMI LEVEL // The Way of Science, 2020. № 3 (73).
7. Usmonov J.I. DEVELOPMENT OF DEVICES BASED ON SILICON WITH MANGANESE NANOCCLUSERS WITH THE PROPERTIES OF AVALANCHE FLIGHT DIODES // International scientific conference, Uzbekistan.
8. Usmonov J.I. Development of photocells for generation of sub-band photocarriers // 25th International Scientific and Practical Conference «INNOVATION-2021», Uzbekistan.