

УДК 621.382

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВА ИЗБЫТОЧНОГО ТОКА ДИОДОВ ШОТТКИ С АМОРФНОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО СПЛАВА

Пашаев И.Г.

Бакинский государственный университет, Баку, e-mail: islampashayev@rambler.ru

В данной работе изучена причина появления и восстановление избыточного тока вблизи температуры кристаллизации аморфного металлического сплава αTiAu и одновременно выяснено влияние ультразвуковой обработки (УЗО) на свойства солнечных элементов $\alpha\text{TiAu-nSi}$ (СЭ), изготовленных по технологии диодов Шоттки (ДШ) с металлическим аморфным сплавом. Деграционные свойства $\alpha\text{TiAu-nSi}$ ДШ после термоотжига при температурах от 473 до 573 К контролировались методом снятия ВАХ как в прямом направлении, так и в обратном. Получено, что появление избыточного тока $\alpha\text{TiAu-nSi}$ ДШ под действием термоотжига связано с изменениями структуры аморфной плёнки металла при переходе в поликристаллическое состояние. ВАХ поврежденных $\alpha\text{TiAu-nSi}$ ДШ очень чувствительны ко времени отжига. С течением времени, даже при комнатной температуре, уровень избыточного тока уменьшается, т.е. как бы заживает «рана», наносимая механическим повреждением. Процесс восстановления происходит тем быстрее, чем выше температура отжига. Зависимость параметров отжига γ_i меняется в интервале ($0 \leq \gamma_i \leq 1$) и влияние УЗО на фотоэлектрические свойства $\alpha\text{TiAu-nSi}$ образца СЭ зависит от выбранного режима УЗО.

Ключевые слова: уровень избыточного тока, поликристаллическое состояние, аморфные сплавы, аморфную структуру, диоды Шоттки, фоточувствительность, кремниевые солнечные элементы, ультразвуковое воздействие

STUDYING THE PROPERTIES OF OVER-CURRENT SCHOTTKY DIODE WITH AMORPHOUS METAL ALLOYS

Pashaev I.G.

The Baku State University, Baku, e-mail: islampashayev@rambler.ru

In this paper we study the cause of the excess current and restore near the crystallization temperature of amorphous metal alloy αTiAu is studied and is simultaneously found out, influence ultrasonic processings (USP) on the properties, diodes Schottki made on technology (DSh) with a metal alloy $\alpha\text{TiAu-nSi}$ solar elements (SE). Degradation properties $\alpha\text{TiAu-nSiDSh}$ after thermoozhiga at temperatures from 473 to 573 K were monitored by removing the VAC in the forward and in reverse. It is received that occurrence of a superfluous current $\alpha\text{TiAu-nSi}$ DSh under the influence of thermoannealing is connected with changes of structure of an amorphous film of metal at transition in a polycrystalline condition. Damaged VAC $\alpha\text{TiAu-nSi}$ DSh are very sensitive to annealing time. Eventually, even at room temperature, level of a superfluous current decreases, i.e. «the wound» put by mechanical damage as though heals, restoration process occurs that faster, than above annealing temperature. Dependence γ_i annealing parameters changes in an interval ($0 \leq \gamma_i \leq 1$) and influence USP on photo-electric properties $\alpha\text{TiAu-nSi}$ sample SE depend on chosen mode USP.

Keywords: level of excess current state of polycrystalline, amorphous alloys, amorphous structure, Schottky diodes, photo-sensitivity, silicon solar cells, ultrasonic treatment

Настоятельной потребностью современной полупроводниковой техники остается увеличение надежности и улучшение качества электронных приборов, в том числе приборов на основе барьера Шоттки. В литературе, посвященной физике и технологии контакта металл-полупроводник, экстенсивно изучаются процессы, происходящие в контакте, и считается, что все эти процессы связаны с полупроводником. Роль металла в большинстве случаев пренебрегают. Влияние металлов и их кристаллической структуры на процессы, имеющие место в контакте, либо не рассмотрено, либо плохо изучено. Чтобы идентифицировать роль металла были изучены свойства ДШ [2–5]. В последние годы XX столетия возрос интерес к ДШ, изготовленным с применением пленок металлов и металлических сплавов с аморфной структурой [1, 3, 5]. Причиной такого интереса является то, что применение пленок металлов с аморфной структурой позволяет изгото-

