



## АКУСТОСТИМУЛИРОВАННОЕ ИЗМЕНЕНИЕ ДЕФЕКТНОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ДИФФУЗИОННЫХ Si – n – p – ДЕТЕКТОРОВ

Доцент Гаибов Абдумалик Гайбуллаевич, доцент Миркамилова Маргуба  
Сунатуллаевна, ст.пред. Джураев Уткир Эргашевич.  
Ташкентский Государственный технический университет

**Аннотация.** В настоящей работе проводится исследование процессов проникновения золота через легированные фосфором  $n^+$ -слои кремния под воздействием ультразвуковых волн частотой  $f = 1 \div 25$  МГц и мощностью (интенсивностью)  $I^* \leq 0,4 \div 0,5$  Вт/см<sup>2</sup>. Показано, что под воздействием ультразвуковых волн мощностью  $I^* \leq 0,4 \div 0,5$  Вт/см<sup>2</sup> при временах ультразвуковой обработки  $t < 30$  мин. приводит улучшение функциональных (спектральных) характеристик Si-приемников излучения и уменьшение скорости поверхностной рекомбинации. Ультразвук подавляет рекомбинационные центры в тонких приповерхностных слоях "входного" окна, (мертвых слоях) что вносит дополнительный вклад в эффективность собирания неравновесных носителей заряда.

Увеличение времени ультразвуковой обработки ( $t > 30$  мин) приводит к более глубокому проникновению золота в чувствительную (активную) область Si-приемников. В результате в ней возникают Au-дефекты и приводит ухудшение характеристик Si-приемников излучения.

**Ключевая слова.** Ультразвук, Si-приемников излучения, атомы золота, диффузия, термообработка, амплитуда сигнала.

**1. Введение.** При изготовления полупроводникового приемников излучения на поверхности "входного окна" Si-приемников излучения наносится тонкий слой золота толщиной « $d$ » до 300 Å, используемый в качестве фронтального контакта, и обработка ультразвуком Si-приемников происходит со стороны "входного окна", и поэтому представляет несомненный интерес изучить воздействие ультразвуковых волн на золотой контакт. Подобные исследования по воздействию ультразвуковой волны на кремний с алюминиевыми, медными и никелевыми контактами проводились в работ [1, 2, 3], где изучался акустостимулированный адгезионный эффект.

В настоящей работе проводится исследование процессов проникновения золота через легированные фосфором  $n^+$ -слои кремния под воздействием ультразвуковых волн частотой  $f = 1 \div 25$  МГц и мощностью (интенсивностью)  $I^* \geq 0,4$  Вт/см<sup>2</sup>. Как известно, золото широко применяется в полупроводниковой технологии для различных целей и образует глубокие уровни в кремнии [4, 5, 6]. Поэтому в рамки данной работы не входит детальное исследование поведения данного элемента и его возможностей изменять параметры кремния.

**2. Материал и метод.** Для изготовления Si-приёмников излучения (Si-ПИ) использовались слитки монокристаллического кремния  $p$ -типа с удельным сопротивлением  $\rho = (10 \div 14) \cdot 10^3 \Omega \text{см}$  и временем жизни неосновных носителей заряда



