

# Импульсная голографическая запись и диагностика объемных и тонкопленочных полупроводников методом динамических решеток

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

Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

В работе продемонстрированы преимущества диагностики объемных полупроводников и тонкопленочных полупроводниковых структур методом пространственно-модуляционной спектроскопии. Метод основан на анализе кинетики процессов записи и релаксации тонких и объемных, пропускающих и отражательных динамических решеток. Показана эффективность выделения электронной и тепловой компонент нелинейности, дистанционного измерения параметров тонких (субмикронных) пленок, измерения кинетических и термооптических характеристик материалов, включая времена рекомбинации свободных носителей заряда и заселения ловушечных уровней, вклад тепловой нелинейности и коэффициент температуропроводности.

*Ключевые слова:* Голография, Динамические решетки, Полупроводники, Тонкие пленки, Оптические нелинейности, Термооптика.

*Цитирование:* Толстик, А. Л. Импульсная голографическая запись и диагностика объемных и тонкопленочных полупроводников методом динамических решеток / А. Л. Толстик, Е. В. Ивакин, И. Г. Даденков, А. А. Станкевич // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 349–352.

## Введение

Среди многообразия методов исследования полупроводниковых материалов можно выделить метод динамических решеток (метод пространственно-модуляционной спектроскопии), который позволяет бесконтактно получать информацию о нелинейно-оптических, термооптических и кинетических характеристиках вещества [1, 2]. Возможность изменения периода решетки, длины волны записывающего излучения, длительности импульсов и интенсивности лазерного излучения позволяет реализовать запись тонких и объемных, пропускающих и отражательных дифракционных решеток и выделить отдельные механизмы нелинейности. При этом появляется уникальная возможность дистанционного измерения параметров тонких (субмикронных) пленок.

В настоящей работе на примерах узко- и широкозонных полупроводников продемонстрирована эффективность выделения различных механизмов нелинейности и измерения кинетических и термооптических характеристик материалов при записи тонких и объемных динамических голограмм. Интерес к исследуемым в работе фоторефрактивным кристаллам семейства силленитов обусловлен их использованием в системах адаптивной голографической интерферометрии [3]. Перспективными для термоэлектрических приложений являются исследуемые соединения на основе халькогенидов свинца. Ведутся

разработки термоэлектриков с высокими значениями подвижности носителей заряда, термоЭДС и одновременно низкой теплопроводностью [4].

### **Используемые методы и подходы**

Для записи динамических решеток в полупроводниковых материалах использовались наносекундные лазерные импульсы, позволяющие индуцировать выброс электронов в зону проводимости. Последующая диффузия электронов, термолизация энергии возбуждения и заселение ловушечных уровней может приводить к проявлению электронной, тепловой, фоторефрактивной и других типов нелинейностей [5]. Решетки записывались на длине волны 532 нм линейно поляризованными лазерными импульсами длительностью 10 нс и зондировались излучением от непрерывного лазера на длине волны 625 нм. Были исследованы фоторефрактивные кристаллы силиката висмута (широкозонные полупроводники) и пленки теллурида свинца без примесей, а также допированные сурьмой и висмутом.

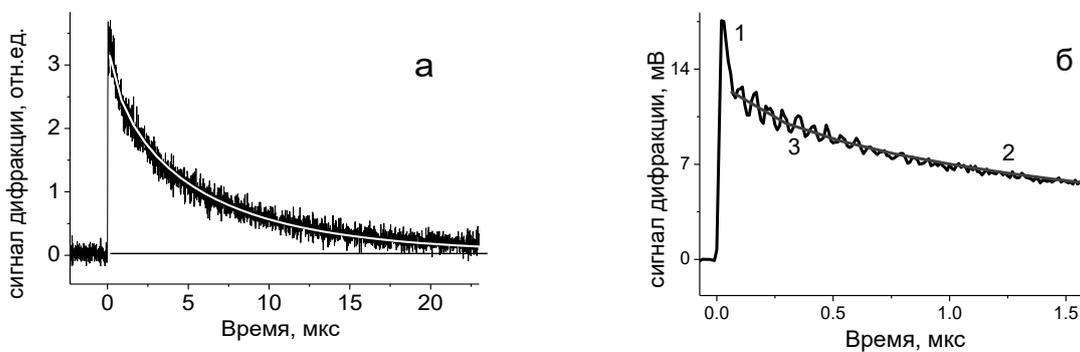
### **Результаты**

В ходе экспериментального исследования фоторефрактивных кристаллов семейства силленитов определены условия записи коротко- (сотни микросекунд) и долгоживущих (секунды) голографических решеток. Измерены зависимости дифракционной эффективности от угла ориентации кристалла силиката висмута и определена четырехлепестковая угловая зависимость дифракционной эффективности (рис. 1), которая хорошо согласуется с теорией дифракции в фоторефрактивных кристаллах среза (110). Такая зависимость явно наблюдается для долгоживущих решеток, причем значения при оптимальном и неоптимальном углах отличаются более, чем в 10 раз. В то же время, короткоживущие решетки имеют гораздо менее выраженную зависимость дифракционной эффективности от угла (различия примерно в 2 раза). Установленные зависимости позволяют сделать вывод о различных механизмах формирования решеток. Долгоживущая решетка формируется за счет классического механизма фоторефрактивной нелинейности, связанным с диффузией электронов и заселением ловушечных центров. За формирование короткоживущей решетки отвечает локальный механизм перехода электронов между ловушечными уровнями и зонами.



