

УДК 62-4

DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2021.1.80>

ФОТОННОЕ ЭХО КАК МЕТОД ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ЛОВУШЕК ЭКСИТОНОВ И ТРИОНОВ В НАНОЭЛЕКТРОННОМ ПРИБОРОСТРОЕНИИ

И. И. Попов, А. В. Мороз, А. А. Гладышева, А. Ю. Леонтьев, Н. И. Сушенцов

Поволжский государственный технологический университет,

Российская Федерация, 424000, Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3

E-mail: biht.orol@gmail.com

Предлагается обзор экспериментальных исследований процессов, протекающих в ловушках экситонов и трионов, на основе регистрации характеристик фотонного эха, формируемого на уровнях квантово-размерной дискретизации энергии локализованных квазичастиц. На основе регистрируемых характеристик фотонного эха предлагаются новые физические принципы построения нанoeлектронных приборов. В том числе, при формировании фотонного эха под воздействием продольного однородного магнитного поля показана возможность определения наполняемости ловушек трионами, а также прямой регистрации фемтосекундных временных интервалов.

Ключевые слова: магнетронное распыление тонких пленок; экситонные ловушки; трионные ловушки; квантовые точки; регистрация фемтосекундных временных интервалов.

Введение. Оптические свойства оксида цинка в настоящее время являются интенсивно исследуемыми объектами во всех передовых странах мира. Результаты исследования электрических и оптических свойств плёнок оксида цинка, нанесённых методом ионно-лучевого распыления оксидной мишени, приведены в работе [1]. Результаты исследований плёнок оксида цинка, полученных методом магнетронного распыления, приведены в работе [2]. При этом резонансные свойства оксида цинка, особенно экситонных состояний, локализованных в зонах скопления поверхностных дефектов волокнисто-кристаллической текстуры тонких плёнок, формируемых методом магнетронного распыления, изучены недостаточно. Идея поиска и исследования в тонких плёнках областей скопления экситонного или трионного газа, обладающих свойствами квантовых точек, возникла на основе имеющегося опыта проведения экспери-

мента по фотонному эху в классических газовых средах. Типовое фотонное эхо (ФЭ) является оптическим откликом резонансной среды на воздействие двух (или более) разнесённых во времени лазерных импульсов на резонансный переход между парой квантовых уровней энергии, формируемым за время меньшее длительности затухания релаксационных процессов в среде после воздействия на неё возбуждающего излучения [3]. Эксперимент проводился с использованием фемтосекундных импульсов лазерного излучения на длине волны 800 нм. Мы обнаружили в тонкоплёночной резонансной среде сигнал фотонного эха, которого не должно было быть на длине волны 800 нм. Дело в том, что у оксида цинка полоса поглощения света имеется только в ультрафиолетовой области излучения и заканчивается она в районе 400 нм. В результате полученного результата напрашивался вывод, что в плёнке есть области, в которых

© Попов И. И., Мороз А. В., Гладышева А. А., Леонтьев А. Ю., Сушенцов Н. И., 2021.

Для цитирования: Попов И. И., Мороз А. В., Гладышева А. А., Леонтьев А. Ю., Сушенцов Н. И. Фотонное эхо как метод диагностирования возможностей ловушек экситонов и трионов в нанoeлектронном приборостроении // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2021. № 1 (49). С. 80-89. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2021.1.80>

происходит выстраивание новых спектральных линий закачиваемой энергии, аналогичное тому, что ранее наблюдалось множеством исследователей в квантовых точках. Такой вывод мотивировал нас на поиск этих квантовых точек и исследование их свойств. Таким образом появился цикл исследований, приведённый в данном обзоре, подтвердивший нашу гипотезу и давший новый толчок технологическому развитию процесса создания этих квантовых точек и их практическому применению. Потому данный цикл исследований является актуальным, так как направлен на разработку технологий получения квантово-размерных объектов методом магнетронного распыления, обладающих свойствами наноразмерного квантования энергии локализованных в них экситонов или трионов. Показаны особенности функционирования экситонных и трионных ловушек при комнатной температуре, в различных фазовых состояниях экситонов и трионов, отражаемые в изменении времён релаксации этих состояний и спектров фотонного эха, формируемого на трионных состояниях. Полученные результаты обладают хорошей перспективой разработки новых физических принципов для создания оригинальных нанoeлектронных приборов, работающих при комнатной температуре.

