

DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-05-03-10

УДК 535.421

Пространственно-модуляционная спектроскопия полупроводниковых материалов на основе динамических решеток

АЛЕКСЕЙ ЛЕОНИДОВИЧ ТОЛСТИК^{1✉}, ИВАН ГЕННАДЬЕВИЧ ДАДЕНКОВ²,
АЛЕКСАНДР АЛЕКСЕЕВИЧ СТАНКЕВИЧ³

Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

¹tolstik@bsu.by

<https://orcid.org/0000-0003-4953-4890>

²dadnenkov.ivan@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-0722-4683>

³fiz.stankeviAA@bsu.by

Аннотация

Предмет исследования. Предложены методы диагностики функциональных материалов на основе записи и считывания динамических решеток. **Метод.** В основу положено использование импульсной записи тонких и объемных динамических решеток с последующим восстановлением непрерывным лазерным излучением, позволяющим проследить динамику формирования и релаксации записываемой дифракционной решетки. На основе измеренных кинетик дифрагированного сигнала определяются нелинейно-оптические, термооптические и кинетические характеристики конденсированных сред. **Основные результаты.** Проанализированы возможности метода динамических решеток для диагностики и измерения характеристик ряда функциональных материалов. Показана эффективность измерения кинетических характеристик в условиях импульсной записи тонких и объемных голографических решеток. На примере фоторефрактивного кристалла силиката висмута определены времена жизни коротко- и долгоживущих ловушечных уровней, участвующих в процессе записи динамических решеток. Установлена зависимость дифракционной эффективности решеток от интенсивности записывающего излучения. Продемонстрированы преимущества использования дополнительной решетки (гомодина), позволяющей разделять вклады различных механизмов нелинейности в условиях их одновременного проявления. Такая методика применена к монокристаллическому германию. На примере пленки диоксида кремния предложен метод оценки толщины пленки на поверхности образца по амплитуде осциллирующей компоненты, связанной со звуковой волной, распространяющейся в воздухе у поверхности пленки. Для измерения нелинейной оптической восприимчивости пятого и более высокого порядков предложено использовать дифракцию в различные порядки на объемных динамических решетках. Разработанные методики апробированы на фоторефрактивных кристаллах и полупроводниковых средах, диагностика которых позволила определить кинетические и термооптические характеристики, включая времена заселения ловушечных уровней, термооптический коэффициент и температуропроводность. **Практическая значимость.** Предложенные в настоящей работе методы диагностики позволяют выделить различные механизмы нелинейности, участвующие в формировании динамических решеток, и измерить нелинейно-оптические, термооптические и кинетические характеристики (оптические восприимчивости различных порядков, термооптический коэффициент, температуропроводность, времена жизни свободных носителей заряда и ловушечных уровней).

Ключевые слова: голография, нелинейная оптика, динамические решетки, оптическая восприимчивость, температуропроводность, фоторефрактивные кристаллы, полупроводники

Ссылка для цитирования: Толстик А.Л., Даденков И.Г., Станкевич А.А. Диагностика функциональных материалов методом динамических решеток // Оптический журнал. 2022. Т. 89. № 5. С. 3–10. DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-05-03-10

Коды OCIS: 050.2770, 090.5694

ВВЕДЕНИЕ

Существенным достоинством метода динамических решеток (метод пространственно-модуляционной спектроскопии) является возможность бесконтактной диагностики большого разнообразия как типов материалов, так и механизмов их взаимодействия с электромагнитным излучением. При этом возможна работа в широком спектральном (от ближней ультрафиолетовой до ближней инфракрасной областей спектра) и временном (от фемтосекунд до секунд) диапазонах. Путем изменения периода динамических решеток, задержки считывающего импульса, а также использования когерентного поля гомодина, интерферирующего с полем сигнала дифракции, появляются возможности выделения различных механизмов нелинейности и измерения нелинейно-оптических, термооптических и кинетических характеристик большого многообразия исследуемых материалов. Так, по дифракционной эффективности динамической решетки можно оценить светоиндуцированное изменение показателя преломления, а также нелинейные оптические восприимчивости различных порядков [1–3]. Анализ кинетики дифрагированного сигнала на тонких и объемных динамических решетках позволяет измерять время их жизни и определять параметры материалов, такие как термооптический коэффициент, температуропроводность, времена жизни свободных носителей заряда и ловушечных уровней в полупроводниках и фоторефрактивных кристаллах, время жизни возбужденного состояния активаторов лазерных сред и др. [4–6].

