

## ПРИБОРОСТРОЕНИЕ INSTRUMENT ENGINEERING

Научная статья

УДК 62-4

<https://doi.org/10.25686/2306-2819.2022.2.61>

### Релаксационный спад стимулированного фотонного эха как ключевой параметр оценки условий получения тонкоплёночных активных сред

*И. И. Попов<sup>1✉</sup>, Р. В. Юсупов<sup>2</sup>, К. А. Волков<sup>1</sup>, А. Г. Козырев<sup>1</sup>, С. А. Мальцева<sup>1</sup>,  
А. В. Мороз<sup>1</sup>, А. В. Петров<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Поволжский государственный технологический университет,  
Российская Федерация, 424000, Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3

<sup>2</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет,  
Российская Федерация, 420008, Казань, ул. Кремлевская, 18  
[biht.orol@gmail.com](mailto:biht.orol@gmail.com)<sup>✉</sup>

**Аннотация.** Сообщается о технологических особенностях получения методом магнетронного распыления и функционирования 12 видов исследуемых плёнок, о снятии спектров пропускания оптического излучения этими тонкими плёнками на основе оксида цинка и определении по этим спектрам толщины и количества слоёв плёнок, о результатах исследования топологии поверхности девяти видов тонких плёнок, как трёхслойных, так и двухслойных, полученных на основе оксида цинка с выявлением наиболее приемлемого при их формировании соотношения концентрации кислорода к аргону в камере магнетронного распыления, составляющего 25 к 75 %. Демонстрируется применимость релаксационного спада стимулированного фотонного эха (СФЭ) в плёнках  $ZnO/Si(B)/Si(P)$  как метода определения времени релаксации возбуждённых квантовых состояний  $T_1$  и отражения соотношения концентраций газов кислорода и аргона в камере магнетронного распыления, наиболее эффективного с позиции получения наибольшей амплитуды СФЭ, и как метода отражения роли дырок и электронов, инжектируемых с подслоёв легированного кремния в рабочий слой оксида цинка и идентификации вида трионов, возбуждаемых в тонких плёнках при комнатной температуре.

**Ключевые слова:** тонкоплёночные активные среды для нанoeлектроники; поверхностные дефекты кристаллической решётки; зондовая микроскопия; локализованные трионы; фотонное эхо; время необратимой продольной релаксации  $T_1$

**Финансирование:** работа Юсупова Р. В. и Петрова А. В. выполнялась при поддержке программы «Приоритет-2030» Казанского федерального университета.

**Благодарности:** авторы выражают глубокую благодарность заведующему кафедрой КиПР ПГТУ Сушенцову Николаю Ивановичу за предоставленные условия для изготовления исследованных тонких плёнок и контроля их параметров.

© Попов И. И., Юсупов Р. В., Волков К. А., Козырев А. Г., Мальцева С. А., Мороз А. В., Петров А. В., 2022.

**Для цитирования:** Попов И. И., Юсупов Р. В., Волков К. А., Козырев А. Г., Мальцева С. А., Мороз А. В., Петров А. В. Релаксационный спад стимулированного фотонного эха как ключевой параметр оценки условий получения тонкоплёночных активных сред // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2022. № 2 (54). С. 61-79. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2022.2.61>

**Введение.** В настоящее время оксид цинка является одним из перспективных материалов, применяемых в технологиях наноэлектронного приборостроения. Результаты исследования электрических и оптических свойств плёнок оксида цинка, нанесённых методом ионно-лучевого распыления оксидной мишени, приведены в работе [1], а плёнок, полученных методом магнетронного распыления, – в работе [2]. Несмотря на то, что в настоящее время известно большое количество свойств тонких плёнок, полученных методом магнетронного распыления [3–10], возможности магнетронного распыления, связанные с получением наноразмерных объектов, обладающих квантово-размерными ограничениями, ни в результатах исследований других авторов, ни патентного поиска, не обнаружено. При этом резонансные свойства оксида цинка, особенности технологических режимов его магнетронного распыления, обеспечивающие формирование дефектов кристаллической решётки на поверхности кристаллических волокон, на которых образуются наноразмерные ловушки экситонов и трионов, получили высокую практическую значимость [11, 12], но изучены недостаточно.

В работе [13] в единичных экземплярах экспериментально реализованы принципы получения наноразмерных ловушек экситонных и трионных состояний, возбуждаемых при комнатной температуре в полупроводниковой плёнке. Получены разные физические состояния этих квазичастиц, локализованных в таких наноразмерных ловушках, отличающиеся временами релаксации, определявшимися с помощью оптической эхоспектроскопии.

В силу наличия фактов, подтверждающих возможность создания наноэлектронных приборов на новых физических принципах, таких как регистратор фемтосекундных временных интервалов [14], мемристорная память [15] на оксиде цинка с модуляцией информации под влиянием наноэлектронных ловушек экситонов, актуальность исследования технологий

получения для них тонкоплёночных активных сред с широким спектром параметров и характеристик, несомненно, актуальна.

Для разработки технологического обеспечения производства наноэлектронных приборов на основе фотонного эха необходимо выполнение дополнительных исследований технологических возможностей получения тонких плёнок, обеспечивающих различный химический состав и послойное содержание, при оптимальных значениях давления газа и температуры рабочей среды в технологическом процессе магнетронного распыления тонких плёнок. Широкий спектр характеристик и параметров исследуемых плёнок возможно регистрировать с помощью методов зондовой микроскопии, спектроскопии поглощения оптического излучения и оптической эхоспектроскопии сверхвысокого временного разрешения.

Именно установлению релаксационных спадов стимулированного фотонного эха слоистых структур тонких плёнок  $ZnO/Si(B)/Si(P)$ , обладающих информацией о необходимых параметрах технологического процесса их получения (химического состава, соотношения кислорода и аргона в камере магнетронного распыления плёнок, времени распыления, влияющем на их толщину, состава и очередности формирования слоёв этих плёнок), значимых для обеспечения оптического свойства плёнок (наибольшего значения времени необратимой продольной релаксации  $T_1$  и амплитуды СФЭ), используемых для построения наноэлектронных приборов на основе фотонного эха, посвящены исследования, приведённые в данной работе.

**Цель** работы заключается в установлении релаксационных спадов стимулированного фотонного эха слоистых структур  $ZnO/Si(B)/Si(P)$ , обладающих информацией о необходимых параметрах технологического процесса их получения, обеспечивающих их оптические свойства используемых для построения наноэлек-

тронных приборов на основе фотонного эха.

**Задачи** исследований включают:

– разработку и экспериментальную реализацию параметров технологии получения слоистых структур  $ZnO/Si(B)/Si(P)$ , её комбинаций  $ZnO/Si(P)$  и  $ZnO/Si(B)$ , предназначенных для проектирования принципов действия новых наноэлектронных приборов на основе фотонного эха;

– снятие спектров пропускания оптического излучения и определение по ним толщины подслоёв исследуемых тонких плёнок;

– исследование топологии поверхности трёхслойной и двухслойных тонких плёнок на основе оксида цинка;

– исследование релаксационного спада СФЭ в слоистых структурах  $ZnO/Si(B)/Si(P)$  как метода определения времени релаксации возбуждённых квантовых состояний  $T_1$  и отражения соотношения газов кислорода и аргона в камере магнетронного распыления;

– исследование релаксационного спада СФЭ как метода отражения роли дырок и электронов, инжектируемых с подслоёв в рабочий слой оксида цинка в составе исследуемых плёнок.

**Технологические особенности получения и функционирования исследуемых слоистых структур.** Все исследуемые структуры формировались методом магнетронного распыления, потому что в этом случае слоистые структуры имели кристаллическо-волоконистую текстуру. Ортогонально ориентированные волокна диаметром несколько десятков до нескольких сот нанометров в основании, уменьшавшиеся по мере удаления от подложки, имели кристаллическую решётку распыляемых материалов. Пространство между волокнами заполнялось рентгенаморфной фазой этих материалов, не успевших кристаллизоваться. При этом из-за большой кривизны поверхность волокон имела множество поверхностных дефектов кристаллических волокон, приводящих к формированию таммовских уровней на грани-

цах запрещённой зоны. Таким образом, на поверхности волокон создавались площадки с поверхностными дефектами, окружённые замкнутой линией дислокаций, состоящей из неповреждённых узлов кристаллической решётки. Потому, когда вблизи границы запрещённой зоны возбуждались квазичастицы (экситоны или заряженные экситонные комплексы – трионы), отклонявшиеся от максимального значения энергии на значение, меньшее тепловой энергии  $kT$ , эти частицы мигрировали по поверхности волокна, пока не попадали в зону скопления поверхностных дефектов кристаллической решётки волокна. Попав на площадку с дефектами, квазичастицы испытывали энергетическое погружение внутрь запрещённой зоны на значение, превышающее  $kT$ , при этом приобретали локализованное состояние, отдавая излишнюю энергию кристаллической решётке через возникающие электрон-фононные взаимодействия. Таким образом, эти площадки, имевшие линейные размеры, не превышающие 100 нм, играли роль наноразмерных ловушек этих квазичастиц (экситонов и трионов). Поскольку линейные размеры этих ловушек соответствовали значениям, при которых проявляются корпускулярные свойства возбуждающего лазерного излучения, то энергия квазичастиц принимала новые дискретные квантовые уровни энергии, на которых как на уровнях электрона происходило возбуждение сигналов фотонного эха.

