

УДК 535.531

PACS: 85.60.-q

Поверхностные дефекты в эпитаксиальных слоях твердых растворов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, создаваемые мягким рентгеновским излучением

В. Г. Средин, А. В. Войцеховский, О. Б. Ананьин, А. П. Мелехов, С. Н. Несмелов,
С. М. Дзядух, В. А. Юрчак

Показана возможность селективного поверхностного дефектообразования при облучении мягким рентгеновским излучением эпитаксиальных слоев $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ за счет избирательного воздействия излучения на отдельные атомы поверхности.

Ключевые слова: твердый раствор $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, рентгеновское излучение, кристаллические дефекты, поверхностный окисел, лазерная плазма.

Введение

Мягкое рентгеновское излучение (МРИ) принадлежит диапазону длин волн 0,15–30 нм (энергия кванта в диапазоне 0,04–10 кэВ). В полупроводниковых материалах данному интервалу энергий соответствуют субвалентные состояния кристаллов и уровни энергии внутренних оболочек их ионного остова. Поглощение МРИ происходит в тонком приповерхностном слое и носит преимущественно фотоионизационный характер, в связи с чем вопрос о дефектообразовании с его участием в полупроводниковых материалах обычно не рассматривается. Тем не менее, ранее было показано, что облучение МРИ с энергией кванта в области 50÷250 эВ монокристаллов и эпитаксиальных слоев твердых растворов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с со-

ставом $x \approx 0,2$ приводит к изменению морфологии поверхности [1, 2] и ряда поверхностных их характеристик [3].

Целью данной работы являлось исследование влияния МРИ с большими (чем в [1–3]) значениями энергии квантов на поверхностные свойства эпитаксиальных слоев этих твердых растворов и на природу радиационного дефектообразования в них.

Экспериментальные результаты

Облучению подвергались слои $\text{Hg}_{0,81}\text{Cd}_{0,19}\text{Te}$, полученные методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке GaAs (310). Состав активной области структуры – $x = 0,194$, суммарная ее толщина составляла около 7 мкм, состав варизонного защитного слоя на поверхности – $x_v = 0,45$, его толщина – $d_v = 0,3$ мкм. Структуры подвергались облучению при комнатной температуре. Активная область структуры имела электронный тип проводимости с концентрацией носителей $2,72 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ при 77 К.

В [1, 2] в качестве источника МРИ использовалось тормозное излучение плазмы, генерируемое лазерным импульсом от поверхности Al-мишени с энергией кванта в интервале 50÷250 эВ. Измерения гальваномагнитных свойств облученного материала показали, что объемные концентрация и подвижность носителей заряда в них в пределах погрешности измерений не изменялось [3]. Для расширения диапазона спектра в область квантов с большим значением энергии в настоящей работе использовалось МРИ, создаваемое при генерации плазмы лазерно-индуцированной вакуумной искры, содержащей кванты с энергией в диапазоне 0,5÷8 кэВ [4]. Излучение генерировалось импульсом YAG:Nd-лазера, работавшим в

Средин Виктор Геннадьевич¹, профессор, зав. кафедрой, д.ф.-м.н.

Войцеховский Александр Васильевич², профессор, зав. кафедрой, д.ф.-м.н.

Ананьин Олег Борисович³, профессор, к.ф.-м.н.

Мелехов Андрей Петрович³, научный сотрудник, к.ф.-м.н.

Несмелов Сергей Николаевич², старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.

Дзядух Станислав Михайлович², старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.

Юрчак Валерий Аркадьевич³, доцент, к.ф.-м.н.

¹ Военная академия РВСН им. Петра Великого. Россия, 143900, МО, Балашиха, ул. Карбышева, 8. E-mail: sredinvg@ Rambler.ru

² Национальный исследовательский Томский государственный университет.

Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

³ НИЯУ «МИФИ».

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

Статья поступила в редакцию 10 октября 2017 г.

