

УДК 621.3.083.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕОДНОРОДНОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ИСХОДНОГО МАТЕРИАЛА КРЕМНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Л.Г. Лапатин*, А.В. Юрченко, А.Н. Новиков

Томский политехнический университет

*ОАО «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов», г. Томск

E-mail: lapatinl@yandex.ru; niipp@inbox.ru

Предложены методики и устройства для бесконтактного локального измерения электрофизических параметров S_i . С их помощью проведено исследование неоднородности удельного сопротивления, времени жизни неравновесных носителей заряда и типа проводимости в пластинах кремния, из которой затем были изготовлены фотоэлектрические преобразователи. Представлены результаты влияния неоднородного распределения электрофизических параметров в подложке фотоэлектрических преобразователей на его эффективность.

Ключевые слова:

Поликристаллический кремний, фотоэлектрические преобразователи, СВЧ методы измерения параметров полупроводников.

Экспериментальные исследования показывают, что при производстве фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) и в процессе их эксплуатации появляется разброс их характеристик: КПД, тока короткого замыкания, напряжения холостого хода [1]. Этот разброс наблюдается при одинаковых условиях изготовления структур и может достигать от 10 до 30 %. Основной причиной подобного разброса является неоднородность исходного материала для изготовления ФЭП. В современных условиях все больше внимания при производстве ФЭП уделяется поликристаллическим материалам. Поэтому является актуальной проблема контроля планарной неоднородности как исходного материала, так и готового ФЭП, особенно на стадии отработки технологии их изготовления. Для обеспечения контроля необходима разработка метрологического оборудования, дающего возможность прогнозировать параметры ФЭП. Решение данной задачи позволит сформулировать требования к исходному сырью, внедрение которых обеспечит минимальный разброс выходных параметров ФЭП и достижение максимально возможной эффективности.

В связи с этим, возникает необходимость детального измерения основных электрофизических параметров: удельного сопротивления, времени жизни неравновесных носителей заряда (ННЗ) и типа проводимости кремния на стадии входного контроля производства ФЭП; исследование методик, позволяющих контролировать данные параметры в готовых ФЭП.

В данной статье исследованы неразрушающие СВЧ и оптические методы для бесконтактного локального измерения удельного сопротивления, времени жизни ННЗ в моно- и поликристаллических полупроводниках, а также времени жизни в ФЭП.

Применение СВЧ-резонаторного метода для бесконтактного локального измерения удельного сопротивления S_i

Принцип измерения основан на взаимодействии СВЧ поля со свободными носителями заряда

в полупроводнике. Полупроводник располагается в пучности электрического поля резонатора. Так как добротность является функцией удельного сопротивления полупроводника, то измерение удельного сопротивления сводится к измерению добротности резонатора [2–4].

В качестве измерительного датчика используется резонатор с внешним кольцевым измерительным отверстием [3]. Это резонатор квазистатического типа, в верхней стенке которого имеется отверстие, соосное с индуктивным штырем. Электрическое поле резонатора локализовано в области свободного торца штыря. Исследуемые образцы включаются в краевое электрическое поле между торцом штыря и верхней стенкой резонатора, изменяя тем самым его частоту и добротность. Пространственное расширение при измерении вдоль поверхности образца определяется степенью локализации электрического поля вблизи торца штыря и примерно равно диаметру отверстия в верхней стенке резонатора. Глубина проникновения электрического поля в образец сравнима по величине с радиусом отверстия.

Потери, вносимые полупроводниковым образцом, регистрируются как изменения прошедшей через резонатор СВЧ мощности [3].

$$P_{np} = \frac{P_{\infty}}{\left(1 + \frac{\alpha}{\rho}\right)^2},$$

где P_{∞} – мощность, прошедшая через резонатор в отсутствие образца; α – коэффициент, определяется экспериментально с помощью образца с эталонным значением удельного сопротивления; ρ – удельное сопротивление измеряемого образца.

Измерение P_{np} и P_{∞} удобно производить по току СВЧ детекторов на выходе резонатора. Характеристики типовых СВЧ детекторов при малой входной мощности имеют квадратичный вид, поэтому ток детекторов пропорционален поступающей на него мощности. Измерение P_{np} и P_{∞} необходимо осу-

шествять на одной и той же резонансной частоте ω_p а измерение P_{np} – при одном значении коэффициента включения.

