

К. т. н. Ю. Е. НИКОЛАЕНКО, к. т. н. С. И. КРУКОВСКИЙ,
И. Р. ЗАВЕРБНЫЙ, О. В. РЫБАК, И. А. МРЫХИН

Украина, г. Львов, НПП "Карат"
E-mail: krukovsky@polynet.lviv.ua

Дата поступления в редакцию
18.03 2002 г.

Оппонент к. т. н. Л. М. СОЛДАТЕНКО
(НИИ "Квант", г. Киев)

ПОЛУЧЕНИЕ ТАНДЕМНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР GaAs—InGaAs—AlGaAs ДЛЯ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

С использованием низкотемпературной ЖФЭ получены многослойные тандемные гетероструктуры, пригодные для изготовления на их основе фотопреобразователей солнечной энергии.

Успехи развития космической фотоэнергетики в последние годы связаны с достаточно хорошо разработанной технологией получения гетероструктур GaAs—AlGaAs с одним p — n -переходом [1, 2]. Параметры фотоэлементов на основе этих гетероструктур близки к достижению своего теоретического предела при использовании планарного p — n -перехода и неконцентрированного солнечного излучения [3, 4].

Одним из путей повышения эффективности работы таких фотопреобразователей является использование концентрированного солнечного излучения. В настоящее время максимальные значения эффективности концентраторных солнечных элементов составляют 24,6% для космического солнечного излучения (AM0, 100 солнц) [4] и 27,6% [5] для солнечного излучения вблизи земной поверхности (AM1,5, 255 солнц). Однако дальнейшее повышение эффективности преобразования солнечной энергии сталкивается со значительными трудностями, обусловленными большими омическими потерями при попытках существенно увеличить степень концентрации солнечного излучения.

Повышение эффективности и коэффициента полезного действия фотопреобразователей может быть достигнуто за счет использования p — n -перехода с сильно развитой поверхностью. Этот способ сейчас усиленно разрабатывается на кремниевых фотопреобразователях. Для гетероструктур на основе A_3B_5 он пока применяется мало, что обусловлено сложностью сохранения изначально структурированной поверхности подложки при наращивании p — n -перехода методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ), который до недавнего времени являлся базовым при получении эпитаксиальных структур для фотопреобразователей. (В последние годы значительно расширилось применение метода МОС-гидридной эпитаксии для изготовления гетероструктур для фотопреобразователей [5]. Однако ЖФЭ сохраняет неплохие перспективы, учитывая возможность получения слоев с высокой диффузионной длиной неосновных носителей при легировании расплавов редкоземельными элементами.)

В настоящей работе рассмотрены некоторые технологические особенности получения многослойных тандемных трехпереходных гетероструктур GaAs—InGaAs—AlGaAs, предназначенных для изготовления преобразователей солнечного излучения.

Тандемные гетероструктуры в системе GaAs—InGaAs—AlGaAs выращивались методом низкотемпературной ЖФЭ в атмосфере проточного водорода с точкой росы не выше -70°C в графитовой поршневой кассете на подложках GaAs n -типа проводимости, ориентированных по плоскости (100). Наращивание гетероструктур проводилось в интервале температур 650 — 500°C . Структура солнечных фотоэлементов на основе гетероструктур GaAs—InGaAs—AlGaAs показана на **рис. 1**.

Au—Ge	Au—Ge
$p\text{-Al}_{0,8}\text{Ga}_{0,2}\text{As}$	0,2 мкм
$p\text{-A}_{0,14}\text{Ga}_{0,86}\text{As}$	0,8 мкм
$n\text{-A}_{0,14}\text{Ga}_{0,86}\text{As}$	0,9 мкм
$p\text{-A}_{0,14}\text{Ga}_{0,86}\text{As}$	0,1 мкм
$n\text{-A}_{0,14}\text{Ga}_{0,86}\text{As}$	0,1 мкм
$p\text{-In}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}$	2,0 мкм
$n\text{-In}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}$	2,5 мкм
Подложка $n^+\text{-GaAs}$	400 мкм
Au—Ni	

Рис. 1. Схема поперечного разреза солнечного фотоэлемента на основе гетероструктуры GaAs—InGaAs—AlGaAs