© Средин В. Г., Войцеховский А. В., Ананьин О. Б., Мелехов А. П., Несмелов С. Н., Дзядух С. М., Юрчак В. А., 2017

режиме модулированной добротности (длина волны $\lambda = 1,06$ мкм, длительность импульса $\tau \leq 15$ нс, плотность мощности лазерного излучения на мишени $P \sim 10^{10}$ Вт/см²), которое фокусировалось на материал катода электрического разрядника. Электроды размещались в вакуумной камере и с помощью малоиндуктивного вакуумного токового ввода были подключены к батарее конденсаторов с запасаемой энергией 0,5 Дж. Импульсы разряда батареи и лазера были синхронизированы.

Спектр генерируемого излучения содержит две составляющие: тормозное излучение плазмы и характеристическое излучение, возникающее при рекомбинации возбужденных ионов катода, и простирается до 8 кэВ (см. рис. 1). Для отсечки низкоэнергетического МРИ нами использовался специальный фильтр, спектр пропускания которого представлен на рис. 1. Рассчитанные дозы облучения исследуемых образцов составляли до 9 мДж см⁻², что сопоставимо с данными [1, 2], при этом длительность рентгеновского импульса $\Delta t \sim 100$ нс.

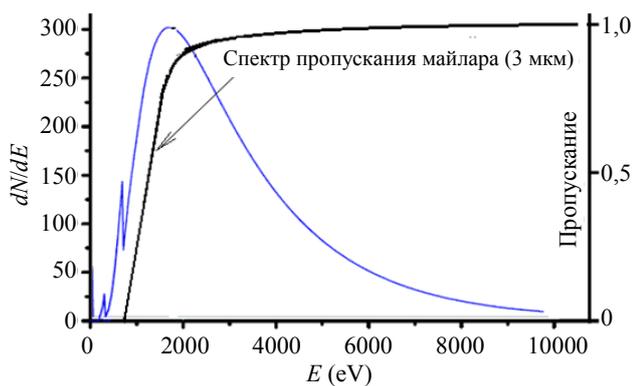


Рис. 1. Спектральное распределение МРИ лазерно-индуцированной разрядной плазмы и спектр пропускания майларового фильтра.

Исследования вольт-фарадных характеристик облученных образцов проводились на автоматизированной установке спектроскопии адмиттанса наногетероструктур на базе криостата Janis и измерителя иммитанса Agilent E4980A (температурный диапазон 8–475 К, разрешение по емкости и нормированной на частоту проводимости до 1 фФ в диапазоне частот 20 Гц – 2 МГц) по методике [5]. Установка позволяла проводить измерения емкости и проводимости МДП-структур в зависимости от напряжения смещения, частоты тестового сигнала и температуры. Для создания МДП-структур на облученные образцы наращивался диэлектрический слой Al_2O_3 толщиной около 70 нм поверх варизонного слоя.

Измерения показали, что в исследуемых образцах происходит изменение электрофизических характеристик МДП-структур, что проявляется, в частности, в увеличении концентрации электронов от $2,72 \times 10^{15}$ см⁻³ до $5,74 \times 10^{15}$ см⁻³ при 77 К, а также к уменьшению произведения дифференциального сопротивления области пространственного заряда МДП-структур в сильной инверсии на площадь электрода от $13,64$ Ом×см² до $2,16$ Ом×см². Воздействие МРИ на $n-Hg_{0,81}Cd_{0,19}Te$ приводит также к существенному изменению характера гистерезиса, накоплению положительного заряда в диэлектрике и отрицательному значению напряжения плоских зон.

Обсуждение результатов

Глубина проникновения МРИ в материал составляет 100–1500 нм. Основную роль во взаимодействии с МРИ играют эффекты возбуждения электронов оболочек атомного остова, которые приводят к интенсивному внешнему фотоэффекту и созданию сильного электрического поля в приповерхностной области [6]. При этом энергии освобождающихся электронов не достаточно для ударного смещения ионов решетки и непосредственного образования радиационных дефектов: энергия фотоэлектронов в нашем эксперименте не может превышать 8 кэВ, в то время как для этих целей их энергия должна быть не менее 200 кэВ [7]. Мы полагаем, что образование точечных дефектов в наших экспериментах является следствием релаксации электронных возбуждений, механизмы которой рассмотрены в [8, 9]. Известно, что генерация неравновесных носителей заряда в полупроводниках может стимулировать миграцию дефектов и примесей и структурные изменения, в том числе генерацию точечных и более сложных дефектов.

