

## НЕРАЗРУШАЮЩАЯ ДИАГНОСТИКА КОРОТКОПЕРИОДНЫХ СВЕРХРЕШЕТОК Mo/Si МЕТОДОМ ПИКОСЕКУНДНОЙ АКУСТИКИ

Н.Ю. Фролов, А.Ю. Клоков, А.И. Шарков, Е.Н. Рагозин

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,

Ленинский пр. 53, Москва 117924, Россия,

*frolil199999@gmail.com, klokov@lebedev.ru, sharkovai@lebedev.ru, enragozin@gmail.com*

Методом пикосекундной акустики экспериментально исследованы структурные свойства короткопериодных сверхрешеток Mo/Si, применяемых в качестве зеркал в диапазоне экстремального ультрафиолета. С помощью фемтосекундных лазерных импульсов возбуждались упругие импульсы с частотами до 1 ТГц, что приводило к изменениям коэффициента отражения структуры, которые детектировались с пикосекундным времененным разрешением. Фурье-анализ полученных временных зависимостей позволил определить частоты собственных колебательных мод, связанных со структурными параметрами сверхрешеток. Получены оценки периода, средней скорости звука и толщины структуры. Высокое пространственное и временное разрешение, а также неразрушающий характер данной методики делают ее перспективной для характеризации слоистых структур.

**Ключевые слова:** пикосекундная акустика; сверхрешетки.

## NON-DESTRUCTIVE DIAGNOSTICS OF SHORT-PERIOD Mo/Si SUPERLATTICES BY PICOSECOND ACOUSTICS

N.Yu. Frolov, A.Yu. Klokov, A.I. Sharkov, E.N. Ragozin

*P.N. Lebedev Physical Institute,*

*53 Leninsky Ave., 119991 Moscow, Russia,*

*frolil199999@gmail.com, klokov@lebedev.ru, sharkovai@lebedev.ru, enragozin@gmail.com*

The picosecond acoustics method was used to experimentally investigate the structural properties of short-period Mo/Si superlattices, which are employed as mirrors in the extreme ultraviolet range. Elastic pulses with frequencies up to 1 THz were excited using femtosecond laser pulses, inducing changes in the reflection coefficient of the structure. These changes were detected with picosecond time resolution. Fourier analysis of the obtained time-dependent signals allowed us to estimate the frequencies of eigenoscillation modes determined by the superlattice's structural parameters. From this analysis, estimates of the period, average sound velocity, and total thickness of the structure were derived. Due to its high spatial and temporal resolution, as well as its non-destructive nature, this technique proves highly promising for the characterization of layered structures.

**Keywords:** picosecond acoustics; superlattices.

### Введение

В настоящее время литография при экстремальном ультрафиолете (EUV) является доминирующим методом серийного изготовления полупроводниковых интегральных схем, позволяющим достигать проектных норм вплоть до единиц нанометров. Ее ключевым элементом являются многослойные зеркальные покрытия, например, на основе слоев Mo/Si, демонстрирующие высокую отражательную способность мягкого рентгеновского и экстремального УФ-излучения [1]. Достижение оптимальных спектральных характеристик таких структур требует атомарно точного

контроля толщин слоев, а также качества интерфейсов.

Для характеристики многослойных систем широко применяется метод скользящего рентгеновского отражения, способный обеспечить прецизионный контроль периода структуры и оценить качество межслойного интерфейса. Однако, поскольку угол скольжения составляет единицы градусов, данный метод сложно использовать для исследования образцов с поверхностью, обладающей кривизной. Кроме того, латеральное разрешение этого метода составляет сотни микрон, ограничивая анализ локальных неоднородностей

многослойных структур.

Для контроля качества таких структур с высоким пространственным разрешением ( $\sim 1$  мкм) перспективным является метод пикосекундной акустики. Он заключается в генерации в образце упругих импульсов деформации при помощи фемтосекундных лазерных импульсов. Распространяясь, упругие импульсы могут рассеиваться на интерфейсах структуры и других неоднородностях образца, что приводит к локальному изменению показателя преломления. В свою очередь, эти изменения приводят к возмущению комплексного коэффициента отражения света. Динамика коэффициента отражения может быть зарегистрирована с фемтосекундным разрешением по отражению зондирующего лазерного импульса. Характерные длины волн импульсов деформации достигают единиц нанометров, что, в сочетании с малым размером пятна возбуждения, позволяет осуществлять прецизионные измерения механических и структурных свойств слоев и интерфейсов. Целью данной работы было исследование упругих и структурных свойств сверхрешеток Mo/Si методом пикосекундной акустики.

### Результаты и их обсуждение

Объектом исследования в данной работе была тонкая слоистая структура Mo/Si ( $d = 9.4$  нм,  $n = 23$ ), нанесенная на подложку из плавленого кварца, имеющей форму сферического сегмента с радиусом кривизны 2 м, методом магнетронного распыления (рентгеновское зеркало).