Определив значение коэффициента α и измерив P_{np} на частоте ω_p можно вычислить удельное сопротивление для $\rho \geq 10^3$ Ом·см по формуле [2]:

$$\rho = \frac{\alpha}{\left(\left(\frac{P_{\infty}}{P_{np}} \right)^{-0,5} - 1 \right)}$$

На основе предложенной методики разработан ряд приборов [2, 6]. Один из них «Ангара-2», предназначенный для бесконтактного измерения распределения удельного сопротивления по торцам пластин и слитков как монокристаллического, так и поликристаллического кремния и германия с локальностью 1...6 мм и шагом сканирования 250 мкм. Время одного измерения 0,5 с [5]. Диапазон измерения $10^{-2} \dots 10^5$ Ом·см. На этой установке и были измерены предоставленные образцы поликремния.

Применение СВЧ методов для бесконтактного измерения времени жизни неравновесных носителей заряда Si

Использование СВЧ смещения для наблюдения импульсной фотопроводимости и определения времени жизни неравновесных носителей заряда в полупроводниках давно известно. На основе этой методики разработано большое количество измерительных приборов [2, 5, 7]. Однако они малоэффективны при измерении полупроводников с низким удельным сопротивлением 1...10 Ом·см и малым временем жизни 0,5...10 мкс, т. е. для материала, используемого при производстве солнечных батарей.

Для бесконтактного измерения времени жизни в поликристаллическом германии при комнатных и азотных температурах нами успешно был применен резонатор с внешним кольцевым отверстием [5], работающий на частоте 1,5 ГГц. Однако для измерения времени жизни в поликремнии этот метод и разработанный прибор оказались недостаточно

чувствительными. Были измерены только высокоомные образцы.

Для выбора оптимальной конструкции датчика (размеры, чувствительность, области концентрации электрических и магнитных полей, зависимость коэффициента прохождения и отражения от величины удельного сопротивления полупроводниковой среды) в программной среде Microwave Studio 5.0 были промоделированы несколько перспективных на наш взгляд типов СВЧ датчиков. Это резонаторный на проход, коаксиальный на отражение, коаксиальный на проход, кольцевой накладной нерезонаторного типа на отражение и на проход.

Лучшим по всем характеристикам оказался кольцевой накладной нерезонаторного типа на проход. Далее при создании прибора на его основе были оптимизированы все его блоки под углом повышения уровня сигнала фотопроводимости: канал оптического возбуждения (ток накачки, время нарастания зондирующего импульса), СВЧ генератор (его частота и мощность), длина волны и мощность излучения светодиодов. В результате собран прибор, на котором проведены измерения времени жизни ряда образцов мультикремния из г. Иркутска и на низкоомных образцах монокристаллического кремния из г. Зеленограда.



Рис. 1. Внешний вид модели накладного измерительного датчика нерезонаторного типа для измерения на проход

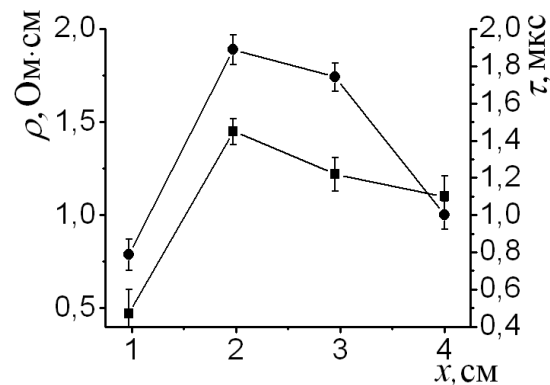
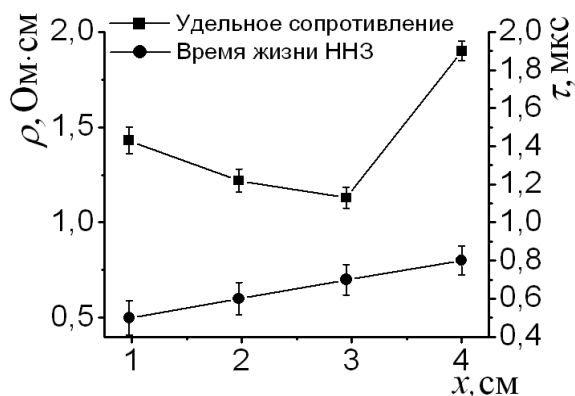


