

УДК 621.383.4/5
ББК 32.86
Т 78

Т78 Труды XXV Международной научно-технической конференции и школы по фотоэлектронике и приборам ночного видения в 2-х томах. Том 2. – М.: АО «НПО «Орион», 2018 г. – М.: Издательство «ОФСЕТ МОСКВА», 2018. – 611 с.

ISBN 978-5-00122-365-8 (Общ.)
ISBN 978-5-00122-367-2 (Т.2)

Государственный научный центр Российской Федерации АО «НПО «Орион» раз в 2 года проводит Международную научно-техническую конференцию и школу по фотоэлектронике и приборам ночного видения. В конференции принимают участие специалисты отечественных и зарубежных организаций, связанных с разработкой и производством изделий фотоэлектроники, приборов ночного видения, тепловизионной техники и смежных отраслей. Данный сборник состоит из двух томов. Том 1 содержит пленарные и устные доклады, том 2 – стендовые доклады, представленные на XXV конференции, состоявшейся 24–26 мая 2018 г.

Сборник предназначен для специалистов, инженеров и научных работников, специализирующихся в области разработки и применения изделий фотоэлектроники и оптико-электронных систем, а также для преподавателей, студентов и аспирантов соответствующих специальностей вузов.

ISBN 978-5-00122-365-8 (Общ.)
ISBN 978-5-00122-367-2 (Т.2)

С21 Исследование дефектообразования в эпитаксиальных слоях $n\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ мягким рентгеновским излучением

¹ Средин В.Г., ² Войцеховский А.В., ³ Ананьин О.Б., ³ Мелехов А.П., ² Несмелов С.Н.,
² Дзядух С.М., ³ Юрчак В.А.

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, Москва, Россия

E-mail: sredinvg@rambler.ru

В рамках модели дефектообразования при распаде электронных возбуждений рассматривается влияние мягкого рентгеновского излучения на электрофизические характеристики МДП-структур на основе $n\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$

Основным механизмом взаимодействия рентгеновского излучения (РИ) с веществом является фотоионизация. Последующий за поглощением рентгеновского кванта распад электронного возбуждения может привести к генерации дефектов в кристаллах или перестройке структуры существующих в них дефектов вследствие, как предполагается, электростатического взаимодействия или ряда других механизмов [1,2]. Ранее было показано, что облучение мягким рентгеновским излучением (МРИ) монокристаллов и эпитаксиальных слоев твердого раствора $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ приводит к модификации морфологии их поверхности [3,4]. МРИ поглощается в тонком приповерхностном слое толщиной до нескольких микрон, поэтому существенных изменений ни концентрации, ни подвижности носителей заряда в объеме материала не было обнаружено. В то же время при исследовании вольт-фарадных характеристик (ВФХ) МДП структур, созданных на поверхности облученных эпитаксиальных слоев $p\text{-Cd}_{0.23}\text{Hg}_{0.77}\text{Te}$, наблюдались изменения концентрации носителей, которая может быть связана с генерацией радиационных дефектов в приповерхностной области в процессе облучения [5]. В настоящей работе исследуется влияние МРИ на электрофизические свойства эпитаксиальных слоев $n\text{-Cd}_{0.24}\text{Hg}_{0.76}\text{Te}$.

Исследуемые слои представляли собой гетероэпитаксиальные структуры $n\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x=0.24$) и были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на подложках из GaAs (013) в ИФП СО РАН. Рабочий слой толщиной 15 мкм был окружен с обеих сторон варизонными слоями толщиной около 0.3 мкм с составом $x=0.45$ на поверхности. В качестве источника МРИ использовалась плазма лазерно-индуцированной вакуумной искры, содержащей кванты с энергией в диапазоне 0,5÷10 кэВ [6]. Искра инициировалась импульсом YAG:Nd-лазера, работавшего в 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). Излучение фокусировалось на материал катода электрического разрядника. Электроды размещались в вакуумной камере и с помощью малоиндуктивного вакуумного токоввода были подключены к батарее конденсаторов с запасаемой энергией ≤ 1 Дж. Спектр МРИ простирался до 10 кэВ, для отсечки видимого излучения и потоков корпускулярных частиц применялся фильтр (алюминированный майлар толщиной 3 мкм) прозрачный в области выше 0.75 кэВ. Рассчитанные дозы облучения исследуемых образцов составляли до 1.5 Дж/см². Длительность рентгеновского импульса – $\Delta t \leq 200$ нс.

МДП структуры создавались после облучения путем наращивания на эпитаксиальные слои слоев Al_2O_3 . На полученных таким образом МДП-структурах в интервале температур 9-77К были проведены исследования адмиттанса. Измерения проводились на автоматизированной установке спектроскопии адмиттанса на базе криостата Janis и измерителя иммитанса Agilent E4980A. За прямое направление развертки принималось изменение напряжения от отрицательных значений к положительным, эквивалентные схемы МДП-структур в различных режимах и модели обработки экспериментальных данных приведены в [7].

