

06;08;07

Акустостимулированное расширение коротковолнового диапазона спектральной чувствительности AlGaAs/GaAs-солнечных элементов

© *Е.Б. Заверюхина, Н.Н. Заверюхина, Л.Н. Лезилова,
Б.Н. Заверюхин, В.В. Володарский, Р.А. Муминов*

Национальный университет Узбекистана, Ташкент

E-mail: k4685@rambler.ru

Физико-технический институт НПО „Физика–Солнце“ АН РУз, Ташкент

E-mail: oybtm@physic.uzsci.net, boris.zav@sarkor.uz

ЗАО „ПСП“, Калужская область, Россия

Поступило в Редакцию 25 мая 2004 г.

В окончательной редакции 10 августа 2004 г.

Исследуется влияние ультразвуковых волн на спектральную чувствительность AlGaAs/GaAs-солнечных элементов. Обнаружено, что облучение ультразвуковыми волнами варизонного $Al_{1-x}Ga_xAs$ -слоя, легированного цинком, приводит к формированию поверхностного слоя, чувствительного к электромагнитному излучению для длин волн $\lambda < 0.551 \mu m$. Показано, что такой слой образуется в результате акустостимулированной диффузии цинка из слоя в глубь образца. Отмечается, что наблюдаемое расширение коротковолнового диапазона спектральной чувствительности, увеличение эффективности собирания неравновесных носителей заряда в AlGaAs/GaAs-солнечных элементах связаны с улучшением дефектной структуры кристалла и перераспределением в ней атомов примеси под действием ультразвука.

Проблема целенаправленного изменения физических свойств полупроводниковых материалов путем внешних воздействий является актуальной задачей физики полупроводников. Хорошо известно, что одним из таких видов внешних воздействий являются ультразвуковые волны (УЗВ), прохождение которых через полупроводник изменяет его свойства, в частности оптические [1].

Целесообразность дальнейших исследований влияния УЗВ на характеристики полупроводниковых приборов связана с указанной выше проблемой.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование влияния УЗВ на спектральные характеристики солнечных элементов (СЭ) на основе арсенида галлия. Проведенные исследования являются логическим продолжением работы [1], где было показано, что в зависимости от параметров УЗВ происходит изменение спектрального коэффициента отражения базовых материалов фотоэлектроники — кремния и арсенида галлия. В настоящее время практически отсутствуют данные по исследованию влияния УЗВ на характеристики солнечных элементов на основе арсенида галлия. Существующие работы показывают позитивные изменения характеристик солнечных элементов из поликристаллического кремния [2,3].

Арсенид галлия обладает относительно большим коэффициентом оптического поглощения, более широкой запрещенной зоной и высокими подвижностями носителей заряда по сравнению с кремнием, что позволяет изготавливать из него солнечные элементы с повышенными значениями коэффициента полезного действия η . Теоретический предел величины η солнечных элементов на основе GaAs в условиях солнечного освещения AM1 составляет более 30%. Наиболее распространенной структурой, используемой для создания солнечных элементов на основе GaAs с $\eta \geq 17\%$ при AM1, является гетероструктура типа n^+ -GaAs- n -GaAs- p -GaAs- p -Al_xGa_{1-x}As, изготавливаемая относительно простым методом жидкофазной эпитаксии [4,5].

Исследованные нами AlGaAs/GaAs-солнечные элементы изготавливались следующим образом. В качестве подложек для эпитаксиального выращивания слоев использовались монокристаллические пластины арсенида галлия n -типа толщиной $d = 350-400 \mu\text{m}$, легированные оловом (n^+ -GaAs(Sn)) до концентрации $N \sim (1.5-3) \cdot 10^{18} \text{cm}^{-3}$. Пластины были ориентированы в плоскостях [111]. Эпитаксиальный слой n -GaAs(Sn) имел толщину $d = 12 \div 14 \mu\text{m}$ и концентрацию электронов $N_e = (2-5) \cdot 10^{17} \text{cm}^{-3}$, диффузионный слой p -GaAs толщиной $0.8 \div 1.5 \mu\text{m}$, полученный диффузией цинка из жидкой фазы, имел концентрацию дырок $p = 6 \cdot 10^{17} - 4 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-3}$. Фронтальный слой p -Al_{1-x}Ga_xAs толщиной $l = 0.7 \div 4.5 \mu\text{m}$ был легирован цинком до концентраций $(1-3) \cdot 10^{18} \text{cm}^{-3}$ при величине $x = 0.3 \div 0.8$. Просветляющие покрытия формировались путем анодного окисления поверхности

