ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
Т. 60, № 12 ФИЗИКА 2017

УДК 621.315.592

В.Г. СРЕДИН[1], А.В. ВОЙЦЕХОВСКИЙ[2], О.Б. АНАНЬИН[3], И.И. ИЖНИН[2], А.П. МЕЛЕХОВ[3], С.Н. НЕСМЕЛОВ[2], С.М. ДЗЯДУХ[2]

ГЕНЕРАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЯХ $Cd_xHg_{1-x}Te$ МЯГКИМ РЕНТГЕНОВСКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ*

Показана возможность селективного воздействия на атомы отдельного элемента на поверхности кристалла, построенного из атомов нескольких химических элементов, с помощью мягкого рентгеновского излучения.

Ключевые слова: *твердый раствор $Cd_xHg_{1-x}Te$, рентгеновское излучение, кристаллические дефекты.*

Ранее было показано, что мягкое рентгеновское излучение (МРИ) лазерной плазмы приводит к модификации состояния поверхности [1, 2] и изменению плотности поверхностных состояний [3] монокристаллов и эпитаксиальных слоев твердых растворов $Cd_xHg_{1-x}Te$. В настоящей работе продолжены эти исследования. Исследовались слои, полученные методом молекулярно-лучевой эпитаксии, с широкозонными защитными слоями, выращенными на подложке GaAs (310). Состав активной области структуры – x = 0.194, суммарная ее толщина составляла около 7 мкм, состав варизонного слоя на поверхности – $x_в$ = 0.45, его толщина – $d_в$ = 0.3 мкм. Структуры подвергались облучению МРИ, которое генерировалось по методике, описанной в [3].

Спектр генерируемого МРИ состоит из тормозного излучения плазмы и рекомбинационного характеристического излучения возбужденных ионов материала катода. Для отсечки низкоэнергетического РИ, корпускулярных потоков и ультрафиолетового излучения применялся майларовый фильтр с напылённым слоем меди толщиной h = (3.0 ±0.6)мкм, который размещался на расстоянии l = 30 мм от кристалла. Спектр пропускания фильтра представлен на рис. 1, *а*. Рассчитанные дозы облучения исследуемых образцов составляли до 1.5 Дж·см$^{-2}$, что сопоставимо с [1–3], длительность рентгеновского импульса – $\Delta t \sim 100$ нс.

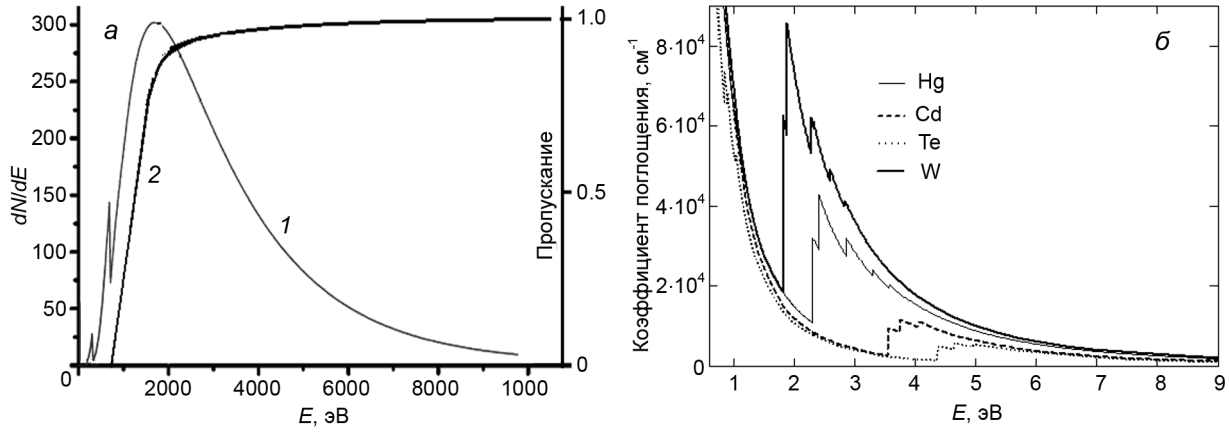

Рис. 1. Спектральные: *а* – распределение РИ лазерно-индуцированной разрядной плазмы (кр. *1*) и спектр пропускания майларового фильтра (кр. *2*); *б* – коэффициенты поглощения элементов Hg, Cd, Te и W

Анализ структуры уровней энергии атомного остова элементов, образующих твердый раствор – Cd, Hg, Te, показывает, что диапазону 1–7 кэВ принадлежат следующие уровни иона ртути: M_I (3.56 кэВ), M_{II} (3.28 кэВ), M_{III} (2.85 кэВ), M_{IV} (2.38 кэВ) и M_V (2.29 кэВ) [4], к возбуждению электронов с которых приводит поглощение квантов рентгеновского излучения. Уровни энергии ионов

* Исследование сотрудников НИ ТГУ выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Томской области, проект р_а № 16-42-700759.