$\tau=450\div650$  мкс, а также и более низкоомные слитки p-Si с  $\rho\leq(2\div5)\cdot10^3\Omega\text{cm}$  и  $\tau=800\div1000$ мкс. Концентрация кислорода  $\text{No}_2$  составляла не более  $10^{16}\text{cm}^{-3}$  и плотность дислокаций  $N_D\sim10^4\text{cm}^{-2}$ . Слитки, имевшие форму цилиндра, разрезались на пластины толщиной до 0,5мм. Пластины имели площадь  $S$  от 0,25  $\text{cm}^2$  до 2,0 $\text{cm}^2$ . Si-пластины шлифовались с обеих сторон абразивным порошком M15. После соответствующей химической обработки на одну из сторон Si-пластин напылялся алюминий (Al) толщиной  $l\approx0,45\text{мкс} \div 0,5\text{мкс}$ , при данной технологической процедуре края Si-пластины были защищены маской. После этого на другую сторону Si-пластины наносился раствор пятиоксида фосфора  $\text{P}_2\text{O}_5$  и проводилась сушка данного покрытия. Следующей технологической операцией являлся процесс диффузии фосфора в Si-пластины. Образцы, расположенные в кварцевых кассетах помещались в диффузионную печь. Диффузия фосфора проводилась при температуре  $T = 1073\text{K}$  в потоке инертного газа в течение времени  $t = 60$  минут. Затем температура медленно понижалась до комнатной. Алюминий, осажденный на Si-пластину, сплавляется с ней при  $T\approx820\text{K}$  и затем, диффундируя из расплава в объем Si-пластины, образует сильнолегированный  $p^+$ -слой кремния. После охлаждения Si-пластинка проходит ряд химико-технологических операций по очистке и удалению фосфорносиликатного стекла на  $p^+$ -слое, полученного диффузией фосфора. До изготовления тыльного металлического контакта к Si-подложке на  $p^+$ -слой тестовой  $p^+$ -р-диодной структуры при температуре  $T = 300\text{K}$  напылялся слой золота толщиной 1000 Å, после чего проводилась термообработка структур при  $T = 400\text{ K}$  в течении  $t = 10\text{с} \div 10\text{мин}$ . Концентрация золота  $N_{\text{Au}}$ , измеренная методом нейтронно-активационного анализа, составляла порядка  $N_{\text{Au}} \approx (4\div5)10^{10}\text{ cm}^{-3}$ .

Вторая группа тестовых структур с золотым слоем на  $p^+$  слое подобной термообработке не подвергалась. Исследования электрофизические характеристики групп, и было обнаружено, что вторая группа приемников излучения (не подвергнутых термообработке), имевшая обозначение Si-ПИ-W, обладает более высокими (лучшими) характеристиками, чем группа приемников, прошедших термообработку и обозначенных как Si-ПИ-P.

### 3. Результаты и их обсуждение

Было показано, что причиной ухудшения характеристик и возникновение эффектов поляризации связано с существованием локальных скоплений примесных атомов в активной области Si-приемников излучения. Природа этих скоплений, как показал анализ амплитудных характеристик Si-приемников, по всей видимости, связана с присутствием золота. На рис.1, показаны спектральные линии и формы зарядовых импульсов для двух групп Si-n-p-приемников подвергнутых (Si-ПИ-P) и не подвергнутых (Si-ПИ-W) термообработке при  $T=400\text{ K}$  в течение 10с. Наблюдаемое различие (появление дублетов и более длинные фронты зарядовых импульсов), надо полагать, связано с диффузией золота в чувствительную (активную) область Si-приемников излучения из золотого контакта на входном окне. После измерения спектральных и электрофизических характеристик проводился ряд ультразвуковых обработок (УЗО) образцов групп Si - ПИ -P и Si-ПИ-W в диапазоне частот  $f=0,8\div15\text{ МГц}$  и мощности  $I^*=0\div5\text{Вт/см}^2$  при температуре  $T = 300\text{K}$ .





Ультразвуковая волна падала на Au-слой. Каждая из групп Si-ПИ-Р и Si-ПИ-В была разделена на две партии, одна из которых была контрольной. Спектральные линии, амплитуда сигнала Si-приемников и изменение концентрации золота  $N_{Au}$  в  $n^+$ -слоях контрольных образцов Si измерялись рентгенометрическим методом анализа тонких слоев [7].

При этом использовался рентгеновский микроанализатор марки "JOEL" JSM 5910 LV-Japan, позволявший определять компонентный состав исследуемых тонких полупроводниковых слоев. Характеристические излучения Au возбуждались источниками мягкого  $\gamma$ -излучения  $^{109}\text{Cd}$ , рентгеновского излучения  $^{241}\text{Am}$  и регистрировались полупроводниковым детектором, имевшим величину энергетического разрешения  $R = 300$  эВ.