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -слоя. Омические контакты определенной конфигурации были получены методами фотолитографии и электрохимического осаждения серебра и никеля. Площади M „входного“ окна исследуемых $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ -солнечных элементов составляли от 0.25 до 2.25 cm^2 .

Измерения характеристик $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ -солнечных элементов проводились с помощью имитатора солнечного излучения при условиях, соответствующих АМ1.5 и мощности светового потока $S = 850 \text{ W/m}^2$.

Методика исследования заключалась в том, что проводились измерения фотоэлектрических характеристик $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ -солнечных элементов до и после облучения ультразвуковыми волнами. Монохроматическое электромагнитное излучение падало на поверхность широкозонной стороны $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -слоя, выступавшего в роли „входного“ окна. $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ -солнечные элементы облучались продольными ультразвуковыми волнами в диапазоне частот $f = 0.8\text{--}25 \text{ MHz}$ и мощностью $P = 0.1 \div 5 \text{ W/cm}^2$ со стороны „входного“ окна в течение времени $t = 15\text{--}60 \text{ min}$. Звукопроводом между пьезопреобразователем, электрически соединенным с ультразвуковым генератором, и $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ -солнечным элементом являлась жидкость. В общей сложности были исследованы 30 $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ -солнечных элементов, которые облучались ультразвуковыми волнами при различных значениях f , P и t . Было обнаружено, что наиболее заметное улучшение характеристик наблюдалось для группы $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ -солнечных элементов, которые были облучены ультразвуковыми волнами $f \geq 15 \text{ MHz}$, $P < 1 \text{ W/cm}^2$ и $t > 45 \text{ min}$. На рис. 1 и в таблице приведены результаты исследований спектральной характеристики и функциональных характеристик типичного представителя из данной группы $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ -солнечных элементов № 13 с толщиной $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -слоя $l = 4 \mu\text{m}$ ($x = 0.4$) до и после облучения его ультразвуковыми волнами частотой $f = 25 \text{ MHz}$ и мощностью $P = 0.25 \text{ W/cm}^2$ в течение времени $t = 65 \text{ min}$.

Обратимся к результатам, представленным в таблице и на рис. 1 и 2. Особенности спектральной характеристики, измеренной до облучения ультразвуковыми волнами солнечного элемента, являются присутствие максимума при $\lambda = 0.775 \mu\text{m}$ (энергия фотонов $E_{ph} = 1.6 \text{ eV}$) и плавное уменьшение фотоответа A в интервале $\lambda = 0.775 \div 0.563 \mu\text{m}$, а также уменьшение величины A при $\lambda = 0.775 \div 0.892 \mu\text{m}$ ($E_{ph} = 1.6 \div 1.390 \text{ eV}$). Положение максимума в области энергий фотонов больше, чем ширина запрещенной зоны GaAs , указывает на то, что $p\text{-}n$ -переход расположен в AlGaAs -слое. Падение

Параметры AlGaAs/As-солнечного элемента, № 13 при $T = 293$ К, АМ-1.5, $S = 850$ W/m ² ; $M = 0.25$ cm ²	До облучения ультразвуковыми волнами	После облучения ультразвуковыми волнами
Ток короткого замыкания I_{SC} , mA/cm ²	20.84	22
Напряжение холостого хода V_{OC} , V	0.942	0.946
Коэффициент заполнения вольт-амперной характеристики ff	0.75	0.75
Коэффициент полезного действия η , %	17.32	18.36
Диапазон спектральной чувствительности λ , μ m	0.534–0.900 μ m	0.466–0.900 μ m

