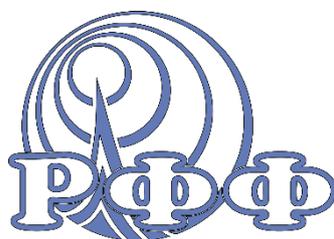


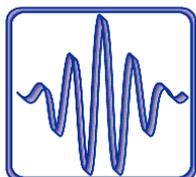


Национальный
исследовательский

**Томский
государственный
университет**



Радиофизический факультет



9-я Международная научно-практическая конференция
**Актуальные проблемы радиофизики
АПР-2021**

Сборник трудов конференции

при поддержке:



20-22 октября 2021 года
г. Томск

Состав носителей в имплантированных бором МЛЭ пленках p -CdHgTe

Ижнин Игорь Иванович^{1,2}

Войцеховский Александр Васильевич²

Кортаев Александр Григорьевич²

Мынбаев Карим Джафарович^{3,4}

Варавин Василий Семенович⁵

Дворецкий Сергей Алексеевич⁵

Михайлов Николай Николаевич⁵

Якушев Максим Витальевич⁵

Świątek Zbigniew⁶

¹Научно-производственное предприятие «Электрон-Карат»

²Национальный исследовательский Томский государственный университет

³Университет ИТМО

⁴ФТИ им. А.Ф. Иоффе

⁵Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН

⁷Institute of Metallurgy and Material Science PAN,

E-mail: i.izhnin@carat.electron.ua

Твердые растворы CdHgTe (КРТ) являются основным материалов инфракрасной фотоэлектроники для создания крупноформатных матричных фотоприемников [1]. В настоящее время наиболее распространенной и технологически отработанной является технология фотодиодов типа n^+n-p , где n^+n область формируется ионной имплантацией (ИИ) бора в вакансионно-легированном КРТ [2]. При этом n^+ -область определяется радиационными донорными дефектами, n -область определяются остаточными донорами ГЭС, которые высвобождаются в процессе диффузии междоузельной ртути и ее аннигиляции с вакансиями ртути. Исследования имплантации различных ионов в КРТ были посвящены многочисленным работам и показано, что ИИ приводит к значительным радиационным нарушениям, и вне зависимости от сорта ионов при ИИ образуется всегда слой с электронным типом проводимости из-за донорного характера образующихся радиационных дефектов. Для определения профилей распределения донорных дефектов, как правило, применяли метод дифференциального эффекта Холла в единичном магнитном поле в процессе послойного химического травления, который из-за многочастичного спектра носителей не всегда давал адекватное распределение донорных дефектов. Для эпитакциальных структур с варизонными защитными слоями такие исследования проведены, например, в работах [3,4]. Исключение составляла работа [5], где состав носителей заряда, их параметры и пространственное распределение в ИИ бором пленках КРТ исследовали с помощью анализа полевых зависимостей коэффициента Холла $R_H(B)$ и проводимости $\sigma(B)$ методом спектров подвижности высокого разрешения (HR MSA). Однако и в работе [5] ничего не говорилось о природе донорных центров, и ряд полученных параметров вызывал определенные сомнения. Поэтому целью настоящей работы являлось определение состава носителей и их параметров в ИИ бором пленках КРТ, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), и сравнение с имеющимися литературными данными.