Cd и Te остова в рассматриваемом диапазоне в условиях данного эксперимента, напротив, не дают заметного вклада в процессы поглощения. Во-первых, интенсивность используемого рентгеновского источника в интервале 3.5–4.5 кэВ, где находятся уровни L_{I}, L_{II} и L_{III} кадмия, примерно в 3 раза ниже, чем в диапазоне 2–3 кэВ. Во-вторых, значение коэффициента поглощения для переходов с уровней атомов Cd и Te также существенно ниже, чем у атомов Hg (рис. 1, *б*). Таким образом, в условиях эксперимента реализована ситуация, когда осуществляется практически избирательное воздействие на отдельный сорт ионов поверхности материала, в нашем случае – это ион ртути. Именно в этом заключается основное отличие настоящего эксперимента от [1, 2], когда в спектральном диапазоне 50–250 эВ МРИ возбуждало ионы всех элементов, образующих исследуемый твердый раствор.

МРИ поглощается в приповерхностном слое вещества толщиной 100–1000 нм. Основную роль во взаимодействии с МРИ играют эффекты возбуждения электронов оболочек атомного остова, которые приводят к интенсивному внешнему фотоэффекту и создают электрическое поле в приповерхностной области [5]. В результате отдельные ионы кристалла могут приобретать энергию, значительно превышающую тепловую, вплоть до значений, достаточных для смещения их из узлов кристаллической решетки. При этом следует иметь в виду, что кванты РИ одинаковым образом взаимодействуют с электронами атомного остова как ионов, находящихся в узлах кристаллической решетки, так и атомов, находящихся в междоузлиях.

Дополнительным фактором, способствующим селективному действию МРИ на элементы, образующие исследуемый твердый раствор, является относительная слабость химической связи Hg–Te, энергия которой примерно в 3 раза меньше, чем энергия связи Cd–Te.

С целью проверки гипотезы о генерации вакансий ртути в исследуемых структурах были проведены исследования их вольт-фарадных характеристик (ВФХ) и полевых зависимостей коэффициента Холла $R_{\text{H}}(B)$ и удельного сопротивления $\rho(B)$ в магнитных полях 0.01–1.2 Тл при 77 К в конфигурации Ван-дер-Пау. Экспериментальные зависимости коэффициента Холла $R_{\text{H}}(B)$ и аппроксимирующие теоретические кривые, рассчитанные в рамках модели двухзонной проводимости с полученными в результате подгонки параметрами 2-х типов носителей заряда исследованных образцов, представлены на рис. 2. Как видно из рисунка, наблюдается систематическое, но очень слабое различие между характеристиками облученного и необлученного образцов. В первую очередь это касается параметров зонных электронов: концентрация $1.42\cdot10^{14}$ и $1.45\cdot10^{14}$ см^{-3}; подвижность 245780 и 243450 $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Наблюдаемая разница (порядка 3 %) может быть отнесена к характерным погрешностям метода.

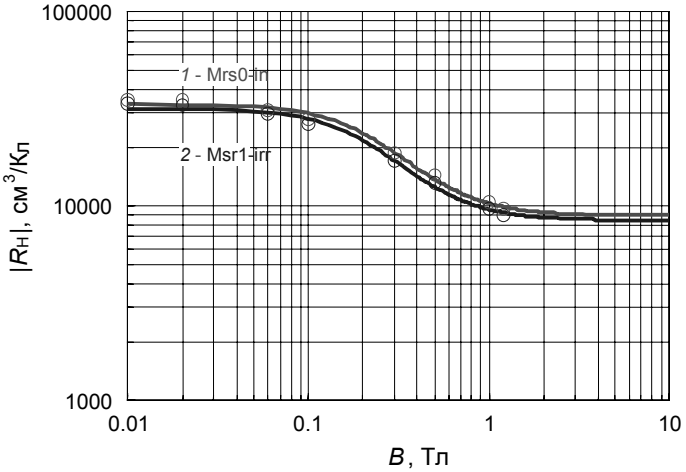

Рис. 2. Полевые зависимости коэффициента Холла при 77 К исходного (кр. *1*) и облученного (кр. *2*) образцов ($R_{\text{H}}(B) < 0$). Точки – экспериментальные значения, линии – теоретические зависимости, рассчитанные в рамках двухзонной модели проводимости

Таким образом, как и следовало ожидать, МРИ, поглощаясь в приповерхностном слое порядка 1 мкм, не оказывает существенного влияния на объемные свойства облучаемого материала. В этой связи были проведены также исследования ВФХ МДП-структур, полученных из эпитаксиальных слоев путем наращивания на них слоя диэлектрика, в диапазоне 10–77 К. Отметим, что

ранее аналогичные исследования были проведены на эпитаксиальных слоях твердого раствора близкого по значению состава *n*-$Hg_{0.765}Cd_{0.235}Te$ [3].