Цель работы заключается в исследовании фотонного эха как метода диагностирования возможностей ловушек экситонов и трионов при разработке новых физических принципов построения оригинальных нанoeлектронных приборов.

Задачи исследований включают:

- наблюдение в ловушках экситонов и трионов, сформированных на базе скопления поверхностных дефектов кристалло-волокнуистой текстуры тонких плёнок, резонансного явления фотонного эха, подтверждающего наличие в них спектров энергии локализованных экситонов и трионов, формирующихся в результате дискретизации этой энергии в квантово-размерных объектах;

- построение модели процесса формирования фотонного эха в ловушках экситонов и трионов и разработка методики, подтверждающей наличие у этих ловушек свойств квантовых точек;

- формирование новых видов тонких плёнок с ловушками экситонов и трионов с целью расширения перечня свойств возбуждаемого в них фотонного эха;

- исследование влияния продольного однородного магнитного поля на процесс формирования фотонного эха в ловушках трионов с целью обнаружения их оригинальных свойств, позволяющих разработать новые физические принципы построения нанoeлектронных приборов;

- исследование возможности влияния процесса формирования элементов сверхтонкой структуры квантовых уровней с противоположными спинами, формируемых при дискретизации энергии в наноразмерных ловушках трионов, на процессы, протекающие в этих ловушках.

Наблюдение фотонного эха в ловушках экситонов и трионов. В экситонном газе, формируемом в ловушках оксида цинка, нами показана возможность резонансного возбуждения при комнатной температуре оптических переходных явлений путём регистрации сигналов фотонного эха [4, 5]. Возбуждающие эхосигналы фемтосекундные импульсы лазерного излучения имели длину волны 800 нм. Возбуждаемые тонкие плёнки оксида цинка имели линии поглощения только в ультрафиолетовом диапазоне, то есть на длинах волн больших 400 нм поглощение оптического излучения отсутствовало. В то же время при подаче лазерных импульсов на длине волны 800 нм имела место регистрация фотонного эха на длинах волн в районе 800 нм. Объясняется это тем, что в составе первого возбуждающего импульса имелись фотоны, отвечающие требованиям двухфотонного возбуждения квантового перехода, то есть на длине волны 400 нм. Хотя такие фотоны составляли доли процента от общего числа фотонов в лазерном импульсе, их числа бы-

ло достаточно для возбуждения в запрещённой зоне плёнки такой концентрации экситонов на 400 нм, которая после их миграции по поверхности плёнки и последующей локализации в ловушках создавала уже концентрацию экситонного газа, достаточную для возбуждения регистрируемой интенсивности сигнала фотонного эха. Поскольку размеры ловушки были не более 100 нм, то энергия экситона, возбуждённого на длине волны 400 нм, значительно превышающего размеры ловушки, испытывала квантовые ограничения. Из-за криволинейного градиента энергетического ограничения экситонного газа, энергетически проваливавшегося в запрещённой зоне в его наноразмерных ловушках, происходила квантово-размерная дискретизация энергии экситона по положительным и отрицательным элементам сверхтонкой структуры квантовых уровней.

Большинство фотонов первого лазерного импульса, не участвующие в двухфотонном возбуждении экситонов, вместе с фотонами последующих возбуждающих импульсов в однофотонном режиме возбуждали сигнал фотонного эха на парах квантовых уровней дискретных значений энергии, относящимся к разным элементам сверхтонкой структуры квантового уровня. Именно благодаря квантово-размерной дискретизации энергии локализуемых в ловушке экситонов стало возможно обнаружение в плёнках оксида цинка, полученных методом магнетронного распыления, сигнала фотонного эха на длине волны 800 нм. Что позволило сделать вывод о применимости этой технологии получения тонких плёнок для формирования нового типа квантовых точек в виде нано-размерных ловушек экситонов.

