

## Диагностика функциональных материалов методом динамических решеток

*А. Л. Толстик, Е. В. Ивакин, И. Г. Даденков, А. А. Станкевич*

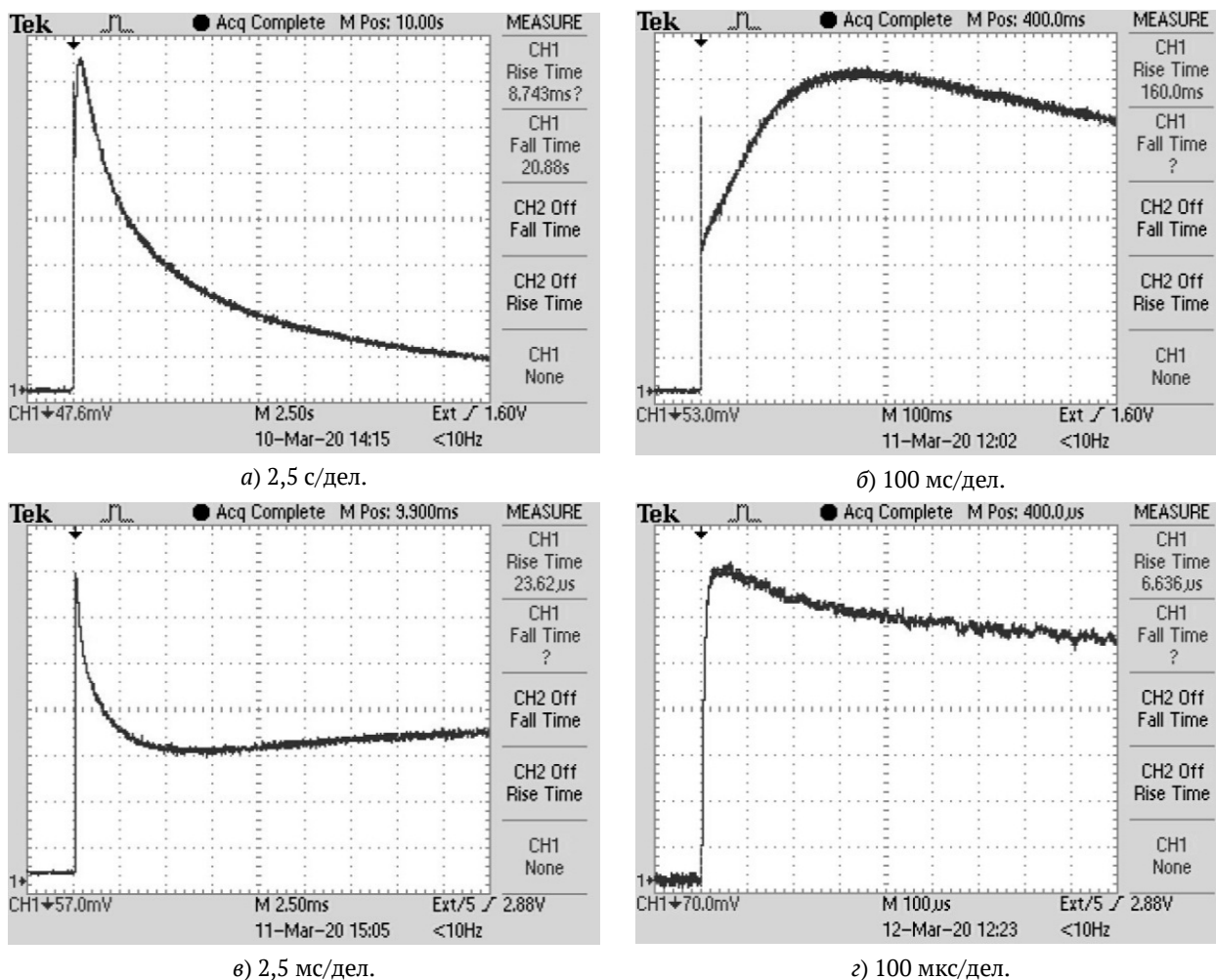
Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

Проанализированы возможности метода динамических решеток для диагностики и измерения характеристик ряда функциональных материалов. Показана эффективность выделения различных механизмов нелинейности за счет изменения длины волны падающего излучения и периода динамических решеток. Продемонстрировано расширение возможностей метода при использовании дополнительной решетки (гомодина), позволяющей разделять вклады различных механизмов нелинейности в условиях их одновременного проявления. Для измерения нелинейной оптической восприимчивости пятого и более высокого порядков предложено использовать различные порядки дифракции на объемных динамических решетках. Разработанные методики апробированы на ряде полупроводниковых сред, фоторефрактивных и активированных кристаллах, диагностика которых позволила определить нелинейно-оптические, термооптические и кинетические характеристики, включая времена заселения возбужденных и ловушечных уровней, время жизни носителей заряда, термооптический коэффициент и температуропроводность.