Концентрация  $N_{Au}$  измерялась до и после УЗО в  $n^+$ -слоях образцов через интервал времени  $t=60$  минут и результаты эксперимента представлены на рис.2. Измерялись также после ультразвуковой обработки амплитуды сигналов и проводился анализ форм спектральных линий, затем процесс проведения УЗО, измерения характеристик приемников и распределения концентрации  $N_{Au}$  повторялись.

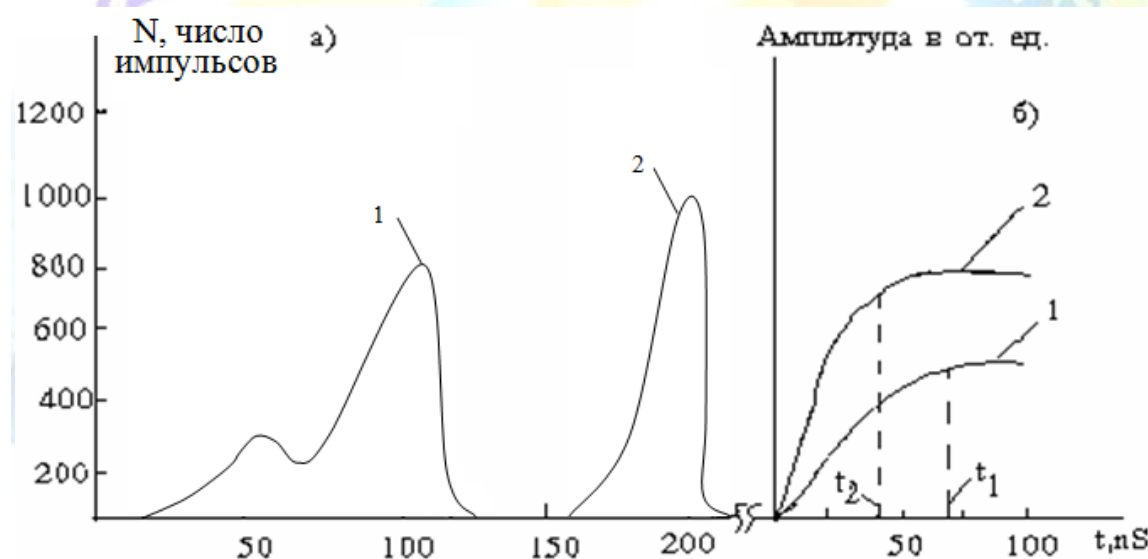


Рис. 1. Формы спектральных  $\alpha$ -линий от изотопа  $^{241}\text{Am}$  (а) и зарядовых импульсов (б) Si-n-p-детекторов двух групп:  $T=300\text{K}$ ,  $E=500\text{ V/cm}$ .

Группа 1 (Si-ПИ-Р детекторы). Структуры детекторов в процессе изготовления были подвергнуты термообработке (кривые 1);

Группа 2 (Si – ПИ – W- детекторы). Структуры детекторов не подвергались термообработке. Спектральная линия детектора 1-ой группы имеет дублет, малую амплитуду и большее время-нарастания  $t_1$ , чем детектор Si-ПИ- W из второй группы. Различие характеристик обусловлено присутствием золота в чувствительной области детектора Si-ПИ-Р и отсутствием Au в чувствительной области Si-ПИ-W

Было обнаружено, что:



1. Во всех образцах Si-ПИ-Р, которые были предварительно подвергнуты термообработке при  $T=400\text{K}$ , концентрация  $N_{\text{Au}}$  в  $n^+$ -слоях после ультразвукового воздействия возрастает в глубь  $n^+$ -слоя и превышает на несколько порядков первоначальное значение  $N_{\text{Au}} \approx 4,5 \cdot 10^{11} \text{cm}^{-3}$  (рис. 2.);

2. Во всех образцах группы Si-ПИ-Р, предварительно подвергнутых термообработке, после УЗО наблюдалось ухудшение форм спектральных линий, уменьшение амплитуды сигналов и возникновение эффектов поляризации (рис.3.). Контрольные образцы группы Si-ПИ-Р, не обработанные ультразвуком, имели более высокие функциональные характеристики и в них не возникал эффект поляризации.

