

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕДУР ВЫРАЩИВАНИЯ ИЗОТИПНЫХ ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЕРЕХОДОВ $AlGaAs-GaAs$ и $InGaAs/GaAs$

Усмонов Жафар Исроилович

научный сотрудник Бухарского института управления природными ресурсами НИУ
«ТИИМСХ», jafarusmonov1986@gmail.com

ARTICLE INFO.

Keywords: полупроводник,
Фотопроводимость, эпитаксия,
легирования,
гетерофотопреобразовател,
подложка.

Аннотация

основными факторами, определяющими возможность дальнейшего повышения КПД гетерофотопреобразователей со структурой $pGa_{1-x}Al_xAs-pGaAs-nGaAs-n^+GaAs$, являются оптимизация профиля распределения Al по толщине, оптимизация толщины слоя $pGaAs$, оптимизация поверхности и достижение большего роста КПД при её просветлении, а также применение микрорельефной поверхности, способствующей увеличению падающего излучения.

<http://www.gospodarkainnowacje.pl/> © 2023 LWAB.

Создание эффективных гетерофотопреобразователей на основе системы $AlGaAs-GaAs$ во многом определяется технологическими возможностями получения качественных слоев $GaAs$ и $AlGaAs$.

Исследование сравнительного вклада диффузионной и базовой областей $p-n$ -перехода в общий коэффициент собирания Q для фотоэлектрических преобразователей из Si и $GaAs$ в области спектра 0.4-1.0 мкм показали, что для фотоэлектрических преобразователей из $GaAs$ вклад в общий коэффициент собирания со стороны базы не превышает 10%, в то время, как для фотоэлектрических преобразователей из Si этот вклад достигает 65%.

Поэтому, основными факторами, определяющими возможность дальнейшего повышения КПД гетерофотопреобразователей со структурой $pGa_{1-x}Al_xAs-pGaAs-nGaAs-n^+GaAs$, являются оптимизация профиля распределения Al по толщине, оптимизация толщины слоя $pGaAs$, оптимизация поверхности и достижение большего роста КПД при её просветлении, а также применение микрорельефной поверхности, способствующей увеличению падающего излучения.

Нами для выращивания эпитаксиальных слоев $GaAs$ и $AlGaAs$ использовалась графитовая двухсекционная кассета с подвижными линейками и контейнером [1]. Кассета имеет два рабочих объема. В первом объеме расположен подвижный графитовый контейнер 1 с ячейками 2 для вертикального размещения пластин $GaAs$, а второй объем предназначен для размещения раствора-расплава ($Al+Ga+As+Zn$) – 3. Кассета снабжена подвижной графитовой линейкой – задвижкой 4, служащей для создания замкнутого рабочего объема и перемещения подвижного контейнера для контакта раствора-расплава с подложками. В этой кассете подложки устанавливаются вертикально в специальный контейнер на определенном расстоянии друг от друга, и раствор-расплав подается снизу.

В этом случае рост идет из ограниченного объема раствора-расплава расположенного в узком зазоре между двумя пластинками, что позволяет контролировать толщину выращивания эпитаксиальных слоев.

Арсенидгаллиевые подложки с $n^+ \sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ с ориентацией $\langle 100 \rangle$ и $S \sim 20 \times 20 \text{ мм}^2$ после резки с определенной конфигурацией и подготовкой размещались контейнеры с зазором между ними 500 мкм, устанавливались в графитовую кассету с раствором-расплавом и загружались в реактор открытого типа.

В использованной кассете имеется возможность одновременного выращивания эпитаксиальных слоев на шести подложках. В нем методом жидкофазной эпитаксии наращивались буферные слои GaAs с $n \sim (1 \div 2) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и толщиной 10 мкм. Полученные таким образом образцы с буферным слоем размещались в другой контейнер с зазором между ними $l = 300 \text{ мкм}$ для получения $p\text{AlGaAs}$.

Слой $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ выращивался из раствора-расплава расположенного в зазоре 300 мкм в интервале температур $600 \div 800^\circ\text{C}$ методом принудительного охлаждения.

