

УДК 535.2

ФОТОННОЕ ЭХО НА ЭКСИТОНАХ И ЕГО РОЛЬ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ НАНОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ НА КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫХ СТРУКТУРАХ В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ ОКСИДА ЦИНКА

© 2024 г. И. И. Попов^{1, *}, Р. В. Юсупов², А. В. Петров², А. Р. Бессонов¹,
А. М. Гайя¹, А. В. Мороз¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования
«Поволжский государственный технологический университет», Йошкар-Ола, Россия

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Казанский (Приволжский) федеральный университет», Казань, Россия

*E-mail: biht.oral@gmail.com

Поступила в редакцию 25.09.2023

После доработки 16.10.2023

Принята к публикации 31.10.2023

Изучены релаксационные спады сигналов фотонного эха в тонких пленках оксида цинка, изготовленных методом магнетронного распыления. Эхо-сигналы возбуждаются на длине волны 800 нм на переходах между квантовыми уровнями, возникающими при локализации экситонных состояний в квантово-размерных структурах, в режиме двухфотонного поглощения лазерных импульсов с длиной волны 800 нм.

DOI: 10.31857/S0367676524020185, EDN: RRBABM

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании нанoeлектронных приборов высокую практическую значимость представляют процессы, протекающие в квантово-размерных объектах типа квантовых точек при комнатных температурах. Хорошей иллюстрацией этого является, например, цикл исследований спектральных и фотофизических свойств нанокомпозитов на основе коллоидных квантовых точек с излучающим ядром из селенида кадмия, выполненных с помощью спектроскопии люминесценции и фотонного эха [1–6].

Для синтеза активных сред для нанoeлектронных приборов применяются 3 метода: жидкофазная эпитаксия (ЖФЭ), химическое осаждение из газовой фазы (ХОГФ) и молекулярно-пучковая эпитаксия (МПЭ). Ранее в статьях [7–10] мы показали возможность изготовления квантово-размерных структур методом магнетронного распыления. При изготовлении тонких пленок этим способом формируется текстура пленок, состоящая из кристаллических волокон, ориентированных ортогонально к подложке и обладающих неравномерной кривизной поверхности, пространством между которыми заполнено рентгеноаморфной фазой. Вблизи поверхности волокон на границе раздела кристаллической и рентгеноаморфной фаз мигрируют

возбуждаемые в кристаллической решетке экситоны. Высокая кривизна поверхности волокон из-за сдвигов формирующихся слоев кристаллической решетки способствует появлению на ней участков с дислокациями, которые являются источником ловушек для возбужденных экситонных состояний.

Структура энергетических уровней экситонов в ловушках дает возможность возбуждать переходы на длине волны 400 нм в режиме двухфотонного поглощения при помощи импульсного лазера, излучающего на длине волны 800 нм и исследовать их динамику методами спектроскопии фотонного эха. Величина времени релаксации, измеренная по кривой временного спада интенсивности фотонного эха, составляющая при комнатной температуре значения от несколько сотен фемтосекунд до единиц пикосекунд, характеризует время жизни экситонных состояний. Эти величины можно использовать в качестве оценочных при проектировании, например, оптических эхо-процессоров, которые могли бы функционировать при комнатной температуре за счет использования полупроводниковых наноструктур. Демонстрация возможности использования для этих целей тонких пленок оксида и оптимизация режимов работы приборов, основанных на эффекте фотонного эха, являются важными практически значимыми задачами. Изучение

влияния параметров синтеза тонких пленок оксида цинка (например, концентрации кислорода в рабочей камере) дает возможность варьировать ширину запрещенной зоны оксида цинка для определения характеристик, обеспечивающих эффективные режимы формирования сигналов фотонного эха и работы устройств обработки информации на его основе [7–10].