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

*Цитирование:* Толстик, А. Л. Диагностика функциональных материалов методом динамических решеток / А. Л. Толстик, Е. В. Ивакин, И. Г. Даденков, А. А. Станкевич // НОЛОЕХРО 2021 : XVIII Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. — С. 96–100.

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 УФ до ближней ИК области 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 величине 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, время жизни свободных носителей заряда и ловушечных уровней в полупроводниках и фоторефрактивных кристаллах, время жизни возбужденного состояния

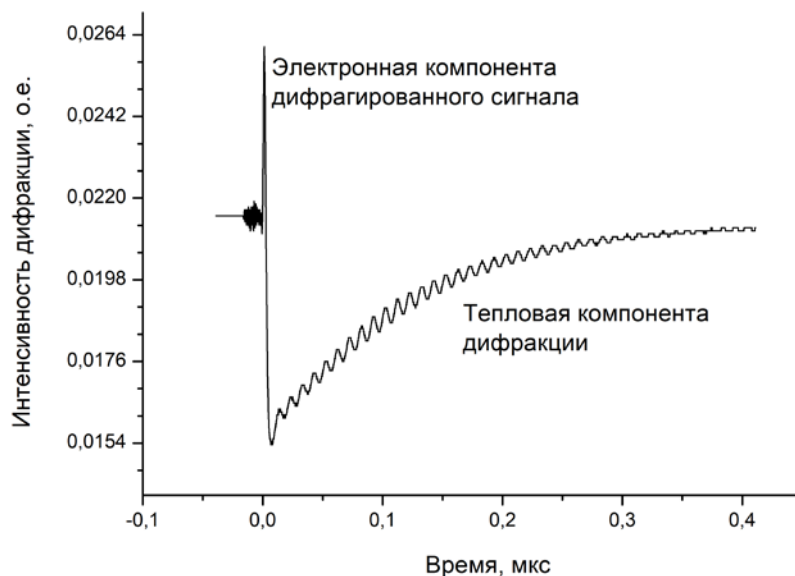


**Рис. 1.** Осциллограммы дифрагированного излучения при интенсивности  $5 \text{ МВт/см}^2$ , зафиксированные с различным временным разрешением

активаторов лазерных сред и т. д. [4–6]. Результаты применения метода динамических решеток в области диагностики ряда материалов приведены в данной работе.

На рис. 1 представлены кинетики дифрагированного сигнала на решетке, записанной в фоторефрактивном кристалле силиката висмута. Объемные динамические решетки записывались импульсным излучением YAG-лазера на длине волны 532 нм (длительность импульса 20 нс) и считывались излучением He-Ne лазера под углом Брэгга. Видно формирование как коротко- (сотни микросекунд), так и долгоживущих (секунды) решеток. Установлено, что с увеличением интенсивности вклад долгоживущих решеток уменьшается, а короткоживущих — увеличивается.

Такое поведение объясняется наличием в запрещенной зоне ловушечных уровней, существенно различающихся временами жизни. Фотондуцированные процессы приводят к перераспределению электронов по многочисленным дефектным центрам, имеющим разнообразную 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



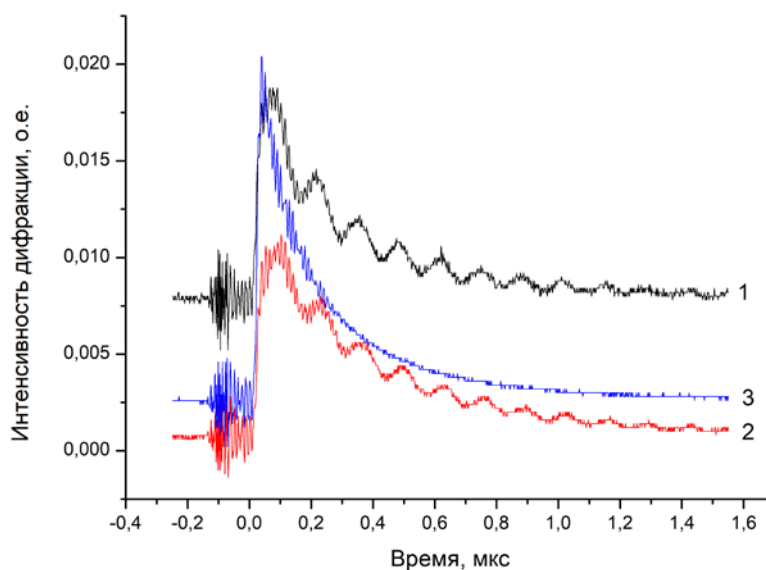
**Рис. 2.** Сигнал дифракции на решетке монокристаллического германия. Тепловая компонента дополнительно промодулирована акустической компонентой, обусловленной нагревом тонкого приповерхностного слоя воздуха

электронов в зоне проводимости и последующей рекомбинацией с переходом на короткоживущие или долгоживущие ловушечные уровни, а также в валентную зону.