При поглощении рентгеновского кванта возбуждается электрон из внутренней оболочки иона, вследствие Оже-процессов электронная вакансия заполняется и возникает многозарядный ион. Торможение фотоэлектронов приводит к дополнительной ионизации атомов. В результате формируется группа многозарядных ионов одинакового знака, в которой в результате кулоновского отталкивания может произойти выход иона из узла решетки в междоузлие, т. е. рождение точечного дефекта. Вероятность процесса возрастает при наличии в кристалле примеси [8, 9]. Подобные явления были ранее обнаружены, например, при облучении рентгеновским излучением в InSb и CdS [10].

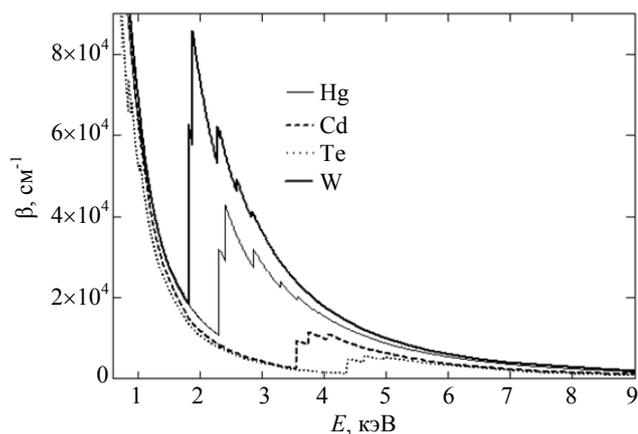


Рис. 2. Спектральные коэффициенты поглощения β элементов Hg, Cd, Te и W [11].

В диапазон энергии квантов, генерируемых в условиях нашего эксперимента, попадают внутренние уровни энергии ионов остова [11]: M_I-M_V иона Hg^{2+} (3,56–2,29 кэВ), L_I-L_{III} иона Te^{2-} (4,2–4,8 кэВ) и Cd^{2+} (3,5–4,2 кэВ) (рис. 2). Как следует из этого рисунка, интенсивность поглощения МРИ ионами ртути на порядок выше, чем ионами кадмия и теллура. Благодаря этому в условиях нашего эксперимента создаются условия для практически избирательного воздействия на определенный сорт ионов многокомпонентного кристаллического материала, в нашем случае – на ион ртути и, как следствие, либо генерации дополнительных его дефектов, либо изменению зарядового состояния межузельной ртути. В этом состоит принципиальное отличие настоящего эксперимента от [1, 2], когда излучение поглощалось всеми ионами, образующими твердый раствор. Таким образом, процесс дефектообразования в рассматриваемых условиях может включать в себя как генерацию новых точечных дефектов, так и модификацию их существующего фона.

Влияние дефектов ртути на объемные свойства твердого раствора $Cd_xHg_{1-x}Te$ достаточно хорошо изучено в [12]. В условиях нашего эксперимента появление дефектов предполагается в тонком приповерхностном слое. Предварительные исследования, выполненные ранее на эпитаксиальных слоях $p-Cd_xHg_{1-x}Te$ с составом $x \approx 0,23$ [13], показали, что в материале после облучения МРИ возрастает поверхностная концентрация дырок примерно на 10 %, что согласуется с гипотезой о том, что облучение приводит к селективной генерации вакансий ионов ртути. Как было отмечено выше, в настоящем эксперименте облучение МРИ $n-Hg_{0,81}Cd_{0,19}Te$ приводит к росту концентрации свободных электронов от $2,72 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ до $5,74 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ при 77 К.

