

УДК 621.315.5

## Исследование действия мягкого рентгеновского излучения на поверхность твердых растворов $Cd_x Hg_{1-x} Te$ методами атомной силовой микроскопии

В.Г. Средин, О.Б. Ананьин, И.Д. Бурлаков,  
А.Е. Мирофьянченко, А.П. Мелехов, И.К. Новиков

*Представлены результаты воздействия импульсного мягкого рентгеновского излучения лазерной плазмы на морфологию поверхности твердых растворов эпитаксиальных слоев  $Cd_x Hg_{1-x} Te$ . Увеличение дозы облучения приводит к росту перепада высот микровыступов и шероховатости.*

PACS: 85.60.—q

*Ключевые слова:* АСМ, морфология поверхности, рентгеновское излучение, плазма, КРТ.

### Введение

К мягкому рентгеновскому излучению (МРИ) относят излучение с длиной волны от 0,1 до 10 нм (энергия кванта 0,1–12,4 кэВ). Так как излучение указанного диапазона характеризуется высокими значениями линейного коэффициента поглощения, а также не приводит к непосредственной генерации точечных дефектов в кристаллах, оно перспективно в качестве средства для модификации свойств тонких поверхностных слоев материалов кристаллической и некристаллической природы, например, для травления поверхности. Подобные операции могут представлять определенный интерес как в эпитаксиальных технологиях выращивания многослойных структур, включая квантово-размерные, так и в технологиях изготовления твердотельных матричных фотоприемных устройств нового поколения [1].

**Средин Виктор Геннадьевич**, профессор, заведующий кафедрой<sup>1,4</sup>,

**Ананьин Олег Борисович**, профессор, заведующий кафедрой<sup>2,4</sup>.

**Бурлаков Игорь Дмитриевич**, заместитель генерального директора<sup>3</sup>.

**Мирофьянченко Андрей Евгеньевич**, инженер-технолог 2-й категории<sup>3</sup>.

**Мелехов Андрей Петрович**, научн. сотр.<sup>2,4</sup>.

**Новиков Игорь Кимович**, научн. сотр.<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Военная академия РВСН им. Петра Великого  
Россия, 109074, Москва, Китайгородский проезд, 9/5. E-mail: sredinvg@rambler.ru

<sup>2</sup>НИЯУ «МИФИ».

Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31.

<sup>3</sup>ОАО «НПО «Орион».

Россия, 111123, Москва, ш. Энтузиастов, 46/2.

E-mail: orion@orion-ir.ru

<sup>4</sup>НОЦ «Лазерная физика», МГТУ МИРЭА.

Россия, 119454, Москва, просп. Вернадского, 78

*Статья поступила в редакцию 20 ноября 2013 г.*

© Средин В.Г., Ананьин О.Б., Бурлаков И.Д., Мирофьянченко А.Е., Мелехов А.П., Новиков И.К., 2013

Одним из естественных источников МРИ является Солнце, и солнечное МРИ представляет собой постоянно действующий фактор в околоземном космосе. Кванты МРИ возникают также в процессах релаксации электронов при возбуждении внутренних оболочек атомов. Существующие в настоящее время лабораторные источники МРИ, включая источники синхротронного излучения, позволяют получать потоки с плотностью мощности до  $10^2$  Вт/см<sup>2</sup>, что может оказаться недостаточным для решения ряда технологических задач.

В настоящей работе приведены результаты исследования воздействия интенсивного импульсного МРИ, создаваемого лазерной плазмой, на поверхностные свойства эпитаксиальных слоев твердых растворов  $Cd_x Hg_{1-x} Te$  с составом  $x = 0,2$ .

### Эксперимент

В экспериментах в качестве источника МРИ использовалась излучение плазмы, генерируемое импульсным лазером с поверхности кристаллической мишени. Схема установки приведена на рис. 1

Излучение твердотельного лазера на алюминате иттрия с  $\lambda = 1,079$  мкм и энергией  $\leq 0,4$  Дж в импульсе при частоте следования до 3 Гц фокусировалось на поверхность мишени из Al, находящейся в условиях глубокого вакуума. Плотность потока лазерного излучения на ее поверхности составляло около  $4 \times 10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup>. При этих условиях достигалась электронная температура лазерной плазмы (ЛП) порядка 80 эВ, содержащей рентгеновскую компоненту.