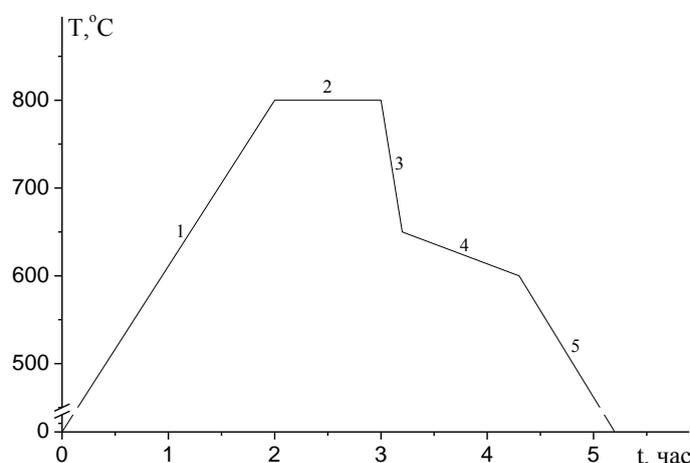


Рис.1. Температурно-временная диаграмма технологического процесса.

На рис. 1. приведена температурно-временная диаграмма технологического процесса.

При принудительном охлаждении системы, в виду высокого коэффициента сегрегации алюминия в растворе-расплаве, в начальный момент Al интенсивно захватывается твердым раствором, и после истощения Al в растворе-расплаве рост слоя AlGaAs практически прекращается. Таким образом, толщина выращенного слоя AlGaAs определяется расстоянием узкого зазора между двумя пластинками.

Так, при содержании Al ($x = 0.85 \div 0.70$) и $T = 750^\circ\text{C}$ максимальная толщина слоя выращенного из зазора ($l = 300 \text{ мкм}$) твердого раствора составила $0.8 \div 1.0 \text{ мкм}$.

Разработка технологии выращивания изотипных гетероэпитаксиальных переходов $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$. Нами для получения гетероэпитаксиальных слоев были использованы два типа модификации жидкостной эпитаксии.

а) Выше приведенная капиллярная жидкостная эпитаксия. На данном этапе мы получили образцы GaAs-AlGaAs с двусторонними эпитаксиальными слоями, поэтому с одной стороны (где толщина была меньше) удаляли неконтролируемый слой. По сути, экспериментальные исследования профиля распределения примесей показывают, что в слоях, выращенных методом капиллярной ЖФЭ, распределение концентрации примесей несколько отличается от

равномерной. Такой характер распределения примесей может быть вызван рядом причин. Главным из которых является:

1. Изменение эффективного коэффициента распределения примеси $K=X_{sc}/X_{lc}$ (отношения между концентрациями легирующего компонента в твердой и жидкой фазах) в процессе охлаждения при эпитаксиальном выращивании.
2. Уменьшение лигатуры в расплаве из-за испарения или химических реакций в процессе выращивания.

В легированных теллуром эпитаксиальных слоях GaAs, концентрация электронов возрастает от границы подложки к поверхности слоя. В случае легирования цинком концентрация дырок, наоборот, уменьшается к поверхности.

Для контролирования концентрации примесей в п-слое GaAs лигатура вводится двумя способами: 1. добавкой в раствор-расплав Ga+GaAs определенной доли лигатуры (олово или теллура). 2. Добавкой в галлиевый раствор-расплав насыщающего материала - источника из п-GaAs с требуемой концентрацией примесей $N_d = 1 \cdot 10^{18} \text{см}^{-3}$. Считается, что второй способ более предпочтителен, поэтому мы использовали второй способ, так как при этом заведомо можно гарантировать получению слоев с концентрацией примеси $2 - 4 \cdot 10^{17} \text{см}^{-3}$, то есть в растущем слое концентрация носителей уменьшается 3-4 раза.

Если обратимся к технологии, нами для выращивания эпитаксиальных слоев GaAs и AlGaAs использовалась графитовая двухсекционная кассета с подвижными линейками и контейнером.

Кассета имеет два рабочих объема, где цифрой 2 обозначен объем с установленными в него кристаллами в данном случае подложка $n^+ \text{GaAs}$ с выращенным не него изотипным эпитаксиальным слоем $n \text{GaAs}$ с площадью $S \sim 20 \times 20 \text{ мм}^2$ и с зазором между ними 300 мкм. Там же цифрой 1 обозначена подвижная часть контейнера. Второй объем - светлый предназначен для размещения на дне раствора-расплава (Al+Ga+As+Zn) – 3. Подвижная графитовая линейка – задвижка 4, служит для создания замкнутого рабочего объема и перемещения подвижного контейнера на раствор-расплав-3, т.е. для непосредственного контакта раствора-расплава с подложками. Таким образом, до перемещения подложек на раствор-расплав с момента достижения температуры начала кристаллизации во время выдержки системы при температуре эпитаксии идет процесс диффузии Zn на эпитаксиальный слой, что создает изотипный гомопереход $n^+ \text{GaAs} - n \text{GaAs} - p \text{GaAs}$.