Измерения 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). Установка позволяла проводить измерения емкости и проводимости МДП-структур в зависимости от напряжения смещения, частоты тестового сигнала и температуры. При обработке результатов измерений предпринимались меры для исключения влияния сопротивления объема эпитаксиального слоя [6] по методике, предложенной в [7].

Воздействие МРИ на *n*-$Hg_{0.81}Cd_{0.19}Te$ с варизонным слоем приводит к изменениям электрофизических характеристик МДП-структур, сформированных на основе облученного полупроводника, что проявляется в увеличении концентрации электронов от $2.72\cdot10^{15}$ до $5.74\cdot10^{15}$ $см^{-3}$, а также к уменьшению произведения дифференциального сопротивления области пространственного заряда МДП-структур в сильной инверсии на площадь электрода от 13.64 до 2.16 $Ом\cdot см^2$, что хорошо согласуется с предшествующими результатами исследований МДП-структур [3]. Отметим, что данные результаты не противоречат гипотезе о генерации вакансий ртути в результате воздействия МРИ [8–10].

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. Полученные результаты частично согласуются с результатами исследований МДП-структур на основе *n*-$Hg_{0.765}Cd_{0.235}Te$. Воздействие МРИ на *n*-$Hg_{0.765}Cd_{0.235}Te$ с варизонным слоем также приводило к изменениям особенностей гистерезиса ВФХ МДП-структур [3].

Таким образом, показано, что действие МРИ на полупроводниковые материалы носит избирательно поверхностный характер, а при подборе спектрального состава излучения может приводить к селективному воздействию на атомы отдельных элементов, входящих в состав облучаемого материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Средин В.Г., Ананьин О.Б., Бурлаков И.Д. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. – № 9/2. – С. 113–115.
2. Средин В.Г., Ананьин О.Б., Бурлаков И.Д. и др. // Прикладная физика. – 2013. – № 6. – С. 17–20.
3. Средин В.Г., Войцеховский А.В., Ананьин О.Б. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2015. – Т. 58. – № 8/3. – С. 273–275.
4. (http://henke.lbl.gov/optical_constants/filter2.html)
5. Ананьин О.Б., Афанасьев Ю.В., Быковский Ю.А., Крохин О.Н. Лазерная плазма. – М.: Изд-во МИФИ, 2003. – 400 с.
6. Войцеховский А.В., Несмелов С.Н., Дзядух С.М. // Изв. вузов. Физика. – 2005. – Т. 48. – № 6. – С. 31–37.
7. Войцеховский А.В., Несмелов С.Н., Дзядух С.М. // Изв. вузов. Физика. – 2009. – Т. 52. – № 10. – С. 3–18.
8. Lilenko Y.V., Shastov K.V., Petrov A.S., et al. // Phys. Status Solidi A: Apll. Res. – 1989. – V. 113. – No. 2. – P. 285–294.
9. Brydnyi V.N., Voitsekhovskii A.V., Grechukh Z.C., et al. // Sov. Phys. Semicond. – 1977. – V. 11. – No. 8. – P. 905–907.
10. Voitsekhovskii A.V., Kokhanenko A.P., Shulga S.A., and Smith R. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. – 2004. – V. 215. – P. 109–121.

[1] Военная Академия РВСН им. Петра Великого, г. Балашиха, Россия
[2] Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия
[3] Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия

Поступила в редакцию 20.04.17.

Средин Виктор Геннадиевич, д.ф.-м.н., профессор, e-mail: sredinvg@rambler.ru;
Войцеховский Александр Васильевич, д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой, e-mail: vav43@mail.tsu.ru;
Ананьин Олег Борисович, д.ф.-м.н., профессор, e-mail: OBAnanin@Mephi.ru;
Ижнин Игорь Иванович, д.ф.-м.н., профессор, e-mail: i.izhnin@carat.electron.ua;
Мелехов Андрей Петрович, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр., Makalu2008@yandex.ru;
Несмелов Сергей Николаевич, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр., e-mail: nesm69@mail.ru;
Дзядух Станислав Михайлович, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр., e-mail: bonespirit@mail2000.ru.