

# МНОЖЕСТВЕННАЯ ДИАГНОСТИКА МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕШЕТОК

Е.В. Ивакин, И.Г. Киселев

*Институт физики НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь*

Стремительное развитие пленочных технологий, появление новых материалов с уникальным сочетанием параметров требуют развития адекватных методов для объективной оценки их наиболее важных (иногда ранее недоступных) характеристик.

Данным докладом мы хотели бы привлечь внимание специалистов в области лазерно-оптического приборостроения и материаловедения к результатам, полученным нами с помощью метода динамических решёток (ДР) [1, 2], и рассмотреть возможности создания на его основе некоторых специализированных диагностических приборов для осуществления бесконтактного контроля конкретных характеристик материалов. Обобщенная схема диагностического устройства приведена на рисунке 1.

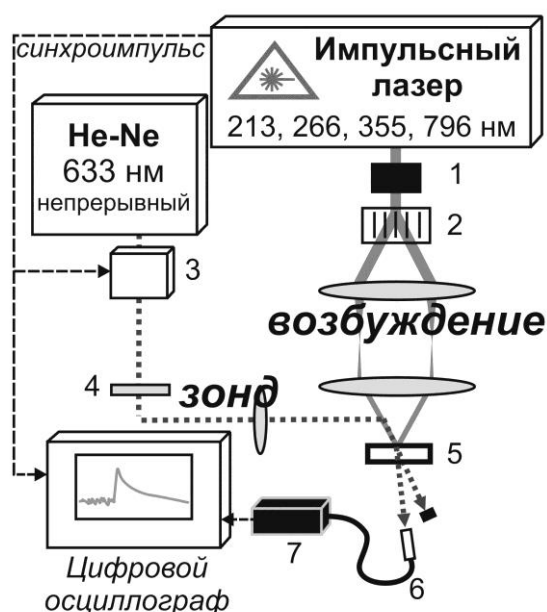


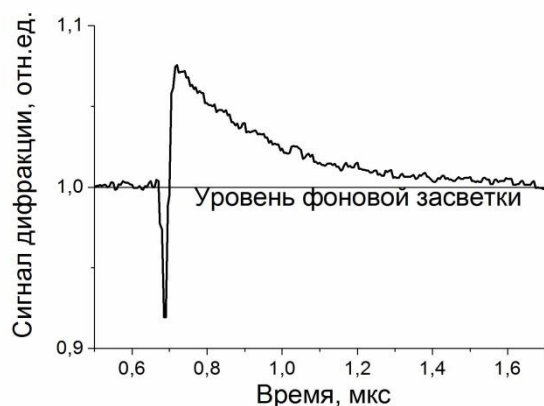
Рис. 1. Схема установки: 1 – аттенюатор, 2 – светоделитель, 3 – акустооптический модулятор, 4 – полуволновая пластинка, 5 – образец, 6 – оптоволоконно, 7 – фотоприёмник

Фактически, в созданном устройстве реализован пространственный аналог широко известного принципа модуляционной спектроскопии [3], обладающей рекордной чувствительностью, универсальностью и селективностью. Импульсное возбуждение образца организовано так, что распределение плотности мощности лазерного излучения по пятну возбуждения описывается гармонической функцией с заданным периодом  $\Lambda$ . Вследствие изменения комплексной диэлектрической проницаемости в образце

под действием накачки формируются одна или сразу несколько ДР различных типов и физической природы: рельефно-поверхностная, объемная, фазовая, амплитудная, электронная, тепловая, акустическая и т.п. Образец зондируют пучком от отдельного лазера непрерывного или импульсного действия и с помощью высокоразрешающего фотоприемника по разработанным моделям определяют временные и амплитудные параметры сигнала дифракции.

Метод ДР характеризуется своей универсальностью по отношению к типу исследуемого материала и измеряемому параметру. Особое место занимает используемое гомодинное детектирование сигнала дифракции. Присутствие когерентного поля гомодина более чем на порядок увеличивает амплитуду сигнала и делает возможной фазовую селекцию в случае его многокомпонентности.

В докладе приводятся некоторые результаты измерения функционально важных параметров материалов: теплопроводность вдоль и нормально поверхности с разрешением по глубине и направлению теплопереноса, подвижность и время жизни свободных носителей заряда (СНЗ) в пленочных и объемных полупроводниках, скорость распространения поверхностных и объемных акустических волн в диапазоне до сотен мегагерц, время жизни метастабильного уровня в лазерных материалах, термооптические коэффициенты и т.д.