Поскольку процессы, протекающие в наноразмерных ловушках, в том числе и характеристики возбуждаемых сигналов фотонного эха, значительно зависят от кривизны кристаллической поверхности волокон, то есть от технологии формирования этих волокон, то параметры технологического процесса магнетронного распыления значительно влияют на эти процессы. В качестве базовых структур, на которых производится проектирование принципов действия новых наноэлектронных приборов, взяты слоистые структуры, состоящие из трёх слоёв тонких плёнок

оксида цинка ZnO, кремния, легированного бором и фосфором ZnO/Si(B)/Si(P). Основным рабочим слоем, в котором возбуждаются и локализируются квазичастицы, является оксид цинка. Слой Si(B) предназначен для инжектирования в слой оксида цинка дырок, обеспечивающих положительный заряд возбуждаемых там экситонов, то есть для формирования положительных трионов. Слой Si(P) предназначен для инжектированных в слой оксида цинка электронов, обеспечивающих отрицательный заряд возбуждаемых там экситонов, то есть для формирования отрицательных трионов. Получено четыре вида слоистых структур Si(P)/Si(B)/ZnO, формирующихся с соотношением концентраций кислорода к аргону в рабочей газовой смеси в камере магнетронного распыления, составляющем 25 к 75 %, 50 к 50 %, 75 к 25 % и 90 к 10 %. Для определения влияния слоёв кремния, инжектирующих в слой оксида цинка дырки и электроны, на свойства структуры, а также с целью исследования возникновения только положительных или только от-

рицательных трионов, были получены слоистые структуры Si(P)/ZnO и Si(B)/ZnO с аналогичными соотношениями концентраций кислорода к аргону. Общее количество видов слоистых структур, изготовленных и исследованных в данной работе, составило 12 шт. Параметры технологического процесса изготовления этих слоистых структур методом магнетронного распыления приведены в таблице.

**Спектры пропускания оптического излучения исследуемыми слоистыми структурами на основе оксида цинка.** Основным варьируемым параметром была выбрана концентрация кислорода в слое оксида цинка, определяющая количество кислородных вакансий, влияющих на свойства структуры и концентрацию аргона, влияющего на стехиометрические параметры кристаллической решётки.

Конструкция исследуемой слоистой структуры представлена на рис. 1. Слоистые структуры осаждались методом магнетронного реактивного распыления на стеклянную подложку.

**Параметры процесса магнетронного распыления плёнок**

Parameters of the process of magnetron sputtering of films

Тип плёнки	P, Па	O <sub>2</sub> , %	Ar, %	T, °C	U <sub>м</sub> для Si, В	I <sub>м</sub> Si, А	t Si, с	U <sub>м</sub> для ZnO, В	I <sub>м</sub> ZnO, А	t ZnO, с
Si(P)Si(B)ZnO	1	25	75	30	550	0,3	180	350	1	60
Si(P)Si(B)ZnO	1	50	50	30	550	0,3	180	350	1	60
Si(P)Si(B)ZnO	1	75	25	30	550	0,3	180	350	1	60
Si(P)Si(B)ZnO	1	90	10	30	550	0,3	180	350	1	60
Si(P)ZnO	1	25	75	30	550	0,3	180	350	1	60
Si(P)ZnO	1	50	50	30	550	0,3	180	350	1	60
Si(P)ZnO	1	75	25	30	550	0,3	180	350	1	60
Si(P)ZnO	1	90	10	30	550	0,3	180	350	1	60
Si(B)ZnO	1	25	75	30	550	0,3	180	350	1	60
Si(B)ZnO	1	50	50	30	550	0,3	180	350	1	60
Si(B)ZnO	1	75	25	30	550	0,3	180	350	1	60
Si(B)ZnO	1	90	10	30	550	0,3	180	350	1	60

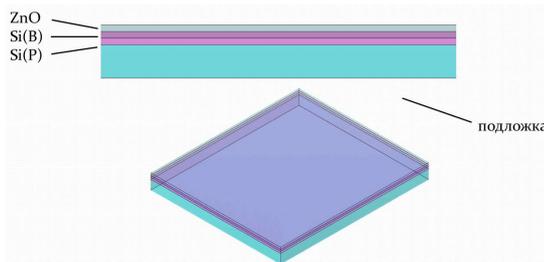


Рис. 1. Изучаемая n/n структура Si(P)/Si(B)/ZnO  
 Fig. 1. Studied p/p structure Si(P)/Si(B)/ZnO

Спектрофотометрические исследования проводились в спектральном диапазоне 190 – 1100 нм, который обеспечивается спектрофотометром СФ-2000. Спектры пропускания оптического излучения тонкоплёночной трёхслойной структурой Si(P)\Si(B)\ZnO с различным соотношением концентрации кислорода

к аргону в камере магнетронного распыления показаны на рис. 2. Спектры пропускания оптического излучения двухслойными структурами Si(P)\ZnO и Si(B)\ZnO с различной концентрацией кислорода, соответствующей её значению в магнетронной камере, показаны на рис. 3 и 4.

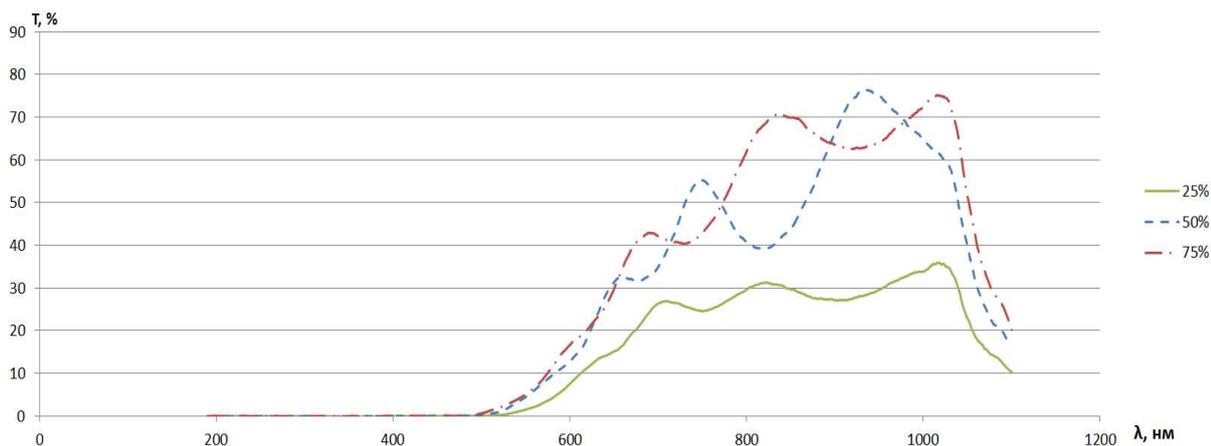


Рис. 2. Спектры пропускания оптического излучения структурой плёнок Si(P)\Si(B)\ZnO, сформированных при соотношениях концентрации кислорода к аргону в камере магнетронного распыления: 25 к 75 %, 50 к 50 %, 75 к 25 %

Fig. 2. Optical transmission spectra of Si(P)\Si(B)\ZnO films produced at ratios of oxygen to argon concentration in the magnetron sputtering chamber: 25 % to 75 %, 50 % to 50 %, 75 % to 25 %

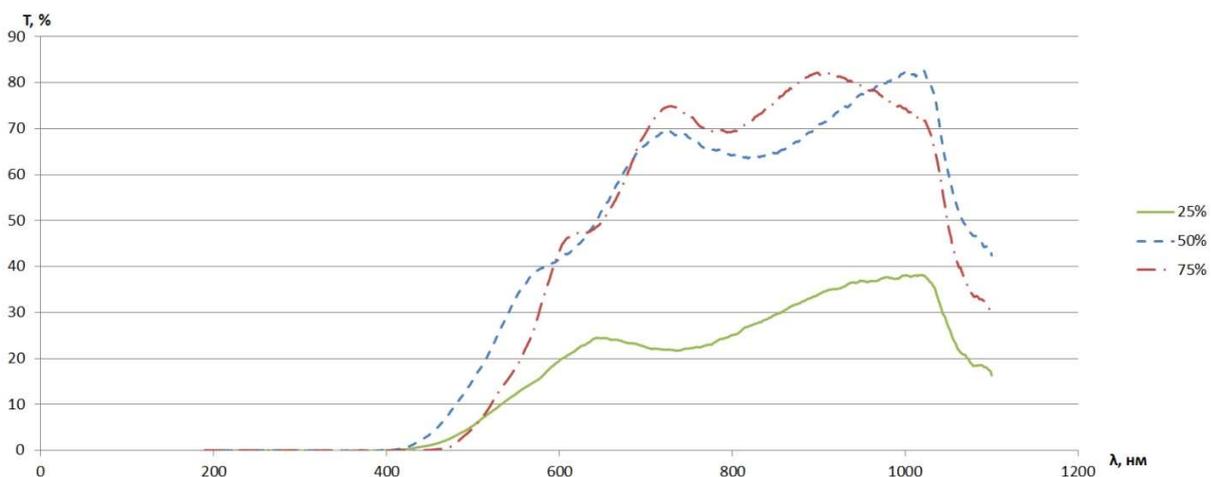


Рис. 3. Спектры пропускания оптического излучения структурой плёнок Si(B)\ZnO, сформированных при соотношениях концентрации кислорода к аргону в камере магнетронного распыления: 25 к 75 %, 50 к 50 %, 75 к 25 %

Fig. 3. Optical transmission spectra of Si(B)\ZnO films produced at ratios of oxygen to argon concentration in the magnetron sputtering chamber: 25 % to 75 %, 50 % to 50 %, 75 % to 25 %

