

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

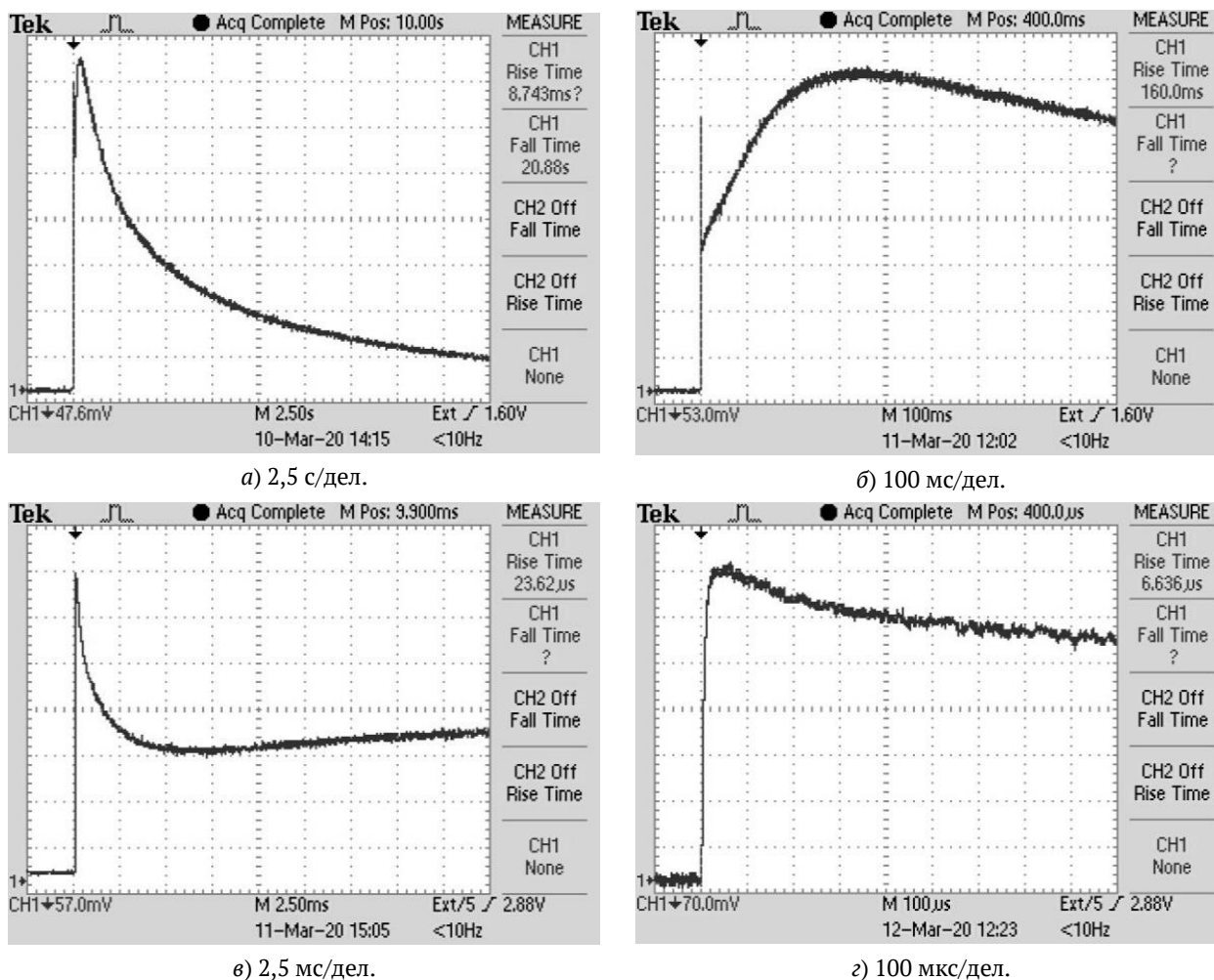


Рис. 1. Осциллограммы дифрагированного излучения при интенсивности 5 МВт/см², зафиксированные с различным временным разрешением

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

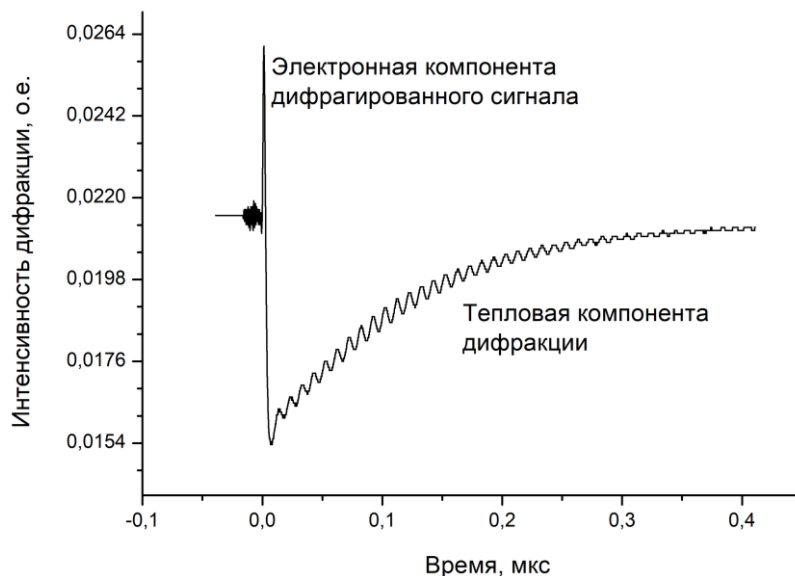


Рис. 2. Сигнал дифракции на решетке монокристаллического германия. Тепловая компонента дополнительно промодулирована акустической компонентой, обусловленной нагревом тонкого приповерхностного слоя воздуха

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,

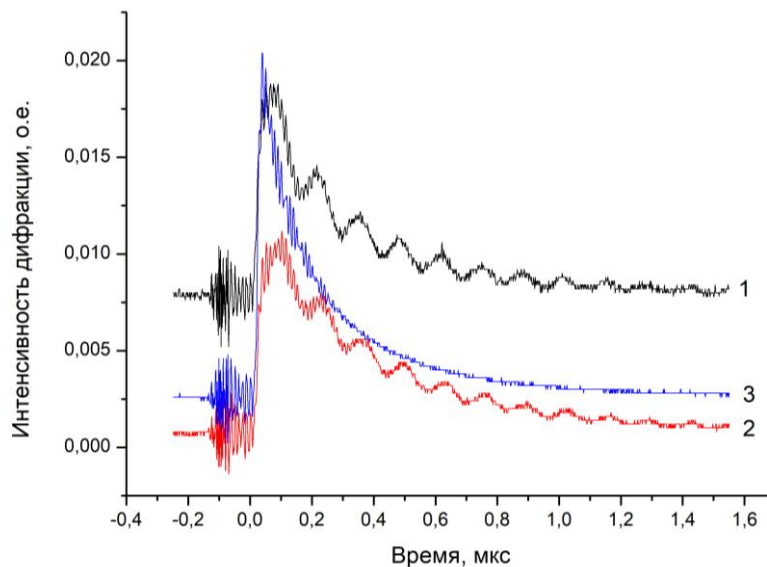


Рис. 3. Сигнал дифракции на решетке без оксидной пленки SiO₂ (1) и с пленкой толщиной 0,5 мкм (2) и 0,9 мкм (3) на стекле

что при вертикальном распространении тепла от поверхности кремния до внешней поверхности пленки, граничащей с воздухом, контраст решетки уменьшается вследствие теплопередачи 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 теплоемкости 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:Lu₂O₃. 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.