Полученные результаты могут быть связаны с генерацией вакансий ртути с переводом ионов ртути в междоузлие. В эпитаксиальных слоях с дырочной проводимостью увеличение концентрации дырок может рассматриваться как прямое следствие роста числа вакансий ртути, сопровождаемое нейтрализацией межузельной ртути за счет образования ею комплексов с атомами неконтролируемой примеси, т.к. вакансия ртути является дефектом акцепторного типа для $Cd_xHg_{1-x}Te$. В слоях $n-Hg_{0,81}Cd_{0,19}Te$ первоначальная концентрация носителей определяется неконтролируемой примесью и дефектами структуры, включая комплексы дефектов и сверхстехиометрическую межузельную ртуть. Т.к. в условиях нашего эксперимента МРИ поглощается селективно ионами ртути, находящимися как в узлах решетки, так и в междоузлиях, и сопровождается изменением их зарядового состояния, то следствием этих процессов может быть нейтрализация вакансий ртути и образование комплексов дефектов на основе межузельной ртути донорного типа. Для построения более точной модели процессов дефектообразования в настоящее время неизвестны некоторые параметры, такие как, например, время жизни дополнительно ионизированного атома в возбужденном состоянии, типы примесных комплексов, образуемых межузельными атомами и их стабильность. Однако полученные экспериментальные результаты подтверждают предположение о процессе селективного дефектообразования в приповерхностной области эпитаксиальных слоев твердого раствора $Cd_xHg_{1-x}Te$, вызванных облучением мягким рентгеновским излучением специально выбранного спектрального состава.

Как известно, кристаллы со структурой сфалерита обладают свойством полярности, вследствие чего некоторые свойства их поверхности зависят от ее кристаллографической ориентации. В [14, 15] показано, что эффекты, обусловленные полярностью, наблюдаются и в твердых растворах $Cd_xHg_{1-x}Te$. Поэтому можно предположить, что интенсивность поверхностного дефектообразования в них под действием МРИ будет зависеть от ориентации поверхности эпитаксиальных слоев и монокристаллов.

Заключение

Показано, что действие МРИ на твердые растворы $Cd_xHg_{1-x}Te$ носит поверхностный характер, причем путем подбора спектрального состава излучения может быть достигнуто селективное воздействие на атомы отдельных элементов, входящих в состав облучаемого материала, и генерации дефектов, предположительно, в результате релаксации возбуждения электронной системы.

Указанный эффект приводит к изменению свойств примесно-дефектной системы приповерхностного слоя полупроводника и границы раздела диэлектрик-полупроводник.

ЛИТЕРАТУРА

1. Средин В. Г., Ананьин О. Б., Бурлаков И. Д., Богданов Г. С., Иваницкая Е. А., Лаврухин Д. В., Мелехов А. П. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2013. № 9/2. С. 113.
2. Средин В. Г., Ананьин О. Б., Бурлаков И. Д., Мирофьянченко А. Е., Мелехов А. П., Новиков И. К. // Прикладная физика. 2013. № 6. С. 17.
3. Средин В. Г., Войцеховский А. В., Ананьин О. Б., Мелехов А. П., Несмелов С. Н., Дзядух С. М. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2015. Т. 58. № 8/3. С. 273.
4. Додулад Э. И. Влияние конфигурации электродов на эмиссионные свойства разряда типа НВИ: Автореферат дис. канд. физ.-мат. наук. М., 2013.
5. Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Дзядух С. М. // Известия вузов. Физика. 2009. № 10. С. 3.
6. Ананьин О. Б., Афанасьев Ю. В., Быковский Ю. А., Крохин О. Н. Лазерная плазма. — М.: Изд-во. МИФИ. 2003.
7. Лисицин В. М. Радиационная физика твердого тела. — Томск: изд. ТПУ. 2008.
8. Клинггер Ж. И., Пуцин Ч. В., Машовец Т. В., Холодарь Г. А., Шейнкман М. К., Эланго М. А. // УФН. 1985. Т. 147. № 3. С. 523.
9. Вавилов В. С. // УФН. 1997. Т. 167. № 4. С. 407.
10. Мирончук Г. Л., Давидюк Г. Е., Божко В. В., Кажукаускас В. // Физика и техника полупроводников. 2010. Т. 44. № 5. С. 694.
11. <http://physics.nist.gov/PhysRefData/form.html>.
12. Chu J., Sher A. Physics and Properties of Narrow Gap Semiconductors. — Springer, 2008.
13. Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Дзядух С. М., Средин В. Г., Ананьин О. Б., Мелехов А. П., Сидоров Г. Ю. // Известия вузов. Физика. 2016. Т. 59. № 9/2. С. 198.
14. Средин В. Г., Мезин Ю. С., Укроженко В. М. // Физика и техника полупроводников. 2001. Т. 35. № 11. С. 1335.
15. Средин В. Г., Ланская О. Г., Поповнин В. М. // Физика и техника полупроводников. 1996. Т. 30. № 3. С. 385.