Сканирование коллимированным пучком  $\alpha$ -частица по входному окну чувствительной (активной) области, позволило обнаружить в неконтрольных образцах крупномасштабные неоднородности, которых ранее не было.

3. Над образцами группы Si-ПИ-В операции по термообработке не проводились. После прохождения через них УЗО с мощностью  $I^* \leq 2 \text{ Вт/см}^2$  и  $f = 15 \text{ МГц}$  в течение  $t = 30 \text{ мин}$  наблюдалось улучшение их функциональных характеристик в среднем  $\approx 5\% \div 7\%$ . Увеличение концентрации  $N_{\text{Au}}$  в  $n^+$ -слоях при этом не наблюдалось. При временах ультразвуковой обработки  $t$  больше 3 часов и неизменных параметрах характеристики приемников начинали ухудшаться и в  $n^+$ -слоях начинала повышаться концентрация  $N_{\text{Au}}$ .

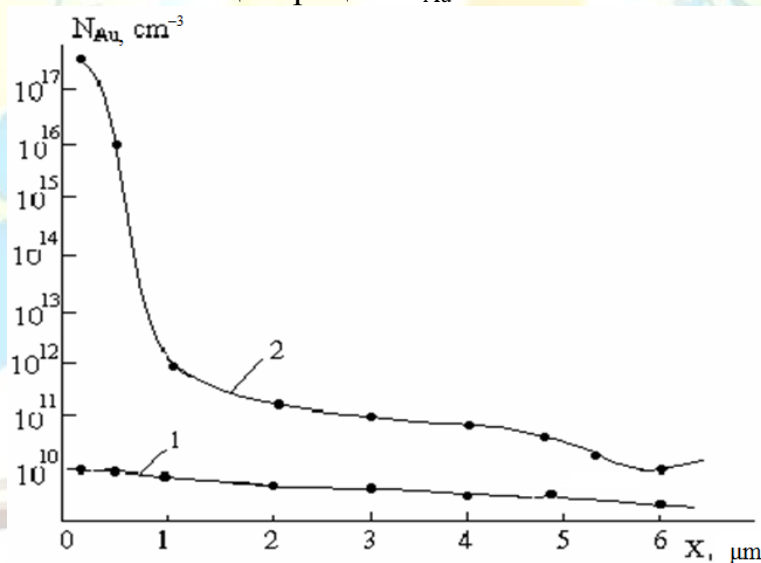


Рис.2. Кривая – 1-распределение концентрации золота в контрольном Si-образце. Кривая 2-распределение концентрации золота в - Si-по глубине после обработки его ультразвуковыми волнами интенсивностью  $I^* = 5 \text{ Вт/см}^2$  и частотой  $f=15 \text{ МГц}$ , в течение  $t=12$  часов.

Таким образом, анализ экспериментальных данных позволяет сделать следующие заключения:

1. Под действием ультразвуковых волн происходит акустостимулированная диффузия золота с поверхности в глубь Si-приемников.

2. Термообработка приводит к обогащению золотом при поверхностного  $n^+$ -слоя вблизи поверхности образца. Этот тонкий, обогащенный золотом, слой является



"стартовой площадкой" для начала акустостимулированной диффузии Au в глубь  $n^+$ -слоя кремния;

3. Образцы без термообработки не имеют такого Au-слоя и диффузия Au вглубь  $n^+$ -слоя под действием УЗО идет медленно, так как атомам Au необходимо преодолеть препятствие в виде тонких окисных слоев и потенциальных барьеров, создаваемых поверхностными состояниями;