вить ДШ с важными прикладными свойствами. Преимущество применения аморфных металлов заключается еще и в том, что из-за отсутствия зернистой структуры и границ зерен в аморфных пленках должна формироваться более однородная граница раздела (ГР), и, как результат этого, ДШ должны обладать свойствами, близкими к идеальным. Кроме того, имеются сообщения о том, что аморфные пленки металлов хорошо исполняют роль диффузионного и электрического барьеров в микроэлектронных структурах. Настоящая работа посвящена изучению изменения избыточного тока в $\alpha\text{TiAu-nSi}$ ДШ вблизи температуры кристаллизации аморфного металлического сплава, и одновременно изучению влияния УЗО на свойства $\alpha\text{TiAu-nSi}$ образца СЭ, изготовленного по технологии ДШ с металлическим сплавом. В некоторых случаях, под действием различных факторов, при низких прямых напряжениях в ДШ появляется избыточный ток, т.к. ВАХ деградирует [5, 7].

В нашем эксперименте в $\alpha\text{TiAu-nSi}$ ДШ избыточный ток появляется при температуре около 573 К, как показано на рис. 1. С изменением температуры происходят структурные изменения [6] в аморфных металлических плёнках, которые появляются при малых прямых напряжениях деградации ВАХ. В связи с этим интерес представляет исследование деградационных (избыточные токи) свойств, возникших под действием термоотжига, а также изучение влияния ультразвукового воздействия на фотоэлектрические и электрофизические свойства полупроводниковых диодов и приборов подобного типа. В последние годы не ослабевает интерес к проблеме целенаправленного изменения физических свойств полупроводниковых материалов. Практически во всех публикациях по данной тематике остается неясным вопрос о конкретных механизмах этого воздействия [8–12].

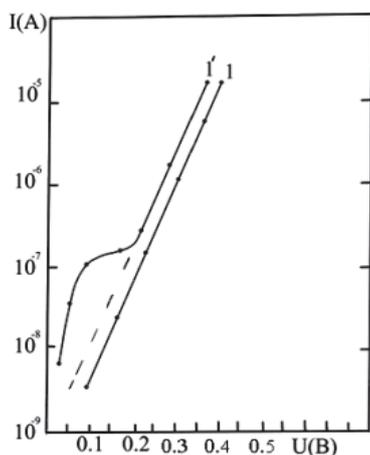


Рис. 1. ВАХ $\alpha\text{TiAu-nSi}$ диодов Шоттки I – до и I' – после термоотжига при 573 К

Так как ультразвуковое воздействие является эффективным способом повышения внутренней энергии твердых тел, в зависимости от коэффициента поглощения и от интенсивности ультразвука возможны различные структурные изменения, оказывающие влияние на фотоэлектрические и электро-

физические свойства материалов, а также на процесс пластической деформации.

Материалы и методы исследования

Для изготовления ДШ использовали кремниевую пластину n -типа с ориентацией (111) и удельным сопротивлением 0,7 Ом·см. Матрица содержала 14 диодов, площади которых менялись в интервале от 100 до 1400 мкм². В нашем случае площадь контакта была равна 200 мкм². Металлический сплав αTiAu наносили методом электронно-лучевого испарения из двух источников. Сплав αTiAu был выбран из тех соображений, что оба компонента широко применяются в микроэлектронике, а сам сплав технологичен. О возможности получения плёнок этого сплава с аморфной структурой сообщалось в работе [6]. Скорости испарения компонентов выбирались таким образом, чтобы состав плёнки соответствовал сплаву $\text{Ti}_{60}\text{Au}_{40}$, поскольку в работе [6] сообщалось, что такой сплав склонен к аморфизации.

Термоотжиг диодов проводился при температурах от 473 до 573 К в течение одинакового по продолжительности времени $t = 10$ мин.

Структура пленки сплава до и после термоотжига контролировалась рентгенографическим анализом и просвечивающим электронным микроскопом Первичный пучок (λ – длина волны, $\lambda = 1,54$ нм) монохроматизировали кристаллом пирографита. Указаны значения рентгенофазового исследования пленок в зависимости от угла падения луча (θ) и получаемой разности хода лучей (d) при дифракции:

$$d = a \sin \theta,$$

где a – межатомное расстояние. Поправки $\Delta 2\theta$, влияющие на точность измерения межплоскостных расстояний, вносились по рефлексам внутреннего стандарта – NaCl. Съёмка дифрактограммы велась в интервале 10–80°.