Рентгеновское излучение является результатом всех возможных электронных переходов, сопровождающих процессы испускания и поглощения излучения: 1) свободно-свободные пере-

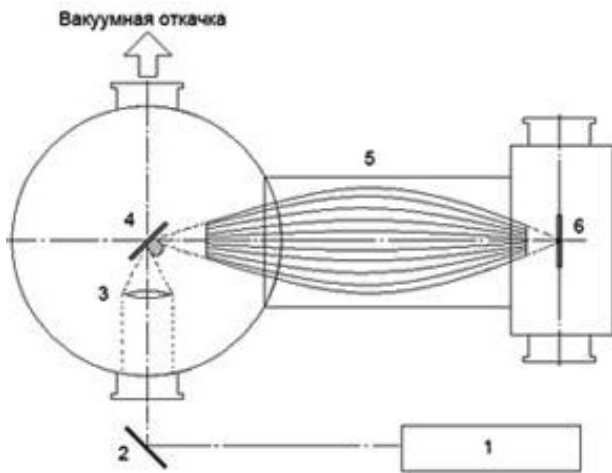


Рис. 1. Лазерно-плазменный источник импульсного мягкого рентгеновского излучения: 1 — импульсный лазер; 2 — поворотное зеркало; 3 — короткофокусная линза; 4 — лазерная мишень из Al; 5 — волноводный концентратор коротковолнового излучения; 6 — облучаемый образец.

ходы (тормозное излучение и поглощение света); 2) связанно-свободные переходы (излучательная рекомбинация и фотоионизация); 3) связанно-связанные (дискретные переходы). Свободно-свободные и связанно-свободные переходы приводят к образованию непрерывного спектра излучения, связанно-связанные переходы в атомах или ионах дают линейчатые спектры излучения. Лазерная плазма содержит также в горячей области многозарядные ионы, ядра и электроны [2, 3]. Высокая интенсивность МРИ на поверхности исследуемых эпитаксиальных слоев создавалась за счет использования волноводного концентратора, представляющего собой плотный пакет из нескольких тысяч тонких стеклянных капилляров, собранных в гексагональную сотовую структуру. Концентратор одновременно защищал слои от прямого воздействия разлетающихся высокоэнергичных частиц ЛП и фокусировал коротковолновое излучение в пятно диаметром около 2 мм в заднем фокусе сборки.

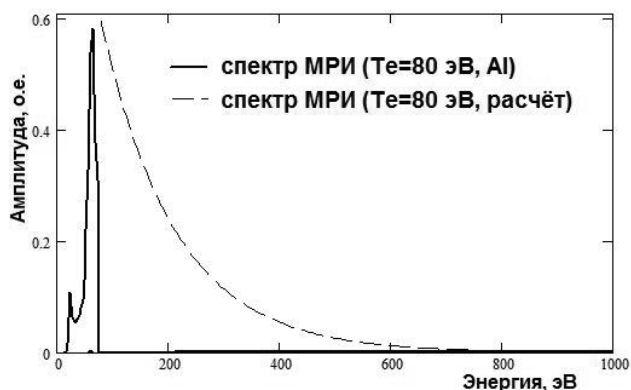


Рис. 2. Непрерывная кривая — импульс МРИ лазерной плазмы, зарегистрированный  $p-i-n$ -фотодиодом, штриховая кривая — расчетный спектр плазмы при  $T_e = 80$  эВ

Интегральный коэффициент конверсии энергии лазерного излучения в энергию МРИ на выходе концентратора зависит от материала мишени-источника и составляет величину порядка  $10^{-4}$ . В эксперименте достигались следующие параметры МРИ: длительность импульсов  $\tau \sim 15$  нс; частота следования 3 Гц; плотность потока  $\sim 80$  кВт/см<sup>2</sup>; спектральный диапазон 10–1500 эВ (свыше 80% энергии приходится на область 50–250 эВ); энергия в импульсе коротковолнового излучения  $\leq 2$  мкДж.