На подложке из n -GaAs, легированной оловом, выращивался первый p — n -переход, образованный узкозонными слоями $n\text{-In}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}$ и $p\text{-In}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}$ с концентрацией основных носителей $(1\text{—}3)\cdot 10^{17}\text{ см}^{-3}$. Далее наращивался лавинный диод, состоящий из двух тонких сильнолегированных слоев $n\text{-A}_{0,14}\text{Ga}_{0,86}\text{As}$ и $p\text{-A}_{0,14}\text{Ga}_{0,86}\text{As}$ с концентрацией основных носителей $(1\text{—}2)\cdot 10^{19}\text{ см}^{-3}$ и $(7\text{—}10)\cdot 10^{18}\text{ см}^{-3}$, соответственно. На поверхности слоя $p\text{-A}_{0,14}\text{Ga}_{0,86}\text{As}$ кристаллизовался второй p — n -переход, состоящий из более широкозонных материалов $p\text{-A}_{0,14}\text{Ga}_{0,86}\text{As}$ и $n\text{-A}_{0,14}\text{Ga}_{0,86}\text{As}$ с уровнем легирования $(1\text{—}3)\cdot 10^{17}$ и $(1\text{—}5)\cdot 10^{17}\text{ см}^{-3}$. Лавинный диод, соединяющий узкозонный и широкозонный p — n -переходы, предназначен для уменьшения омических потерь в фотоэлементе. Для уменьшения рекомбинационных потерь на поверхности структуры

наращивалось широкозонное окно из $p\text{-Al}_{0,8}\text{Ga}_{0,2}\text{As}$ с концентрацией носителей $(8\text{--}10)\cdot 10^{17}\text{ см}^{-3}$. Контакты к фронтальной поверхности гетероструктуры изготавливались из сплава Au–Ge, а к тыльной – на основе Au–Ni.

Для сохранения оптимальных условий преобразования солнечной энергии в tandemной гетероструктуре толщина слоя $p\text{-Al}_{0,14}\text{Ga}_{0,86}\text{As}$ не должна превышать 1,2—1,0 мкм (оптимально 0,8—1,2 мкм), а уровень легирования — $(1\text{--}5)\cdot 10^{17}\text{ см}^{-3}$. Особенностью tandemных гетероструктур является наличие в ее составе двух сильнолегированных слоев $\text{Al}_{0,14}\text{Ga}_{0,86}\text{As}$ p - и n -типа проводимости, образующих туннельный диод. Малые толщины слоев определяют выбор низкотемпературного варианта ЖФЭ для воспроизводимого получения tandemных гетероструктур. Однако при низких температурах значительно усложняется получение сильнолегированных слоев, особенно p -типа проводимости. Это обусловлено тем, что нелегированные слои GaAs имеют n -тип проводимости. Концентрация электронов, обусловленная фоновыми примесями, у них, как правило, снижается после дополнительной очистки шихты путем отжига или добавок редкоземельных элементов. Фоновая концентрация электронов в нелегированных слоях, полученных с использованием вышеуказанных способов очистки, может составлять $2\cdot 10^{16}\text{--}5\cdot 10^{16}\text{ см}^{-3}$. Чтобы получить слои p -типа проводимости с уровнем легирования $\sim 5\cdot 10^{17}\text{ см}^{-3}$, необходимо ввести в слой акцепторную примесь в количестве не ниже $(2\text{--}5)\cdot 10^{17}\text{ см}^{-3}$ с учетом коэффициента ионизации примеси.

Для получения слоев AlGaAs p -типа наиболее подходящими примесями являются Zn, Mg, Si, Ge. Однако Si и Ge при низких температурах эпитаксии ($500\text{--}600^\circ\text{C}$) проявляют преимущественно донорные свойства в GaAs и AlGaAs [7, с. 147]. Цинк, по сравнению с магнием, имеет значительно большее парциальное давление паров — $4\cdot 10^{-15}\text{ мм рт. ст.}$ против $3,7\cdot 10^{-24}\text{ мм рт. ст.}$ Поэтому использование Zn при получении многослойных гетероструктур нежелательно из-за опасности загрязнения цинком через газовую фазу растворов-расплавов, содержащих донорную примесь. Таким образом, для получения слоев p -типа проводимости в составе многослойных структур при низких температурах ЖФЭ наиболее приемлемой примесью является магний. Однако, как показали исследования авторов [8], максимальная концентрация дырок в легированном магнием $\text{Al}_{0,65}\text{Ga}_{0,25}\text{As}$ не превышает 10^{18} см^{-3} . Приблизительно это же предельное значение концентрации дырок было получено и нами (рис. 2, кривая 1) при исследовании легирования магнием слоев $\text{Al}_{0,14}\text{Ga}_{0,86}\text{As}$, выращенных методом ЖФЭ в интервале температур $500\text{--}600^\circ\text{C}$ из галлиевых расплавов.