Целью настоящей работы является отработка метода динамических решеток для выделения различных механизмов нелинейности и измерения нелинейно-оптических, кинетических и термооптических характеристик конденсированных сред на примере фоторефрактивных кристаллов силиката висмута и полупроводниковых материалов (монокристаллического германия и пленки диоксида кремния).

ДИНАМИЧЕСКИЕ РЕШЕТКИ В КРИСТАЛЛЕ СИЛИКАТА ВИСМУТА

Одним из существенных преимуществ кубических фоторефрактивных кристаллов семейства силленитов ($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$, $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$)

является формирование в них динамических голограмм в реальном времени. Это определяет их использование в адаптивных интерферометрах, голографических системах записи, хранения и обработки информации и др. [7–11]. Физические процессы записи голограмм в фоторефрактивных кристаллах основаны на пространственном перераспределении зарядов в поле интерферирующих световых пучков по многочисленным центрам, имеющим разнообразную природу возникновения и характеристики.

По своей энергетической структуре фоторефрактивные кристаллы относятся к широкозонным диэлектрикам, при этом существенное влияние оказывают примеси и структурные дефекты кристаллической решетки, приводящие к возникновению в запрещенной зоне донорных и акцепторных энергетических уровней [11, 13]. Особенностью является одновременное существование как долгоживущих (секунды, часы), так и короткоживущих ловушек (микро- и миллисекунды) [14–19]. Переходы с уровня, лежащего в запрещенной зоне, в зону проводимости приводят к образованию подвижных носителей заряда, причем такие переходы возможны при использовании излучения с заметно большей длиной волны, чем для прямых межзонных переходов, позволяя работать с излучением в видимой и ближней инфракрасной областях спектра [11, 20]. Последующая диффузия или дрейф электронов во внешнем электрическом поле приводят к заселению ловушечных уровней, формированию поля пространственного заряда и модуляции показателя преломления вследствие эффекта Поккельса. Как правило, для формирования динамических голограмм в фоторефрактивных кристаллах используют непрерывное лазерное излучение [7–10, 12, 13]. Новые возможности открываются при использовании лазерных импульсов нано- и пикосекундной длительности [21–24].

Для изучения нелинейных свойств фоторефрактивного кристалла силиката висмута была использована импульсная запись динамических решеток. С использованием установки, схема которой приведена на рис. 1, осуществлялась запись и восстановление интерференционной картины, полученной с помощью второй гармоники лазера на иттрий-алюминиевом гранате с длиной волны $\lambda = 532$ нм

и длительностью импульса 20 нс. Восстановление происходило при использовании излучения непрерывного гелий-неонового лазера с $\lambda = 632,8$ нм. Угол падения восстанавлива-

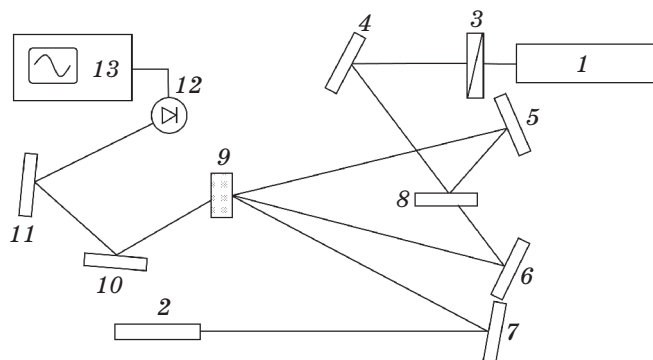


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 — лазер на иттрий-алюминиевом гранате, 2 — гелий-неоновый лазер, 3 — полуволновая пластинка, 4–8, 10, 11 — зеркала, 9 — исследуемый кристалл, 12 — скоростное фотоприемное устройство, 13 — цифровой осциллограф

ющего пучка выбирался исходя из условия Вульфа–Брэгга для дифракции на объемной голограмме.

На рис. 2 представлены кинетики дифрагированного сигнала на решетке, записанной в фоторефрактивном кристалле силиката висмута. Видно формирование как коротко- (сотни микросекунд), так и долгоживущих (секунды) решеток, причем с увеличением интенсивности вклад долгоживущих решеток уменьшается, а короткоживущих — увеличивается. Похожее поведение фотоиндуцированных динамических решеток в кристалле силиката висмута отмечалось в работе [6].