Спектральный состав излучения в диапазоне мягкого рентгена, зарегистрированный с помощью  $p-i-n$ -фотодиода с поверхностным фильтром из тонкого слоя Al для отсечки оптического излучения, представлен на рис. 2 в относительных единицах. Штриховой линией на рисунке представлен расчетный сплошной спектр МРИ при электронной температуре плазмы 80 эВ.

Известно, что МРИ поглощается в тонком приповерхностном слое толщиной 100–1000 нм. Основную роль в процессах взаимодействия интенсивного МРИ с кристаллами играют эффекты возбуждения электронов оболочек атомного остова, что может приводить к появлению атомов, имеющих энергию, значительно превышающую среднюю тепловую энергию ионов кристаллической решетки и, как следствие, повышенную подвижность в промежутки времени, сопоставимые с длительностью рентгеновского импульса. Кроме того, за счет интенсивного внешнего фотоэффекта в приповерхностной области следует ожидать возникновения существенного электрического поля, которое также может приводить к изменению структуры поверхности [2, 4, 5].

В эксперименте исследовались 3 идентичных образца эпитаксиальных слоев  $Cd_{0.2}Hg_{0.8}Te$ , полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии. В настоящей работе фактор кристаллографической ориентации поверхности не учитывался, хотя известно, что для твердого раствора  $Cd_xHg_{1-x}Te$  характерна некоторая анизотропия поверхностных свойств [6, 7]. Диаметр пятна МРИ на поверхности слоев увеличивали за счет расфокусировки до 5 мм. Время облучения образцов составляло 25, 60 и 80 минут (образцы № 1, 2 и 3 в таблице), оцениваемые дозы облучения МРИ в этих условиях составляют 0,8, 1,4 и 1,9 Дж/см<sup>2</sup>, соответственно. Влияние указанного воздействия на поверхность образцов исследовались методом атомной силовой микроскопии (АСМ). Результаты исследований представлены на рис. 3 и в таблице.

Из набора статистических параметров, характеризующих морфологию поверхности, получае-

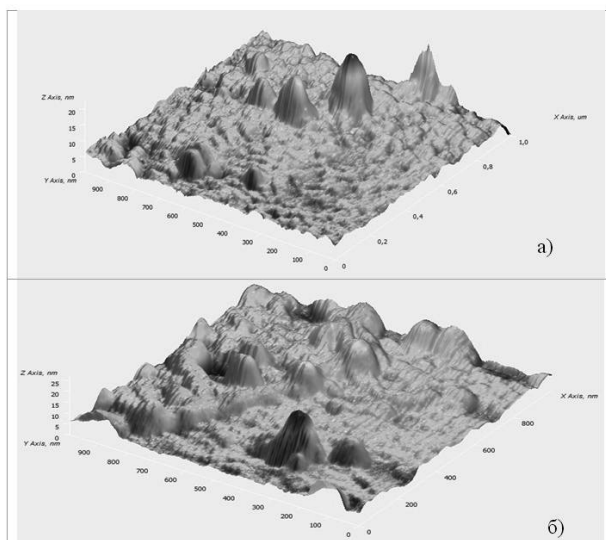


Рис. 3. АСМ-изображения поверхности эпитаксиальных слоев  $Cd_{0.2}Hg_{0.8}Te$  после обработки МРИ в течение а) 25 минут и б) 80 минут

мых с помощью АСМ, наиболее информативными являются средний перепад микровыступов по высоте и среднее или среднеквадратичное отклонение от него, т.е. шероховатость и среднеквадратичная шероховатость поверхности [8]. Как видно из рис. 3 и таблицы, увеличение дозы облучения приводит к росту перепада высот микровыступов и шероховатости в целом. При этом возникающая структура не обладает признаками дополнительной периодичности. Отметим также, что рост шероховатости при облучении МРИ в нашем случае не связан с нагревом поверхности, т.к. генерируемая в импульсе энергия коротковолнового излучения, как отмечалось выше, не превышает 2 мкДж.