величины A в длинноволновом диапазоне $\lambda > 0.775$ μ m спектра в основном связано с уменьшением диффузионной длины дырок L_p , зависящей от присутствия дефектов различной природы. Как известно, в варизонных твердых растворах существуют встроенные электрические поля, способствующие более полному и быстрому сбору носителей заряда на электрические контакты [7,8]. Отклонение вида спектральной зависимости (фотоответа) от прямоугольной формы, проявляющееся в виде плавного уменьшения величины A в интервале $\lambda = 0.775 \div 0.563$ μ m указывает, что существующий градиент внутренних электрических полей в p -Al_xGa_{1-x}As-слое не способствует быстрому дрейфу и полному сбору неравновесных электронов. Анализ амплитуды сигналов „ k “ AlGaAs/GaAs-солнечных элементов, работавших в качестве приемников импульсного излучения с $\lambda = 0.700$ μ m [9,10], позволил обнаружить центры захвата и рекомбинации в их чувствительной области. Медленное нарастание зависимости $k(V) \sim V^{1/2} < 1$ (V — напряжение смещения) указывало на присутствие таких центров. Присутствие электрически активных центров приводит к ослаблению варизонного электрического поля и увеличению вероятности захвата носителей. В работе [11] показано, что из-за наличия ловушек в чувствительной области приемников излучения образуются участки, где электрические поля отсутствуют либо малы. В результате происходит сильный захват неравновесных носителей и может возникнуть эффект поляризации (уменьшение фоточувствительности, падение амплитуды сигнала) приемника излучения. По этой же причине (присутствие ловушек) в данном

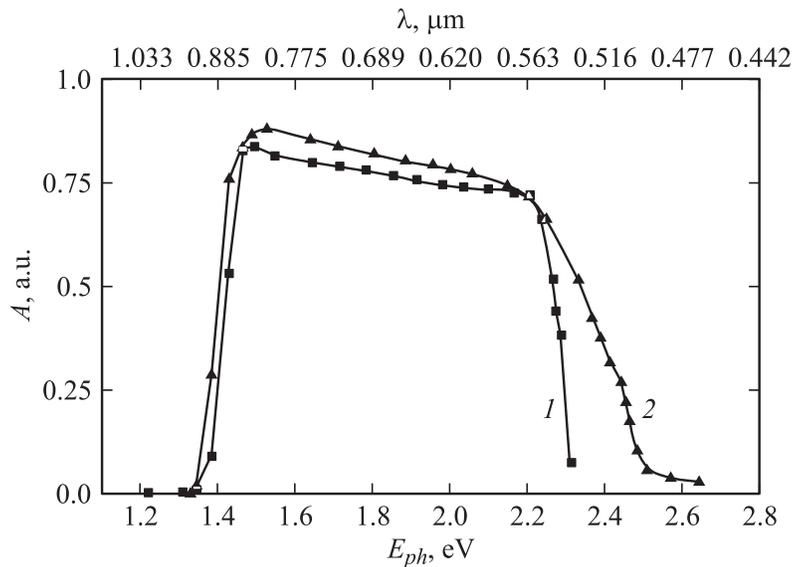


Рис. 1. Спектральные характеристики фоточувствительности AlGaAs/GaAs-солнечного элемента № 13 от энергии падающих фотонов до (1) и после (2) ультразвукового воздействия. $T = 293$ К.

случае происходит ослабление встроенного электрического поля и, как следствие, захват неравновесных носителей в p -Al_xGa_{1-x}As-слое и уменьшение амплитуды фотоответа (A).