МЕТОДИКА ПРОБОПОДГОТОВКИ И СПЕКТРОСКОПИЯ ФОТОННОГО ЭХА НА ЛОКАЛИЗОВАННЫХ ЭКСИТОННЫХ СОСТОЯНИЯХ

Для возбуждения фотонного эха в тонкой пленке необходимо оптимизировать ширину запрещенной зоны таким образом, чтобы реализовать возбуждение экситонов на длине волны 400 нм. При этом важную роль играет толщина пленки. Чем толще пленка, тем длиннее волокна, тем большее количество локализованных экситонов в ней, но при этом больше и линейные размеры ловушек и тем быстрее спад во времени интенсивности сигналов фотонного эха, что накладывает ограничение на предельную длительность операции обработки информации в устройствах на основе фотонного эха. За счет изменения концентрации кислорода в вакуумной камере и длительности процесса формирования пленки нами получены различные образцы тонких пленок. Рассчитанные значения ширины запрещенной зоны оксида цинка приведены в табл. 1.

В экспериментах по эхо-спектроскопии использовалась экспериментальная установка, представленная на рис. 6 в работе [12]. На исследуемые тонкие пленки после фокусировки линзой с фокусным расстоянием 15 см подавались под углом 8 градусов по отношению друг к другу три разнесенные во времени лазерных импульса, формируемых фемтосекундной лазерной системой Ti: Sa со следующими параметрами: длительность импульса – 35 фс, энергия в импульсе – 2 мДж, частота повторения импульсов – 1000 Гц. Возбуждающие лазерные импульсы формировались путем деления каждого генерируемого лазерного импульса на три

и разделялись во времени с помощью оптических линий временной задержки. Возбуждаемые сигналы первичного (ПФЭ) и стимулированного фотонного эха (СФЭ) регистрировались в направлениях, определяемых условиями пространственного синхронизма. Эхо-сигналы отделялись от возбуждающих импульсов с помощью диафрагм, устанавливаемых перед фотодетекторами. Мощность первого возбуждающего импульса составляла 280 мВт, второго – 184 мВт, третьего – 230 мВт.

Особенностью возбуждения фотонного эха в тонких пленках оксида цинка, как было указано выше, является применение в качестве резонансного излучения фемтосекундных импульсов на длине волны 800 нм при условии отсутствия у активной среды переходов на длинах волн, больших 400 нм, в том числе и на длине волны 800 нм. Наличие двухфотонного поглощения лазерного излучения на длине волны 800 нм проверялось регистрацией сигналов ПФЭ в направлении пространственного синхронизма, соответствующего режиму двухфотонного поглощения. Для обеспечения этого режима необходимо точное соблюдение согласованности параметров двух фотонов, объединяющихся в один возбуждающий фотон. Условиям двухфотонного поглощения на квантовом переходе с длиной волны 400 нм соответствовало порядка 0.1% энергии лазерного импульса, подаваемого на длине волны 800 нм. Для точной юстировки нулевой задержки между возбуждающими импульсами вместо резонансной среды устанавливался нелинейный кристалл, в котором при нулевой задержке происходила неколлинеарная генерация второй гармоники.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК ОКСИДА ЦИНКА ПО РЕЛАКСАЦИОННЫМ СПАДАМ ФОТОННОГО ЭХА

Мы исследовали зависимость параметров релаксационных спадов интенсивности сигналов фотонного ПФЭ при разных толщинах пленки. На рис. 1 показаны кривые спада сигналов ПФЭ для пленок оксида цинка толщиной 100, 600 и 800 нм.

Таблица 1. Технологические режимы формирования тонких пленок оксида цинка методом магнетронного распыления и ширина запрещенной зоны этих пленок

Номер образца	Соотношение кислорода / аргона, %	Температура подложки во время напыления, °С	Время напыления, мин	Давление газа в камере, Па	Ток магнетрона, А	Ширина запрещенной зоны, эВ
1	30/70	100	2	1	1	3.38
2	35/65	100	2	1	1	3.12
3	50/50	100	2	1	1	3.22