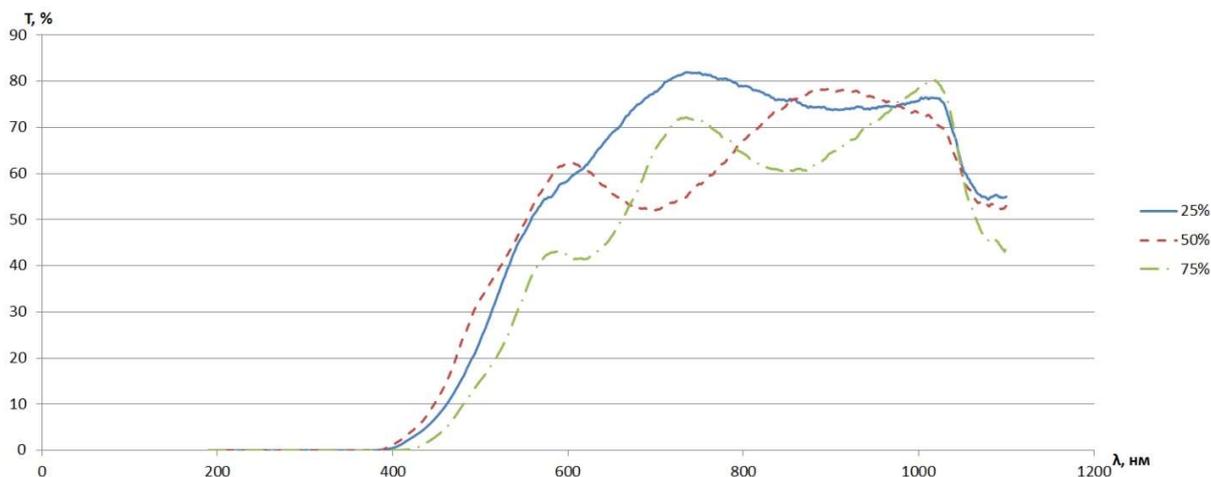


Рис. 4. Спектры пропускания оптического излучения структурой плёнок  $\text{Si(P)\ZnO}$ , сформированных при соотношениях концентрации кислорода к аргону в камере магнетронного распыления: 25 к 75 %, 50 к 50 %, 75 к 25 %

Fig. 4. Optical transmission spectra of  $\text{Si(P)\ZnO}$  films produced at ratios of oxygen to argon concentration in the magnetron sputtering chamber: 25 % to 75 %, 50 % to 50 %, 75 % to 25 %

Спектрофотометрические исследования на спектрофотометре СФ-2000 показали резко отличающиеся оптические свойства комбинации положительно легированного кремния ( $\text{Si(B)}$ ) и оксида цинка, полученного при соотношении концентраций кислорода к аргону в камере магнетронного распыления, составляющем 25 к 75 %. Коэффициент пропускания таких плёнок вдвое меньше, чем у остальных комбинаций легированного кремния и оксида цинка. Двойное ослабление пропускания наблюдалось как на двухслойной плёнке  $\text{Si(B)\ZnO}$ , полученной с соотношением концентраций кислорода к аргону в камере магнетронного распыления, равным 25 к 75 %, так и на трёхслойной структуре  $\text{Si(P)\Si(B)\ZnO}$ , полученной с соотношением концентраций кислорода к аргону в камере магнетронного распыления, равным 25 к 75 %. Кремний, n-типа ( $\text{Si(P)}$ ), не оказал каких-либо видимых влияний. Такие результаты можно объяснить преобладанием кристаллической фазы вещества, что требует дополнительных подтверждающих исследований топологии полученных поверхностей. Согласно методике, прикладываемой к спектрофотометру СФ-2000, по зарегистрированным спектрам пропускания определялась толщина слоёв плёнок и их количество.

**Исследование топологии поверхности трёхслойных и двухслойных структур на основе оксида цинка.** Изображения структуры поверхности двух- и трёхслойных структур с различной концентрацией кислорода в слое оксида цинка получены с помощью сканирующего зондового микроскопа NT-MDT NTEGRA Prima и представлены на рис. 5. Исследование топологии поверхности полученных структур показало гораздо большее количество кристаллической фазы вещества, расположенной равномерно на поверхности структур  $\text{Si(B)\ZnO}$  и  $\text{Si(P)\Si(B)\ZnO}$ , сформированных при соотношении концентрации кислорода и аргона в камере магнетронного распыления, составляющем 25 к 75 %. Таким образом, возможно образование гораздо большего количества экситонных и трионных ловушек в зонах с низкой энергией в поверхностных дефектах на поверхности кристаллических волокон.

На поверхности полученных структур наблюдается увеличение кривизны из-за уменьшения диаметра кристаллических волокон с уменьшением концентрации кислорода и увеличением концентрации аргона в камере магнетронного распыления.

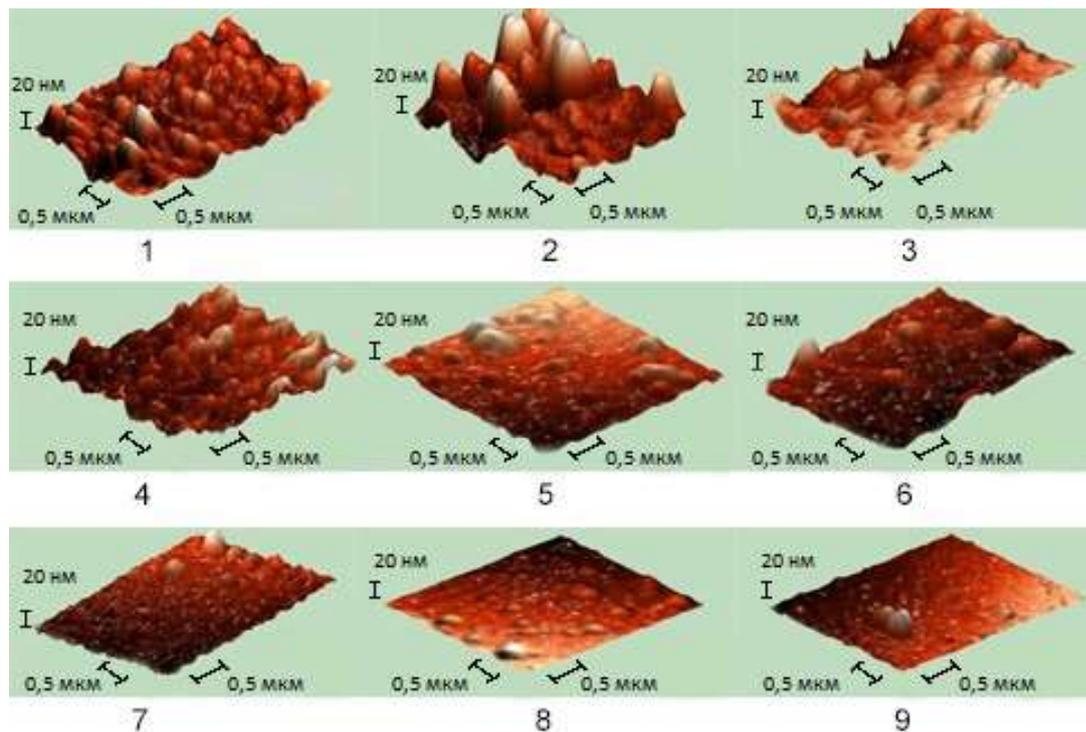


Рис. 5. АСМ изображения поверхности структур: 1)  $\text{Si(P)}\backslash\text{Si(B)}\backslash\text{ZnO}$ , полученные при концентрации кислорода в камере магнетронного распыления 25 %; 2)  $\text{Si(P)}\backslash\text{Si(B)}\backslash\text{ZnO}$  – 50 %;

3)  $\text{Si(P)}\backslash\text{Si(B)}\backslash\text{ZnO}$  – 75 %; 4)  $\text{Si(B)}\backslash\text{ZnO}$  – 25 %; 5)  $\text{Si(B)}\backslash\text{ZnO}$  – 50 %; 6)  $\text{Si(B)}\backslash\text{ZnO}$  – 75 %;

7)  $\text{Si(P)}\backslash\text{ZnO}$  – 25%; 8)  $\text{Si(P)}\backslash\text{ZnO}$  – 50 %; 9)  $\text{Si(P)}\backslash\text{ZnO}$  – 75 %

Fig. 5. Atomic force microscopy (AFM) images of the surface of structures: 1)  $\text{Si(P)}\backslash\text{Si(B)}\backslash\text{ZnO}$  produced at a concentration of oxygen in the magnetron sputtering chamber of 25 %; 2)  $\text{Si(P)}\backslash\text{Si(B)}\backslash\text{ZnO}$  – 50 %;

3)  $\text{Si(P)}\backslash\text{Si(B)}\backslash\text{ZnO}$  – 75 %; 4)  $\text{Si(B)}\backslash\text{ZnO}$  – 25 %; 5)  $\text{Si(B)}\backslash\text{ZnO}$  – 50%; 6)  $\text{Si(B)}\backslash\text{ZnO}$  – 75 %;

7)  $\text{Si(P)}\backslash\text{ZnO}$  – 25 %; 8)  $\text{Si(P)}\backslash\text{ZnO}$  – 50 %; 9)  $\text{Si(P)}\backslash\text{ZnO}$  – 75 %

**Релаксационный спад СФЭ в слоистой структуре  $\text{ZnO}\backslash\text{Si(B)}\backslash\text{Si(P)}$  как метод определения времени релаксации возбуждённых квантовых состояний  $T_1$  и отражения соотношения концентраций газов кислорода и аргона в камере магнетронного распыления.** При изменении концентрации кислорода в камере магнетронного распыления от 0 до 25 % изменяется концентрация кислорода в слое оксида цинка, придавая ему состояние, меняющееся от металла, переходящего в полупроводник, до диэлектрика. При изменении концентрации кислорода в камере магнетронного распыления от 25 до 90 %, при постоянном давлении суммы газов кислорода и аргона, равном 1 Па, изменяются стехиометрические характеристики кристаллической решётки оксида цинка, что сказывается на специфике поверхностных дефектов кристаллической

решётки и, соответственно, на параметрах наноразмерных ловушек квазичастиц. По этой причине важно определиться в количественных соотношениях газов в камере магнетронного распыления и в их проявлении с наибольшим эффектом формирования задаваемых свойств фотонного эха.