Одной из причин увеличения тока короткого замыкания I_{SC} является подавление (нейтрализация) ультразвуком центров захвата и рекомбинации в чувствительной области, где происходит генерация носителей [12], что демонстрируется возрастанием фотоответа в интервале $\lambda = 0.775 \div 0.563 \mu\text{m}$ и появлением последнего в интервале $\lambda = 0.551 \div 0.466 \mu\text{m}$. На рис. 1 (кривая 2) показано такое акустостимулированное расширение спектральной чувствительности. Расширение фотоответа в длинноволновой части спектрального диапазона ($\lambda > 0.849 \mu\text{m}$) является менее заметным. Акустостимулированный эффект появления фотоответа для $\lambda > 0.849 \mu\text{m}$ наблюдался в каскадном GaAs-солнечном элементе в результате нейтрализации ультразвуком

центров захвата и рекомбинации в его узкозонном GaAs-фотопреобразователе [13].

Обычно расширение спектральной чувствительности $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ -солнечных элементов в коротковолновой области спектра достигается: а) увеличением компоненты x в твердом растворе $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ и б) уменьшением толщины $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -слоя [6]. В проводимых нами экспериментах ультразвуковое воздействие на $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -солнечные элементы не может изменить величину x и толщину эпитаксиального $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -слоя. Поэтому мы считаем, что акустостимулированное появление фотоответа в коротковолновой части спектрального диапазона $\lambda < 0.551 \mu\text{m}$ является следствием в основном трех эффектов.

Эффект 1. Возникновение приповерхностных фоточувствительных $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -слоев с повышенным удельным сопротивлением ρ по сравнению с объемом $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -слоя в результате акустостимулированной диффузии цинка Zn с поверхности в глубь этого слоя.

Возможность появления этого эффекта вытекает из следующих соображений и подтверждается экспериментами по диффузии цинка в ультразвуковом поле, которое излагается ниже.

Известно, что с увеличением энергии фотонов E_{ph} место генерации неравновесных носителей заряда смещается к поверхности широкозонного „входного“ окна $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, вблизи которой, как и в полупроводниковых детекторах ядерных излучений, существуют нечувствительные к ионизирующему излучению „мертвые“ слои [14]. Наличие таких „мертвых слоев“ является проблемой даже в технологии изготовления приемников ядерных излучений, которая является более прецизионной по сравнению с технологией солнечных элементов, так как она преследует цель создания устройств для регистрации излучений по интенсивностям, значительно уступающим солнечному излучению. Принцип работы $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ -солнечных элементов основан на тех же физических процессах, происходящих в них, что и в указанных приемниках ядерного излучения (генерация, дрейф и сбор неравновесных носителей заряда на электрические контакты устройства). Поэтому солнечные элементы можно рассматривать как приемники электромагнитного излучения, имеющие все присущие им недостатки (потери носителей заряда, дефекты структуры кристалла, „мертвые“ слои и т.д.).

Проведенный анализ показал, что отсутствие фотоответа (фоточувствительности) $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -солнечных элементов при $\lambda < 0.551 \mu\text{m}$