В таблице представлены характеристики $\alpha\text{TiAu-nSi}$ образца СЭ до и после УЗО при различных режимах. Как видно из таблицы, после УЗО-1 ($W_{\text{УЗ}} = 0,55$ Вт/см², $t = 200$ мин, $f_{\text{УЗ}} = 25$ МГц) обратный ток образца увеличился на несколько порядков. Следующий этап ультразвуковой обработки УЗО-2 ($W_{\text{УЗ}} = 0,15$ Вт/см², $t = 200$ мин, $f_{\text{УЗ}} = 25$ МГц) привел к незначительному уменьшению обратного тока. Это, на наш взгляд, свидетельствует об улучшении дефектного состояния базы СЭ. Последующий этап ультразвуковой обработки образца УЗО-3 ($W_{\text{УЗ}} = 25$ Вт/см², $t = 90$ мин, $f_{\text{УЗ}} = 25$ МГц) заново привел к увеличению обратного тока, хотя после УЗО с такой мощностью ожидался выход из строя СЭ или по крайней мере, увеличение обратного тока на несколько порядков.

Фотоэлектрические параметры $\alpha\text{TiAu-nSi}$ образцов до и после УЗО при $P_{\text{изл}} = 100$ Вт/см² и $T = 300$ К

Параметры \ Состояние образца	До УЗО	После УЗО-1	После УЗО-2	После УЗО-3
$I_{\text{к.з.}}$, мА	28,20	24,81	25,52	21,90
$U_{\text{хх}}$, В	0,530	0,510	0,500	0,485
η , %	9,184	7,693	8,090	6,541
$I_{\text{об}}$, А	$9,1 \cdot 10^{-6}$	$4,2 \cdot 10^{-5}$	$4,1 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$
A	2,22	2,58	2,53	2,72

**Результаты исследования
и их обсуждение**

На рис. 1 представлены ВАХ для $\alpha\text{TiAu-nSi}$ ДШ до и после отжига при температуре 573 К. Как видно из графика после термоотжига при малых прямых напряжениях появляется избыточный ток. Известно, что аморфные плёнки металлов при определённых температурах меняют структуру и переходят в поликристаллическое состояние [6]. Следовательно, можно предположить, что появление избыточного тока в ДШ после отжига при температуре 573 К и выше связано с изменением структуры металлической плёнки сплава. Действительно, ис-

следования структуры металлической плёнки αTiAu на установке ДРОН-2 до и после отжига при температуре 573 К показали, что плёнка металла из аморфного или квазиаморфного состояния переходит в поликристаллическое (рис. 2). Об этом свидетельствуют и электронно-микроскопические исследования поверхности пленки (рис. 3). Как видно из рисунка, пленка сплава αTiAu до отжига имеет аморфную структуру. Такой вывод сделан на основании того, что у кристаллов четко выражается серия максимумов и минимумов, что говорит не только о правильном расположении ближайших атомов, но и о существовании дальнего порядка.

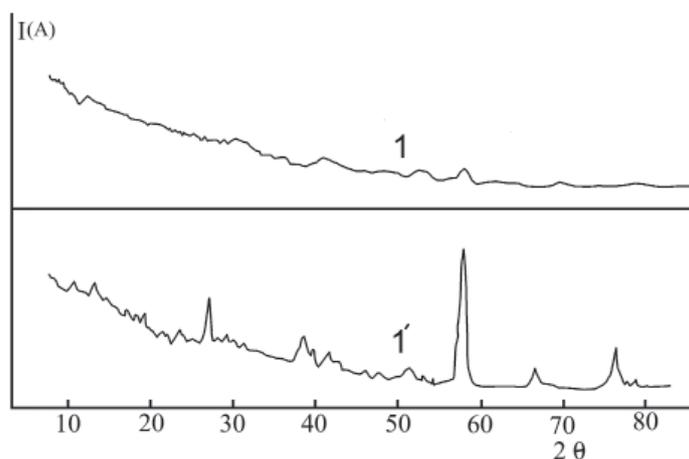


Рис. 2. Рентгеноструктурный анализ аморфных металлических пленок αTiAu :
I – до I' – после термоотжига при 573 К