Таблица

Параметры шероховатости поверхности эпитаксиальных слоев  $Cd_{0.2}Hg_{0.8}Te$

Параметр	№ 1	№ 2	№ 3
Максимальная высота профиля, нм	209,8	326,3	1200
Среднее значение высоты профиля, нм	11,8	13,1	139
Среднее арифметическое отклонение профиля, $S_a$ , нм	4,1	6,1	54,2
Высота неровностей профиля по 10 точкам, $S_{10z}$ , нм	165,5	259,7	1165

Предварительные исследования гальваномагнитных свойств эпитаксиальных слоев

$Cd_{0.2}Hg_{0.8}Te$  [6] показали, что объемные концентрации и подвижность носителей заряда в них не изменяются в результате воздействия МРИ в пределах погрешности измерений в условиях наших экспериментов.

### Заключение

Приведенные результаты показали, что облучение эпитаксиальных слоев интенсивным мягким рентгеновским излучением приводит к изменению морфологии поверхности без изменения объемных свойств материала. Увеличение дозы облучения приводит к росту перепада высот микровыступов и шероховатости в целом. При этом возникающая структура не обладает признаками дополнительной периодичности, что делает такой способ воздействия потенциально пригодным для создания на его основе нового метода травления в технологиях изготовления твердотельных матричных фотоприемных устройств нового поколения.

Статья подготовлена в рамках работ по Гранту Президента Российской Федерации НШ-3851.2012.10 для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации.

### Литература

1. Бурлаков И.Д., Пономаренко В.П., Филачев А.М., Дегтярев Е.В. // Прикладная физика. 2007. № 2. С. 43
2. Ананьин О.Б., Афанасьев Ю.В., Быковский Ю.А., Крохин О.Н. Лазерная плазма.— М.: Изд-во. МИФИ. 2003
3. Jevtic M. M., Scepanovic M. J. //Appl. Phys. 1991. V. A53. P. 332.
4. Беграмбеков Л.Б. Процессы в твердом теле под действием ионного и плазменного облучения.— М: Изд. МИФИ, 2008
5. Суханов Я. А., Сахаров М. В., Дяченко И. В. и др. Взаимодействие лазерного излучения с материалами оптико-электронной техники.— Сергиев-Посад: ЦФТИ МО РФ, 2004.
6. Средин В.Г., Ананьин О.Б., Бурлаков И.Д. и др. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2013. Т. 9/2. С. 113
6. Средин В.Г., Мезин Ю.С., Укроженко В.М. // Физика и техника полупроводников. 2001. Т.35. № 11. С. 1335
7. Chu J., Sher A. Physics and Properties of Narrow Gap Semiconductors.— Springer. 2008.
8. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии.— Нижний Новгород: РАН, Институт физики микроструктур, 2004

## Influence of soft X-ray on the surface properties of $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ solid solutions

*V.G. Sredin<sup>1,4</sup>, O.B. Anan'in<sup>2,4</sup>, I.D. Burlakov<sup>3</sup>,  
A.E. Mirofyanchenko<sup>3</sup>, A.P. Melekhov<sup>2,4</sup>, and I.K. Novikov<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Military Academy of the RVSN  
9/5 Kitayigorodsky passage, Moscow, Russia  
E-mail: sredinvg@rambler.ru

<sup>2</sup>MEPhI National Research Nuclear University  
31 Kashirskoe highway, Moscow, 115409, Russia

<sup>3</sup>Orion R&P Association  
46/2 Enthusiasts highway, Moscow, 111123, Russia  
E-mail: orion@orion-ir.ru

<sup>4</sup>Laser Physics Research Center of the MIREA  
78 Vernadsky av., Moscow, 119454, Russia

***The AFM research of a X-ray soft impact on the  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  surface morphology has been shown.  
The radiation dose increase results to root-mean-square roughness rise.***

PACS: 85.60.—q

*Keywords:* AFM, plasma, X-ray, surface morphology,  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ .

Bibliography — 8 references

*Received November 20, 2013*