В основе рассматриваемых принципов проектирования новых нанoeлектронных приборов лежат свойства слоя оксида цинка. Потому очень важно для реализации принципов резонансной обработки информации в приборах, построенных на основе фотонного эха, выявить характер релаксационного спада стимулированного фотонного эха в зависимости от соотношения концентрации кислорода и аргона в камере магнетронного распыления оксида цинка.

Блок-схема экспериментальной установки приведена на рис. 6.

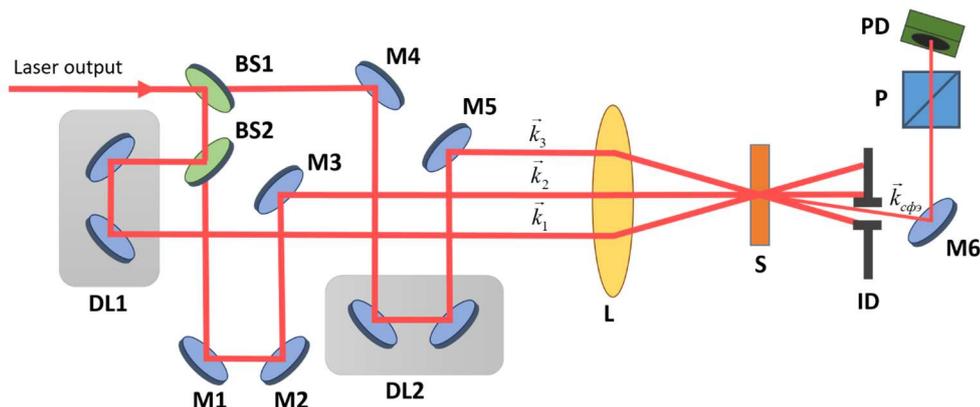


Рис. 6. Блок-схема экспериментальной установки: M1-M6 – диэлектрические зеркала; BS1, BS2 – светоделители 50/50; DL1, DL2 – оптические линии задержки; L – фокусирующая линза; S – объект исследования; ID – ирисовая диафрагма; P – поляризатор; PD – фотодетектор  
 Fig. 6. Block diagram of the experimental facility: M1-M6 – dielectric mirrors; BS1, BS2 – 50/50 beam splitters; DL1, DL2 – optical delay lines; L is the focusing lens; S is the object of study; ID – iris diaphragm; P is the polarizer; PD – photodetector

В экспериментальных исследованиях возбуждение СФЭ проводилось тремя разнесёнными во времени импульсами лазера в пучках, распространявшихся в направлении  $k_1$ ,  $k_2$  и  $k_3$ , под углами друг к другу, равными 8 градусам. Длительность возбуждающих лазерных импульсов составляла 40 фс, плотность мощности на поверхности возбуждаемых плёнок отвечала нижней границе наблюдения сигнала эха  $12,5 - 59,7$  ГВт/см<sup>2</sup>. Длина волны возбуждающих импульсов составляла  $805 \pm 15$  нм. Линза L имела фокусное расстояние 15 см, при этом расстояние от линзы L до исследуемого образца плёнки составляло 14 см.

Входной лазерный импульс на светоделителе BS1 делился на два равных по энергии лазерных пучка. Первый пучок на светоделителе BS2 снова делился на два равных по энергии пучка, один из которых зеркалами M1, M2 и M3 направлялся через фокусирующую линзу L на исследуемый тонкоплёночный образец в направлении первого возбуждающего импульса  $k_1$ , а другой, пройдя оптическую линию задержки DL1, через фокусирующую линзу L направлялся на исследуемый тонкоплёночный образец в направлении второго возбуждающего импульса  $k_2$ . Второй пучок после светоделителя BS1 зеркалом M4 через оптическую линию задержки

DL2 и через фокусирующую линзу L направляется зеркалом M5 на исследуемый тонкоплёночный образец в направлении второго возбуждающего импульса  $k_3$ . Все три возбуждающих лазерных импульса, пройдя исследуемый образец, поглощаются диафрагмой ID. Формируемый в тонкоплёночном исследуемом образце сигнал СФЭ, согласно характерному для условия пространственного синхронизма [16], распространяется в своём направлении  $k_{CFE}$ . Поляризационная призма P, устанавливаемая на входе фотодетектора PD, регистрирующего сигналы СФЭ и сигнал четвертьволнового смещения (ЧВС), ориентирована на выделение линейной поляризации в вертикальном направлении, совпадающем с направлением поляризации возбуждающих лазерных импульсов и сигнала СФЭ. Благодаря этой призме P исключается прохождение на фотодетектор паразитных деполаризующих рассеиваний света на оптических элементах экспериментальной установки. В этом же направлении  $k_{CFE}$  распространяется ЧВС. Сигнал ЧВС формируется в момент совпадения по времени всех трёх возбуждающих лазерных импульсов. При смещении во времени одного из возбуждающих лазерных импульсов, например, третьего (при росте временного интервала между вторым и третьим возбуждающими

импульсами  $\tau_{23}$ ) в сторону опережения или отставания по отношению к первому и второму возбуждающим импульсам, сигнал ЧВС симметрично уменьшается до нуля. Нулевое значение соответствует отсутствию пересечения по времени длительности сдвигаемого импульса и других возбуждающих лазерных импульсов. В итоге мы получали ситуацию наложения друг на друга двух сигналов ЧВС и СФЭ. Сигнал СФЭ при увеличении небольших временных задержек  $\tau_{23}$  растёт по интенсивности за счёт возрастания концентрации активных частиц, участвующих в формировании фотонного эха. Когда возрастание концентрации активных частиц приводит к интенсификации упругих (деполяризующих) и неупругих (газокинетических) столкновений активных частиц до значений, приводящих к затуханию интенсивности эхосигнала в большей мере, чем его возрастание благодаря повышению концентрации активных частиц, формируется кривая релаксационного

спада СФЭ. По координатам двух точек на кривой релаксационного спада при значениях  $\tau_{23}$ , больших тех, после которых сигнал ЧВС отсутствует согласно выражению (1), вычисляется время необратимой продольной релаксации (время тушения возбужденного состояния)  $T_1$ .

$$T_1 = \frac{2(\tau_{23}^{(2)} - \tau_{23}^{(1)})}{\ln(I_{cp.c}^{(1)} / I_{cp.c}^{(2)})}, \quad (1)$$

где  $I_{cp.c}^{(1)}$  и  $I_{cp.c}^{(2)}$  – значения средней интенсивности сигналов СФЭ, соответствующие временным интервалам между возбуждающими импульсами, соответственно, равными  $\tau_{23}^{(1)}$  и  $\tau_{23}^{(2)}$ .

На рис. 7 приведены релаксационные спады стимулированного фотонного эха трёхслойных плёнок  $ZnO/Si(B)/Si(P)$ , сформированных при соотношениях концентрации кислорода к аргону в камере магнетронного распыления, составляющих 25 к 75 %, 50 к 50 %, 75 к 25 % и 90 к 10 %.

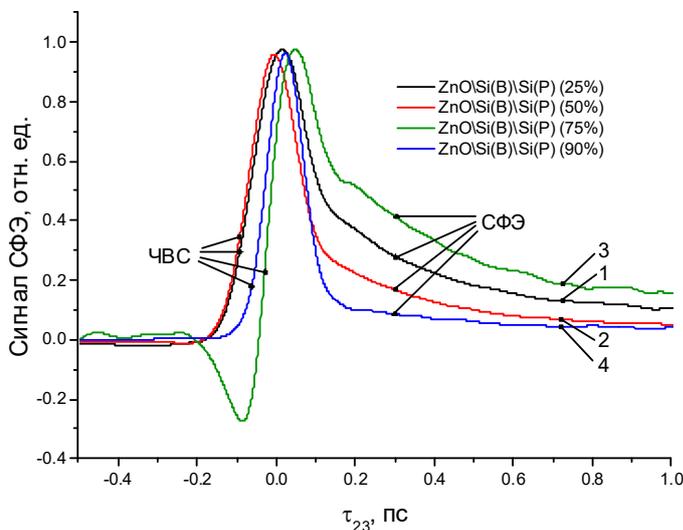


Рис. 7. Релаксационные спады СФЭ в трёхслойных структурах  $ZnO/Si(B)/Si(P)$ , сформированных при соотношении концентрации кислорода к аргону в камере магнетронного распыления, равном 25 к 75 % (кривая 1), 50 к 50 % (кривая 2), 75 к 25 % (кривая 3), 90 к 10 % (кривая 4), при этом максимальное значение всех кривых нормировано к единице, а также показаны сигналы ЧВС (четырёхволнового смешения), с ветвями, симметрично спадающими при увеличении в обе стороны задержки третьего возбуждающего импульса относительно нулевого значения

Fig. 7. Relaxation decays of stimulated photon echo (SPE) in three-layer  $ZnO/Si(B)/Si(P)$  structures produced at a ratio of oxygen to argon concentration in the magnetron sputtering chamber of 25 % to 75 % (curve 1), 50 % to 50 % (curve 2), 75 % to 25 % (curve 3), 90 % to 10 % (curve 4), while the maximum value of all curves is normalized to unity, and the signals of the FWM (four-wave mixing), with branches falling symmetrically with an increase in both directions of the delay of the third exciting pulse relative to the zero value

При соотношении концентрации кислорода к аргону в камере магнетронного распыления 25 к 75 % время релаксации  $T_1$  плёнки составило  $518 \pm 16$  фс, для 50 к 50 % –  $516 \pm 21$  фс, 75 к 25 % –  $643 \pm 25$  фс, 90 к 10 % –  $740 \pm 39$  фс.