Рис. 2. Результаты измерения удельного сопротивления ρ и времени жизни ННЗ τ в образцах кремния

Методика бесконтактного определения типа проводимости

Метод основан на определении знака изгиба зон поверхности полупроводника. Знак изгиба зон определяется методом импульсной фотоЭДС и однозначно несет информацию о типе проводимости.

В работе [6] описан принцип действия устройства для измерения типа проводимости полупроводников методом поверхностной фотоЭДС. Устройство предназначено для локального бесконтактного определения типа проводимости в полупроводниках типа германия, кремния, арсенида галлия при комнатных и азотных температурах по торцам и образующим слитков. Оно позволяет определять тип проводимости в широком диапазоне значений удельного сопротивления полупроводников ($10^0 \dots 10^6 \text{ Ом}\cdot\text{см}$).

Эффективность планарно-неоднородных фотоэлектрических преобразователей

С использованием установки измерения интегральных характеристик [7] были проведены экспериментальные исследования влияния последовательного сопротивления и расстояния между токосборниками на КПД ФЭП. Измерения КПД и последовательного сопротивления проводились при одинаковой мощности имитатора солнечного излучения равном $1000 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Калибровка мощности имитатора проводилась относительно вторичных эталонов – ФЭП, изготовленных и измеренных в АОЗТ «Силикон» на установке СП «Интертехника». Для измерения распределения фотоотклика ФЭП по его поверхности разработана методика и на ее основе установка измерения дифференциальных параметров ФЭП. Методика основана на измерении изменения фототока в цепи смещения ФЭП при локальной засветке оптическим излучением ($\lambda=475; 590; 660; 860; 940 \text{ нм}$) его лицевой поверхности при перемещении ФЭП по двум координатам относительно засветки. Разработанная установка позволяет проводить измерения локальных спектральных характеристик с локальностью до $0,1 \text{ мм}$, что позволяет экспериментально разделить вклад в планарную неоднородность ФЭП на технологическую и подложечную составляющую.

Для анализа физики процессов и более детального исследования влияния неоднородного распределения фотоотклика ФЭП на его КПД выбраны 100 ФЭП площадью 29 см^2 с КПД от 4 до 15,4 %, а также ФЭП изготовленные на подложках из поликристаллического кремния. Наиболее типичные характеристики ряда ФЭП представлены в таблице.

Существует обратно пропорциональная зависимость КПД от удельного разброса D_λ исследуемого ФЭП для различных длин волн. Это означает, что основной вклад в удельный разброс фотоотклика вносит базовая область ФЭП, прежде всего величина диффузионной длины электронов или, что то же самое, время жизни.

Таблица. Характеристики исследуемых ФЭП

Образец	КПД, %	Удельный разброс фотоотклика D_λ , отн. едн.				
		435 нм	590 нм	660 нм	860 нм	940 нм
S6	10,1	0,09	0,17	0,18	0,13	0,025
S9	9,4	0,16	0,21	0,12	0,16	0,05
S5	11,9	0,21	0,2	0,19	0,09	0,04
S7	7,40	0,27	0,27	0,20	0,24	0,09
C1	11,8	0,2	0,22	0,18	0,12	0,05
C2	9,5	0,29	0,23	0,19	0,22	0,08
C3	8,5	0,26	0,19	0,08	0,18	0,04
C4	11,9	0,39	0,18	0,21	0,12	0,06
C5	9,4	0,36	0,20	0,12	0,14	0,04
C6	9,0	0,21	0,24	0,19	0,24	0,08
C7	14,9	0,3	0,21	0,09	0,14	0,03
C8	12,0	0,17	0,23	0,19	0,12	0,09
C9	10,9	0,29	0,22	0,13	0,27	0,07
C10	9,9	0,43	0,27	0,14	0,23	0,01
C11	8,0	0,33	0,20	0,23	0,21	0,11
C12	9,6	0,31	0,26	0,18	0,23	0,06
C13	8,5	0,38	0,17	0,22	0,26	0,15
C14	4,3	0,36	0,15	0,33	0,39	0,55
C15	6,0	0,38	0,36	0,31	0,31	0,36
C16	7,6	0,43	0,43	0,29	0,31	0,37
C17	3,8	0,43	0,26	0,15	0,25	0,15
C18	15,4	0,25	0,19	0,11	0,09	0,05