Таким образом, перед нами возникла задача получения при низких температурах эпитаксии сильнолегированных слоев твердых растворов $\text{Al}_{0,14}\text{Ga}_{0,86}\text{As}$ p -типа проводимости в составе tandemных гетероструктур. Одним из путей решения этой задачи является

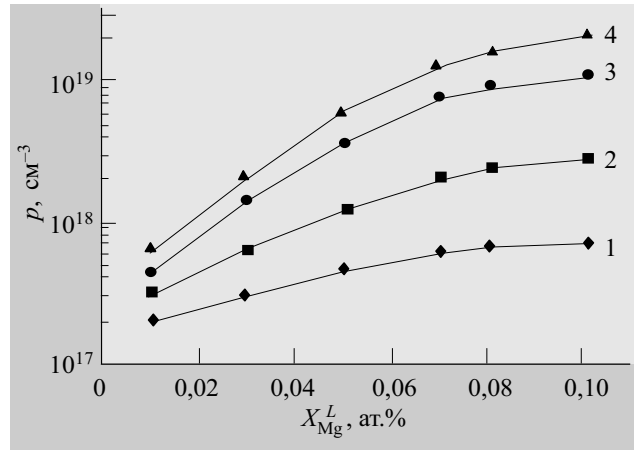


Рис. 2. Зависимость концентрации дырок (p) в слоях $p\text{-Al}_{0,14}\text{Ga}_{0,86}\text{As}$ от концентрации магния (X_{Mg}^L) и висмута в растворе-расплаве галлия:

1 — 0 ат.% Bi; 2 — 1 ат.% Bi; 3 — 2 ат.% Bi; 4 — 3,2 ат.% Bi

комплексное легирование полупроводников химическими элементами, оказывающими существенное влияние на перераспределение фоновых примесей по подрешеткам галлия и мышьяка. К таким примесям, как известно [9], относятся изовалентные элементы — висмут, индий, сурьма.

Нами был отработан режим наращивания слоев $p\text{-Al}_{0,14}\text{Ga}_{0,86}\text{As}$, легированных магнием и висмутом. Зависимость концентрации дырок в этих слоях от концентрации висмута и магния в расплаве галлия приведена на рис. 2. Как видно из рисунка, возрастание количества висмута от 1,0 до 3,2 ат.% в растворе-расплаве галлия приводит к увеличению концентрации дырок на порядок, достигая значения более $1\cdot 10^{19}\text{ см}^{-3}$. Для всех слоев $p\text{-Al}_{0,14}\text{Ga}_{0,86}\text{As}$, полученных из растворов-расплавов галлия с разным количеством висмута (рис. 2, кривые 2, 3, 4), наблюдается тенденция к насыщению уровня легирования при концентрациях магния в расплаве больше 0,08 ат.%. Однако, как показали наши эксперименты, при использовании многокомпонентных растворов-расплавов на основе Ga—Al—Bi в поршневых кассетах концентрация висмута не должна превышать 1—1,5 ат.%. Это обусловлено сильным влиянием добавок висмута на растворимость GaAs [10]. При смешивании галлий- и висмутсодержащих расплавов происходит образование нежелательных переходных эпитаксиальных слоев.

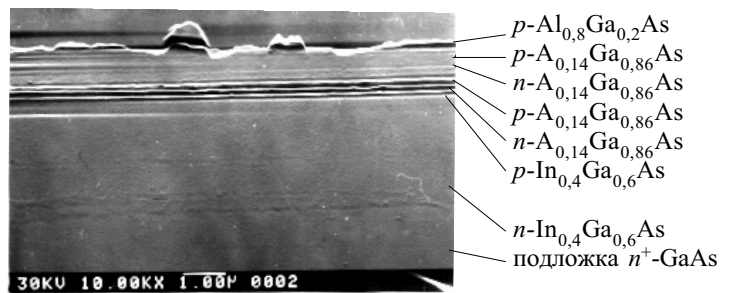


Рис. 3. Фотография поверхности скола многослойной tandemной гетероструктуры GaAs–InGaAs–AlGaAs

Полученные результаты по легированию слоев $p\text{-A}_{0,14}\text{Ga}_{0,86}\text{As}$ магнием при низких температурах были использованы при получении многослойной гетероструктуры для фотопреобразователей солнечной энергии.