Формирование короткоживущих и долгоживущих решеток объясняется наличием в запрещенной зоне кристаллов семейства силленитов ловушечных уровней, существенно различающихся временами жизни. Фотоиндуцированные процессы приводят к перераспределению электронов по многочисленным дефектным центрам, имеющим раз-

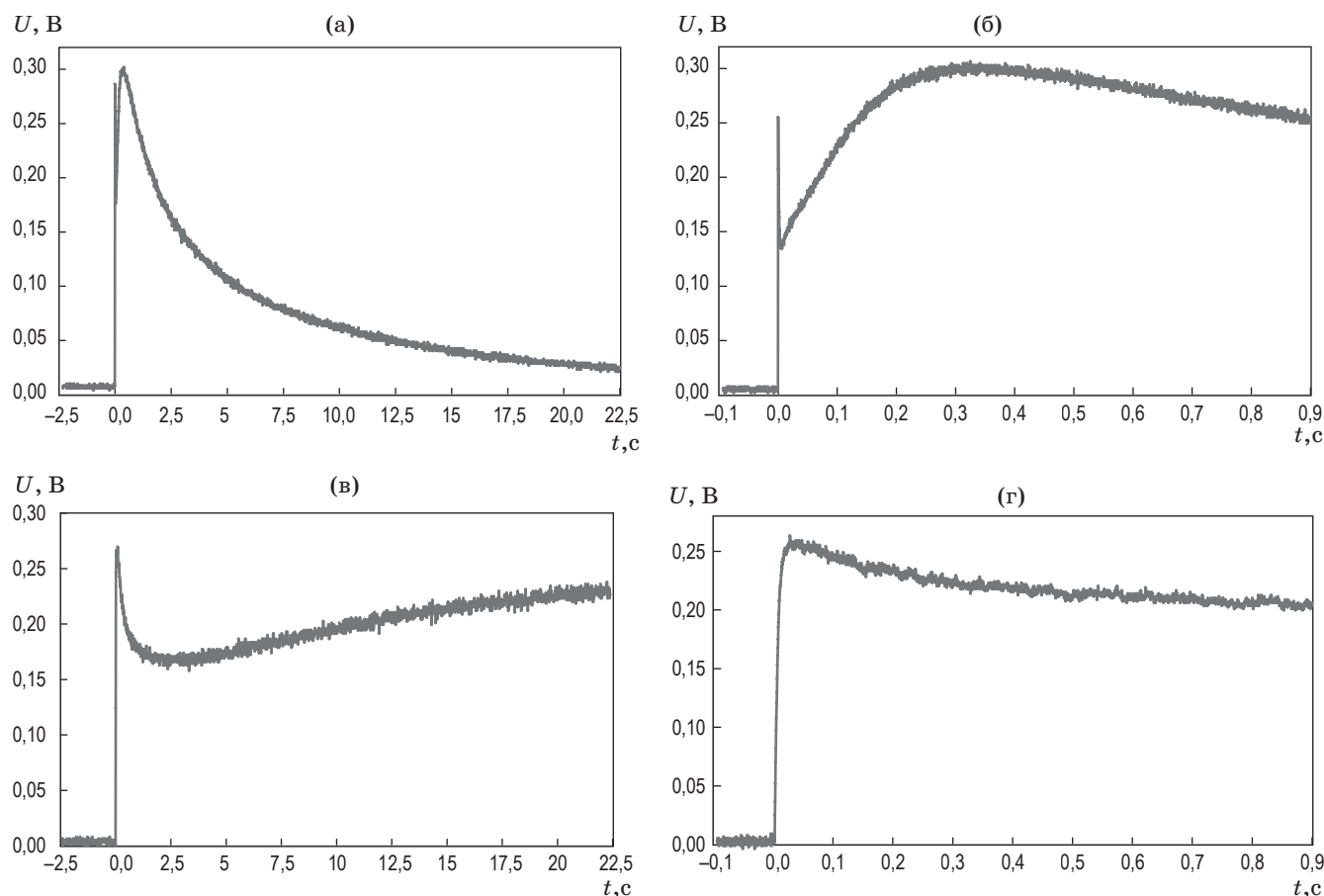


Рис. 2. Осциллограммы дифрагированного излучения при плотности мощности 5 МВт/см², зафиксированные с временным разрешением 2,5 с/дел (а), 100 мс/дел (б), 2,5 мс/дел (в), 100 мкс/дел (г)