4. Золото образует комплексы с фосфором P, а также резко снижает  $\tau$  носителей, что согласуется с литературными данными [4,5, 6]. Возникающие новые дефекты в виде комплексов  $Au_2P_3$  и одиночных атомов Au приводят к ухудшению функциональных характеристик Si-ПИ и возникновению эффектов поляризации [8];

5. Улучшение функциональных характеристик приемников при временах УЗО  $t < 30$  min связано с распадом локальных скоплений примесных атомов также и с повышением адгезии пленки золота к Si-поверхности в ультразвуковом поле за счет эффекта акустостимулированной диффузии золота с поверхности кремния в его объем. При этом происходит улучшение механических и электрических свойств Au-контакта к кремнию, что отражается на шумовых характеристиках Si-приемников излучения, приводя к снижению величины шума при повышенных напряжениях смещения. Это обстоятельство является важным фактором, так как является одним из главных требований, предъявляемых к качеству контактов Si-приемников излучения. Токовые характеристики, рассмотренные выше, и вольтшумовая характеристика одного из Si-приемников излучений, демонстрирует снижение уровня шума после ультразвуковой обработки

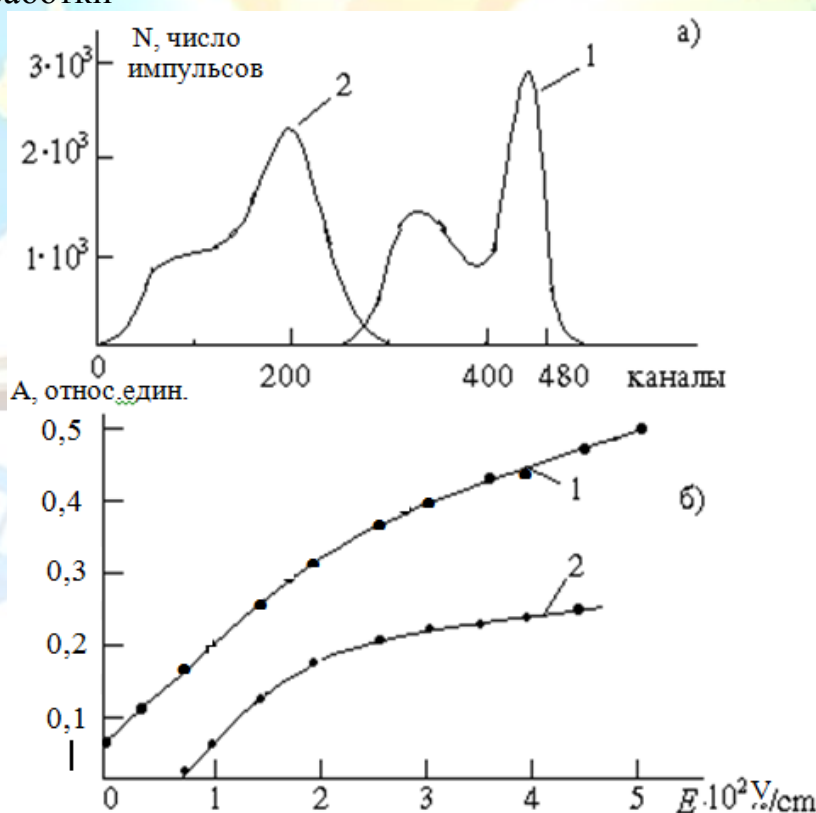


Рис. 3. Формы спектральных линий (а) и амплитуды сигнала А детектора Si-ПИ-№6 ( $d=50\mu\text{м}$ ), измеренные до (кривые 1) и после (кривые 2) воздействия ультразвуковых волн интенсивностью





$I^*=0,5\text{Вт/см}^2$ , частотой  $f=15\text{МГц}$ , в течение  $t=12\text{часов}$ , при  $T=300\text{К}$ .

Спектральные линии измерены при  $E=450\text{В/см}$ .

последнего (рис.4.). Электрические и прочностные характеристики контакта металл-полупроводник можно улучшить, облучая его ультразвуком, что исследовано в работе [1] применительно для случая акустостимулированной адгезии медных пленок к Si.