Экспериментальные исследования неоднородности распределения коэффициента отражения на данных длинах волн показывает, что он вносит незначительный вклад (до 0,03) в удельный разброс фотоотклика по сравнению с неоднородным распределением электрофизических параметров лицевого слоя и подложки.

Для уточнения влияния планарной неоднородности измерены распределения спектрального фотоотклика SR по площади ФЭП на различных длинах волн для образца S7. Данный образец имеет характерное распределение фотоотклика для пластин с КПД < 10 %, доля подобных образцов составляет более 90 % от общего числа исследуемых пластин с КПД < 10 %. На рис. 5, а, представлено распределение спектрального отклика для образца S7 при $\lambda=940 \text{ нм}$.

В рассматриваемой пластине ФЭП можно выделить три характерные области: с повышенным (1), средним (2), пониженным (3) фотооткликом. Для более детального изучения областей 1, 2, 3 из исследуемого ФЭП S7 эти области были вырезаны. При исследовании этих областей установлено, что область 1 обладает КПД 15 %, область 2 – 9,5 %, область 3 – 6,5 %.

На рис. 5б представлено распределение фотоотклика по пластине ФЭП изготовленного на подложке из поликристаллического кремния. КПД такой структуры измерить не представлялось возможным, вследствие малости фотоотклика (порядка 10 мА с 29 см^2). Измерение распределения фотоотклика показало отсутствие его в середине образца, тогда как по краям образца фотоотклик наблюдался. Для более детального изучения образца исследуемого ФЭП были вырезаны области 1 и середина области 2. Установлено, что ФЭП из области 1 обладает относительно неплохим КПД 5 %, в то

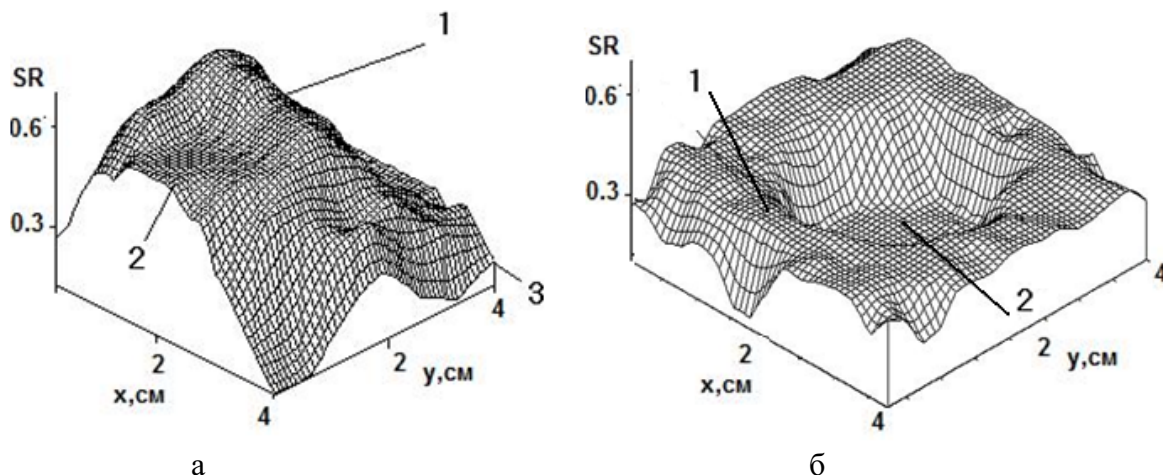


Рис. 5. Распределение спектрального отклика SR по площади ФЭП для образцов: а) S7 при $\lambda=940$ нм; б) на поликристаллическом кремнии при $\lambda=660$ нм

время как ФЭП из области 2 имеет КПД=0 (ВАХ омического сопротивления).