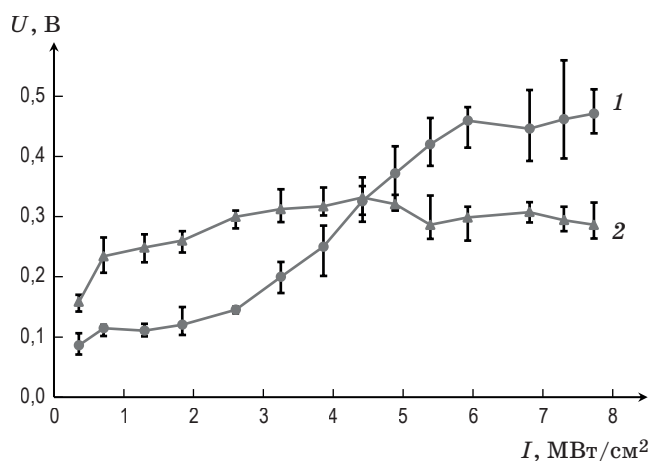


Рис. 3. Зависимость дифракционных эффективностей короткоживущей решетки (1) и долгоживущей решетки (2) от плотности мощности записывающего излучения

нообразную природу возникновения и характеристики. При этом запись динамических голограмм может определяться как локальным механизмом нелинейности, связанным с заселением различных уровней, так и нелокальным механизмом, определяемым диффузией электронов в зоне проводимости и последующей рекомбинацией с переходом на короткоживущие или долгоживущие ловушечные уровни, а также в валентную зону.

Зависимости дифракционной эффективности быстрой и медленной компонент динамической решетки от плотности мощности падающего излучения представлены на рис. 3. Исходя из вида зависимостей можно сделать вывод, что короткоживущая компонента существенно зависит от интенсивности падающего излучения и с ростом интенсивности становится более выраженной, что приводит к увеличению дифракционной эффективности. В то же время дифракционная эффективность долгоживущей решетки выходит на насыщение при плотности мощности порядка 2–3 МВт/см², что подтверждает участие различных механизмов в формировании динамических решеток в кристаллах силиката висмута.

ДИНАМИЧЕСКИЕ РЕШЕТКИ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Запись динамических решеток в полупроводниковых материалах также может быть об-

условлена проявлением различных механизмов нелинейности. Это и переход электронов в зону проводимости, заселение ловушечных уровней, нагрев среды, деформация поверхности и др. Используемый метод динамических решеток можно рассматривать как аналог широко известного метода модуляционной спектроскопии [25, 26], но в котором модуляция мощности возбуждения материала происходит не во времени, а в пространстве. Поглощение лазерного излучения оптическим материалом приводит к изменению его комплексной диэлектрической проницаемости, а также к деформации поверхности. При пространственно модулированном воздействии на образец все эти эффекты обуславливают одновременное формирование нескольких динамических решеток — фазовой, амплитудной, а также фазовой рельефной. При множественном характере отклика образца на лазерное воздействие необходим способ выделения нужной компоненты. Решение этой задачи в рамках метода динамических решеток стало возможным благодаря применению дополнительной дифракционной решетки (так называемого гомодина), генерирующего дополнительный световой пучок коллинеарный и когерентный пучку, дифрагированному на динамической решетке. Первое применение гомодина при изучении рэлеевского рассеяния в материалах осуществлено в работе [27] для усиления сигнала дифракции. Источником поля гомодина служил светорассеивающий микродефект на поверхности образца.

Селективирующее действие поля гомодина реализуется следующим образом. В простейшем случае одного экспоненциально затухающего сигнала $E_D(t) = E_D(0)\exp(-t/\tau)$ и постоянного поля гомодина $E_B(t) = E_B$ в результате их интерференции интенсивность на детекторе записывается в виде суммы двух сигналов с временами релаксации $\tau/2$ и τ

$$I_D(t) = I_B + I_D(0)\exp(-2t/\tau) + 2\sqrt{I_B I_D(0)}\exp(-t/\tau)\cos\Delta\varphi, \quad (1)$$

где τ — время жизни динамической решетки, $\Delta\varphi$ — разность фаз между дифрагированным полем на исследуемой динамической решетке и на гомодине, I_D — интенсивность дифракции, I_B — интенсивность поля гомодина.