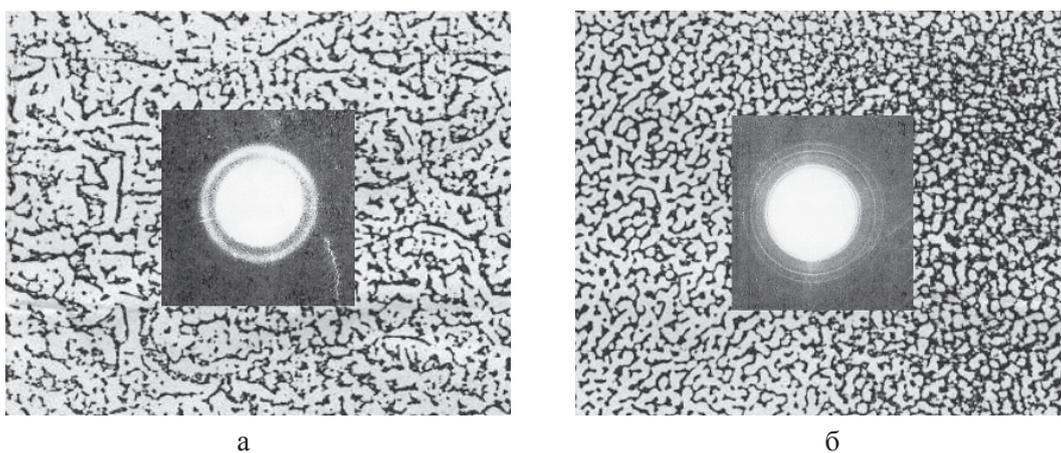


Рис. 3. Электронно-микроскопические фотографии поверхности пленки $\text{Ti}_{60}\text{Au}_{40}$:
б – до отжига; а – после отжига увеличение $\times 50000$

На рис. 4. представлена ВАХ для $\alpha\text{TiAu-nSi}$ ДШ, деградированной искусственно с помощью алмазного микротвёрдомера ПМТ-3. Искусственным образом создана неоднородность на ГР. Алмазная игла адаптера представляет собой правильную четырёхугольную пирамиду с углом между

противоположными гранями 136° . Площадь нарушенных участков варьировалась путём изменения величины нагрузки F (50 Г) и количества нарушений $N(1)$ до и после отжига при 523 К в течение некоторого времени: (1–16 с, 2–65 с, 3–148 с, 4–260 с, 5–410 с, 6–580 с, $V_{\text{пр}} = 0,13$ В).

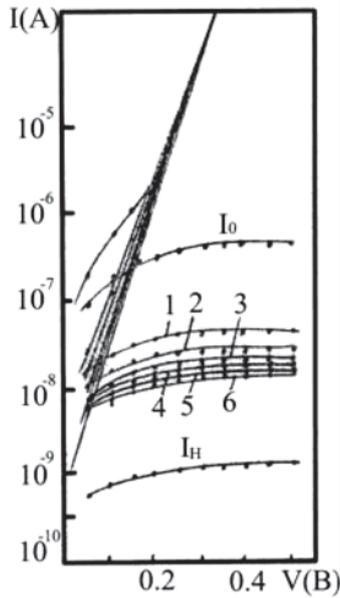


Рис. 4. ВАХ α TiAu-nSi ДШ в нормальном, искусственно деградированном и отожженном ($T_{отж} = 523$ К) состояниях. I_H – ток нормального (неповрежденного) диода Шоттки; I_0 – ток диода непосредственно после воздействия идентером ($t = 0$)

Деградационные свойства α TiAu-nSi ДШ после термоотжига при температурах от 473 до 573 К контролировались методом снятия ВАХ как в прямом направлении, так и в обратном.

Для количественной характеристики восстановления избыточного тока под действием отжига, с учетом времени, применялась формула:

$$\gamma_t = \frac{I_t - I_H}{I_0 - I_H},$$

где I_H – ток нормального (неповрежденного) диода Шоттки; I_0 – ток диода непо-

средственно после воздействия идентером ($t = 0$); I_t – ток поврежденного диода, отожженного в течение t с; γ_t – характеризует относительное восстановления избыточного тока под действием термоотжига за время t , с.