Формирование тонких плёнок с отличающимися параметрами ловушек и обнаруженные в них свойства фотонного эха. Для исследования свойств ловушек экситонов было изготовлено несколько серий плёнок, отличающихся:

- толщиной плёнки оксида цинка, соответственно, диаметром кристалличе-

ских волокон, кривизной их поверхности и размерами ловушек;

- размерами трёх видов кристаллической решётки: оксида цинка, кремния, легированного бором, и кремния, легированного фосфором, соответственно размерами ловушек и глубиной энергетического провала в запрещённой зоне при одинаковой толщине плёнок, равной 100 нм;

- наличием донорных дырок у плёнки оксида цинка, толщиной 100 нм, за счёт напыления двух подслоёв кремния, легированного фосфором, и кремния, легированного бором, также имеющих толщину 100 нм, что позволяло формировать в оксиде цинка ловушки трионов.

В работах [4, 5, 7, 8] приведены результаты исследования этих плёнок с помощью фотонного эха. В наших работах [5] показано, что с помощью фотонного эха можно оценивать релаксационные процессы в двухуровневых квантовых системах, построенных на этих экситонах, и спектральные ширины как квантовых переходов этих двухуровневых квантовых систем, так и их квантовых уровней. Методика регистрации ширины квантовых уровней газовых частиц предложена авторами работы [6]. Если пренебречь вкладом в уширение спектральных линий экситон-фононного взаимодействия внутри ловушек, то с вполне допустимой погрешностью с помощью подхода, приведённого в работе [6], можно оценить спектральную ширину квантовых уровней дискретизации энергии экситонов или трионов внутри ловушки и ширины спектральной линии квантовых переходов между этими уровнями.

Трионные состояния, аналогично экситонным, мигрируя по поверхности плёнки, локализуются в ловушках, формируя там трионный газ. Результаты нашего исследования с помощью фотонного эха локализованных трионных состояний приведены в работе [5]. Нами установлен факт смещения спектра стимулированного фотонного эха (СФЭ), формируемого на трионных со-

стояниях (рис. 1). Смещение спектра в эхосигналах происходило при закручивании по часовой стрелке зоны возбуждения плёнки тремя разделёнными во времени фемтосекундными лазерными импульсами, подаваемыми на плёнку под острым углом к оптической оси, ортогональной плёнке. Увеличение энергии фотонного эха и, соответственно, сдвига спектра эхосигнала в сторону увеличения его частоты связано с перераспределением энергии эхосигналов, одновременно формируемых на обеих парах компонент сверхтонкой структуры в сторону эхосигнала, формируемого на элементах сверхтонкой структуры с положительным спином (вращением поляризации электромагнитной энергии по часовой стрелке). Чем позднее формировался эхосигнал (при увеличении временного интервала между возбуждающими импульсами), тем больше был сдвиг его спектра.

Квантовая система, возбуждаемая на подуровнях с большей энергией, смещает свою энергию в сторону увеличения по отношению к начальному состоянию. При смене направления закручивания возбуждающими лазерными импульсами возбуждаемой части плёнки перераспределение энергии эхосигналов, формируемых на двух парах сверхтонкой структуры квантовых переходов, в сторону эхосигнала на меньшей частоте с меньшей энергией. Что приводило к охлаждению резонансной среды, переходящей в сторону формирования трионного конденсата. Этот результат фиксировался как сдвигом спектра эхосигнала, так и увеличением времени релаксации резонансной среды. То есть при возбуждении фотонного эха наблюдается стремление частиц резонансной среды к состоянию конденсата с последующим охлаждением и её структуризацией, переходящей в кристалл, приобретающий упругие свойства. Структуризация среды происходит за счёт уменьшения вклада эхосигнала, формируемого на элементах сверхтонкой структуры, обремененным кулоновской связи триона с по-

ложительным спином (центробежным вращением энергии) и увеличения вклада компоненты кулоновской связи триона с отрицательным спином (центростремительным вращением энергии).