На рис. 3 показана фотография поверхности скола многослойной тандемной гетероструктуры GaAs-InGaAs-AlGaAs, полученная с помощью растрового электронного микроскопа. Использование низких температур роста позволило воспроизводимо получить тонкие ($\sim 0,1$ мкм) слои $n\text{-A}_{0,14}\text{Ga}_{0,86}\text{As}$ и $p\text{-A}_{0,14}\text{Ga}_{0,86}\text{As}$, образующие туннельный диод, а использование комплексного легирования висмутом и магнием — достичь уровня легирования в p -слое выше $1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

Таким образом, проведенная работа с использованием низкотемпературной ЖФЭ позволила получить многослойные тандемные гетероструктуры, пригодные для изготовления на их основе фотопреобразователей солнечной энергии.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Николаенко Ю. Е., Вакив Н. М., Круковский С. И. и др. Состояние и тенденции развития твердотельных фотопреобразователей солнечной энергии // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2001.— № 3.— С. 21—30.

2. Андреев В. М., Хвостиков В. П., Ларионов В. Р. и др. Высокоэффективные концентраторные (2500 солнц) AlGaAs/GaAs-солнечные элементы // ФТП.— 1999.— Т. 33, вып. 9.— С. 1070—1072.

3. Андреев В. М. Гетероструктурные солнечные элементы // Там же.— С. 1035—1038.

4. Yamaguchi Masafumi. Physics and technologies of super-high-efficiency tandem solar cells // Там же.— С. 1054—1058.

5. Martin A. Green, Keith Emery, Klaus Bucher et al. Solar cell efficiency tables (Version 9) // Progress in Photovoltaics: Research and Applications.— 1997.— Vol. 5.— P. 51—54.

6. Lawrence L. Kazmerski. Photovoltaics: a review of cell and module technologies // Renewable and Sustainable Energy Reviews.— March/ June 1997.— Vol. 1, N 1/2.— P. 71—170.

7. Шишияну Ф. С. Диффузия и деградация в полупроводниковых материалах и приборах.— Кишинев: Штиинца, 1978.

8. Ларионов В. Р., Минтаиров А. М., Смекалин К. Е. и др. Кристаллизация и легирование квантово-размерных слоев AlGaAs / Тез. докл. V Всесоюз. конф. по физическим процессам в полупроводниковых гетероструктурах.— Калуга, 1990.

9. Куницын А. Е., Новиков С. В., Чалдышев В. В. и др. Анализ спектров фотолюминесценции слоев GaAs, выращенных из Ga-Bi растворов-расплавов // ФТП.— 1995.— Т. 29, вып. 11.— С. 2088—2091.

10. Якушева Н. А., Чикичев С. И. Растворимость арсенида галлия в висмут-галлиевых расплавах // Изв. АН СССР. Неорган. материалы.— 1987.— Т. 23, № 10.— С. 1607—1609.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ. СИМПОЗИУМЫ

Труды третьей международной научно-практической конференции **«Современные информационные и электронные технологии»**.— Одесса: «Нептун-Технология», 2002.— 248 с.

В Трудах 3-й МНПК «СИЭТ-2002» опубликованы рефераты докладов, подготовленных учёными и специалистами Азербайджана, Беларуси, Грузии, Литвы, Молдовы, Польши, России, Турции, Узбекистана, Украины, Югославии.

«Труды» содержат материалы пленарного заседания и секций «Сигналопреобразующие телекоммуникационные технологии», «Прогрессивные информационные технологии», «Компьютерные технологии создания электронной аппаратуры», «Прогрессивные технологии создания материалов и изделий электронной техники».

«Труды» можно заказать по адресу:

Украина, 65028, Одесса,
ул. Б. Хмельницкого, 59,
ДП «Нептун-Технология».

Цена одного экземпляра эквивалентна 5 дол. США.

В соответствии с решением 3-й МНПК "СИЭТ-2002" проведение очередной конференции планируется в 2003 г. Предложения по ее организации можно направлять в адрес редакции журнала "ТКЭА".