Как показано на рис. 5, при ($V_{пр} = 0,13$ В) γ_t существенно зависит как от $T_{отж}$, так и от t , с. Значение γ_t при различных значениях температуры отжига и в зависимости от t отжига меняется в интервале $0 \leq \gamma_t \leq 1$. В рис. 6. дана результаты относительное восстановления избыточного тока под действием термоотжига (время $t = 16$ с) зависимости от напряжения. При определении γ_t токи берутся при фиксированном значении $V_{обр}$ ($V_{обр} = 0,5$ В) обратного напряжения, ибо, как видно из рис. 6. от напряжения почти не зависит.

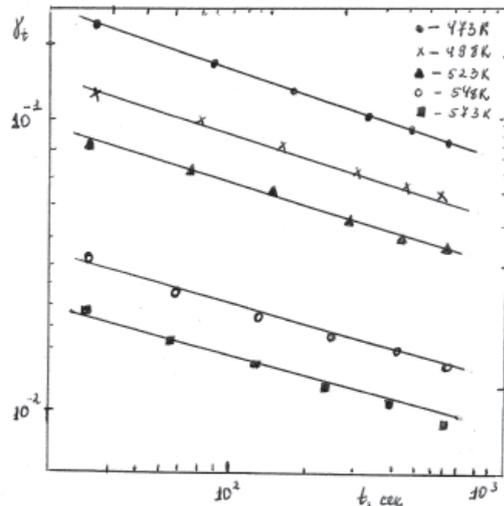


Рис. 5. Зависимость γ_t от времени отжига t при различных значениях температуры отжига

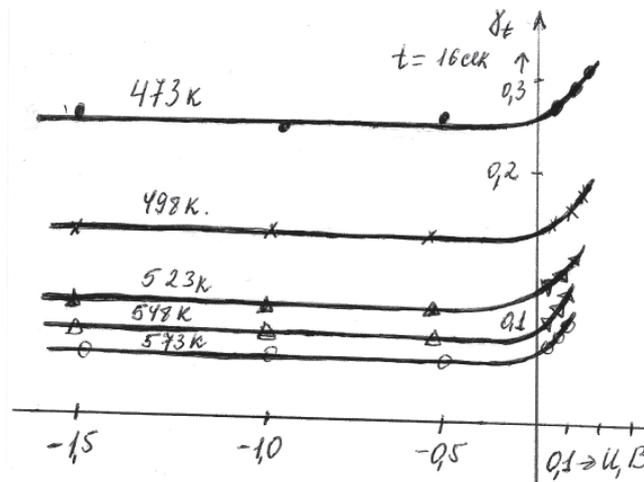


Рис. 6. Зависимость γ_t от напряжения смещения при различных температурах отжига

Из этого видно что, во-первых, основной этап процесса отжига происходит за короткие начальные промежутки времени, во-вторых, основной этап процесса отжига «излечивает» (восстанавливает свойства) поврежденные диоды. ВАХ $\alpha\text{TiAu-nSi}$ ДШ очень чувствительна ко времени отжига. С течением времени, даже при комнатной температуре, уровень избыточного тока уменьшается, т.е. как бы заживает «рана», наносимая механическим повреждением. Процесс восстановления происходит тем быстрее, чем выше температура отжига. Как видно из рисунков, определенный уровень отжига достигается при различных параметрах отжига: уровень отжига $\gamma_t = 0,1$ при $T_{\text{отж}} = 473 \text{ К}$ достигается в течение $t = 400 \text{ с}$, а при $T_{\text{отж}} = 523 \text{ К}$ в течение $t = 10 \text{ с}$.

В таблице представлены определенные из вышеописанных экспериментов фотоэлектрические параметры: $I_{\text{к.з}}$ – ток короткого замыкания; $U_{\text{х.х}}$ – напряжение холостого хода; η – КПД; $I_{\text{об}}$ – обратный ток; A – безразмерный коэффициент образца.

В таблице приведены значения этих параметров после каждого этапа ультразвуковой обработки образца. Такое построение таблицы позволяет проследить, на какую величину изменяются фотоэлектрические параметры при подаче на образец ультразвуковой волны со строго заданной мощностью, частотой и в течение заданного времени. В исследуемом кремниевом СЭ, происходит эффективное поглощение УЗО в местах, содержащих несовершенства кристаллической решетки. Последние представляют собой точечные дефекты и их комплексы, а также кластерные образования и дислокации. В результате становится возможным процесс перестройки точечных дефектов и их комплексов.