PACS: 85.60.-q

Surface defects in epitaxial layers of the $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ solid solutions created by soft X-ray radiation

V. G. Sredin¹, A. V. Voitsekhovskii², O. B. Anan'in³, A. P. Melekhov³, S. N. Nesmelov², S. M. Dzyadukh², and V. A. Yurchak³

¹ Peter the Great Military Academy of Strategic Rocket Force
8 Karbysheva str., Balashikha, Moscow Region, 143900, Russia
E-mail: sredinvg@rambler.ru

² The National Research Tomsk State University
36 Lenin av., Tomsk, 634050, Russia

³ National Research University «Moscow Institute of Engineering Physics»
31 Kashirskoe shosse, Moscow, 115409, Russia

Received October 2, 2017

Consideration is given to the possibility of selective surface defect formation in epitaxial layers $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ by irradiation of soft X-ray emission due to selective effects of radiation on individual atoms of the surface.

Keywords: solid solution $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, x-ray radiation, crystal defects, surface oxide.

REFERENCES

1. V. G. Sredin, O. B. Anan'in, I. D. Burlakov, G. S. Bogdanov, E. A. Ivanitskaya, D. V. Lavrukhin, and A. P. Melekhov, Rus. Journ Physics, No. 9/2, 113 (2013).
2. V. G. Sredin, O. B. Anan'in, I. D. Burlakov, A. E. Mirofyanichikov, A. P. Melekhov, and I. K. Novikov, Prikl. Fiz., No. 6, 17 (2013).

3. V. G. Sredin, A. V. Voitsekhovskii, O. B. Anan'in, A. P. Melekhov, S. N. Nesmelov, and S. M. Dzyadukh, *Rus. Journ Physics* **58** (8/3), 273 (2015).
4. E. I. Dodulad, Candidate Dissertation (Moscow, 2013).
5. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, and S. M. Dzyadukh, *Rus. Journ Physics*, No. 10, 3 (2009).
6. O. B. Anan'in, Yu. V. Afanas'ev, Yu. A. Bykovskii, and O. N. Krokhin, *Laser Plasma* (Moscow, MEPhI, 2003) [in Russian].
7. V. M. Lisitsyn, *Radiative Physics of Solid State* (TPU, Tomsk, 2008) [in Russian].
8. Zh. I. Klinger, Ch. V. Pushchin, T. V. Mashovets, et al., *Sov. Phys. Usp.* **147**, 523 (1985).
9. V. S. Vavilov, *Phys. Usp.* **167**, 407 (1997).
10. G. L. Mironchuk, G. E. Davidyuk, V. V. Bozhko, et al., *Semiconductors* **44**, 694 (2010).
11. <http://physics.nist.gov/PhysRefData/form.html>.
12. J. Chu and A. Sher, *Physics and Properties of Narrow Gap Semiconductors* (Springer, 2008).
13. A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, S. M. Dzyadukh, V. G. Sredin, O. B. Anan'in, A. P. Melekhov, and G. Yu. Sidorov, *Rus. Journ Physics* **59** (9/2), 198 (2016).
14. V. G. Sredin, Yu. S. Mezin, and V. M. Ukrozhenko, *Semiconductors* **35**, 1335 (2001).
15. V. G. Sredin, O. G. Lanskaya, and V. M. Popovnin, *Semiconductors* **30**, 385 (1996).