Наибольшая интенсивность СФЭ наблюдается при соотношении концентрации кислорода и аргона в камере магнетронного распыления 75 к 25 %.

Из рис. 7 время релаксации  $T_1$ , определяющее временной интервал, при котором могут работать оптические процессоры и устройства оптической обработки информации, растёт по мере уменьшения доли кислорода и соответствующего возрастания доли аргона, когда для концентрации кислорода в камере более 25 % молекулярный состав кислорода в оксиде цинка остаётся постоянным [17]. Этим показано, что в силу изменения времени релаксации  $T_1$ , из-за уменьшения линей-

ных размеров ловушек трионов имеет место изменение стереометрии кристаллов оксида цинка.

**Релаксационный спад СФЭ как метод отражения роли дырок и электронов, инжектируемых с подслоёв в рабочий слой оксида цинка в составе исследуемых плёнок.** Исследование релаксационных спадов трёхслойной структуры  $ZnO/Si(B)/Si(P)$  и двухслойных структур  $ZnO/Si(B)$ , доноров дырок, и  $ZnO/Si(P)$ , доноров электронов, выявило, что интенсивность СФЭ в трёхслойной структуре близка к сумме экосигналов, формируемых на двухслойной структуре  $ZnO/Si(B)$  на экситонах оксида цинка, заряженных инжектированными дырками, то есть на положительных трионах, и на двухслойной структуре  $ZnO/Si(P)$  на экситонах оксида цинка, заряженных инжектированными электронами, то есть на отрицательных трионах (см. рис. 8).

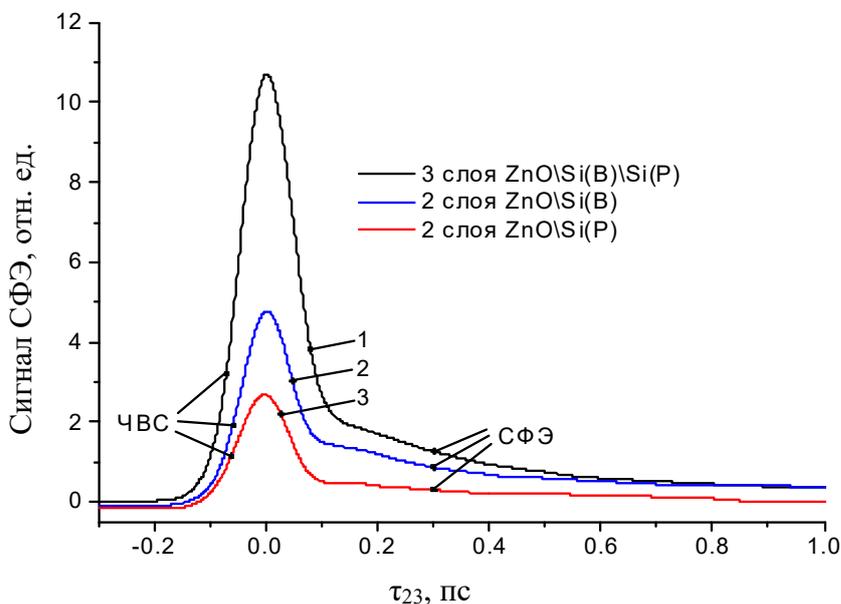


Рис. 8. Релаксационные спады СФЭ в трёхслойной структуре  $ZnO/Si(B)/Si(P)$  (кривая 1) при наличии положительных и отрицательных трионов и двухслойных плёнках  $ZnO/Si(B)$  (кривая 2) с положительными трионами и  $ZnO/Si(P)$  (кривая 3) с отрицательными трионами, а также показаны сигналы ЧВС (четырёхволнового смешения) с ветвями, симметрично спадающими при увеличении в обе стороны задержки третьего возбуждающего импульса относительно нулевого значения  
 Fig. 8. Relaxation decays of the SPE in the three-layer  $ZnO/Si(B)/Si(P)$  structure (curve 1) in the presence of positive and negative trions and two-layer  $ZnO/Si(B)$  films (curve 2) with positive trions and  $ZnO/Si(P)$  (curve 3) with negative trions, as well as FWM signals with branches that fall symmetrically with increasing to both sides of the delay of the third excitatory pulse relative to the zero value

Из рис. 8 следует, что с помощью релаксационных кривых спада СФЭ возможна идентификация положительных и отрицательных трионов или их совокупности в слое оксида цинка при комнатной температуре. Выявлено, что вклад в формирование СФЭ в трёхслойной структуре  $ZnO/Si(B)/Si(P)$  положительных трионов больше, чем отрицательных. Интенсивность СФЭ на чисто экситонных состояниях в слое оксида цинка толщиной 100 нм была на порядок меньше интенсивности СФЭ [15], формируемого в структуре плёнки, то есть СФЭ в трёхслойной структуре в большей мере формируется как на локализованных положительных, так и отрицательных трионах. Заметим, что в работах [18, 19, 20] для обнаружения трионов проводилось формирование фотонного эха в квантовых точках лишь при низких температурах в виде биений эхосигналов, формируемых поочередно на уровнях с проекциями спинов  $+3/2$  и  $-3/2$ , подключаемых с частотой ларморовой прецессии, возникающей при воздействии однородного поперечного магнитного поля.

Анализируя топологию поверхности исследуемых структур, приведённую на рис. 5, и релаксационные спады СФЭ, приведённые на рис. 7, установлено, что наиболее правильную форму имеет структура, сформированная при концентрации кислорода в магнетронной камере 25 %, в силу наличия наименьшей деформации стехиометрических параметров кристаллической решётки и равномерном распределении кривизны поверхности кристаллических волокон плёнок, что проявляется в наиболее повторяемых размерах наноразмерных ловушек трионов и приемлемом для оптических эхопроцессоров значений времени необратимой релаксации  $T_1$ .

Поскольку слои  $Si(B)$  и  $Si(P)$  инжектируют дырки и электроны в слой оксида цинка, важно выявить наличие или отсутствие связи интенсивности СФЭ с толщиной этих подслоёв. На рис. 9 показан релаксационный спад стимулированного фотонного эха при различных толщинах инжектирующих слоёв. Наиболее эффективной при толщине слоя оксида цинка в 100 нм оказалась толщина инжектирующих подслоёв в 100 нм.

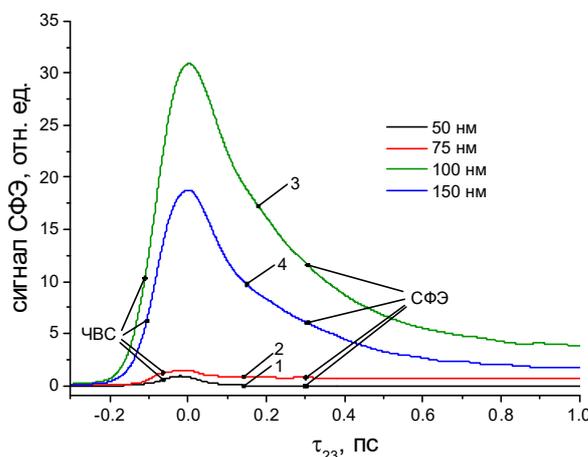


Рис. 9. Релаксационный спад СФЭ в слоистых структурах  $ZnO/Si(B)/Si(P)$  при толщине обоих подслоёв, инжектирующих в слой оксида цинка, соответственно, дырки и электроны, составляющей 50 нм (кривая 1), 75 нм (кривая 2), 100 нм (кривая 3) и 150 нм (кривая 4); при этом на всех кривых спад СФЭ показан на фоне заднего фронта сигнала ЧВС (четырёхволнового смешения) с ветвями, симметрично спадающими при увеличении в обе стороны задержки третьего возбуждающего импульса относительно нулевого значения

Fig. 9. Relaxation decay of SPE in layered structures  $ZnO/Si(B)/Si(P)$  at the thickness of both sublayers that inject into the zinc oxide layer, respectively, holes and electrons, the component 50 nm (curve 1), 75 nm (curve 2), 100 nm (curve 3) and 150 nm (curve 4); while on all curves the SPE decay is shown against the background of the trailing edge of the FWM signal with branches falling symmetrically with an increase in both directions of the delay of the third exciting pulse relative to the zero value

**Заключение.** В рамках выполненного цикла экспериментальных работ намеченная цель полностью достигнута, то есть установлены релаксационные спады стимулированного фотонного эха для 12 видов слоистых структур  $ZnO/Si(B)/Si(P)$ ,  $ZnO/Si(B)$  и  $Si(P)$ , обладающие информацией о необходимых параметрах технологического процесса их получения (давления и температуры рабочей смеси, соотношения в ней кислорода и аргона, с приемлемыми значениями 25 к 75 % и 75 к 25 % в камере магнетронного распыления, обеспечивающих их оптические свойства (наибольшие значения времени необратимой продольной релаксации  $T_1$ , достигшего 0,74 пс, и амплитуды СФЭ), используемые для построения наноэлектронных приборов на основе фотонного эха.

