



УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе,
д.ф.-м.н.

С.В. Лебедев

" 02 " 10 2014 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию АКРЕСТИНОЙ Анны Сергеевны "ФОТО- И ТЕРМОИНДУЦИРОВАННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В КРИСТАЛЛАХ КЛАССА СИЛЛЕНИТОВ", представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – оптика

Целый ряд важнейших проблем современной физики твердого тела и квантовой электроники связан с эффектами взаимодействия излучения с веществом. Огромное научное и практическое значение таких эффектов обусловлено, с одной стороны, возможностью получения новой информации о строении вещества, включая материалы и объекты, не существовавшие ранее в природе и созданные с использованием новейших технологий (фотонные кристаллы, композиционные, монокристаллические и полимерные материалы). С другой стороны, такие эффекты сами являются основой высоких технологий, находящих применение в современной науке, технике и производстве. Все сказанное выше в полной мере относится к динамической голографии – научному направлению, появившемуся на стыке квантовой электроники, физической и нелинейной оптики и успешно развивающемуся в течение более чем трех десятилетий. Фоточувствительными средами в динамической голографии могут являться centrosymmetric и неcentrosymmetric диэлектрические и полупроводниковые кристаллы, фотонные кристаллы и квантово-размерные структуры. Их многообразие требует развития различных подходов и методик для изучения и адекватного описания фотоэлектрических процессов и механизмов, ответственных за изменение оптических характеристик среды под влиянием света. Вследствие этого, диссертационная работа А.С. Акрестиной, посвященная изучению особенностей фото- и термоиндуцированного примесного оптического поглощения в кристаллах класса силленитов, является актуальной и практически значимой работой.

Диссертация Акрестиной А.С. состоит из введения и четырех глав. Основная часть первой главы посвящена исследованиям оптических свойств и фотоиндуцированного поглощения света в кристаллах класса силленитов. Рассмотрено влияние температуры на оптическое поглощение и фотоиндуцированные явления в фоторефрактивных кристаллах. Дан обзор моделей зонного переноса и динамики фотоиндуцированного поглощения. Приведены сведения из работ по использованию монокристаллов класса силленитов в динамической голографии и влиянию предварительной экспозиции видимым излучением на фоторефрактивные характеристики кристаллов.

Во второй главе диссертации приведены результаты по изучению динамики фотоиндуцированного поглощения света в фоторефрактивном кристалле

ВХ-№ 31016 / 587
ПОСТУПИЛА В ТГУ
* 08 * 10 * 2014

$\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Fe},\text{Cu}$ и номинально нелегированных кристаллах титаносилленита висмута $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ и силикосилленита висмута $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$. Представлены результаты экспериментов по динамике фотоиндуцированных изменений оптического поглощения при облучении кристалла титаносилленита висмута, легированного железом и медью, излучением полупроводниковых светодиодов с длинами волн в диапазоне от 505 до 870 нм. Выявлено, что для всех длин волн наблюдается переход от начального быстрого участка роста фотоиндуцированных изменений $\Delta\alpha$ к медленному, с выходом на уровень, близкий к стационарному. Показано, что скорость фотоиндуцированных изменений в поглощении и стационарный уровень существенно возрастают с уменьшением длины волны облучающего света, а переход от быстрого участка роста $\Delta\alpha$ к медленному является более резким при вторичной засветке кристалла.

Автором представлена теоретическая модель фотоиндуцированного перераспределения электронов, учитывающая влияние температуры фоторефрактивного кристалла на электроны, находящиеся на промежуточном уровне, путем сопоставления этому энергетическому положению двух возможных состояний, отличающихся сечениями фотоионизации. Численный анализ показал, что экспериментально наблюдаемая динамика оптического поглощения в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Fe},\text{Cu}$ удовлетворительно описывается в рамках модифицированной теоретической модели. Далее Акрестиной А.С. приведены результаты экспериментальных исследований и представлен теоретический анализ динамики фотоиндуцированного поглощения света с длиной волны 633 нм в фоторефрактивных кристаллах силикосилленита и титаносилленита висмута при их облучении лазерными импульсами пикосекундной длительности на длине волны 532 нм. Показано, что засветка фоторефрактивных кристаллов пикосекундными импульсами приводит к уменьшению интенсивности проходящего через них зондирующего излучения. Автором разработана методика численного анализа, учитывающая большие различия в скоростях процессов фотовозбуждения электронов в зону проводимости, их рекомбинации и релаксации к исходному распределению по дефектным центрам. Проведенный Акрестиной А.С. численный анализ показал, что экспериментально наблюдаемая динамика оптического поглощения в фоторефрактивных кристаллах $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ удовлетворительно описывается в рамках развитой теоретической модели и для фотоиндуцированного перераспределения электронов, инициированного импульсами пикосекундной длительности.

В третьей главе диссертации приведены результаты по исследованию спектральных зависимостей оптического поглощения в монокристаллах силленитов при их облучении лазерным и квазимонохроматическим светом из видимой и ближней инфракрасной областей спектра. Показано, что в кристаллах силленитов необходимо учитывать вклад в примесное поглощение как процессов фотоионизации глубоких донорных центров так и внутрицентровых переходов.