Амплитуда искомого сигнала, описываемая последним слагаемым в выражении (1), зависит от двух параметров — интенсивности поля гомодина и разности фаз между двумя взаимодействующими полями. Заметим, что фазой поля гомодина можно управлять, меняя положение гомодина относительно записываемой динамической решетки. Такая возможность позволяет выделить одну компоненту дифрагированного сигнала и исключить из рассмотрения сопутствующие кинетики. Для этого необходимо сделать разность фаз двух полей $\Delta\varphi$, равной 0 и π , и зарегистрировать две кинетики

$$I_{D1}(t) = I_B + I_D(0) \exp(-2t/\tau) + 2\sqrt{I_B I_D(0)} \exp(-t/\tau), \quad (2)$$

$$I_{D2}(t) = I_B + I_D(0) \exp(-2t/\tau) - 2\sqrt{I_B I_D(0)} \exp(-t/\tau). \quad (3)$$

Затем находится разностный сигнал $I_{D1}(t) - I_{D2}(t)$, который позволяет выделить искомую компоненту с временем релаксации τ

$$I_{D1}(t) - I_{D2}(t) = 4\sqrt{I_B I_D(0)} \exp(-t/\tau). \quad (4)$$

Схема экспериментальной установки для записи динамических решеток представлена на рис. 4. Запись решеток осуществлялась лазерным излучением на длине волны 532 нм с длительностью импульса 20 нс. Для считывания использовалось излучение полупроводникового лазера с длиной волны 635 нм. На рис. 5 и 6 представлены осциллограммы дифрагированных сигналов, полученные при записи поверхностных динамических решеток в образцах монокристаллического германия и пленки диоксида кремния. На рис. 5 участие когерентного поля гомодина, интерферирующего с полем дифракции, в формировании сигнала дифракции позволило разделить электронную и тепловую компоненты, связанные с положительным изменением показателя преломления при переходе электронов в зону проводимости и отрицательным тепловым изменением показателя преломления. Длительность электронной компоненты определяется временем рекомбинации свободных носителей заряда, лежит в диапазоне менее 1 нс

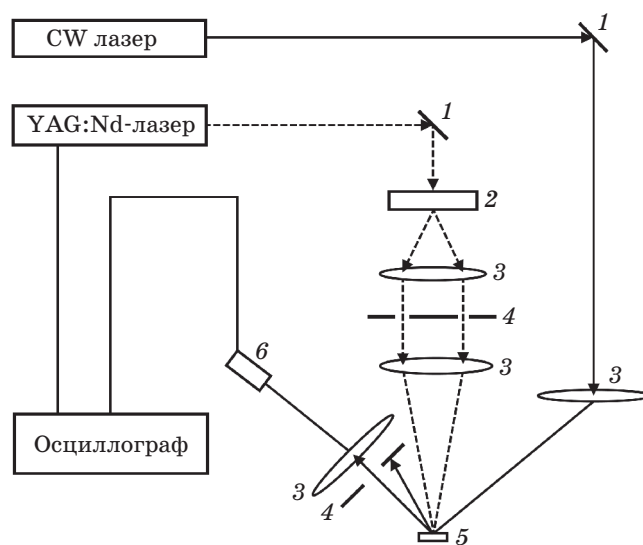


Рис. 4. Схема экспериментальной установки для записи динамических решеток. 1 — зеркала, 2 — дифракционная решетка, 3 — собирающие линзы, 4 — диафрагмы, 5 — исследуемый образец, 6 — фотоэлектронный умножитель

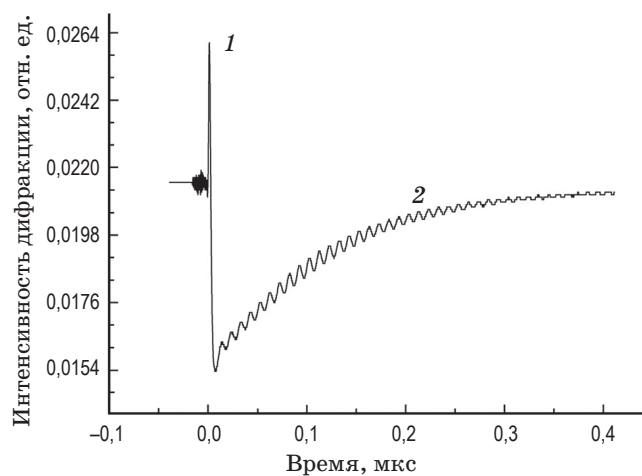


Рис. 5. Сигнал дифракции на решетке монокристаллического германия. Тепловая компонента дополнительно промодулирована акустической компонентой, обусловленной нагревом тонкого приповерхностного слоя воздуха