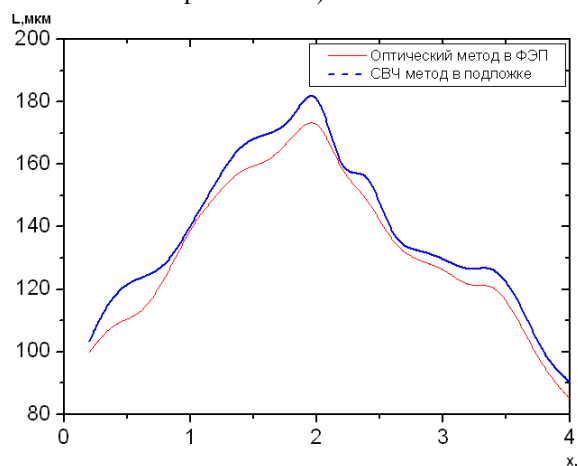


Рис. 6. Профиль диффузионной длины L для образца S7, измеренный СВЧ методом до изготовления ФЭП и оптическим методом после его изготовления

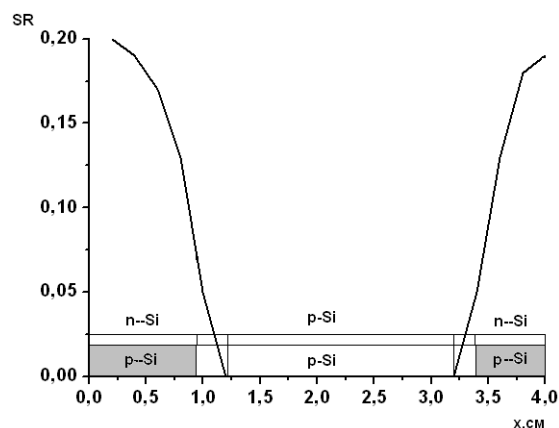


Рис. 7. Профиль спектрального отклика по пластине поликремния и распределение типа проводимости по пластине

На рис. 6 представлены зависимости распределения диффузионной длины носителей заряда по координате, измеренные СВЧ методом в пластине поликремния и оптическим методом в ФЭП, изготовленной из этой пластины. С помощью СВЧ метода определялось время жизни ННЗ и затем производился его перерасчет в диффузионную длину. Как видно из рисунка, результаты измерений практически совпадают, что говорит о возможности применения СВЧ метода для контроля параметров материала для изготовления солнечных элементов до процесса изготовления ФЭП.

Рис. 7 демонстрирует нам распределение спектрального отклика по пластине ФЭП при $\lambda=660$ нм изготовленного из поликремния. Также на рисунке изображено распределение типа проводимости в структуре ФЭП, измеренное вышеописанным методом.

Таким образом, применение неразрушающих СВЧ методик для измерения электрофизических параметров кремния и оптических спектральных методик для измерения локальных характеристик ФЭП позволяет проводить отработку технологии изготовления ФЭП. Особенно полезны данные методики при разработке ФЭП на поликристаллах, где исходный материал может иметь существенно неоднородное распределение времени жизни ННЗ, удельного сопротивления и типа проводимости.

Выводы

1. Рассмотрены бесконтактные методы неразрушающего контроля электрофизических характеристик полупроводниковых материалов. На их основе созданы новые приборы, с помощью которых проведено исследование неоднородности распределения времени жизни неосновных носителей заряда, удельного сопротивления и типа проводимости в пластинах моно- и поликрем-