На рис. 2 и 3 представлены осциллограммы дифрагированных сигналов, полученные при записи поверхностных динамических решеток в образцах монокристаллического германия и пленки кремния. Запись решеток осуществлялась лазерным излучением на длине волны 532 нм с длительностью импульса 20 нс. Для считывания использовалось излучение полупроводникового лазера на длине волны 635 нм. На рис. 2 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 и следовательно не разрешается используемой регистрирующей системой. В отличие от этого кинетики тепловой компоненты дифракции, представленные на рисунках, позволяют определить величину температуропроводности материала

На рис. 2 и 3 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.

Рис. 3 демонстрирует возможности метода для оценки толщины пленки оксида кремния на поверхности образца по амплитуде осциллирующей компоненты. Видно, что амплитуда акустической составляющей в воздухе убывает с ростом толщины пленки. Это связано с тем,



**Рис. 3.** Сигнал дифракции на решетке без оксидной пленки SiO<sub>2</sub> (1) и с пленкой толщиной 0,5 мкм (2) и 0,9 мкм (3) на стекле

что при вертикальном распространении тепла от поверхности кремния до внешней поверхности пленки, граничащей с воздухом, контраст решетки уменьшается вследствие теплопереноса вдоль поверхности образца.

Новые возможности диагностики конденсированных сред в условиях мощного лазерного возбуждения дает нелинейная запись динамических решеток, реализуемая в средах в условиях проявления нелинейностей пятого и более высокого порядка. Появляется возможность измерения не только нелинейно-оптических восприимчивостей высших порядков, но и определения нелинейности термооптического коэффициента. На примере поглощающих жидкостей предложена методика измерения коэффициента второго порядка ( $d^2n/dT^2$ ), учитывающего зависимость теплоёмкости и плотности среды от температуры.

Таким образом, в работе демонстрируются широкие возможности использования метода динамических решеток для диагностики разнообразных материалов, выделения различных механизмов нелинейности и измерения нелинейно-оптических, термооптических и кинетических характеристик (оптические восприимчивости различных порядков, термооптические коэффициенты, температуропроводность, время жизни возбужденных атомов и молекул, свободных носителей заряда и ловушечных уровней).

### Список источников

- [1] **Rubanov A. S.** [Nonlinear formation of dynamic holograms and multiwave mixing in resonant media](#) / A. S. Rubanov, A. L. Tolstik, S. M. Karpuk, O. Ormachea // Optics Communications. — 2000. — Vol. 181. — P. 183–190.
- [2] **Толстик А. Л.** Многоволновые взаимодействия в растворах сложных органических соединений. — Мн. : БГУ. — 2002. — 159 с.
- [3] **Agishev I. N.** [Highly effective six-wave mixing in linearly absorbing organic liquids](#) / I. N. Agishev, A. L. Tolstik // Technical Physics Letters. — 2009. — Vol. 35. — P. 746–749.

- [4] **Ивакин Е. В.** Исследование динамики индуцированной лазерным излучением плазмы свободных носителей заряда в монокристаллическом CVD-алмазе методом двухфотонного поглощения / Е. В. Ивакин, И. Г. Киселев, В. Г. Ральченко, А. П. Большаков, Е. Е. Ашкинази, Г. П. Шаронов // Квантовая электроника. — 2014. — Том 44. — С. 1055–1060.
- [5] **Ivakin E. V.** [Laser ceramics Tm:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Thermal, thermo-optical, and spectroscopic properties](#) / E. V. Ivakin, L. G. Kisialiou, O. L. Antipov // Optical Materials. — 2013. — Vol. 35. — P. 499–503.
- [6] **Dadenkov I. G.** [Photoinduced absorption and pulsed recording of dynamic holograms in bismuth silicate crystals](#) / I. G. Dadenkov, A. L. Tolstik, Yu. I. Miksyuk, K. A. Saechnikov // Optics and Spectroscopy. — 2020. — Vol. 128. — P. 1401–1406.