Во втором случае (см. рис. 1) в среде происходил процесс её нагрева за счёт нарастания центробежных сил в составе резонансной среды, приводящих к разряжению экситонных состояний и переводу их в высокоэнергетическое фазовое состояние (сначала в нагретую жидкость (плазму), затем в разогретый хаотически движущийся газ. За счёт тепловой энергии разогретого газа происходит выход трионов из ловушки и последующая рекомбинация электронов и дырок.

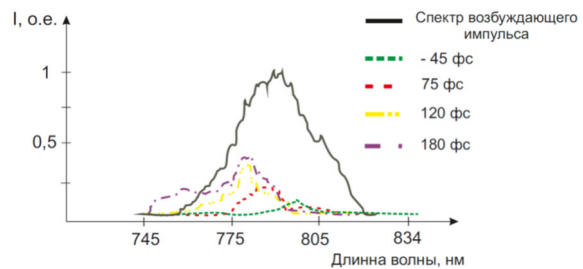


Рис. 1. Сдвиг спектра оптических откликов зафиксированных в режиме возбуждения СФЭ в зависимости от разности хода между возбуждающими импульсами

Рис. 1. Сдвиг спектра оптических откликов зафиксированных в режиме возбуждения СФЭ в зависимости от разности хода между возбуждающими импульсами

Поляризационные свойства стимулированного фотонного эха в продольном магнитном поле. Впервые об обнаружении фотонного эха на трионных состояниях сообщалось в работе [7], где показаны поляризационные свойства стимулированного фотонного эха, возбуждаемого при комнатной температуре на локализованных трионных состояниях под воздействием продольного однородного магнитного поля. При этом впервые в тонких плёнках был зарегистрирован при комнатной температуре эффект нефарадеевского поворота плоскости поляризации стимулированного фотонного эха. Ранее этот эффект впервые был обнаружен нами в газе,

представленном насыщенными парами молекулярного йода [8]. Этот эффект возникает в силу неравномерности зеемановского расщепления квантовых уровней на подуровни. Авторы предсказания этого эффекта [9] установили, что он возможен только в газовых средах. В работах [10, 11] указывается на то, что в газе на переходах, когда оказываются одновременно задействованными несколько энергетических переходов с неравным расщеплением, то при наличии собственного магнитного момента μ_i у каждого из резонансных подуровней ($i = 1, 2, 3 \dots$) в продольном магнитном поле H_0 вектор поляризации ФЭ может испытывать нефарадеевский поворот вокруг направления этого поля. В то же время этот поворот не возможен в твёрдом теле, когда магнитное поле, направленное вдоль оптической оси кристалла, снимает вырождение по спину и создаёт ситуацию, при которой четырёхуровневая система при описании ФЭ может быть корректно разделена на две двухуровневые подсистемы с одинаковым энергетическим расщеплением, именно это равенство расщеплений было причиной того, что при одинаковых линейных поляризациях возбуждающих импульсов поляризация ФЭ оказывается той же, что и у импульсов, и никакого специфического поворота плоскости поляризации ФЭ не происходило.

Исследование с помощью фотонного эха свойств трионов в квантовых точках под воздействием поперечного магнитного поля впервые провели авторы работ [12, 13]. Они показали возможность возбуждения при гелиевой температуре сигналов фотонного эха в трионах, возникающих в квантово-размерном объекте в виде квантовой точки, сформированной на многослойной пленке. В ней под воздействием поперечного однородного магнитного поля исследованы спектры биеений сигнала фотонного эха, возникающие между двумя плечами триона, отличающимися знаком спина. Именно это свойство трионов иметь две компоненты спек-

тральной линии триона, отличающиеся спином положены в основу зеемановского расщепления этих компонент, которое обеспечило условия для наблюдения нами эффекта нефарадеевского поворота плоскости поляризации эхосигнала [7].

Обнаружение этого эффекта указывает на газообразный характер резонансной среды в виде трионного газа. В результате нашего исследования этого эффекта экспериментально продемонстрирована возможность прямой регистрации при комнатной температуре временного интервала между вторым и третьим лазерными импульсами возбуждения сигнала СФЭ, равного 27 фс. Заметим, что на данный момент времени во всех метрологических учреждениях мира самые короткие эталоны временного интервала имеют значения не менее 1 пс. В России шкала эталонов временных интервалов, составляющей, от $1 \cdot 10^{-9}$ до 10^8 с¹. В работе [14] приводится информация о наличии во ВНИИОФИ приборов для регистрации быстропротекающих процессов с временным разрешением от 10 пс и более.