При этом поставленные задачи выполнены в полном объёме:

- разработана и обоснована возможность разработки и экспериментальной реализации параметров технологии получения трёхслойной структуры  $ZnO/Si(B)/Si(P)$  и её двухслойных комбинаций с наличием  $ZnO$ , предназначенных для проектирования принципов действия новых наноэлектронных приборов на основе фотонного эха, составляющих давление и температуру газовой смеси, соответственно, 1 Па, в том числе соотношение кислорода к аргону в рабочей смеси 25 к 75 %, 50 к 50 %, 75 к 25 %, 90 к 10 %, температура 30 °С, время напыления 60 с, напряжение между магнетроном и мишенью кремния Si на магнетроне 550 В при токе 0,3 А и времени распыления кремния 180 с, напряжение между магнетроном и мишенью цинка Zn 330 В при токе 1 А и временем распыления цинка 60 с;

- проведена регистрация спектров пропускания оптического излучения и определение по ним толщины подслоёв 12 видов исследуемых слоистых структур;

- методом зондовой микроскопии исследована топология поверхности трёхслойной и двухслойных слоистых структур на основе оксида цинка в количестве девяти штук и показан подход выявления

по этим результатам наиболее приемлемых вариантов слоистых структур тонких плёнок для проектирования наноэлектронных приборов на основе фотонного эха при соотношениях кислорода к аргону к рабочей газовой смеси в камере магнетронного распыления 25 к 75 %;

- проведено исследование релаксационного спада СФЭ в слоистых структурах  $ZnO/Si(B)/Si(P)$  как метода определения времени необратимой продольной релаксации возбуждённых квантовых состояний  $T_1$ , составившего при соотношении концентрации кислорода к аргону в камере магнетронного распыления 25 к 75 %  $T_1 = 518 \pm 16$  фс, для 50 к 50 % –  $516 \pm 21$  фс, 75 к 25 % –  $643 \pm 25$  фс, 90 к 10 % –  $740 \pm 39$  фс, наиболее эффективного для возбуждения сигналов СФЭ, имеющих значения 25 к 75 % и 75 % к 25 %;

- предложен метод идентификации видов кватернионов, задействованных в формировании СФЭ и выявлении роли дырок и электронов, инжектируемых со слоистых структур легированного кремния в рабочий слой оксида цинка, в составе исследуемых слоистых структур.

Установлена зависимость СФЭ от толщины инжектирующих слоёв трёхслойной структуры, от топологии поверхности слоя оксида цинка, при этом наиболее практически значимые результаты получены при значениях толщины всех слоёв в составе структуры 100 нм.

Сумма интенсивности эхооткликов, сформированных на положительных и отрицательных трионах, близка интенсивности эхоотклика на трёхслойной структуре, при одинаковом соотношении концентрации кислорода и аргона в камере магнетронного распыления при получении этих исследуемых слоистых структур. При этом в плёнке  $ZnO/Si(B)/Si(P)$  преобладала составляющая, сформированная на положительных трионах. При этом к наиболее оптимальным параметрам технологического процесса формирования тонкоплёночной активной среды для наноэлектронных приборов на основе фотонного

эха с позиции достижения наибольших значений сигнала СФЭ является соотношение концентрации кислорода в магнетронной камере, составляющее 75 к 25 %, при толщине слоёв плёнки по 100 нм. В слоистой структуре ZnO\Si(B)\Si(P) соотношение между положительными и отрицательными трионами имело преимущество положительных трионов.

Практическая значимость полученных результатов заключается в предложении практически значимых методов контроля применяемых параметров технологического процесса, обеспечивающих параметры активных сред, для проектируемых новых наноэлектронных приборов, например, регистраторов фемтосекундных временных интервалов [21].

#### Список источников

1. Электрические и оптические свойства пленок оксида цинка, нанесенных методом ионнолучевого распыления оксидной мишени / А.П. Достанко, О.А. Агеев, Д.А. Голосов и др. // Физика и техника полупроводников. 2014. Т.48. Вып. 9. С. 1274-1279.
2. Вольяны, О.Д., Обод Ю.А., Яковлев П.П. Получение оптических пленок оксида цинка магнетронным распылением на постоянном и переменном токе // Прикладная физика. 2010. № 3. С. 24-30.
3. Electrochemical stability enhancement in reactive magnetron sputtered Zn films upon annealing treatment / A. Achour, M. Islam, I. Ahmad et al // Coatings. 2019. Vol. 9. No. 2. Pp. 1-7. <https://doi.org/10.3390/coatings9020072>.
4. Correlative experimental and theoretical investigation of the angle-resolved composition evolution of thin films sputtered from a compound Mo2Bc target / J. Achenbach, S. Mráz, D. Primetzhofer et al. // Coatings. 2019. Vol. 9. No. 3. Pp. 1-14. <https://doi.org/10.3390/coatings9030206>.
5. Cougnon F., Depla D. The seebeck coefficient of sputter deposited metallic thin films: the role of process conditions // Coatings. 2019. Vol. 9. No. 5. Pp. 1-13 / <https://www.mdpi.com/2079-6412/9/5/299>
6. Gas sensing with nanoplasmonic thin films composed of nanoparticles (Au, Ag) dispersed in a Cu matrix / M. Proença, M. Rodrigues, J. Borges et al. // Coatings. 2019. Vol. 9. No. 5. Pp. 1-11. <https://www.mdpi.com/2079-6412/9/5/337>.
7. Nickel film deposition with varying rf power for the reduction of contact resistance in NiSi / S. Eadi, H. Song, H. Song et al. // Coatings. 2019. Vol. 9. No. 6. Pp. 1-9/ <https://www.mdpi.com/2079-6412/9/6/349>.
8. Experimental and modeling study of the fabrication of Mg nano-sculpted films by magnetron sputtering combined with glancing angle deposition / H. Liang, X. Geng, W. Li et al. // Coatings. 2019. Vol. 9. No. 6. Pp. 1-12. <https://www.mdpi.com/2079-6412/9/6/361>.
9. Phase Selectivity in Cr and N co-doped TiO<sub>2</sub> films by modulated sputter growth and post-deposition flash-lamp-annealing / R. Gago, S. Prucnal, R. Hübner et al. // Coatings. 2019. Vol. 9. No. 7. Pp. 1-13. <https://www.mdpi.com/2079-6412/9/7/448>.
10. The effect of RF sputtering conditions on the physical characteristics of deposited GeGaN thin film / C. Thao, D. Kuo, T. Tuan et al. // Coatings. 2019. Vol. 9. No. 10. Pp. 3-10/ <https://www.mdpi.com/2079-6412/9/10/645>.
11. Фотонное эхо как метод диагностирования возможностей ловушек экситонов и трионов в наноэлектронном приборостроении / И. И. Попов, А. В. Мороз, А. А. Гладышева и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2021. № 1(49). С. 80-87. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2021.1.80>
12. Возможности магнетронного распыления в создании ловушек экситонов и трионов для наноэлектронного приборостроения / И. И. Попов, А. В. Мороз, А. А. Гладышева и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2021. № 1(49). С. 63-77. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2021.1.63>.
13. Вашиурин Н.С., Попов И.И., Путилин С.Э. Фотонное эхо как метод исследования дефектной структуры поверхности кристаллических волокон тонких текстурированных пленок // Известия РАН. Серия физическая. 2017. Т. 81. № 5. С. 597-601.
14. Фемтосекундная магнитооптика на основе фотонного эха / И.И. Попов, Н.С. Вашиурин, С.Э. Путилин и др. // Известия РАН. Серия физическая. 2017. Т. 81. № 5. С. 594-597.
15. Квантово-размерные объекты в виде ловушек экситонов и трионов и их роль при экситонном частичном блокировании мемристорных свойств тонких пленок оксида цинка / И. И. Попов, А. В. Мороз, Д. В. Минеев и др. // Известия РАН. Серия физическая. 2021. Т. 85. № 2. С. 273-280.
16. Маныкин Э. А., Самарцев В. В. Оптическая эхоспектроскопия. М.: Наука, 1984. 270 с.
17. Выбор материалов и нанотехнология изготовления комбинированного мемристорного диодного кроссбара – основа аппаратной реализации нейропроцессора / А.Д. Писарев, А.Н. Бусыгин, А.Н. Бобылев и др. // Вестник Тюменского

государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2019. Т. 5. № 4 (20). С. 200-219.

18. Magnetic-Field Control of Photon Echo from the Electron-Trion System in a CdTe Quantum Well: Shuffling Coherence between Optically Accessible and Inaccessible States / L. Langer, S.V. Poltavtsev, I.A. Yugova et al. // Phys.Rev. Lett. 2012. Vol. 109. Pp. 157403–157408. Doi. 10.1103/PhysRevLett.109.157403

19. Access to long-term optical memories using photon echoes retrieved from semiconductor spins /

L. Langer, S.V. Poltavtsev, I.A. Yugova et al. // Nature Photon. 2014. Vol. 8. №. 11. Pp. 851-857.

20. Фотонное эхо на локализованных экситонах в полупроводниковых наноструктурах/ С.В. Полтавцев, И.А. Югова, И.А. Акимов и др. // Физика твердого тела. 2018. Т. 60. №. 8. С.1587–1596.

21. Фотонное эхо как метод фемтосекундной магнитооптической спектроскопии тонких текстурированных пленок / И.И. Попов, Н.С. Вашурин, Е.А. Виноградов и др. // Известия РАН. Серия физическая. 2018. Т. 82. № 8. С. 1113-1116.

Статья поступила в редакцию 13.05.2022; одобрена после рецензирования 07.06.2022; принята к публикации 15.06.2022

### Информация об авторах

*ПОПОВ Иван Иванович* – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – оптическая спектроскопия, наноэлектронное приборостроение. Автор 405 научных публикаций.