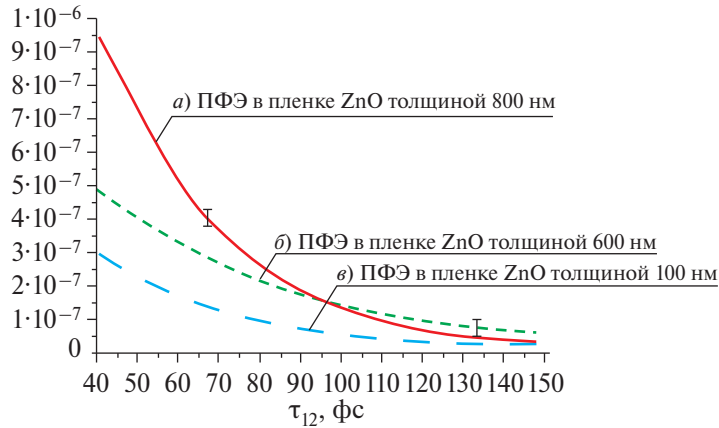


Рис. 1. Зависимость спада средней мощности сигналов первичного фотонного эха от временного интервала между первым и вторым возбуждающими импульсами для пленок оксида цинка: толщиной 800 (а), 600 (б) и 100 (в) нм.

Из графиков следует, что случаю пленок большей толщины (800 нм) соответствует наибольший динамический диапазон изменения интенсивности сигналов фотонного эха, что может быть использованы при практической реализации устройств оптической обработки информации. Время необратимой поперечной релаксации T_2 для пленок толщиной 800 нм составляет $\sim 130 \pm 30$ фс, а для пленки 600 нм — 320 ± 60 фс. В то же время, с уменьшением толщины пленки, увеличивается значение времени релаксации резонансных квантовых переходов, приводит к возможности увеличения предельного времени отдельных операций обработки информации. Результаты исследований показывают, что в пленке толщиной 100 нм обеспечивается устойчивая регистрация эхо-сигналов, при этом время релаксации составляет 820 ± 90 фс.

Кроме того, в изготовленных образцах тонких пленок оксида цинка нами исследованы релаксационные спады интенсивности сигналов СФЭ. На рис. 2 показаны измеренные кривые спада сигналов СФЭ, на основе анализа которых были определены значения времени необратимой продольной релаксации T_1 в пленках оксида цинка, кремния, легированного фосфором, и кремния, легированного бором. Для пленок толщиной 100 нм оно составило: 4300 ± 690 фс (для ZnO); 670 ± 120 фс (для Si(P)); 280 ± 50 фс (для Si(B)).

Обнаружено, что в пленке оксида цинка, с более широкой запрещенной зоной, интенсивность сигналов фотонного эха в среднем выше, чем в пленках германия. Тем не менее пленки на основе германия, легированного фосфором или бором, могут использоваться для обеспечения инжектирования электронов или дырок в пленку оксида цинка, в слоистых структурах для разработки различных нанoeлектронных устройств.

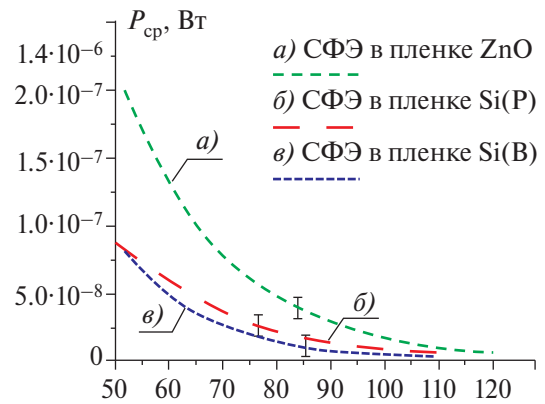


Рис. 2. Зависимость спада средней мощности сигналов стимулированного фотонного эха от временного интервала между вторым и третьим возбуждающими импульсами для пленок толщиной 100 нм, отличающихся шириной запрещенной зоны: оксида цинка (а); кремния, легированного фосфором (б); кремния, легированного бором (в).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, были продемонстрированы возможности детектирования при комнатной температуре сигналов фотонного эха в тонких пленках оксида цинка, а также германия, легированного фосфором и/или бором. Полученные значения характеристических времен фазовой и энергетической релаксации могут быть использованы в качестве рекомендаций в разработках быстродействующих нанoeлектронных приборов на основе фемтосекундного фотонного эха. При этом пленки германия, легированного фосфором или бором, могут быть использованы для формирования вспомогательных тонких слоев, обеспечивающих инжекцию электронов или дырок в пленку оксида цинка, при формировании фемтосекундного