(рис. 1, кривая 1) обусловлено высокой проводимостью σ приповерхностного слоя широкозонной стороны „входного“ окна $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, на которую падает электромагнитное излучение. Концентрация цинка N_{Zn} в этом приповерхностном слое толщиной $L \leq 0.1 \div 0.15 \mu\text{m}$, измеренная на контрольных образцах рентгеновским микроанализатором „Joel JSM 5910 LV“ в $2 \div 4$ раза больше, чем в объеме $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -слоя. Такой градиент N_{Zn} возникает в технологическом процессе изготовления AlGaAs/GaAs-солнечных элементов и приводит к формированию насыщенных цинком субмикронных приповерхностных слоев, не чувствительных („мертвые“ слои) к электромагнитному излучению с $\lambda < 0.551 \mu\text{m}$. Появление фотоответа можно получить путем уменьшения величины σ этого не фоточувствительного слоя (подобная задача по созданию высокоомной чувствительной к излучению области приемников ядерного излучения решается путем внедрения атомов лития в $p\text{-Si}$ [14]). Снижение проводимости этого поверхностного слоя приведет к возникновению в нем дополнительного варизонного электрического поля E_v того же знака, что и в $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -слое. Появление такого дополнительного слоя с варизонным E_v полем означает расширение чувствительной области AlGaAs/GaAs-солнечного элемента в сторону поверхности, что должно привести к появлению фотоответа для фотонов с $E_{ph} > 2.25 \text{ eV}$ ($\lambda < 0.551 \mu\text{m}$). Появление такого фотоответа для фотонов с $E_{ph} > 2.25 \text{ eV}$ нами наблюдалось в исследованных AlGaAs/GaAs-солнечных элементах после облучения их ультразвуком (рис. 1, кривая 2) и свидетельствовало об акустостимулированном возникновении приповерхностных фоточувствительных слоев $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (исчезновение „мертвых“ слоев) вблизи поверхности „входного“ окна. Экспериментальные измерения концентрации цинка в контрольных образцах с толщиной $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ слоев до $50 \mu\text{m}$, имевших тот же состав $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -слоев и величину N_{Zn} , что и исследуемые AlGaAs/GaAs-солнечные элементы, показали уменьшение величины N_{Zn} в $3 \div 5$ раза в приповерхностных слоях толщиной до $1 \mu\text{m}$ после обработки их ультразвуком в течение времени $t = 240\text{--}360 \text{ min}$ и более. Измерения концентрации введенной примеси (цинк) в контрольных образцах, как и в работе [1], проводилось методом послыонного травления и на рентгеновском микроанализаторе. Параметры ультразвуковых волн (f, P), облучавших AlGaAs/GaAs-солнечные элементы и контрольные образцы, были одинаковыми. Таким образом, эффект возникновения приповерхностных фоточувствительных

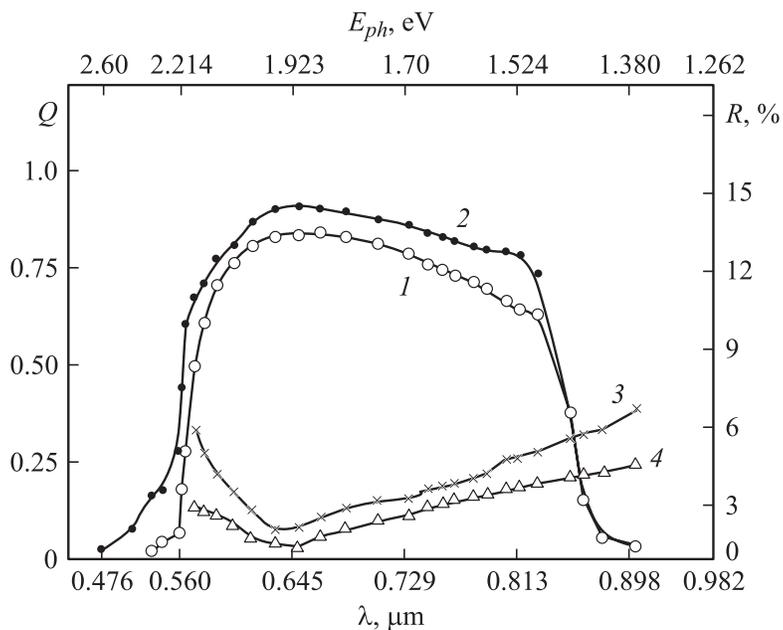


Рис. 2. AlGaAs/GaAs-солнечный элемент № 13: спектральное распределение коэффициента собирания носителей заряда Q до (1) и после (2) ультразвукового воздействия; коэффициент отражения R до (3) и после (4) ультразвукового воздействия. $T = 293 \text{ K}$.

$p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -слоев связан с акустостимулированной диффузией цинка от поверхности в глубь $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -слоя. Теоретические исследования влияния ультразвуковых волн на процессы диффузии атомов примеси в полупроводниках проведены одним из авторов [15].