Выводы

Таким образом, можно заключить, что избыточный ток проходит через механически нарушенные участки контакта, и причина его появления связана с нарушением ГР. Это ещё раз доказывает то, что появление избыточного тока для $\alpha\text{TiAu-nSi}$ ДШ вблизи температуры кристаллизации аморфного металлического сплава связано с изменением структуры аморфной плёнки металла при переходе в поликристаллическое состояние. Относительное восстановление избыточного тока под действием термоотжига за время t , γ_t при фиксированном значении $V_{\text{обр}}$ ($V_{\text{обр}} = 0,5 \text{ В}$) обратного напряжения, ибо,

от напряжения почти не зависит. Из полученных результатов видно, что изменение параметров отжига происходит за короткие начальные промежутки времени, и основной этап процесса отжига «излечивает» поврежденные диоды. Определенный уровень отжига достигается при различных параметрах отжига, уровень отжига $\gamma_t = 0,1$ при $T_{\text{отж}} = 473 \text{ К}$ достигается в течение $t = 400 \text{ с}$, а при $T_{\text{отж}} = 523 \text{ К}$ в течение $t = 10 \text{ с}$.

Приведенные экспериментальные данные показывают, что УЗО влияет на характер и степень изменений фотоэлектрических и электрофизических свойств СЭ. В исследуемом кремниевом СЭ, происходит эффективное поглощение УЗО в местах, содержащих несовершенства кристаллической решетки.

Список литературы

1. Обработка облученных солнечных элементов с помощью ультразвука / Н.А. Гусейнов, Ш.Г. Аскеров, Я.М. Олих и др. // Гелиотехника. – 2006. – № 2. – С. 17–21.
2. Пашаев И.Г. Влияние различных обработок на свойства диодов Шоттки // ФТП. – 2012. – 46, № 8. – С. 1108–1110.
3. Аскеров Ш.Г., Асланов Ш.Г., Пашаев И.Г. Электрофизические свойства барьерных структур на основе кремния с аморфным металлическим сплавом алюминий-никель // Электронная техника. Сер.10, Микроэлектронные устройства. – 1989. – № 78. – С. 46–49.
4. Торхов Н.А. Природа прямых и обратных токов насыщения в контактах металл-полупроводник с барьером Шоттки // ФТП. – 2010. – 44, № 6. – С. 767–762.
5. Пашаев И.Г. Изучение свойств контактов кремния с барьером Шоттки, изготовленных на основе аморфных и поликристаллических различных металлических сплавов // Успехи физика металлов. – 2012. – Т.13. – С. 1001–1020.
6. Судзуки К. Аморфные металлы / К. Судзуки, Х. Фулзумори, К. Хасимов: пер. с англ.; под. ред. И.В. Кекало. – М.: Металлургия, 1987. – 328 с.
7. Гонтарук А.Н., Корбутяк Д.В., Корбут Е.В. Деграционно-релаксационные явления в светоизлучающих р-п структурах на основе фосфида галлия, стимулированные ультразвуком // Письма в ЖТФ. – 1998. – 24, № 15. – С. 64–67.
8. Ермолович И.Б. Влияние ультразвуковой обработки на микропроцессы формирования барьеров Шоттки гетеросистем Мп-n + GaAs (M-Pt, Cr, W) / И.Б. Ермолович, В.В. Миленин, Р. В. Конакова // Письма в ЖТФ. – 1996. – Т. 22, № 6. – С. 33–36.
9. Мелебаева Г.Д., Мелебаев Д., Рудь Ю.В., Рудь В.Ю. Фоточувствительность барьеров Шоттки Ni-GaAs // ФТП. – 2009. – 43, № 1. – С. 34–37.
10. Островский, И. В. Образование поверхностного упроченного слоя в бездислокационном кремнии при ультразвуковой обработке / И.В. Островский, Л.П. Стебленко, А.Б. Надточий // ФТП. – 2000. – Т.34, № 3. – С. 257–260.
11. Влияние ультразвукового воздействия на генерационные характеристики границы раздела кремний-диоксид кремния / П.Б. Парчинский, С.И. Власов, Л.Г. Лигаи и др. // Письма в ЖТФ. – 2003. – 29 № 9. – С. 83–87.
12. Влияние ультразвука на параметры структур металл-диэлектрик-полупроводник / П.Б. Парчинский, С.И. Власов, Р.А. Муминов и др. // Письма в ЖТФ. – 2000. – 26, № 10. – С. 40–45.