и не разрешается используемой регистрирующей системой. В отличие от этого, кинетики тепловой компоненты дифракции, представленные на рисунках, позволяют определить температуропроводность материала. Так, например, температуропроводность монокристаллического германия (рис. 5) составила $0,34 \text{ см}^2/\text{с}$, что соответствует табличному зна-

чению теплопроводности при комнатной температуре 58 Вт/мК.

На рис. 5 и 6 присутствуют также акустические компоненты дифракции на частоте 5–20 МГц в зависимости от периода динамической решетки. Их формирование обусловлено тепловым возбуждением приповерхностного слоя воздуха, контактирующего с нагретой поверхностью образцов.

Рисунок 6 демонстрирует возможности метода для оценки толщины пленки диоксида кремния на поверхности образца по амплитуде осциллирующих компоненты. Видно, что амплитуда акустической составляющей в воздухе убывает с ростом толщины пленки. Это связано с тем, что с увеличением времени распространения тепла от поверхности кремния, участвующей в поглощении, до внешней поверхности пленки, граничащей с воздухом, контраст решетки уменьшается вследствие смещения звуковой волны и теплопереноса вдоль поверхности образца.

Завершая демонстрацию возможностей метода динамической голографии для диагностики конденсированных сред обратим внимание на особенности нелинейной записи динамических голограмм [1–3]. В условиях мощного лазерного возбуждения профиль штриха динамической решетки перестает воспроизводить синусоидальную картину интерференции вследствие, например, эффекта насыщения поглощения. В этом случае нелинейная голографическая запись будет определяться вклю-

чением во взаимодействие нелинейностей пятого и более высокого порядков. Для анализа эффекта дифракции лазерного излучения на периодической решетке со сложным профилем используют классическое разложение модуляции показателя преломления и/или коэффициента поглощения в пространственный ряд Фурье [2]. Использование условия Брэгга на объемных голограммах позволяет выделить световые пучки, дифрагированные на отдельных пространственных компонентах динамической решетки, что позволяет измерить не только нелинейно-оптическую восприимчивость высших порядков, но и определить нелинейности термооптического коэффициента. Такая методика предложена для измерения термооптического коэффициента второго порядка поглощающих жидкостей (d^2n/dT^2), учитывающего зависимость теплоемкости и плотности среды от температуры [3].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты демонстрируют широкие возможности использования метода динамических решеток для неразрушающей диагностики материалов, выделения различных механизмов нелинейности и измерения нелинейно-оптических, термооптических и кинетических характеристик.

Так, с использованием импульсной записи объемных решеток в фоторефрактивных кристаллах определены условия проявления двух механизмов их формирования, приводящих к записи решеток с временами жизни, отличающимися на четыре порядка (сотни микросекунд и секунды). Показано, что с увеличением интенсивности лазерного излучения вклад долгоживущих решеток уменьшается, а короткоживущих — увеличивается. При записи поверхностных динамических решеток в образцах монокристаллического германия выделены компоненты дифрагированного сигнала, обусловленные электронной и тепловой нелинейностями. При этом показано, что тепловая компонента дополнительно промодулирована акустической компонентой, связанной со звуковой волной, распространяющейся в воздухе у поверхности пленки. Использование акустической компоненты позволило применить метод динамических решеток и для оценки

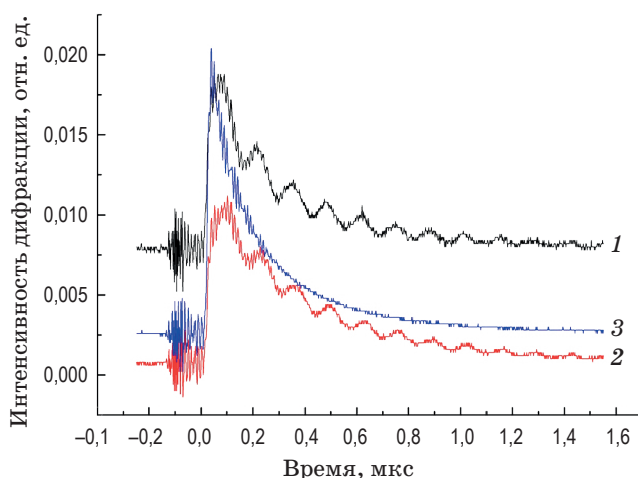


Рис. 6. Сигналы дифракции на решетках без оксидной пленки (1) и с пленкой SiO₂ толщиной 0,5 (2) и 0,9 (3) мкм