Зависимость наполняемости трионных ловушек от полярности прикладываемого продольного однородного магнитного поля. При формировании фотонного эха на локализованных в ловушках трионах при наличии продольного однородного магнитного поля установлена зависимость времени релаксации резонансной среды от полярности приложенного продольного магнитного поля.

В случае приложения магнитного поля в одном направлении с возбуждающими лазерными импульсами наблюдался характерный для газовой среды эффект нефарадеевского поворота плоскости по-

¹ Об утверждении государственной поверочной схемы для средств измерения времени и частоты»// Приказ Министерства промышленности и торговли Российской Федерации: Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Госстандарт) № 1621 от 31 июля 2018 г. (1 *10⁻⁹ – 10⁸ с).

ляризации СФЭ. При этом время продольной необратимой релаксации T_1 составило порядка 1 000 фс (рис. 2). Это связано с увеличением энергии на компонентах сверхтонкой структуры квантовых уровней с положительным спином.

Когда магнитное поле подавалось навстречу лазерным импульсам, имело место значительное увеличение времени необратимой продольной релаксации T_1 , достигавшее десятки пикосекунд (рис. 3). При этом почти незаметен характерный для газовой среды эффект нефарадеевского поворота плоскости поляризации СФЭ.

Это связано с увеличением энергии на компонентах сверхтонкой структуры квантовых уровней, обладающих отрицательным спином. Таким образом, демонстрируется факт отличия состояния резонансной среды от газового состояния. Согласно предлагаемому методу оценки процессов, протекающих в ловушках трионов, можно квалифицировать резонансную среду как способную переходить в состояние конденсата или даже экситонного кристалла. Полученный качественный результат является предварительным и требует дополнительных научных исследований.

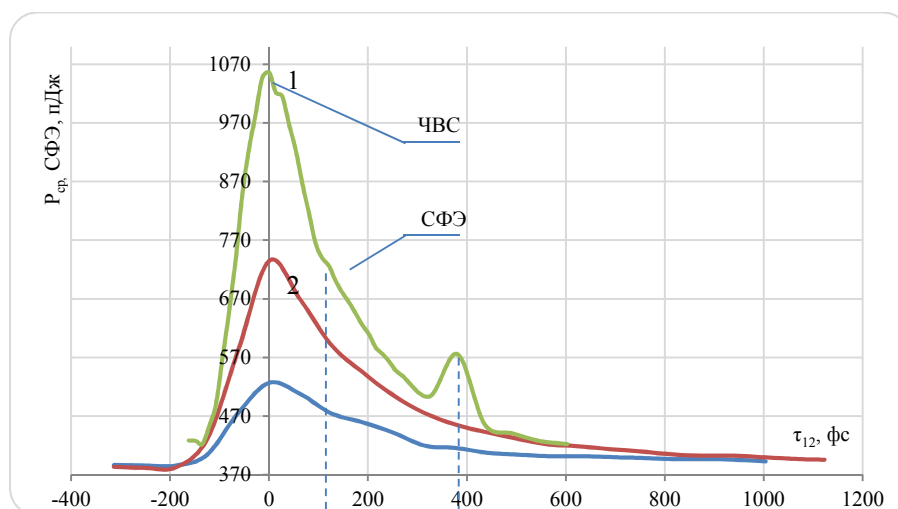


Рис. 2. Зависимость спада интенсивности сигнала СФЭ, сформированного при воздействии поперечного однородного магнитного поля, от времени τ_{23} при $\tau_{12} = 0$ фс (кривая 1), при $\tau_{12} = 35$ фс (кривая 2), $\tau_{12} = 49$ фс (кривая 3)

Рис. 2. Зависимость спада интенсивности сигнала СФЭ, сформированного при воздействии поперечного однородного магнитного поля, от времени τ_{23} при $\tau_{12} = 0$ фс (кривая 1), при $\tau_{12} = 35$ фс (кривая 2), $\tau_{12} = 49$ фс (кривая 3)