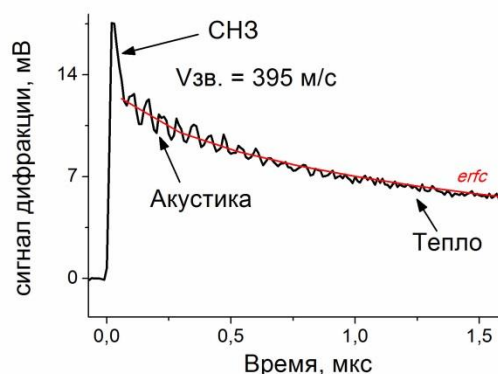
*Рис. 2. Электронная (кинетика вниз) и тепловая (кинетика вверх) компоненты дифракции, наблюдаемой в образце поликристаллического CVD алмаза. Возбуждение ДР на длине волны 213 нм. Зондирование в проходящем свете*

На рисунке 2 приведена кинетика дифракции в тонкой пластинке парофазного (CVD) поликристаллического алмаза, который, как известно, является широкозонным полупроводником [4]. При межзонном возбуждении в пленке формируются два типа ДР - электронная (короткий импульс вниз) и тепловая (сигнал вверх). Временные параметры электронной компоненты использованы для определения подвижности СНЗ и их времени рекомбинации. Тепловая компонента дифракции формируется в результате локального тепловыделения, вызванного быстрой безызлучательной рекомбинацией СНЗ и используется для определения температуропроводности (теплопроводности) образца. Горизонтальная линия фоновой засветки на рисунке характеризует

уровень интенсивности гомодинного источника. Противоположные полярности сигналов дифракции относительно линии гомодина означают, что изменение показателя преломления в образце за счет изменения плотности СНЗ и вследствие нагрева имеют противоположные знаки. Величина транспортных коэффициентов существенно зависит от концентрации дефектов и плотности СНЗ [5].

Приведенный пример наглядно иллюстрирует эффективность метода ДР в диагностике полупроводников. Метод особенно полезен при изучении свойств термоэлектриков (узкозонные полупроводники), которые используются для преобразования тепловой энергии в электрическую. В этих материалах необходимо, чтобы подвижность СНЗ была максимальной, а теплопроводность – минимальной. Удобство метода ДР состоит в том, что динамика тепловой и электронной компонент исследуется одновременно.

В настоящее время в Институте физики начаты исследования термоэлектрических преобразователей на основе наноструктурированных пленок халькогенидов свинца. На рисунке 3 показана кинетика затухания сигнала дифракции для полупроводниковой пленки РbТе толщиной 0,7 мкм на стеклянной подложке при возбуждении на длине волны 1064 нм. Регистрируются сразу три типа ДР. Осцилляции сигнала обусловлены формированием акустической волны в частотном диапазоне 8-9 МГц в тонком приповерхностном слое воздуха. По измеренной частоте и известной (справочной) температурной зависимости скорости звука в воздухе оценена температура этого слоя, а, следовательно, и температура поверхности пленки в момент измерения.



*Рис. 3. Затухание ДР в плёнке РbТе. В начале графика виден узкий пик дифракции электронного происхождения. Кроме того, на фоне сравнительно медленной тепловой компоненты наблюдаются высокочастотные акустические осцилляции. Зондирование в отраженном свете*

Использование в производстве различных вариантов технологических процессов часто сказывается на внутреннем строении получаемых материалов. Связь теплопроводности с особенностями структуры образцов (пористость, зернистость, плотность дефектов и т.д.) позволяет выявлять эти закономерности с помощью метода ДР. В качестве примера на рисунке 4

показана зависимость измеренной теплопроводности верхнего слоя (20-30 мкм) плёнки анодного оксида алюминия  $Al_2O_3$  толщиной 100 мкм, выращенной на массивной алюминиевой подложке, от величины анодного тока.