Акрестиной А.С. описана методика экспериментальных исследований спектральных зависимостей оптического поглощения и их фотоиндуцированных изменений, представлены экспериментальные результаты по изменениям спектра оптического поглощения в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Cd}$, наведенным квазимонохроматическим излучением с центральной длиной волны 625 нм, обнаружено фотоиндуцированное увеличение оптического поглощения кристалла в диапазоне длин волн 500-900 нм, приведены результаты аппроксимации экспериментально наблюдаемых спектральных зависимостей оптического поглощения в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Cd}$ в рамках модели, учитывающей фотовозбуждение электронов в зону проводимости с четырех донорных центров. Показано, что расчетные зависимости удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

Далее Акрестиной А.С. представлены результаты исследования фотоиндуцированных изменений в спектре оптического поглощения в кристалле титаносилленита висмута, легированного кальцием, и аппроксимация полученных данных на основе той же модели. Автором установлено, что последовательное облучение кристалла $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca}$ излучением из зеленой ($\lambda_e = 505$ нм) и ближней ИК ($\lambda_e = 870$ нм) областей спектра увеличивает оптическое поглощение в области 508–880 нм и уменьшает его в области 880–980 нм. Показано, что полученные экспериментально спектральные зависимости удовлетворительно описываются в рамках модели, учитывающей фотовозбуждение электронов в зону проводимости с четырех донорных центров со средними значениями энергии ионизации $E_1 \sim 1,27$ эВ, $E_2 \sim 1,46$ эВ, $E_3 \sim 1,89$ эВ и $E_4 \sim 2,43$ эВ. Акрестиной А.С. приведены результаты экспериментов по изменениям в спектре оптического поглощения кристалла силикосилленита висмута наблюдаемым при его облучения импульсным лазерным излучением на длине 1053 нм. Показано, что ИК-воздействие приводит к уменьшению оптического поглощения в диапазоне длин волн 450–900 нм с сохранением наведенных изменений в течение более 150 часов. Оказалось, что спектр фотоиндуцированных изменений носит резонансный характер с максимумами для полос поглощения на длинах волн 570, 700, 750 и 820 нм. С учетом обнаруженного резонансного характера фотоиндуцированных изменений в поглощении для кристалла силикосилленита висмута, автором сделано предположение, что в данном кристалле заметный вклад в поглощение дают внутрицентровые переходы для количественного описания которых может быть использовано разложение на компоненты гауссовой формы. Акрестиной А.С. предложена формула для корректного теоретического описания спектральных зависимостей оптического поглощения в кристаллах силленитов. Оказалось, что экспериментально наблюдаемые спектральные зависимости в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ удовлетворительно описываются предложенной формулой при учете фотовозбуждения электронов в зону проводимости с пяти глубоких донорных центров и четырех внутрицентровых переходов. Далее автором представлены результаты исследования фотоиндуцированных изменений в спектре оптического поглощения кристалла титаносилленита висмута, легированного алюминием, и аппроксимация экспериментальных зависимостей в рамках модифицированной модели примесного поглощения. Установлено, что облучение фоторефрактивного кристалла как непрерывным лазерным излучением из красной области спектра, так и импульсным ИК излучением приводит к уменьшению коэффициента поглощения во всей исследованной спектральной области. Показано, что экспериментальные спектральные зависимости оптического поглощения и его фотоиндуцированных изменений в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Al}$ хорошо описываются в рамках предложенной модели, с учетом фотовозбуждения электронов в зону проводимости с трех глубоких донорных центров и пяти внутрицентровых переходов.

В четвертой главе диссертации представлены результаты по изучению температурных зависимостей оптического поглощения и термоиндуцированных изменений в спектрах оптического поглощения кристаллов силленитов, после их отжига в воздушной атмосфере. Проведена аппроксимация полученных экспериментально спектральных зависимостей в рамках моделей, развитых во второй и третьей главе. Акрестиной А.С. описана методика для изучения температурных зависимостей коэффициента поглощения в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Al}$, а также спектральных зависимостей термически индуцированных изменений поглощения в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$.

Автором представлены результаты исследования температурных зависимостей оптического поглощения в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Al}$ на фиксированных длинах волн 470,

505, 570 и 660 нм, обнаружено проявление гистерезиса в цикле «нагрев–охлаждение», наблюдаемое при максимальной температуре нагрева, превышающей 70 °С. Установлено, что для $T_m < 70$ °С зависимость коэффициента поглощения от температуры удовлетворительно описывается в рамках известной модели термически индуцированных туннельных переходов электронов в донорно-ловушечных парах. Высказано предположение, что нагрев кристалла до температур выше 70 °С может сопровождаться уменьшением количества таких донорно-ловушечных пар, и только частичным восстановлением их концентрации при охлаждении кристалла, что и приводит к температурному гистерезису.