толщины пленок диоксида кремния, образующихся на поверхности кремния. Показано, что амплитуда осциллирующей компоненты,

обусловленная нагревом тонкого приповерхностного слоя воздуха, убывает с ростом толщины пленки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Rubanov A.S., Tolstik A.L., Karpuk S.M., Ormachea O. Nonlinear formation of dynamic holograms and multiwave mixing in resonant media // *Opt. Commun.* 2000. V. 181. P. 183–190.
2. Толстик А.Л. Многоволновые взаимодействия в растворах сложных органических соединений. Минск: БГУ, 2002. 159 с.
3. Agishev I.N., Tolstik A.L. Highly effective six-wave mixing in linearly absorbing organic liquids // *Technical Phys. Lett.* 2009. V. 35. P. 746–749.
4. Ивакин Е.В., Киселев И.Г., Ральченко В.Г., Большаков А.П., Ашкинази Е.Е., Шаронов Г.П. Исследование динамики индуцированной лазерным излучением плазмы свободных носителей заряда в монокристаллическом CVD-алмазе методом двухфотонного поглощения // *Квант. электрон.* 2014. Т. 44. С. 1055–1060.
5. Ivakin E.V., Kisialiou L.G., Antipov O.L. Laser ceramics $\text{Tm:Lu}_2\text{O}_3$. Thermal, thermo-optical, and spectroscopic properties // *Opt. Mater.* 2013. V. 35. P. 499–503.
6. Dadenkov I.G., Tolstik A.L., Miksyuk Yu.I., Saechnikov K.A. Photoinduced absorption and pulsed recording of dynamic holograms in bismuth silicate crystals // *Optics and Spectroscopy.* 2020. V. 128. P. 1401–1406.
7. Nastas A.M., Iovu M.S., Agishev I.N., Gavrusenok I.V., Melnikova E.A., Stashkevitch I.V., Tolstik A.L. Formation of holographic diffraction gratings in thin films of chalcogenide glassy semiconductors // *J. Belarusian State University. Physics.* 2021. № 3. P. 4–11.
8. Петров М.П., Степанов С.И., Хоменко А.В. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике. СПб.: Наука, 1992. 320 с.
9. Buse K. Electric and dielectric properties of $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ single crystals // *Appl. Phys. B: Lasers A. Optics.* 1997. V. 64. № 3. P. 273–291.
10. Nazhestkina N.I., Kamsyilin A.A., Kobozev O.V., Prokofiev V.V. Detection of small phase modulation using two-wave mixing in photorefractive crystals // *Appl. Phys. B.* 2001. V. 72. № 6. P. 767–773.
11. Каргин Ю.Ф., Бурков В.И., Марьин А.А., Егорышев А.В. Кристаллы $\text{Bi}_{12}\text{Si}_x\text{O}_{20-\delta}$ со структурой силленита. Синтез, строение, свойства. М.: изд. ИОХН РАН, 2004.
12. Шандаров С.М., Буримов Н.И., Кульчин Ю.Н., Ромашко Р.В., Толстик А.Л., Шепелевич В.В. Динамические голограммы Денисюка в кубических фоторефрактивных кристаллах // *Квант. электрон.* 2008. Т. 38. С. 1059–1069.
13. Pochi Yeh. Introduction to photorefractive nonlinear optics. N.Y.: Wiley, 1993. 410 p.
14. Wevering S., Imbrock J., Kratzig E. Relaxation of light-induced absorption changes in photorefractive lithium tantalate crystals // *JOSA. B.* 2001. V. 18. P. 472–478.
15. Matusevich A., Tolstik A., Kisteneva M., Shandarov S., Matusevich V., Kiessling A., Kowarschik R. Investigation of photo-induced absorption in a $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ // *Appl. Phys. B.* 2008. V. 92. № 2. P. 219–224.
16. Matusevich A., Tolstik A., Kisteneva M., Shandarov S., Matusevich V., Kiessling A., Kowarschik R. Methods for controlling of the laser-induced absorption in a BTO crystal by using of cw-laser radiation // *Appl. Phys. B.* 2009. V. 96. № 1. P. 119–125.
17. Кистенева М.Г., Акрестина А.С., Сивун Д.О., Киселев Р.В., Шандаров С.М., Смирнов С.В., Толстик А.Л., Агишев И.Н., Станкевич А.В., Каргин Ю.Ф. Динамика фотоиндуцированного поглощения света в кристаллах силленитов при облучении импульсами пикосекундной длительности // *Докл. Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.* 2010. Т. 22. № 2. Ч. 2. С. 62–65.
18. Khudyakova E.S., Kisteneva M.G., Shandarov S.M., Kornienko T.A., Tolstik A.L., Kargin Yu.F. Dynamics of light-absorption variations induced in a bismuth silicate crystal by visible laser illumination // *Radiophysics and Quantum Electronics.* 2015. V. 57. № 8–9. P. 589–594.