фотонного эха на заряженных экситонных состояниях. Эффективная толщина слоев используемых тонких пленок может составлять величины от 100 до 800 нм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Магарян К.А., Каримуллин К.Р., Васильева И.А., Наумов А.В.* // Опт. и спектроск. 2019. Т. 126. № 1. С. 50; *Magaryan K.A., Karimullin K.R., Vasil'eva I.A., Naumov A.V.* // Opt. Spectrosc. 2019. V. 126. No. 1. P. 41.
2. *Karimullin K.R., Mikhailov M.A., Georgieva M.G., et al.* // J. Phys. Conf. Ser. 2018. V. 951. Art. No. 012011.
3. *Karimullin K.R., Knyazev M.V., Arzhanov A.I. et al.* // J. Phys. Conf. Ser. 2017. V. 859. Art. No. 012010.
4. *Аржанов А.И., Каримуллин К.Р., Наумов А.В.* // Краткие сообщ. по физике ФИАН. 2018. Т. 45. № 3. С. 39; *Arzhanov A.I., Karimullin K.R., Naumov A.V.* // Bull. Lebedev Phys. Inst. 2018. V. 45. No. 3. P. 91.
5. *Каримуллин К.Р., Аржанов А.И., Наумов А.В.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. № 11. С. 1620; *Karimullin K.R., Arzhanov A.I., Naumov A.V.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. No. 11. P. 1478.
6. *Каримуллин К.Р., Аржанов А.И., Наумов А.В.* // Изв. РАН. Сер. Физ. 2017. Т. 81. № 12. С. 1581; *Karimullin K.R., Arzhanov A.I., Naumov A.V.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. No. 12. P. 1396.
7. *Попов И.И., Ващурич Н.С., Путилин С.Э., Бахадуров А.У.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 5. С. 594; *Popov I.I., Vashurin N.S., Putilin S.E., Bakhodurov A.U.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. No. 5. P. 551.
8. *Бахадуров А.У., Ващурич Н.С., Виноградов Е.А. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. № 12. С. 1661; *Bakhodurov A.U., Vashurin N.S., Vinogradov E.A. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. No. 12. P. 1510.
9. *Попов И.И., Архиреев И.А., Ващурич Н.С. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. № 3. С. 401; *Popov I.I., Arkhireev I.A., Vashurin N.S. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2020. V. 84. No. 3. P. 308.
10. *Попов И.И., Мороз А.В., Минеев Д.В. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 2. С. 294; *Popov I.I., Moroz A.V., Mineev D.V. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 2. P. 210.
11. *Попов И.И., Юсупов Р.В., Волков К.А. и др.* // Вестн. ПГТУ. Сер. радиотехн. и инфоком. сист. 2022. № 2(54). С. 61.

Photon echo on excitons for the development of nanoelectronic devices based on a quantum-size structures in a thin zinc oxide films

**I. I. Popov¹*, R. V. Yusupov², A. V. Petrov², A. R. Bessonov¹,
A. M. Gaia¹, A. V. Moroz¹**

¹ Volga State Technological University, Yoshkar Ola, 424000 Russia

² Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, 420008 Russia

*e-mail: biht.orol@gmail.com

The relaxation decays of photon echo signals in thin zinc oxide films produced by magnetron sputtering have been studied. Echo signals are excited at a wavelength of 800 nm at transitions between quantum levels that arise when excitonic states are localized in quantum-sized structures in the two-photon absorption mode of laser pulses with a wavelength of 800 nm.