Увеличение времени ультразвуковой обработки ( $t>30\text{ мин}$ ) приводит к более глубокому проникновению золота в чувствительную (активную) область Si-приемников. В результате в ней возникают указанные Au-дефекты и ухудшение характеристик Si-приемников излучения (форма спектральной линии, шум и так далее). Следует еще также отметить, что на улучшение функциональных (спектральных) характеристик Si-приемников излучения влияет и уменьшение скорости поверхностной рекомбинации под воздействием ультразвуковых волн мощностью  $I^* \leq 0,4 \div 0,5\text{ Вт/см}^2$  при временах ультразвуковой обработки  $t < 30\text{ мин}$ . Ультразвук подавляет рекомбинационные центры в тонких приповерхностных слоях "входного" окна, (мертвых слоях) что вносит дополнительный вклад в эффективность собирания неравновесных носителей заряда.

Следует также отметить, что эффект подавления поверхностных рекомбинационных центров ультразвуком наблюдался ранее как и в p – Si – монокристаллах так и в поликристаллическом кремнии [9]. Как известно, эффекты поверхностной рекомбинации в поликристаллическом кремнии, в основном обусловлены физическими процессами, происходящими на межзерновых границах отдельных кристаллов. Эти эксперименты [9, 10] подтверждают наш вывод о том, что в монокристаллическом Si идет подавление центров рекомбинации и захвата дырок, как в объеме, так и в приповерхностных слоях активного элемента Si-приемников излучения.

Этот эффект обнаружен впервые нами в  $n^+$  - слоях Si – монокристаллов при исследовании Si-n-p- структур и связан с образованием электрически неактивных комплексов из доноров и акцепторов, выступавшими до ультра-

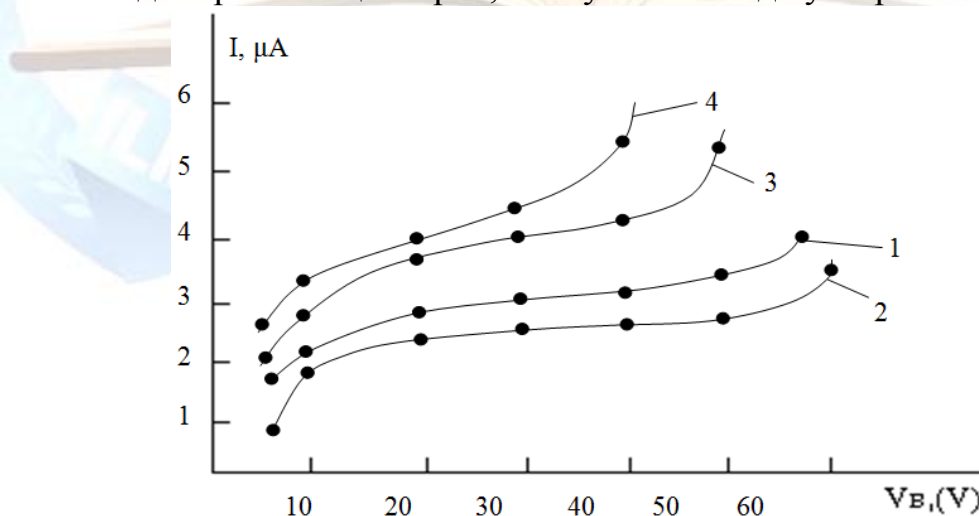


Рис.4. Вольтамперные характеристики Si-n-p-приемника излучения Si-ПИ- W-№8 до и после ультразвуковой обработки при  $I^*=0,4\text{Вт/см}^2$ ,  $f=15\text{МГц}$  и  $T=300\text{К}$ .



Кривая 1-до ультразвуковой обработки; кривая 2-время обработки  $t = 20$  мин; кривая 3-  $t = 120$  мин; кривая 4-  $t = 240$  мин.