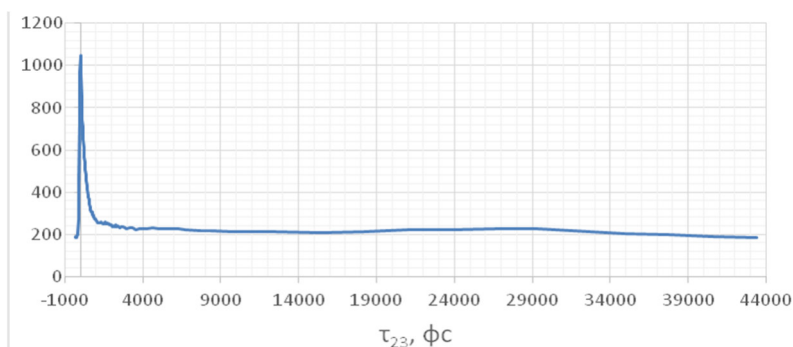


Рис. 3. Зависимость интенсивности фотонного эха, возбуждаемого в двух квантовом режиме при наличии продольного однородного поля на локализованных заряженных экситонных состояниях (типа триона), от величины временного интервала между вторым и третьим возбуждающими импульсами

Рис. 3. Зависимость интенсивности фотонного эха, возбуждаемого в двух квантовом режиме при наличии продольного однородного поля на локализованных заряженных экситонных состояниях (типа триона), от величины временного интервала между вторым и третьим возбуждающими импульсами

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что магнитное поле сдвигает перераспределение энергии между компонентами сверхтонкой структуры квантовых уровней резонансного перехода, связанными с соответствующими кулоновскими связями триона, проявляющееся в энергии формируемых компонент сигнала фотонного эха.

В первом случае повышенная наполняемость ловушек газовыми разогретыми трионами приводит к наиболее быстрому затуханию эхо-сигнала, с меньшим временем релаксации возбуждённого состояния. Во втором случае имеет место уменьшение количества газовых частиц из-за перехода их в более плотные состояния, что приводит к увеличению времени релаксации T_1 . Эти факты дополнительно подтверждают наличие дополнительной дискретизации квантовых уровней энергии трионов, локализованных в ловушках, полученных методом магнетронного распыления, в виде дополнительных компонент их сверхтонкой структуры, имеющих направление сдвига энергии в зависимости от их знака спина.

Заключение. В рамках выполненного цикла экспериментальных работ намеченная цель работ полностью достигнута, то есть показано, что в тонких плёнках, формируемых магнетронным распылением, возможна регистрация фотонного эха как метода диагностирования возможностей ловушек экситонов и трионов при разработке новых физических принципов оригинальных наноэлектронных приборов.

При этом поставленные задачи выполнены в полном объёме. Сформулированы и экспериментально реализованы принципы получения нано-размерных ловушек экситонных и трионных состояний,

возбуждаемых при комнатной температуре в полупроводниковой плёнке. Получены разные физические состояния этих квазичастиц, отличающиеся временами релаксации, определявшимися с помощью оптической эхоспектроскопии. Предварительное предположение авторов связывает это с обязательным наличием состояния газа и конденсата. Для повышения достоверности данных выводов о наличии этих состояний энергии квазичастиц необходимо их дополнительное исследование другим методом оптической спектроскопии, что и планируется провести в результате будущих исследований. Измеренные времена релаксации, меняются с сотен фемтосекунд до 1 пс. Также продемонстрирован физический принцип прямой регистрации фемтосекундных временных интервалов между лазерными импульсами, возбуждающими на квантованных внутри ловушки уровнях энергии сигнал СФЭ, в трионных ловушках тонких плёнках оксида цинка, достигавших 27 фс. Реализованный физический принцип регистрации временных интервалов основан на преобразовании временного интервала между возбуждающими лазерными импульсами в регистрируемую величину нефарадеевского поворота плоскости поляризации СФЭ. Зарегистрированный временной интервал более, чем на два порядка короче временных интервалов, регистрируемых на других принципах, используемых в работе лаборатории быстротекущих процессов ВНИИОФИ, где разрабатываются и хранятся эталоны оптически измеряемых величин. Показано, что полярность приложенного продольного однородного магнитного поля влияет на формирующиеся в ловушке состояния трионов.