Далее после перемещения образцов на раствор-расплав осуществляется принудительное охлаждение системы, в виду высокого коэффициента сегрегации алюминия в растворе-расплаве, в начальный момент Al интенсивно захватывается твердым раствором, и после истощения Al в растворе-расплаве рост слоя AlGaAs практически прекращается. Таким образом, получается $n^+ \text{GaAs} - n \text{GaAs} - p \text{GaAs} - p \text{AlGaAs}$ структура, где толщина выращенного эпитаксиального слоя AlGaAs определяется толщиной зазора между двумя пластинками.

Так, при содержании Al ($x=0.85 \div 0.70$) и при начальной температуре $T=750^\circ \text{C}$ максимальная толщина слоя выращенного из зазора $l=300 \text{ мкм}$ твердого раствора $p \text{AlGaAs}$ составила $0.8 \div 1.0 \text{ мкм}$.

После завершения процесса получения структуры проводится химико-технологическая обработка и очистка поверхностей с последующим процессом получения фронтального и тыльного контактов применением фотолитографии и электрохимического осаждения Pd-Ni с отжигом и лужением в припое ПОС-40, просветляющего покрытия методом анодирования или вакуумного напыления окисла с показателем преломления порядка 1,8-2,0.

б) Что касается $n^+ \text{GaAs} - n \text{GaAs}$ изотипных эпитаксиальных переходов на *микрорельефных* подложках, то они выращивались при принудительном охлаждении раствора-расплава по

технологии описанной ниже для *переходов InGaAs/GaAs* (неизотермическая жидкостная эпитаксия) с помощью графитового контейнера – кассеты “пенального” типа.

Подложки GaAs ориентированные в кристаллографическом направлении $\{100\}$ с концентрацией носителей $n \sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ площадью $10 \times 10 \text{ мм}^2$ после полировки в полирующем травителе $5\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$ в течение 20-30 сек, промывались в CCl_4 и деионизованной воде, просушивались. Затем их устанавливали в первую ячейку контейнера, а во вторую ячейку помещали подложку с микрорельефной поверхностью. Таким образом, в одном технологическом процессе и при одном и том же режиме выращивали эпитаксиальные слои на подложки с ровной границей раздела, а также с микрорельефной поверхностью. В качестве источника для раствора-расплава для обеих ячеек использовали легированные теллуром монокристаллы GaAs с концентрацией носителей $\sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Далее графитовый контейнер с двумя подложками и раствором-расплавом загружали в реактор открытого типа продуваемый потоком очищенного водорода.

Отметим, что в данном случае для предотвращения подрастворения подложки с микрорельефом после гомогенизации раствора – расплава интервалы 2 и 3 рис.1.4 включали программное охлаждение со скоростью $0,3 \text{ }^\circ\text{C}$ минут и далее вводили подложки под расплав. Начальная температура эпитаксии составляла $\sim 830 \text{ }^\circ\text{C}$. При этом расплав был обогащен мышьяком.

Диффузионные переходы были получены в буферных слоях. Диффузия Zn осуществлялось из растворов-расплавов путем удержания его на буферном слое в течение ~ 1 часа при $800 \text{ }^\circ\text{C}$ и последующим осаждением тонкого слоя.

Также были отработаны технологии осаждения многослойных пленок с диффузионными переходами, типа $p^+\text{AlGaAs-nInGaAs-nGaAs}$ и эпитаксиальными (резкими) переходами: $p^+\text{AlGaAs-p}^+\text{InGaAs-n InGaAs-n GaAs}$.

Толщина буферных слоев n-InGaAs составляет (5-6) мкм, а слоев $p^+\text{AlGaAs}$ и $p^+\text{InGaAs}$ – порядка (1÷2) мкм. Температура эпитаксии ($850 \div 800$) $^\circ\text{C}$. Скорость охлаждения раствора-расплава $\sim 0.5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$.

Исследование электрофизических характеристик полученных гетеропереходов и управление составом гетероэпитаксиальных слоев. Совершенство выращенных слоев и качество металлургической и физической границ оценивались исследованиями декорированных сколов с помощью металлографического микроскопа. Результаты наблюдений показали, что эпитаксиальные слои nGaAs, $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ растут равномерно по всей площади, границы p-n-перехода и металлургические границы получаются в большинстве случаев бездефектными.