Глубина, на которую МРИ проникает в кристалл сопоставима с шириной области пространственного заряда (ОПЗ), которая зависит от диэлектрической проницаемости полупроводника, температуры и концентрации основных носителей заряда. Для $n\text{-Cd}_{0.24}\text{Hg}_{0.76}\text{Te}$ при 77К

максимальная ширина ОПЗ составляет около 0.26 мкм при концентрации электронов $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и 0.775 мкм при концентрации $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

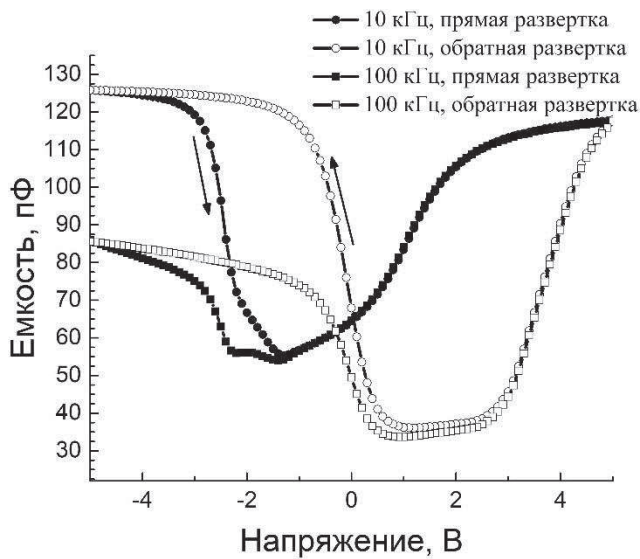


Рисунок 1. ВФХ МДП-структуры на основе исходного $n\text{-Cd}_{0.24}\text{Hg}_{0.76}\text{Te}$, измеренные при 77К при прямой и обратной развертке напряжения на разных частотах

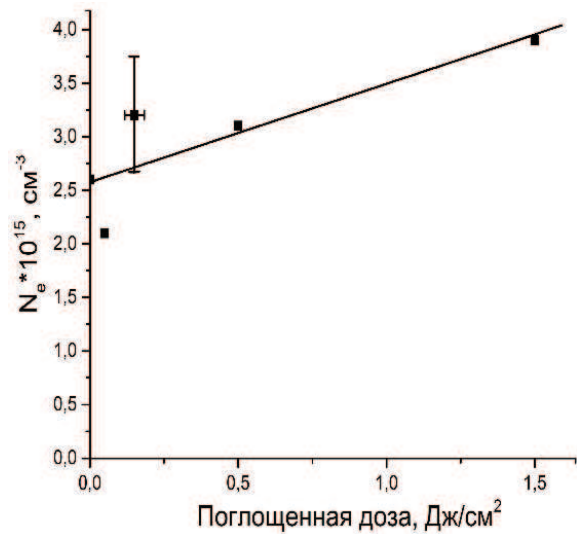


Рисунок 2. Зависимость концентрации электронов от дозы облучения для эпитаксиального слоя $n\text{-Cd}_{0.24}\text{Hg}_{0.76}\text{Te}$ при 77К

Емкость МДП структуры зависит от ряда параметров: концентрации носителей в ОПЗ, величины встроенного в диэлектрик заряда и др. Некоторые из этих величин могут быть определены из исследования ВФХ. На рис. 1 приведены ВФХ МДП-структуры на основе исходного $n\text{-Cd}_{0.24}\text{Hg}_{0.76}\text{Te}$, измеренные при 77 К при прямой и обратной развертке напряжения на частотах 10 и 100 кГц. Как следует из рисунка, для ВФХ наблюдается значительный гистерезис инжекционного типа. В этом случае для МДП-структур можно определить концентрацию основных носителей заряда в области ОПЗ по значению емкости в минимуме ВФХ. Определенная подобным образом концентрация электронов при 77 К представлена на рис. 2 в зависимости от дозы МРИ. Из рисунка видно, что концентрация электронов немного возрастает с ростом дозы.

Кроме того исследования ВФХ показали, что МРИ приводит к изменению спектров быстрых поверхностных состояний МДП-структур (рис.3).

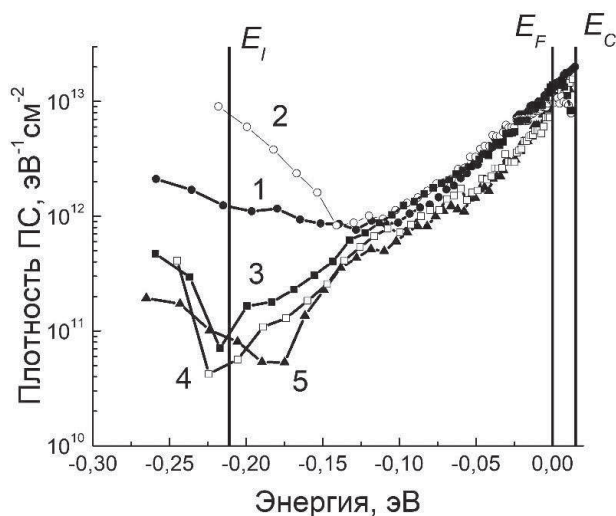


Рисунок 3. Спектры поверхностных состояний для МДП-структур на основе $n\text{-Hg}_{0.76}\text{Cd}_{0.24}\text{Te}$ с варизонным слоем, после воздействия МРИ, измеренные при частоте 10 кГц при 77 К. Спектры получены при следующих величинах поглощенной дозы: 1 - исходный; 2 - 0.05 Дж/см²; 3 - 0.15 Дж/см²; 4 - 0.5 Дж/см²; 5 - 1.5 Дж/см²