Список литературы

1. Электрические и оптические свойства пленок оксида цинка, нанесенных методом ионно-лучевого распыления оксидной мишени / А.П. Достанко, О.А. Аггев, Д.А. Голосов и др. // Физика и техника полупроводников. 2014. Т.48. Вып. 9. С. 1274 – 1279.
2. Вольян 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. Маныкин Э. А., Самарцев В. В. Оптическая эхо-спектроскопия. М.: Наука, 1984. 270 с.

4. Фотонное эхо и зондовая микроскопия как методы исследования тонких пленок для микроэлектронных датчиков/ А.В. Мороз, Н.С. Вашурин, И.И. Попов и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2012. № 2. С. 64-72.
5. Вашурин Н.С. Попов И.И., Путилин С.Э. Фотонное эхо как метод исследования дефектной структуры поверхности кристаллических волокон тонких текстурированных пленок/ Н.С. Вашурин, // Известия РАН. Серия физическая. 2017. Т. 81, № 5. С. 597-601.
6. Евсеев, А.В. Стимулированное фотонное эхо как метод определения спектроскопических характеристик отдельного резонансного уровня/ А.В. Евсеев, И.В. Евсеев, В.М. Ермаченко // ДАН СССР. 1981. Т. 256. № 1. С. 57-60.
7. 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.
8. Polarization properties of photon echoes in molecular iodine and its application/ I.S. Bikbov, I.I. Popov, V.V. Samartsev et al. // Laser phys. 1995. Vol. 5, No.3. Pp. 580 – 583.
9. Алексеев А.И. Особенности фотон-эха в газе при наличии магнитного поля // Письма в ЖЭТФ. 1969. Т.9. № 8. С. 472-475.
10. Евсеев, И.В., Ермаченко В.М., Решетов В.А. Стимулированное фотонное эхо в газе при наличии магнитного поля // Оптика и спектроскопия. 1982. Т. 52, № 3. С. 444-449.
11. Евсеев И.В., Решетов В.А. Фотонное (световое) эхо в магнитном поле при произвольной форме возбуждающих импульсов // Оптика и спектроскопия. 1984. Т. 57, № 5. С. 869-874.
12. Photon Echo from an Ensemble of (In,Ga)As Quantum Dots / Ia.A. Babenko, I.A. Yugova, S.V. Poltavtsev // Semiconductors. 2018. No. 52. Pp. 531–534. <https://doi.org/10.1134/S106378261804005X>
13. Access to long-term optical memories using photon echoes retrieved from semiconductor spins/ L. Langer, S.V. Poltavtsev, I.A. Yugova et al. // Nature Photonics. 2014. Vol. 8. Pp. 851-857.
15. Канзюба М.В. Метрологическое обеспечение измерений временных характеристик импульсного лазерного излучения в пикосекундном диапазоне // Фотоника. 2019. Т. 13, № 7. С. 670-675.

Статья поступила в редакцию 14.02.2021

Принята к публикации 15.03.2021

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 400 научных публикаций.

МОРОЗ Андрей Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – формирование тонких пленок магнетронным распылением и исследование взаимосвязи их свойств с технологическим режимом. Автор 30 научных публикаций.

ГЛАДЫШЕВА Анна Андреевна – студент, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – моделирование экспериментальных результатов. Автор шести научных публикаций.

ЛЕОНТЬЕВ Александр Юрьевич – аспирант кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – моделирование технологических процессов наноэлектронного приборостроения Автор трёх научных публикаций.

СУШЕНЦОВ Николай Иванович – кандидат технических наук, заведующий аспирант кафедрой конструирования и производства радиоаппаратуры, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – формирование тонких пленок магнетронным распылением и исследование взаимосвязи их свойств с технологическим режимом. Автор 250 научных публикаций.