Изучены совершенства, и степень легирования буферных слоев в зависимости от весовой доли лигатуры в растворе-расплаве. В качестве лигатуры использовались металлическое олово и арсенид галлия, легированный оловом до концентрации $(4 \div 7) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Вольт-фарадные исследования показали, что при выбранном режиме, p-n-переходы получают резкими, концентрация легирующей примеси в буферном слое достигает $n = (1 \div 2) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

На подложках арсенида галлия АГЧО n-типа $\sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$ с кристаллографической ориентацией (100) $0^0 10^1$ были получены структуры нижеприведенного типа.

1. $n\text{GaAs-nGaAs}$, где n GaAs буферный слой с толщиной 4-5 мкм и концентрацией $\sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$.
2. $p\text{Al}_{0.63}\text{Ga}_{0.37}\text{As-nGaAs}$, где толщина эпитаксиального слоя $p\text{Al}_{0.63}\text{Ga}_{0.37}\text{As}$ $p \sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$, непосредственно наращенного на подложку $n\text{GaAs} \sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$, составляет ~ 1 мкм. Выше приведенные структуры имеют зеркальную поверхность.
3. $p\text{Al}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{As-nGaAs}$, где толщина эпитаксиального слоя $p\text{Al}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{As}$ $p \sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ составляет ~ 1 мкм. Подложка с дендритной морфологией $n\text{GaAs} \sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$.
4. $p\text{Al}_{0.63}\text{Ga}_{0.37}\text{As-nGaAs}$, где толщина эпитаксиального слоя $p\text{Al}_{0.63}\text{Ga}_{0.37}\text{As}$ $p \sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$

составляет ~ 1 мкм. Подложка с микрорельефной морфологией n GaAs $\sim 10^{17}$ см^{-3} .

Гетеропереходы p $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ - p GaAs- n GaAs- n^+ GaAs. Ниже приводятся результаты исследования *гетеропереходов* в структуре солнечных элементов типа p $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ - p GaAs- n GaAs- n^+ GaAs, где активная область p GaAs получена диффузией Zn из замкнутого объема, перед получением слоя p $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, диффузией Zn из замкнутого объема. Слой p $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ фактически служит в качестве окна. Толщина подложки - области n^+ -типа из GaAs с концентрацией носителей $\sim 10^{17}$ см^{-3} равна 400 мкм. На подложку n^+ GaAs методом жидкостной эпитаксии выращен слой n GaAs и p $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ легированный цинком до концентрации 10^{18-19} см^{-3} итого толщиной 5-8 мкм. В процессе роста слоя получен диффузионный p - n -переход в эпитаксиальном слое n -GaAs. Площадь готовых структур составляет 5×6 мм^2 . Со стороны подложки нанесен сплошной омический контакт из Ni, а на активную поверхность сформированы омические контакты в виде гребенки из сплава AgSn.

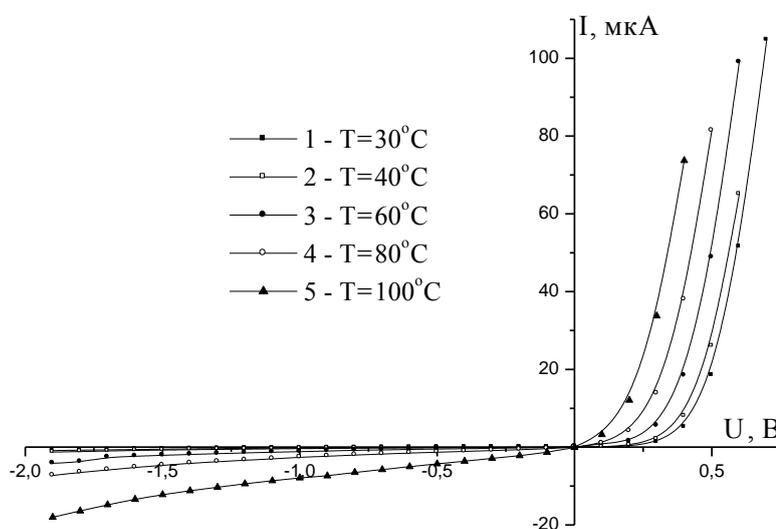


Рис.2 Вольтамперная характеристика гетероструктуры $p\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ - $p\text{GaAs}$ - $n\text{GaAs}$ - $n^+\text{GaAs}$

Как показано на рис.2 выпрямляющие свойства p - n -перехода (p GaAs- n GaAs) сохраняются во всем исследованном диапазоне температур (30-100 $^{\circ}\text{C}$). Наблюдаемая крутизна роста прямого тока от напряжения свидетельствует о резкости p - n -перехода. При изменении температуры в указанном диапазоне механизм токопрохождения остается неизменным.

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 Thermophysics this 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 QATLAMLARNING 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.