19. Kornienko T., Kisteneva M., Shandarov S., Tolstik A. Light-induced effects in sillenite crystals with shallow and deep traps // *Phys. Proc.* 2017. V. 86. P. 105–112.
20. Толстик А.Л., Матусевич А.Ю., Кистенева М.Г., Шандаров С.М., Иткин С.И., Мандель А.Е., Каргин Ю.Ф., Кульчин Ю.Н., Ромашко Р.В. Спектральная зависимость поглощения, фотоиндуцированного в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ лазерными импульсами длиной волны 532 нм // *Квант. электрон.* 2007. Т. 37. № 11. С. 1027–1032.
21. Hermann J.P., Herriau J.P., Huignard J.P. Nanosecond four-wave mixing and holography in BSO crystals // *Appl. Opt.* 1981. V. 20. P. 2173–2174.
22. Partanen J.P., Nouchi P., Jonathan J.M.C., Hellwarth R.W. Comparison between holographic and transient-photocurrent measurements of electron mobility in photorefractive $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ // *Phys. Rev. B.* 1991. V. 44. P. 1487–1491.
23. Murillo J.G. Photorefractive grating dynamics in $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ using optical pulses // *Opt. Commun.* 1999. V. 159. P. 293–300.
24. Станкевич А.В., Толстик А.Л., Хайдер Х.К. Фотоиндуцированное поглощение в кристаллах титаната висмута при нано- и пикосекундном возбуждении // *Письма в ЖТФ.* 2011. Т. 37. № 16. С. 7–14.
25. Roger J.P., Lepoutre F., Fournier D., Voccaro A.C. Thermal diffusivity measurement of micron-thick semiconductor films by mirage detection // *Thin Solid Films.* 1987. V. 155. P. 165–174.
26. Магунов А.Н. Лазерная термометрия твердых тел. М.: Физматлит, 2002. 224 с.
27. Pohl D.W., Schwarz S.E., Irniger V. Forced Rayleigh scattering // *Phys. Rev. Lett.* 1973. V. 31. № 1. P. 35–38.

АВТОРЫ

Алексей Леонидович Толстик — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой лазерной физики и спектроскопии, Белорусский государственный университет, Минск, 220030, Республика Беларусь; Scopus ID 6603803667; <https://orcid.org/0000-0003-4953-4890>; tolstik@bsu.by

Иван Геннадьевич Даденков — аспирант, младший научный сотрудник, Белорусский государственный университет, Минск, 220030, Республика Беларусь; <https://orcid.org/0000-0003-0722-4683>; dadenkov.ivan@gmail.com

Александр Алексеевич Станкевич — студент, инженер, Белорусский государственный университет, Минск, 220030, Республика Беларусь; fiz.stankeviAA@bsu.by

AUTHORS

Alexei L. Tolstik — Dr. Sci., professor, Head of the Department of the Laser Physics and Spectroscopy, Belarusian State University, Minsk, 220030, Republic of Belarus; Scopus ID 6603803667; <https://orcid.org/0000-0003-4953-4890>; tolstik@bsu.by

Ivan G. Dadenkov — Postgraduate student, junior researcher, Belarusian State University, Minsk, 220030, Republic of Belarus; <https://orcid.org/0000-0003-0722-4683>; dadenkov.ivan@gmail.com

Alexander A. Stankevich — Student, engineer, Belarusian State University, Minsk, 220030, Republic of Belarus; fiz.stankeviAA@bsu.by