- ния и проанализировано их влияние на характеристики фотоэлектрических преобразователей.
- Показано, что основной вклад в снижение эффективности фотоэлектрических преобразователей вносит разброс значений времени жизни неосновных носителей заряда (диффузионной длины) в базе преобразователя.
 - Показана эффективность предложенных методик для отработки технологии изготовления фотоэлектрических преобразователей на новых материалах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Aberle A.G., Altermatt P.P., Heiser G., Robinson S.J., Wang A., Zhoa J., Krumbeir U., Green M. Limiting loss mechanisms in 23 % efficient silicon solar cells // *J. Appl. Phys.* – 1995. – V. 77. – № 7. – P. 3491–3504.
- Детинко М.В., Медведев Ю.В., Петров А.С. Физические основы неразрушающего СВЧ-резонансного метода локального контроля электрофизических параметров полупроводников. Томск: Изд-во ТГУ, 1988. – 30 с.
- Ахманов В.Б., Медведев Ю.В., Петров А.С. Резонатор для бесконтактного измерения удельного сопротивления полупроводниковых материалов // *Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ.* – 1981. – Вып. 4. – С. 48–51.
- Медведев Ю.В., Скрыльников А.А. Бесконтактный СВЧ-резонаторный метод измерения подвижности свободных носителей заряда в полупроводниках // *Известия вузов. Физика.* – 1985. – Т. 38. – № 7. – С. 28–31.
- Miyamoto N., Nishizawa J. Contactless measurement of resistivity of slices of semiconductor materials // *Research institute of electrical communication.* – 1967. – V. 38. – № 10. – P. 360–367.
- Лапатын Л.Г., Петров А.С., Киселев И.И. Экспрессное определение электрофизических и рекомбинационных характеристик особо чистого германия бесконтактными методами: Препринт. – М.: ЦНИИ Атоминформ, 1986. – 28 с.
- Мочалов И.Г., Ушеренко А.А., Юрченко А.В. Автоматизированная система измерения характеристик фотоэлектрических преобразователей // *Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления» (Датчик-96): Тез. докл. VII научно-техн. конф. / Под ред. В.Н. Азарова.* – М.: МГИЭМ, 1996. – Т. 2. – С. 404–405.
- Ушеренко А.А., Юрченко А.В. Планарная неоднородность фоточувствительности фотоэлектрических преобразователей // *Электронная промышленность.* – 1998. – № 1–2. – С. 108–111.

Поступила 16.01.2009 г.

УДК 535.215.12

ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИЙ И ФОТОРЕФРАКТИВНЫЙ ЭФФЕКТ В ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛАХ

Б.Х. Каримов

Ферганский Государственный Университет, г. Фергана, Узбекистан
E-mail: karimov1948@rambler.ru

Рассмотрены фотовольтаические и фоторефрактивные эффекты в пьезоэлектрических кристаллах ZnS. Обсуждены экспериментальные и физические основы фотовольтаического эффекта в пьезоэлектрических кристаллах ZnS. Определены фотовольтаические коэффициенты k_{jk} для ZnS ($K_{12} \approx 5 \cdot 10^{-9} \text{ А} \cdot \text{см} \cdot (\text{Вт})^{-1}$), которые более чем на порядок превышают соответствующие коэффициенты для $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$. Показана возможность использования фотопьезоэлектриков для голографической записи.

Ключевые слова:

Фотовольтаический эффект, фоторефрактивный эффект фотовольтаический тензор, фотовольтаические коэффициенты, фотопьезоэлектрический кристалл, голографический запись, восстановление, и стирание записи, спектральное распределение, фотовольтаический ток.

Введение

ФотоЭДС (или фотонапряжение) в полупроводниках независимо от ее природы не может превышать ширину запрещенной зоны, т. е. несколько V . Например, в однородном полупроводнике Демберовское (диффузионное) фотонапряжение для сколь угодно большой интенсивности возбуждающего света не превышает значения [1]

$$V = \frac{KT}{q} \ln \frac{n_1}{n_0} \ll \frac{KT}{q} \ln \frac{N_c}{n_0} = E_g, \quad (1)$$

где E_g – ширина запрещенной зоны полупроводника, n_1 и n_0 – соответственно неравновесная и равно-

весная концентрации носителей, N_c – плотность состояний.

Другим примером может служить фотонапряжение, возникающее при освещении p - n перехода [2]

$$V \leq \frac{KT}{q} \ln \frac{n_n p_p}{n_0^2} = E_{Fn} - E_{Fp}, \quad (2)$$

которое также не превышает E_g . Здесь n_n и p_p – соответственно концентрации электронов в n -области и дырок в p -области. E_{Fn} и E_{Fp} – энергии уровня Ферми в n - и p -областях.

Исключение из этого правила составляли лишь полупроводниковые текстуры, в которых наблюда-