Эффект 2. Акустостимулированный распад скоплений атомов примеси.

Существование этого эффекта подтверждается характером поведения спектральной зависимости коэффициента собирания неравновесных носителей заряда $Q(\lambda)$, измеренного в спектральном диапазоне $\lambda = 0.448 \div 0.982 \mu\text{m}$. Рис. 2 демонстрирует влияние ультразвуковой обработки на спектральное распределение коэффициента собирания носителей $Q(\lambda)$ в области коротких длин волн $\lambda < 0.532 \mu\text{m}$. Как видно из

этого рисунка, наблюдается расширение спектральной чувствительности от $\lambda = 0.532 \mu\text{m}$ (рис. 2, кривая 1) до $\lambda = 0.476 \mu\text{m}$ (рис. 2, кривая 2) и общий рост величины (амплитуды) $Q(\lambda)$ после ультразвуковой обработки. Это свидетельствует о том, что наряду с акустостимулированной диффузией цинка произошел отжиг рекомбинационных центров [16] и распад скоплений примесных атомов, как и в работе [17]. Полученные нами [18] и авторами работы [17] данные показывают, что в этом случае происходит увеличение подвижности носителей заряда μ . Рост дрейфовой скорости за счет повышения μ приводит к уменьшению вероятности захвата носителей ловушками и соответственно к увеличению эффективности сбора последних. Наконец, влияние ультразвука на спектр локальных состояний в гетероструктурах на основе GaAs также изучалось в работе [19], где было отмечено, что ультразвуковая обработка образцов приводит к пространственной и химической упорядоченности приконтактных областей. Результаты этих исследований по перестройке дефектной подсистемы кристалла в ультразвуковых полях в принципе согласуются с нашими данными, также показывающими, что происходит улучшение дефектной структуры приповерхностных областей солнечных элементов на основе A^3B^5 -соединений. Такое изменение приповерхностных областей под влиянием ультразвука и обуславливает наблюдаемое расширение спектральной чувствительности в область коротких длин волн, а также увеличение эффективности собирания носителей заряда.

Эффект 3. Изменение характера отражения электромагнитного излучения от $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -слоя после обработки его ультразвуком.

Ранее было обнаружено, что ультразвук приводит к перестройке системы активных фотоэлектрических дефектов в полупроводнике [20] и изменяет его оптические свойства [1]. В данной работе также проводилось исследование влияния ультразвуковых волн на оптический коэффициент отражения R $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -слоя контрольных образцов. Толщина и состав этого слоя были одни и те же, что и у исследованных солнечных элементов. Измерение R проводилось по методике, описанной в [1]. Эксперимент показал, что облучение образцов ультразвуковыми волнами ($f = 20 \text{ MHz}$, $P = 0.25 \text{ W/cm}^2$) в течение $t = 60 \text{ min}$ и более начинало приводить к уменьшению коэффициента R (рис. 2, кривая 3 до и кривая 4 после облучения ультразвуком образца). Наблюдаемый эффект уменьшения R можно объяснить, исходя из представлений об акустостимулированной диффузии атомов примеси,

изложенных ранее [1,15]. В результате акустостимулированной диффузии атомов цинка от поверхности в глубь $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -входного „окна“ его поверхностные слои становятся менее „металлизированными“ и коэффициент R уменьшается. Смещение минимума зависимости $R(\lambda)$ ($\lambda = 0.630 \mu\text{m}$) в область более длинных волн ($\lambda = 0.645 \mu\text{m}$) после ультразвуковой обработки указывает на понижение концентрации цинка вблизи поверхности образца. Соответственно в результате изменения состава и структуры поверхностного слоя „окна“ меняются и другие его оптические характеристики [7,20] (оптические коэффициенты поглощения, пропускания, преломления). Уменьшение коэффициента отражения и соответственно рост коэффициента поглощения в этом случае должны также сопровождаться появлением и усилением фотосигнала в определенном интервале длин волн, что и наблюдается в эксперименте. Точное определение оптических видов потерь и разделение потерь на отражение и поглощение не входило в рамки данных исследований.