*ЮСУПОВ Роман Валерьевич* – кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Центра квантовых технологий, Казанский (Приволжский) федеральный университет. Область научных интересов – физика твёрдого тела, магнетизм, сверхпроводимость, тонкие плёнки и гетероструктуры, фазовые переходы, сверхбыстрые когерентные процессы, магнитная и оптическая спектроскопия. Автор 100 научных публикаций.

*ВОЛКОВ Кирилл Александрович* – магистр, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – технология наноэлектронного приборостроения. Автор восьми научных публикаций.

*КОЗЫРЕВ Антон Геннадьевич* – аспирант кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – формирование тонких плёнок магнетронным распылением, наноэлектронное приборостроение. Автор 12 научных публикаций.

*МАЛЬЦЕВА Светлана Андреевна* – магистр, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – технология наноэлектронного приборостроения. Автор пяти научных публикаций.

*МОРОЗ Андрей Викторович* – кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – формирование тонких плёнок магнетронным распылением и исследование взаимосвязи их свойств с технологическим режимом. Автор 38 научных публикаций.

*ПЕТРОВ Андрей Вячеславович* – инженер-проектировщик Центра квантовых технологий, Казанский (Приволжский) федеральный университет. Область научных интересов – исследование сверхбыстрых процессов в магнитных тонкоплёночных структурах и монокристаллах, индуцированных фемтосекундными лазерными импульсами, фемтосекундная оптическая и магнитооптическая спектроскопия. Автор 20 научных публикаций.

**Вклад авторов:**

*Попов И. И.* – постановка задачи исследований, формирование требований к экспериментальной установке по исследованию фотонного эха в тонких слоистых структурах и к изготавливаемым тонким плёнкам, проведение экспериментальных исследований по снятию релаксационных спадов стимулированного фотонного эха, анализ научных результатов, вытекающих из экспериментальных кривых, спектров поглощения и топологии поверхности.

*Юсупов Р. В.* – разработка и экспериментальная реализация оптической схемы для снятия фотонного эха в тонких слоистых структурах, включая юстировку оптических элементов и контроль параметров оптического излучения. Проведение экспериментальных исследований по снятию релаксационных спадов стимулированного фотонного эха, анализ научных результатов, вытекающих из экспериментальных кривых.

*Волков К. А.* – разработка технологических параметров технологии получения серии намеченных для исследования тонких плёнок, изготовление трёхслойных тонких слоистых структур различной толщины и с разным количеством кислорода в камере магнетронного распыления, анализ научных результатов, вытекающих из снятых спектров пропускания и полученной топологии поверхности тонких слоистых структур различной толщины и наличия кислорода в оксиде цинка в сочетании с релаксационными спадами стимулированного фотонного эха.

*Козырев А. Г.* – снятие информации о топологических зависимостях исследуемых плёнок от их толщины и содержания тонких слоистых структур.

*Мальцева С. А.* – изготовление двухслойных тонких слоистых структур различной толщины и с разным количеством кислорода в камере магнетронного распыления.

*Мороз А. В.* – разработка технологии получения тонких слоистых структур с различным составом кислорода в составе слоёв оксида цинка и анализ полученных параметров этих структур. Анализ полученных научных результатов.

*Петров А. В.* – разработка и экспериментальная реализация оптической схемы для снятия фотонного эха в тонких слоистых структурах, включая юстировку оптических элементов и контроль параметров оптического излучения. Проведение экспериментальных исследований по снятию релаксационных спадов стимулированного фотонного эха, обработка регистрируемой информации и построение кривых релаксационных спадов экосигналов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Scientific article

UDC 62-4

<https://doi.org/10.25686/2306-2819.2022.2.61>**Relaxation Decay of Stimulated Photon Echo as a Key Parameter for Evaluation of Conditions for Obtaining Thin-Film Active Media****I. I. Popov<sup>1</sup>, R. V. Yusupov<sup>2</sup>, K. A. Volkov<sup>1</sup>, A. G. Kozyrev<sup>1</sup>, S. A. Maltseva<sup>1</sup>,  
A. V. Moroz<sup>1</sup>, A. V. Petrov<sup>2</sup>**<sup>1</sup> Volga State Technological University,  
3, Lenin Sqr, Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation<sup>2</sup> Kazan (Volga Region) Federal University,  
18, Kremlevskaya str., Kazan, 420008, Russian Federation  
[biht.orol@gmail.com](mailto:biht.orol@gmail.com)✉**Keywords:** thin-film active media for nanoelectronics; surface defects of the crystal lattice; probe microscopy; localized trions; photon echo; irreversible longitudinal relaxation time  $T_1$ **ABSTRACT**

**Introduction.** The presented study into technologies for obtaining thin-film active media with a wide range of parameters is urgent, that is proved by the facts confirming the possibility of creating nanoelectronic devices based on new physical principles such as a femtosecond time interval recorder, memristor memory on nanoelectronic trion traps in zinc oxide films. **The aim** of the research was to establish the relaxation decays of the stimulated photon echo of layered structures ZnO\Si(B)\Si(P), which have information about the necessary parameters of the technological process of their production, providing their optical properties used to build nanoelectronic devices based on photon echo. **Research methods** include probe microscopy, optical spectrophotometry, optical echo spectroscopy with ultrahigh time resolution, adjustment of the magnetron sputtering technology parameters of thin-film layered structures in question, including the ratio of the concentration of oxygen to argon of the working gas mixture in the magnetron sputtering chamber, the sputtering time of layered structures, the composition of layers of thin-film active medium for nanoelectronic devices. **The research findings** showed the presence of various specific dependences of the stimulated photon echo (SPE) decay in layered structures formed at oxygen to argon ratios effective for excitation of echo signals in the working gas mixture in the chamber for magnetron sputtering of layered structures. The irreversible transverse relaxation time  $T_1$  was  $518 \pm 16$  fs at the ratio of oxygen to argon concentration in the chamber for magnetron sputtering of 25% to 75%;  $516 \pm 21$  fs at the ratio of 50% to 50%;  $740 \pm 39$  fs at the ratio of 90% to 10%. The most effective ratios to excite SPE signals were 25% to 75% and 75% to 25%. The study allowed to obtain the dependences of the SPE on the most effective thickness of the layers of the three-layer structure, which inject holes and electrons into the ZnO layer and on the surface topology of the zinc oxide film. In addition to this, it was found that the presence of both types of localized trions (positive and negative) with the dominance of positive trions in the thin-film active medium is obligatory condition. **Conclusions.** The dependence of the echo signal on the thickness of the injecting 100 nm layers of the three-layer structure was found according to the relaxation decays of the SPE. The longest time of irreversible longitudinal relaxation  $T_1$  was not less than 0.74 ps. The intensity of the echo in the ZnO\Si(B)\Si(P) film was close to the sum of the echos formed on purely positive and negative localized trions, with the dominating contribution of positive trions. From the point of view of SPE formation, the most effective ratios of the concentration of oxygen to argon in the working gas mixture in the chamber for magnetron sputtering of films are 25% to 75% and 75% to 25%. **The practical significance** of the results is manifested in the proposal of relevant methods for monitoring the applied parameters of the technological process that ensure the parameters of active media appropriate for designing new nanoelectronic devices, for instance, femtosecond time interval recorders.

**Funding:** the work of R. V. Yusupov and A. V. Petrov was supported by the program « Priority-2030 » from Kazan Federal University.**Acknowledgments:** the authors would like to express sincere gratitude to Nikolay Ivanovich Sushentsov, Head of the Department of Design and Production of Radioelectronic Equipment of Volga State University of Technology for the support in the production of the studied thin films and the control of their parameters.