Далее автором представлены результаты исследования влияния температурного отжига в воздушной атмосфере на спектр оптического поглощения в кристалле силикосилленита висмута в диапазоне 490–2500 нм. Экспериментально обнаружено, что спектральная зависимость термически индуцированных изменений поглощения имеет резонансный характер. Показано, что спектральные зависимости оптического поглощения в кристалле силикосилленита висмута могут быть удовлетворительно описаны в рамках модели, учитывающей вклад как фотовозбуждения электронов в зону проводимости с глубоких донорных центров, так и внутрицентровых переходов. Для удовлетворительной аппроксимации экспериментально наблюдаемых зависимостей в спектральной области от 490 до 2500 нм оказалось достаточно учесть фотовозбуждение электронов в зону проводимости с пяти глубоких донорных центров и восемь внутрицентровых переходов. Акрестиной А.С. приведены результаты изучения термоиндуцированных изменений в спектре оптического поглощения в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Al}$. Обнаружено, что спектральная зависимость термически индуцированных изменений поглощения имеет резонансный характер. Показано, что аппроксимация наблюдаемых экспериментальных зависимостей в диапазоне 460–900 нм возможна в рамках модели, учитывающей фотовозбуждение электронов в зону проводимости с четырех глубоких донорных центров и пять внутрицентровых переходов.

Таким образом, диссертантом выполнен большой объем приоритетных теоретических и экспериментальных исследований, характеризующихся научной новизной и имеющих практическую ценность. Полученные данные представляют весомый вклад в физику фоторефрактивных явлений и дают основу для понимания особенностей фото- и термоиндуцированного примесного оптического поглощения в кристаллах класса силленитов.

Выдвигаемые автором научные положения, сделанные выводы и рекомендации научно обоснованы, а представленные результаты достоверны, что обеспечивается корректным использованием современных представлений о физических процессах и соответствующих математических моделей, применением передовых экспериментальных методик и аппаратуры, согласием теоретических предсказаний с экспериментальными данными автора и других исследовательских групп.

Диссертация не свободна от недостатков:

1. В тексте диссертации и автореферате автор использует выражение «уровень близкий к стационарному», не указав при этом ни относительную величину этого уровня, ни оценку времени, за которое *освещенный* кристалл достигает стационарного состояния.
2. В работе следовало бы сравнить значения энергии активации внутрицентровых переходов в кристаллах $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Al}$ (табл. 3.2, 3.4, 4.1, 4.3). Хорошее соответствие этих значений, полученных в разных экспериментах и разных кристаллах класса силленитов, может говорить о том, что выявленные внутрицентровые переходы присущи структурным дефектам кристаллов, а не

примесям. Также было бы полезно привести сравнение с параметрами, полученными в работах Панченко Т.В. (ссылки [47,48] диссертации).

3. В таблицах следовало отметить, какие параметры являлись подгоночными, а какие были заданы и не менялись при аппроксимации. Для фиксированных параметров следовало бы привести ссылку на литературный источник и кратко обсудить выбор значений. Кроме того, точность значений параметров в таблицах варьируется в слишком широких пределах. Так, например, в таблице 3.3 приведены параметры с указанием от одной до пяти значащих цифр.
4. Правильнее использовать общепринятые названия фоторефрактивных кристаллов: силикосилленит висмута, титаносилленит висмута, а не «силикат висмута», «титанат висмута».

Перечисленные недостатки не являются существенными и не снижают качества диссертации в целом.

Диссертация А.С. Акрестиной «Фото- и термоиндуцированные явления в кристаллах класса силленитов» является законченным исследованием, выполненным на высоком научном и техническом уровне. Материалы диссертации опубликованы в ведущих отечественных журналах, докладывались на российских и международных конференциях. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Результаты диссертационной работы А.С. Акрестиной могут представлять интерес в исследованиях фоторефрактивных сред в учреждениях РАН, таких как ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ИОФ, Институт оптического мониторинга СО, ИРЭ, Институт автоматики и процессов управления ДВО; Дальневосточном государственном техническом университете (ДВГТУ), ГНУ НИИ Океанотехники при ДВГТУ.

В целом рассматриваемая диссертация по своему содержанию, объему выполненных исследований, новизне, научной и практической значимости результатов соответствует требованиям, предъявляемым ВАК Минобрнауки РФ к кандидатским диссертациям по «Положению (п. 9)» о порядке присуждения ученых степеней, а ее автор, Акрестина Анна Сергеевна, заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – оптика.

Отзыв заслушан и одобрен на заседании научно-технического семинара лаборатории физики анизотропных материалов (протокол № 1 от 15.09.2014 г.).

Ведущий научный сотрудник
лаборатории физики анизотропных материалов
ФТИ им. А.Ф. Иоффе,
д.ф.-м.н.



И.А. Соколов

Старший научный сотрудник
лаборатории физики анизотропных материалов
ФТИ им. А.Ф. Иоффе,
к.ф.-м.н.



М.А. Брюшинин

Полное название ведущей организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (Ioffe Institute)

Сокращенное название ведущей организации: ФТИ им. А.Ф. Иоффе (Ioffe Institute)

Адрес: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

Электронная почта: post@mail.ioffe.ru

Телефон: (812) 297-2245

Сайт: <http://www.ioffe.ru>

Составители отзыва: Соколов Игорь Александрович, Брюшинин Михаил Алексеевич