Эффект увеличения амплитуды фоточувствительности A солнечного элемента в интервале $\lambda = 0.775 \div 0.563 \mu\text{m}$ (рис. 1, кривая 2) и коэффициента собирания Q (рис. 2, кривая 2) связан с нейтрализацией центров захвата и рекомбинации в $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -слое после облучения его ультразвуковыми волнами. Анализируя такое изменение амплитуды сигнала A и коэффициента собирания Q , можно утверждать, что, как и в случаях [12–20], произошла акустостимулированная перестройка дефектов, приведшая к нейтрализации ловушек и к сглаживанию потенциального рельефа электрического поля в объеме фоточувствительной области солнечного элемента. В этом случае, как следствие этого факта, происходит более полный сбор неравновесных носителей на электрические контакты устройства. Переход зависимостей типа $A \sim V^{n < 1}$ в зависимости $A \sim V^{n > 1}$ после облучения солнечных элементов ультразвуковыми волнами подтверждает данный вывод.

Следует указать и на возможность существования другого эффекта — акустостимулированного изменения свойств анодного окисла, что также может изменять характеристики фоточувствительных структур. Действительно, свойства окислов могут изменяться под действием ультразвука. В работе [21] было показано, что в системах металл–диэлектрик–полупроводник ультразвуковая обработка уменьшает величину встроенного заряда в диэлектрик и уменьшает величины заряда поверхностных состояний. Следовательно, электромагнитная волна, проходя через такой облученный ультразвуком диэлектрик, будет иметь

уже другие коэффициенты отражения R и преломления Ψ , чем до облучения. При этом естественно должны измениться и характеристики фоточувствительных структур. Мы проверили возможность акустостимулированного изменения R и Ψ , а также и электрических характеристик тестовых окислов. Эксперименты показали, что происходит изменение указанных характеристик при частотах ультразвуковых волн $f > 50$ MHz, которые в описанных выше экспериментах по облучению ультразвуком солнечных элементов нами не применялись. Это дает основание полагать в нашем случае, что акустостимулированный эффект изменения оптических свойств анодных окислов либо мал, либо отсутствует.

Таким образом, улучшение функциональных характеристик облученных ультразвуком AlGaAs/GaAs-солнечных элементов (см. таблицу) связано с возникновением в них остаточных явлений (перераспределение атомов примеси, образование электрически неактивных дефектов и т.д.).

Заключение.

1. Облучение ультразвуковыми волнами мощностью $P < 1$ W/cm² и частотой $f > 15$ MHz твердых варизонных растворов p -Al_xGa_{1-x}As, легированных цинком, приводит к уменьшению концентрации цинка в приповерхностном слое раствора в результате диффузии цинка от поверхности в глубь образца.

2. Образовавшийся приповерхностный слой, обедненный цинком, становится чувствительным к электромагнитному излучению с длиной волны $\lambda < 0.551$ μm вследствие изменения характера отражения и поглощения излучения. Варизонное электрическое поле этого слоя стимулирует эффективное собирание неравновесных носителей заряда, генерируемых фотонами в слое, и обеспечивает появление фотоответа для фотонов с энергией $E_{ph} > 2.25$ eV.

3. Облучение ультразвуковыми волнами мощностью $P \leq 1$ W/cm² и частотой $f \geq 15$ MHz AlGaAs/GaAs-солнечных элементов приводит к увеличению эффективности собирания неравновесных носителей заряда за счет улучшения дефектной структуры приповерхностных областей, что также приводит к расширению коротковолнового диапазона спектральной чувствительности до длин волн $\lambda = 0.476$ μm.

4. Хотя результаты улучшения ультразвуком характеристик AlGaAs/GaAs-солнечных элементов не являются рекордными,

проведенные исследования показывают перспективность разработок акустических методов для повышения эффективности солнечных элементов из различных полупроводниковых материалов.