Кривые измеренные при  $T = 300$  К. Уменьшение тока (кривая 2) связано с улучшением структуры чувствительной области и адгезионной прочности Au-контакта на «входом» окне.

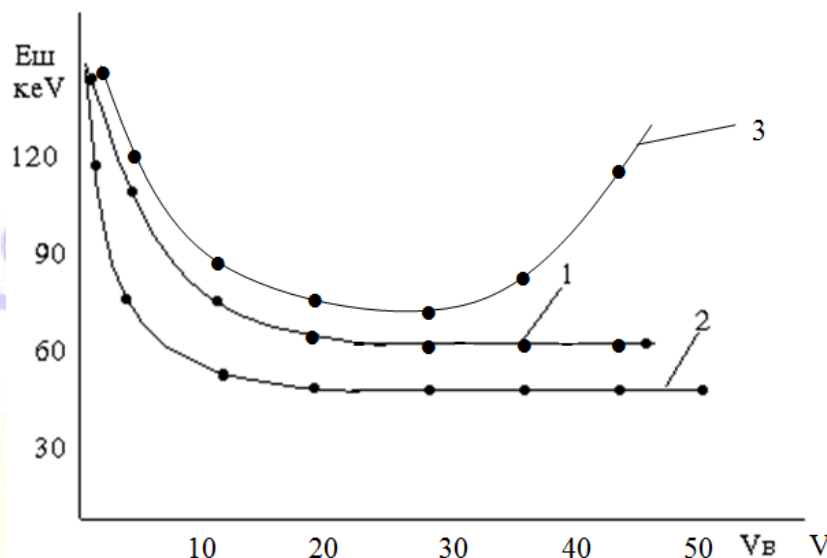


Рис. 5. Зависимость шума Si-n-p-приемника излучения Si-ПИ-W №8 от напряжения смещения при  $T = 300$  К. Кривая 1-до, кривая 2-после облучения ультразвуком интенсивностью  $I^* = 0,4 \text{ Вт/см}^2$ ,  $f = 15 \text{ МГц}$  в течение  $t = 25$  мин. Кривая 3- после облучения ультразвуком  $I^* = 0,4 \text{ Вт/см}^2$ ,  $f = 15 \text{ МГц}$  в течение  $t = 120$  мин.

звуковой обработки в роли центров захвата, рекомбинации неравновесных дырок и электронов. Образование подобных комплексов происходит за счет механизма акустостимулированной диффузии атомов примеси, что было теоретически рассмотрено для атомов лития [11] и экспериментально исследовано относительно атомов фосфора в работе [12] при изучении влияния ультразвука на оптический спектр отражения Si – n – p – структур.

Проникновение золота в активную область Si-приемников излучения под воздействием ультразвука мощностью  $I^* \geq 0,4 \div 0,5 \text{ Вт/см}^2$  в течение длительного времени, как отмечалось выше, приводит к ухудшению их характеристик. Это связано с тем, что введение центров с глубокими уровнями (золото) приводит к уменьшению времени жизни носителей заряда. Исследования различных авторов показывают, что атомы золота в кремнии могут находиться в трех зарядовых состояниях однократно отрицательном, положительно заряженном и нейтральном. При этом донорный уровень золота лежит на расстоянии  $E_1 = 0,35 \text{ эВ}$  от валентной зоны, а акцепторный на расстоянии  $E_2 = 0,54 \text{ эВ}$  от дна зоны проводимости [4,5,6]. Уровни, обусловленные введением золота, концентрируются около n-p-перехода Si-приемника излучения и это приведет к увеличению тока (рис.4.) и, соответственно, повышению уровня шума (кривая рис.5.). Эффект влияния золота на характеристики Si-тиристоры,



изготовленных с помощью термодиффузии последнего был обнаружен в работе [13], где было, в частности, отмечено увеличение токов утечек.