**Рис. 1.** Зависимость дифракционной эффективности коротко- (а) и долгоживущей решетки (б) от угла ориентации кристалла

Результаты исследования пленок теллурида свинца приведены на рис. 2. Толщина поликристаллической пленки теллурида свинца с примесью сурьмы составила 1,1 мкм, период записанной решетки  $\Lambda = 25$  мкм. Температуропроводность  $\chi$  в направлении вдоль поверхности пленки вычислялась из соотношения  $\chi = \Lambda^2/4\pi^2\tau$  по измеренным периоду решетки  $\Lambda$  и времени ее жизни  $\tau$ . На рис. 2а представлена полная кинетика дифракции, на рис. 2б – начальный ее фрагмент. Цифрами обозначены три характерных участка сигнала: зарождение и распад решетки свободных носителей заряда (1), релаксация тепловой решетки (2) и следствие возбуждения акустической монохроматы в воздухе (3).



**Рис. 2.** Кинетики дифрагированного сигнала, демонстрирующие возбуждение и распад тепловой решетки в поликристаллической пленке PbTe с примесью сурьмы. Белой кривой обозначен результат сопоставления эксперимента с теорией

Осцилляции на рис. 1б происходят вследствие термического возбуждения акустической волны в тонком слое воздуха, контактирующем с поверхностью пленки. На рис. 1б в начале кинетики виден также короткий пик дифракции, который связан с формированием решетки свободных носителей заряда.

### Заключение

Предложенный метод бесконтактной диагностики тонких пленок позволяет выделять различные механизмы нелинейности и получать уникальную информацию об субмикронных

объектах, включая кинетику отклика и температуропроводность. Установленные закономерности угловых зависимостей дифракционной эффективности для коротко- и долгоживущих голографических решеток представляют практический интерес для оптимизации условий записи голографических решеток в системах адаптивной интерферометрии, для которой существенны времена жизни решеток. Переход к короткоживущим решеткам расширяет область использования адаптивных интерферометров, позволяя фиксировать сигналы во всем звуковом диапазоне.

### Список источников

- [1] **Ивакин, Е. В.** Лазерный дифракционный релаксометр для исследования кинетики фотовозбуждения в конденсированных средах / Е. В. Ивакин // Оптический журнал. — 2000. — Том 67. — № 11. — С. 27–30.
- [2] **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.
- [3] **Ромашко, Р. В.** Адаптивная голографическая интерферометрия: техника, прогресс и приложения / Р. В. Ромашко // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. — 2021. — № 4. — С. 40–47.
- [4] **Chen, Z.** Lattice dislocations enhancing thermoelectric PbTe in addition to band convergence / Z. Chen, Z. Jian, W. Li, Y. Chang, B. Ge, R. Hanus, J. Yang, Y. Chen, M. Huang, G. J. Snyder, Y. Pei // Advanced Materials. — 2017. — Vol. 29. — P. 1606768.
- [5] **Толстик, А. Л.** Пространственно-модуляционная спектроскопия полупроводниковых материалов на основе динамических решеток / А. Л. Толстик, И. Г. Даденков, А. А. Станкевич // Оптический журнал. — 2022. — Том 89. — № 5. — С. 3–10.

## Pulsed holographic recording and diagnosis of bulk and thin-film semiconductors by transient grating method

*A. L. Tolstik, E. V. Ivakin, I. G. Dadenkov, A. A. Stankevich*

Belarusian State University, Minsk, Belarus

This work demonstrates the advantages of diagnostics of bulk semiconductors and thin-film semiconductor structures by spatial-modulation spectroscopy. The method is based on the analysis of the kinetics of recording and relaxation processes of thin and volume, transmission and reflection transient gratings. The efficiency of separation of electronic and thermal nonlinearity components, distance measurements of thin (submicron) films parameters, measurements of kinetic and thermo-optical characteristics of materials, including recombination times of free charge carriers and trap levels occupancy, thermal nonlinearity contribution and thermal diffusivity coefficient are shown.

*Keywords:* Holography, Transient gratings, Semiconductors, Thin films, Optical nonlinearities, Thermo-optics.