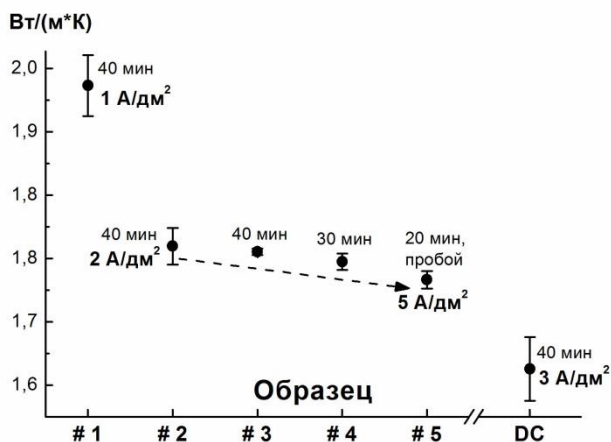


Рис. 4. Теплопроводность плёнки анодного  $Al_2O_3$  при различных параметрах высоковольтного анодирования. Измерения проводились при периоде ДР 25 мкм. Числами указаны значения плотности анодного тока и время процесса

Полученная закономерность указывает на то, что чрезмерное повышение плотности тока в процессе электролиза приводит к уменьшению теплопроводности получаемой пленки оксида алюминия.

Практический интерес представляет также тепловая диагностика субмикронных пленок, которые, как правило, находятся в тепловом контакте с подложкой.

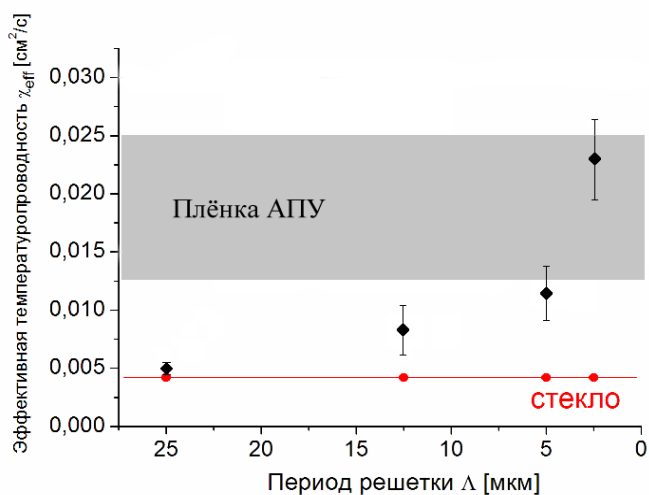


Рис. 5. Зависимость эффективной температуропроводности системы пленка-подложка от периода ДР. Зондирование в проходящем свете

На рисунке 5 представлена зависимость эффективной температуропроводности  $\chi$  от  $\Lambda$  для системы «пленка алмазоподобного углерода (АПУ) на стеклянной подложке». Видно, что при малых и больших

периодах ДР результат измерения близко соответствует тепловым свойствам пленки и стекла соответственно. Этот пример показывает, что путем изменения периода ДР можно последовательно определить теплопроводность пленки и подложки в отдельности.

В докладе приводятся также некоторые результаты диагностики современных лазерных материалов по тепловым и электронным параметрам [6,7].

Работа выполнена при поддержке БРФФИ по проектам Ф11ЛИТ-006 и Ф13К-063.

Авторы выражают благодарность тем организациям, которые любезно предоставили свои образцы для тестирования.

### *Литература*

1. Special issue on dynamic gratings and four-wave mixing. IEEE Journal of Quantum Electronics, QE-22, No 8, 1986.
2. E.V. Ivakin A.S. Rubanov. Thermal diffusivity measurement of high-conducting solids by the method of transient gratings. Analytical Sciences, 17, p. 126-128 (2001).
3. M. Cardona. Modulation spectroscopy. Academic Press, 1969.
4. E.V. Ivakin, A.V.Sukhodolov, V.G. Ralchenko, A.V. Vlasov, A.V. Khomoch. Measurement of thermal conductivity of polycrystalline CVD diamond by laser-induced transient grating technique. Quantum Electronics. 32, p. 367-372 (2002).
5. P. Šcajev, V. Gudelis, K. Jarasiunas, E. Ivakin, I. Kisialiou, M. Nesladek, K. Haenen // Phys. Stat. Sol. 2012, No 9, p. 1744-1749, (2012)
6. I.G. Kisialiou. Free of reabsorption upper-state lifetime measurements by the method of transient grating. Appl. Opt. 51, No 22, p. 5458-5463, (2012).
7. E.V. Ivakin, A.V. Suchadolau, O.L. Antipov, N.V. Kuleshov. Transient grating measurements of refractive index changes in intensively pumped Yb-doped laser crystals. Appl. Phys. B 86, 315-3-8, (2007).