Авторы выражают благодарность Н.Н. Черникову (г. Москва) за помощь в исследованиях.

Список литературы

- [1] *Заверюхин Б.Н., Заверюхина Н.Н., Турсункулов О.М.* // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. В. 18. С. 1–12.
- [2] *Искандеров А., Кревчик В.Д., Муминов Р.А., Шадыбеков И.У.* // Гелиотехника. 1988. № 6. С. 19–22.
- [3] *Искандеров А., Кревчик В.Д., Муминов Р.А., Шадыбеков И.У.* // Гелиотехника. 1989. № 4. С. 25–28.
- [4] *Андреев В.М., Долгинов А.М., Третьяков Д.Н.* // Жидкофазная эпитаксия в технологии полупроводниковых приборов. М.: Сов. радио, 1975. 328 с.
- [5] *Заверюхин Б.Н., Искандеров А., Исмаилов Х.Х.* и др. // Гелиотехника. 1987. № 1. С. 11–14.
- [6] *Андреев В.М., Головнер Т.М., Каган М.Б.* и др. // ФТП. 1973. Т. 7. В. 12. С. 2289–2296.
- [7] *Именков А.Н., Назаров Н., Сулейманов Б.С.* и др. // ФТП. 1978. Т. 12. В. 12. С. 2377–2385.
- [8] *Алфёров Ж.И., Андреев В.М., Задиранов Ю.М.* и др. // Письма в ЖТФ. 1978. Т. 4. В. 18. С. 1128–1132.
- [9] *Еремин В.К.* Исследование влияния объемного заряда на свойства полупроводниковых детекторов ядерных излучений. Канд. дис. Л., 1978.
- [10] *Заверюхин Б.Н., Заверюхина Н.Н., Муминов Р.А.* // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. В. 5. С. 75–83.
- [11] *Еремин В.К., Строкан Н.Б., Тиснек Н.И.* // ФТП. 1975. Т. 9. В. 3. С. 530–534.
- [12] *Заверюхин Б.Н., Кревчик В.Д., Муминов Р.А.* и др. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 3. С. 525–528.
- [13] *Zaveryukhin B.N., Zaveryukhina N.N., Lezilova L.N., Zaveryukhina E.B.* // 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion 18th European PV Solar Energy Conference. May 11–18, 2003. Osaka, Japan, 3P-B5-38. P. 74.
- [14] *Дирли Дж., Нортрон Д.* Полупроводниковые счетчики ядерных излучений. М.: Мир, 1966. 359 с.
- [15] *Krevchik V.D., Muminov R.A., Yafasov A.Ya.* // Phys. Stat. Sol. (a). 1981. V. 63. P. K159–K162.

- [16] *Алаев А.А., Андреев В.М., Заверюхин Б.Н.* и др. // Фотоэлектрические явления в полупроводниках. Ашхабад, 1991. АН СССР, Научный совет по проблеме „Физика и химия полупроводников“. Тез. докл. 2-й Научной конференции. 23–25 апреля 1991 г. С. 221–222.
- [17] *Баранский П.И., Беляев А.Е., Комиренко С.М., Шевченко Н.В.* // ФТТ. 1999. Т. 32. В. 7. С. 2159–2161.
- [18] *Заверюхин Б.Н., Муминов Р.А., Заверюхина Н.Н.* и др. // Конференция „Фотоэлектрические явления в полупроводниках“. АН РУз, Научно-технологический центр Украины, Ташкент, 20–21 апреля 2004. С. 2–4.
- [19] *Ермолович И.Б., Миленин В.В., Конакова Р.В.* и др. // ФТП. 1997. Т. 31. В. 4. С. 503–508.
- [20] *Громашевский В.Л., Дякин В.В.* и др. // Укр. физ. журнал. 1984. Т. 9. В. 9. С. 550–554.
- [21] *Парчинский П.Б., Власов С.И., Муминов Р.А.* и др. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. В. 10. С. 40–45.