Из рисунка видно, что эта зависимость носит немонотонный характер. Причиной описанных эффектов является перестройка примесно-дефектной системы границы раздела диэлектрик-полупроводник и приповерхностного слоя полупроводника, наличие дозовой зависимости эффектов указывает на их радиационный характер. Поскольку прямая генерация дефектов в кри-

сталлах РИ невозможна, одним из наиболее вероятных механизмов радиационного дефектообразования является образование дефектов при распаде электронных возбуждений [1,2]. В условиях нашего эксперимента спектр МРИ сосредоточен в диапазоне 1.5-6 кэВ, причем максимум излучения ограничен интервалом 2-5 кэВ, в этом диапазоне находится энергия электронов М-оболочек иона Hg, в то время как уровни энергии внутренних оболочек Te и Cd смещены в область более высоких энергии [8]. Таким образом первичным эффектом взаимодействия МРИ с $Cd_xHg_{1-x}Te$ является возбуждение внутренних электронных оболочек ионов Hg, которое сопровождается внешним фотоэффектом. В результате образуется ион Hg^{3+} , время жизни которого ограничено Оже-эффектом и составляет по оценкам 10^{-13} с [1]. Как предполагает модель дефектообразования при распаде электронных возбуждений за это время в результате кулоновского взаимодействия ион с дополнительным зарядом может переместиться в междоузлие образуя вакансию или комплекс вакансии + атом в междоузлии. Ранее было показано, что облучение МРИ с тем же спектральным составом, что и в настоящей работе, приводило к росту концентрации дырок в $p-Cd_xHg_{1-x}Te$, и это не противоречит гипотезе о генерации вакансий Hg [5] в процессе облучения. Наблюдаемый же рост концентрации электронов в $n-Cd_xHg_{1-x}Te$ не может быть вызван этим же эффектом. По-видимому, в МЛЭ слоях $Cd_xHg_{1-x}Te$ существует сложная система послеростовых дефектов, как донорного, так и акцепторного типов, степень компенсации которых может смещаться неоднозначным образом при внешнем воздействии на примесно-дефектную систему слоев.

Отметим, что в силу известной анизотропии поверхностных свойств $Cd_xHg_{1-x}Te$ [9,10], присущей всем многокомпонентным материалам со структурой сфалерита, можно ожидать, что процесс поверхностного дефектообразования при воздействии МРИ также будет зависеть от кристаллографической ориентации облучаемой поверхности.

Литература

1. Вавилов В.С. // УФН, 1997, т.167, №4, с.407
2. Мирончук Г. Л., Давидюк Г. Е., Божко В. В., Кажукаускас В. // Физика и техника полупроводников. 2010, т. 44, № 5, с. 694.
3. 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, т.56, №9/2, с.113
4. Средин В.Г., Ананьин О.Б., Бурлаков И.Д., Мирофьянченко А.Е., Мелехов А.П., Новиков И.К. // Прикладная физика, № 6, 2013, с.17.
5. Войцеховский А.В., Несмелов С.Н., Дзядук С.М., Средин В.Г., Ананьин О.Б., Мелехов А.П., Сидоров Г.Ю. // Известия вузов. Физика. 2016, т.59, № 9/2, с. 198.
6. Додулад Э.И. Влияние конфигурации электродов на эмиссионные свойства разряда типа НВИ: Автореферат дис. канд. физ.-мат. наук. М., 2011
7. Voitsekhovskii A., Nesmelov S., Dzyadukh S // Opto-Electronics Review. 2014. v 22 №4p. 236
8. <http://physics.nist.gov/PhysRefData/form.html>.
9. Средин В. Г., Мезин Ю. С., Укроженко В. М. // Физика и техника полупроводников. 2001. т. 35. № 11. с. 1335.
10. Средин В. Г., Ланская О. Г., Поповнин В. М. // Физика и техника полупроводников. 1996. т. 30. № 3. с. 385.

C21 The investigation of defect formation in epitaxial layers of $n-Cd_xHg_{1-x}Te$ by soft X-ray radiation

¹ Sredin V.G., ² Voitsekhovskii A.V., ³ Ananyin O.B., ³ Melekhov A.P., ² Nesmelov S.N.,
² Dzyadukh S.M., ³ Yurchak V.A.

¹ Peter the Great Military Academy of Strategic Rocket Forces, Balashikha, Russia

² National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

³ National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute),
Moscow, Russia

The influence of soft x-ray radiation on the electrical characteristics of MIS structures based on $n-Cd_xHg_{1-x}Te$ is considered in the framework of the model of defect formation during the decay of electronic excitations.