Для генерации и регистрации упругих импульсов в структуре использовалась установка, реализующая двухцветную методику pump-probe на основе фемтосекундного Ti:Sa лазера Mira-900. Излучение источника (длительность импульса 170 фс, частота повторений 76 МГц, длина волны  $\lambda = 800$  нм) делилось на два луча. Первый луч после удвоения частоты фокусировался на поверхности образца в пятно диаметром 3 мкм и производил нагрев, возбуждая импульсы упругой деформации,

приводящие к изменению комплексного коэффициента отражения света. Эти изменения регистрировались вторым (зондирующим) лазерным импульсом на исходной длине волны (сфокусированным в ту же точку) при помощи модифицированного интерферометра Саньяка [2]. Для регистрации временной динамики коэффициента отражения в схеме была установлена линия задержки, позволявшая изменять время прихода зондирующего луча относительно луча возбуждения.

Регистрируемые временные зависимости изменения коэффициента отражения структуры (рис. 1), состояли из медленной составляющей, связанной с прогревом образца, а также быстро осциллирующей части, вызванной распространением упругого импульса в сверхрешетке (вставка в рис. 1). В момент времени 60 пс наблюдается приход импульса, отраженного от интерфейса структуры с подложкой. Используя ростовые параметры можно оценить среднюю скорость звука в структуре:  $V_L = 7.28$  нм/пс.

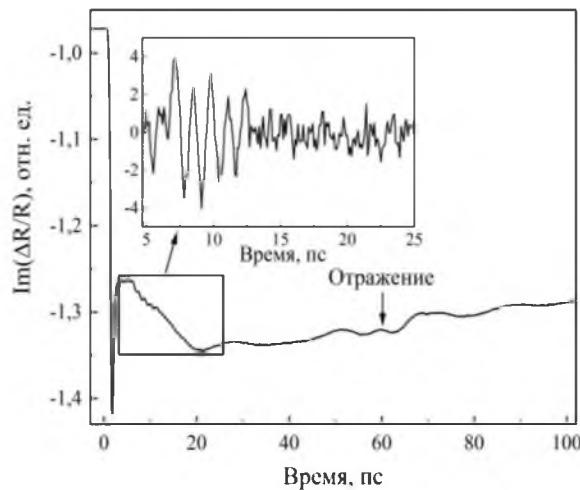


Рис. 1. Временная зависимость изменения коэффициента отражения структуры. На вставке изображена быстрая часть отклика структуры

После вычитания из отклика медленной составляющей проводился Фурье-анализ осциллирующей составляющей (рис. 2).

Интенсивная линия на частоте 48 ГГц, связана с рассеянием Мадельштама-Бриллюэна на продольном акустическом фо-

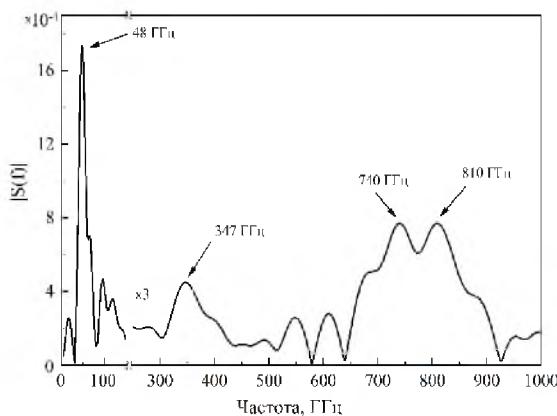


Рис. 2. Спектр быстрой части отклика

ноне. Используя соотношение  $f_{MB} = 2 \cdot n_{SL} \cdot V_L / \lambda$ , можно оценить усредненный показатель преломления  $n_{SL} = 2.26$ . Линия на частоте 347 ГГц связана с возбуждением локальной поверхностной моды. Наличие этой линии, находящейся в запрещенной зоне, говорит о том, что верхний слой структуры – кремний, поскольку его волновое сопротивление меньше, чем у молибдена см. [3]. Линии  $f_1 = 740$  ГГц и  $f_2 = 810$  ГГц связаны с распространяющимися модами, находящимися в первой и второй минизонах Бриллюэна. Период сверхрешетки можно оценить величиной  $d = 2 \cdot V_L / (f_1 + f_2) \approx 9.4$  нм.

### Заключение

Для сверхрешеток Mo/Si были измерены временные зависимости изменения

коэффициента отражения данной структуры, в результате распространение импульса гиперзвука. Их Фурье анализ показал наличие линий на частотах 347 ГГц, 740 ГГц и 810 ГГц. Полученные оценки толщины структуры, а также среднего размера периода сверхрешетки соответствуют ростовым параметрам.

Таким образом, полученные в данной работе результаты показывают, что с помощью методики накачка-зондирование возможна неразрушающая диагностика однородности, постоянства периода и соотношения толщин слоев Mo и Si с высоким пространственным разрешением.

Работа выполнена при поддержке Гранта РНФ 25-12-00314.

### Библиографические ссылки

1. Bjorkholm J.E., Bokor J., Eichner L., Freeman R.R., Gregus J., Jewell T.E., et. al. Reduction imaging at 14 nm using multilayer-coated optics: Printing of features smaller than 0.1 μm. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics Processing and Phenomena* 1990; 8(6): 1509-1513.
2. Tachizaki T., Muroya T., Matsuda O., Sugawara Yo, Hurley D., Wright O. Scanning ultrafast Sagnac interferometry for imaging two-dimensional surface wave propagation. *Review of Scientific Instruments* 2006; 77(4): 043713-1-043713-12.
3. Grahn H.T., Maris H.J., Tauc J. Time-resolved study of vibrations of a-Ge: H/a-Si: H multilayers. *Physical Review B* 1988; 38(9): 6066-6074.