## REFERENCES

1. Dostanko A.P., Ageev O.A., Golosov D.A. et al. Jelektricheskie i opticheskie svojstva plenok oksida cinka, nanosenyih metodom ionnoluchevogo raspylenija oksidnoj misheni [Electrical and optical properties of zinc oxide films deposited by ion-beam sputtering of an oxide target]. *Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov*. 2014. Vol. 48. No 9. Pp. 1274-1279. (In Russ.)
2. Volpyan, O.D., Obod Yu.A., Yakovlev P.P. Poluchenie opticheskikh plenok oksida cinka magnetronnym raspyleniem na postojannom i peremennom toke [Fabricating the optic films from zinc oxide by magnetron sputtering on direct and alternating current]. *Prikladnaya fizika* [Applied physics]. 2010. No 3. Pp. 24-30. (In Russ.)
3. Achour A., Islam M., Ahmad I. et al. Electrochemical stability enhancement in reactive magnetron sputtered films upon annealing treatment. *Coatings*. 2019. Vol. 9. No. 2 Pp. 1-7. <https://doi.org/10.3390/coatings9020072>.
4. Achenbach J., Mráz S., Primetzhofer D. et al. Correlative experimental and theoretical investigation of the angle-resolved composition evolution of thin films sputtered from a compound  $\text{Mo}_2\text{C}$  target. *Coatings*. 2019. Vol. 9. No. 3. Pp. 1-14. <https://doi.org/10.3390/coatings9030206>.
5. Cougnon F., Depla D. The seebeck coefficient of sputter deposited metallic thin films: the role of process conditions. *Coatings*. 2019. Vol. 9. No. 5. Pp. 1-13. <https://www.mdpi.com/2079-6412/9/5/299>
6. Proença M., Rodrigues M., Borges J. et al. Gas sensing with nanoplasmonic thin films composed of nanoparticles (Au, Ag) dispersed in a Cu matrix. *Coatings*. 2019. Vol. 9. No. 5. Pp. 1-11. <https://www.mdpi.com/2079-6412/9/5/337>.
7. Eadi S., Song H., Song H. et al. Nickel film deposition with varying rf power for the reduction of contact resistance in NiSi. *Coatings*. 2019. Vol. 9. No. 6. Pp. 1-9. <https://www.mdpi.com/2079-6412/9/6/349>.
8. Liang H., Geng X., Li W. et al. Experimental and modeling study of the fabrication of Mg nano-sculpted films by magnetron sputtering combined with glancing angle deposition. *Coatings*. 2019. Vol. 9. No. 6. Pp. 1-12. <https://www.mdpi.com/2079-6412/9/6/361>.
9. Gago R., Prucnal S., Hübner R. et al. Phase Selectivity in Cr and N co-doped  $\text{TiO}_2$  films by modulated sputter growth and post-deposition flash-lamp-annealing. *Coatings*. 2019. Vol. 9. No. 7. Pp. 1-13. <https://www.mdpi.com/2079-6412/9/7/448>.
10. Thao C., Kuo D., Tuan T. et al. The effect of RF sputtering conditions on the physical characteristics of deposited GeGaN thin film. *Coatings*. 2019. Vol. 9. No. 10. Pp. 3-10. <https://www.mdpi.com/2079-6412/9/10/645>.
11. Popov I. I., Moroz A. V., Gladysheva A. A. et al. Fotonnoe jecho kak metod diagnostirovanija vozmozhnostej lovushek jeksitonov i trionov v nanoelektronnom priborostroenii [Photon echo as a method for diagnosing the possibilities of exciton and trion traps in nanoelectronic engineering]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya «Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy»* [Vestnik of Volga State University of Technology. Series "Radio Engineering and Infocommunication Systems"]. 2021. No 1(49). Pp. 80-87. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2021.1.80> (In Russ.)
12. Popov I. I., Moroz A. V., Gladysheva A. A. et al. Vozmozhnosti magnetronnogo raspylenija v sozdanii lovushek jeksitonov i trionov dlja nanoelektronnogo priborostroenija [Capabilities of magnetron sputtering for the creation of exciton and trion traps for nanoelectronic engineering]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya «Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy»* [Vestnik of Volga State University of Technology. Series "Radio Engineering and Infocommunication Systems"]. 2021. No 1(49). Pp. 63-77. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2021.1.63>. (In Russ.)
13. Vashurin N.S., Popov I.I., Putilin S.E. Fotonnoe jecho kak metod issledovanija defektnoj struktury poverhnosti kristallicheskih volokon tonkih teksturirovannyh plenok [Photon echoes as means of studying defective surface structure of the crystal fibers of thin films]. *Izvestija RAN. Serija fizicheskaja* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics]. 2017. Vol. 81. No 5. Pp. 597-601. (In Russ.)
14. Popov I.I., Vashurin N.S., Putilin S.E. et al. Femtosekundnaja magnitooptika na osnove fotonnogo jeha [Femtosecond magnito-optics based on photon echoes]. *Izvestija RAN. Serija fizicheskaja* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics]. 2017. Vol. 81. No 5. Pp. 594-597. (In Russ.)
15. Popov I. I., Moroz A. V., Mineev D. V. et al. Kvantovo-razmernye obekty v vide lovushek jeksitonov i trionov i ih rol pri jeksitonnom chastichnom blokirovanii memristornyh svojstv tonkih plenok oksida cinka [Quantum-sized objects in the form of exciton and trion traps: their role in excitonic partial blocking of the memristor properties of thin zinc oxide films]. *Izvestija RAN. Serija fizicheskaja* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics]. 2021. Vol. 85. No 2. Pp. 273-280. (In Russ.)
16. Manykin E. A., Samartsev V. V. *Opticheskaja jecho-spektroskopija* [Optical echo spectroscopy]. Moscow, Nauka, 1984. 270 p. (In Russ.)
17. Pisarev A.D., Busygin A.N., Bobylev A.N. et al. Vybor materialov i nanotekhnologija izgotovlenija kombinirovannogo memristornogo-diodnogo krossbara – osnova apparatnoj realizacii nejroprocessora [Materials selection and fabrication nanotechnology of the composite memristor-diode crossbar - the basis of neuroprocessor hardware implementation]. *Vestnik Tjumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Fiziko-*

*matematicheskoe modelirovanie. Neft, gaz, jenergetika* [Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy]. 2019. Vol. 5. No 4 (20). Pp. 200-219. (In Russ.).

18. Langer L., Poltavtsev S.V., Yugova I.A. et al. Magnetic-Field Control of Photon Echo from the Electron-Trion System in a CdTe Quantum Well: Shuffling Coherence between Optically Accessible and Inaccessible States. *Phys.Rev. Lett.* 2012. Vol. 109. Pp. 157403–157408. Doi. 10.1103/PhysRevLett.109.157403

19. Langer L., Poltavtsev S.V., Yugova I.A. et al. Access to long-term optical memories using photon echoes retrieved from semiconductor spins. *Nature Photon.* 2014. Vol. 8. №. 11. Pp. 851-857.

20. Poltavtsev S.V., Yugova I.A., Akimov I.A. et al. Fotonnoe jecho na lokalizovannyh jeksitonah v poluprovodnikovyh nanostrukturah [Photon echo from localized excitons in semiconductor nanostructures]. *Fizika tverdogo tela* [Physics of the Solid State]. 2018. Vol. 60. No 8. Pp. 1587-1596. (In Russ.).

21. Popov I.I., Vashurin N.S., Vinogradov E.A. et al. Fotonnoe jecho kak metod femtosekundnoj magnitoopticheskoj spektroskopii tonkih teksturirovannyh plenok [Using photon echoes for the femtosecond magneto-optical spectroscopy of thin textured films]. *Izvestija RAN. Serija fizicheskaja* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics]. 2018. Vol. 82. No 8. Pp. 1113-1116. (In Russ.).

The article was submitted 25.05.2022; approved after reviewing 10.06.2022; accepted for publication 15.06.2022

**For citation:** Popov I. I., Yusupov R. V., Volkov K. A., Kozyrev A. G., Maltseva S. A., Moroz A. V., Petrov A. V. Relaxation Decay of Stimulated Photon Echo as a Key Parameter for Evaluation of Conditions for Obtaining Thin-Film Active Media. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Radio Engineering and Infocommunication Systems.* 2022. No 2 (54). Pp. 61–79. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2022.2.61>

#### Information about the authors

*Ivan I. Popov* – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor, professor at the Department of Design and Production of Radio Equipment of Volga State University of Technology. Research interests – optical spectroscopy, nanoelectronic instrumentation. The author of 405 scientific publications.

*Roman V. Yusupov* – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, associate professor, senior research scientist at the Quantum Technologies Center of Kazan (Volga Region) Federal University. Research interests – solid state physics, magnetism, superconductivity, thin films and heterostructures, phase transitions, ultrafast coherent processes, magnetic and optical spectroscopy. The author of 100 scientific publications.

*Kirill A. Volkov* – master student at Volga State University of Technology. Research interests – the technology of nanoelectronic instrumentation. The author of 8 scientific publications.

*Anton G. Kozyrev* – PhD student at the Department of Design and Production of Radio Equipment of Volga State University of Technology. Research interests – the production of thin films by magnetron sputtering, nanoelectronic instrumentation. The author of 12 scientific publications.

*Svetlana A. Maltseva* – master student at Volga State University of Technology. Research interests – the technology of nanoelectronic instrumentation. The author of 5 scientific publications.

*Andrey V. Moroz* – Candidate of Technical Sciences, associate professor at the Department of Design and Production of Radio Equipment of Volga State University of Technology. Research interests – the production of thin films by magnetron sputtering and the study of the relationship between their properties and the technological regime. The author of 38 scientific publications.

*Andrey V. Petrov* – design engineer at the Quantum Technologies Center of Kazan (Volga Region) Federal University. Research interests – ultrafast processes in magnetic thin-film structures and single crystals induced by femtosecond laser pulses, femtosecond optical and magneto-optical spectroscopy. The author of 20 scientific publications.

**Contribution of authors:**

*Popov I. I.* – formulation of the research problem, formation of requirements for an experimental facility for the study of photon echo in thin layered structures and for manufactured thin films, carrying out experimental studies on removing relaxation decays of stimulated photon echo, analysis of scientific results obtained from experimental curves, spectra absorption and surface topology.

*Yusupov R. V.* – development and experimental implementation of an optical scheme for photon echo recording in thin layered structures, including adjustment of optical elements and control of optical radiation parameters. Carrying out experimental studies on the removal of relaxation decays of stimulated photon echo, analysis of scientific results obtained from experimental curves

*Volkov K. A.* – development of parameters of the technology for obtaining a series of thin films intended for research, fabrication of three-layer thin layered structures of various thicknesses and with different amounts of oxygen in the magnetron sputtering chamber, analysis of scientific results arising from the recorded transmission spectra and the resulting topology of the surface of thin layered structures of various thicknesses and the presence of oxygen in zinc oxide in combination with relaxation decays of the stimulated photon echo.

*Kozyrev A. G.* – gathering data on the topological dependences of the studied films on their thickness and the content of thin layered structures.

*Maltseva S. A.* – fabrication of two-layer thin layered structures of various thicknesses and with different amounts of oxygen in the magnetron sputtering chamber.

*Moroz A. V.* – development of technology for obtaining thin layered structures with different oxygen composition in the composition of zinc oxide layers and analysis of the obtained parameters of these structures. Analysis of the obtained scientific results.

*Petrov A. V.* – development and experimental implementation of an optical scheme for photon echo recording in thin layered structures, including adjustment of optical elements and control of optical radiation parameters. Carrying out experimental studies on the removal of relaxation decays of stimulated photon echo, processing of recorded information and plotting curves of relaxation decays of echo signals.

Authors declare that they have no conflict of interest.

All authors read and approved the final manuscript.