Таким образом, что под воздействием ультразвуковых волн мощностью  $I^* \leq 0,4 \div 0,5$  Вт/см<sup>2</sup> при временах ультразвуковой обработки  $t < 30$  мин. приводит улучшение функциональных (спектральных) характеристик Si-приемников излучения и уменьшение скорости поверхностной рекомбинации. Ультразвук подавляет рекомбинационные центры в тонких приповерхностных слоях “входного” окна, (мертвых слоях) что вносит дополнительный вклад в эффективность собирания неравновесных носителей заряда.

Увеличение времени ультразвуковой обработки ( $t > 30$  мин) приводит к более глубокому проникновению золота в чувствительную (активную) область Si-приемников. В результате в ней возникают Au-дефекты и приводит к ухудшению характеристик Si-приемников излучения.

### Литература

1. Заверюхин Б.Н., Исмаилов Х.Х., Муминов Р.А. и др. “Акустостимулированная адгезия медных пленок к кремнию”.//Письма в ЖТФ, 1996, т.22, в.15, с.25-27.
2. Каримов А.В., Муминов Р.А., Заверюхин Б.Н., Исмаилов Х.Х. «Акустостимулированная адгезия пленок никеля к кремнию».//Поверхность, 2000, №10, с. 92-94.
3. Гаибов А., Заверюхин Б.Н., Заверюхина Н.Н. и др. “Акустостимулированная адгезия пленок Al к Si”// Конф. “Фундаментальные и прикладные вопросы физики”, посвящ. 60-лет. АН и ФТИ АН РУз, 27-28 ноябрь, 2003, Ташкент.
4. М.К.Бахадырханов., К.С.Аюпов., Э.У.Арзикулов, С.Н.Сражев, Т.У.Тошбоев. Термические свойства кремния с кластерами атомов никеля. // Физика. Томск. №11/3. 2008. с.170-171.
5. Милехин А.Г. и др., Инфракрасная спектроскопия кремниевых сращённых пластин // Физика и техника полупроводников, 2006, том 40, вып. 11, с. 1338-1347.
6. Варварица В.П., Кадилин В.В., Самосадный В.Т., Трушин А.В. Высокочувствительные методы рентгенофлуоресцентного анализа для контроля загрязнения окружающей среды // 7 международная научно-практическая конференция «Репиклинг, переработка отходов и чистые технологии». Москва. Сборник материалов. М.: ФГУП, «Институт «Гинцветмет», 2011, с. 94-100.
7. Заверюхина Н.Н., Заверюхина Е.Б., Власов С.И., Заверюхин Б.Н. Акустостимулированное изменение плотности и энергетического спектра поверхностных состояний в монокристаллах p-кремния // Письма в Журнал технической физики, 2008, 34, № 6, с.36-42
8. Еремин В.К., Вербицкая Е.М. Кремниевые детекторы релятивистских частиц в современной физике высоких энергий. // «КРЕМНИЙ-2012» 9-13 июля 2012 Санкт-Петербург, с.50





9. П.Б.Парчинский Влияние ультразвуковой обработки на плотность поверхностных состояний на границе раздела кремний-диоксид кремния, облученной-квантами //Микроэлектроника,2005,Т.34, №6, с.420-423
10. "Master Handbook of Acoustics" (6<sup>th</sup> ed.), by Alton F. Everest, Publisher: McGraw-Hill Compnies, Format:Paperback, 2015, p.592.
- 11.V.D.Krevchik, R.A.Muminov "Influence of ultrasound on ionic diffusion process in semiconductors"// Phys.Stat. Solidi (a), 1981, №8, p.K159-
12. Е.М. Зобов , М.Е. Зобов, Ф.С. Габибов, И.К. Камилов, Ф.И. Маняхин, Е.К. Наими. Влияние ультразвуковой обработки на фотоэлектрические и люминесцентные свойства кристаллов ZnSe// Физика и техника полупроводников, 2008, том 42, вып. 3,с.282-285
- 13.Викулин И.М., Курмашев Ш.Д., Стафеев В.И. Инжекционные фотоприемники// Физика и техника полупроводников, 2008, том 42, вып. 1, с.113-127