Для исследований была использована гетероэпитаксиальная структура $Cd_xHg_{1-x}Te$ (ГЭС) с варизонными защитными слоями (ВЗС), выращенная в ИФП им. А.В. Ржанова СО РАН (Новосибирск) методом МЛЭ на подложке (013) CdTe/ZnTe/GaAs с контролем процесса роста *in situ* с помощью автоматического эллипсометра [6]. Состав активного слоя ГЭС x_a был равен 0,22, поверхностный состав ВЗС толщиной 0,3 мкм был равен 0,44 (Рис. 1, кривая 3), суммарная толщина ЭС составляла 10,1 мкм. После роста ГЭС вакансионным легированием была приведена к p -типу проводимости путем термического отжига в атмосфере гелия при низком давлении паров ртути (220 °С, 24 часа). Имплантация бора проведена на установке ИМС200 (Ion Beam Services, Франция) ионами с энергией $E = 50$ кэВ (образец №1) и $E = 150$ кэВ (образец №2) и флюенсом $\Phi = 10^{14}$ см⁻². Профили распределения имплантированных ионов В, рассчитанные с помощью программы SRIM, приведены на рис. 1. Как видно, для энергии ионов 50 кэВ профиль распределения полностью заключен в ВЗС ($R_p = 143$ нм), а для ионов с энергией 150 кэВ значительная часть профиля расположена в активном слое структуры ($R_p = 354$ нм). Исследования электрических свойств ЭС проводили, измеряя полевые зависимости $R_H(B)$ и $\sigma(B)$ в полях 0,01 – 1,2 Тл при 77 К. Для определения состава и параметров носителей использовали метод дискретного анализа спектров подвижности (*англ.* Discrete Mobility Spectrum Analysis, DMSA) [7]. Это позволило определить качественный состав носителей в имплантированных образцах и определить количественные значения их параметров: подвижность и средние значения концентрации и парциальной проводимости, рассчитанные на полную толщину образца.

DMSA исходного образца p -типа показал, что состав носителей заряда был типичен для такого сорта образцов. Вклад в проводимость дают три типа носителей: тяжелые дырки с подвижностью $\mu_p = 504$ см²/(В·с) и концентрацией $p_h = 1.06 \cdot 10^{16}$ см⁻³ (основной вклад); легкие дырки с подвижностью $\mu_{pl} = 11100$ см²/(В·с) и концентрацией $p_l = 1.5 \cdot 10^{13}$ см⁻³; электроны с низкой подвижностью $\mu_{nh} = 9230$ см²/(В·с) и концентрацией $n_h = 1.7 \cdot 10^{12}$ см⁻³. Присутствие электронов с низкой подвижностью является характерной особенностью МЛЭ

образцов, получаемых данной технологией; пространственно они локализованы в переходной области вблизи буферного слоя. Электроны с высокой подвижностью (неосновные носители) в данном образце не проявлялись.

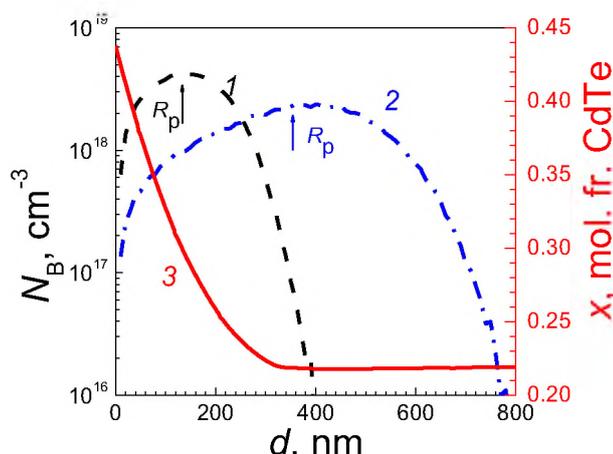


Рис. 1. Профили ионов бора, имплантированных с флюенсом $\Phi = 10^{14} \text{ см}^{-2}$ и энергией $E = 50 \text{ кэВ}$ (1) и $E = 350 \text{ кэВ}$ (2), симулированные программой SRIM, и совмещенные с профилем состава в приповерхностной области (3). R_p – средний проецированный пробег ионов бора для данных энергий.

После ИИ в обоих образцах вклад в проводимость давали 5 типов носителей заряда: электроны с высокой, средней и низкой подвижностью, а также тяжелые и легкие дырки. Для примера на рис. 2 представлены результаты DMSA образца №2, имплантированного при энергии 150 кэВ.

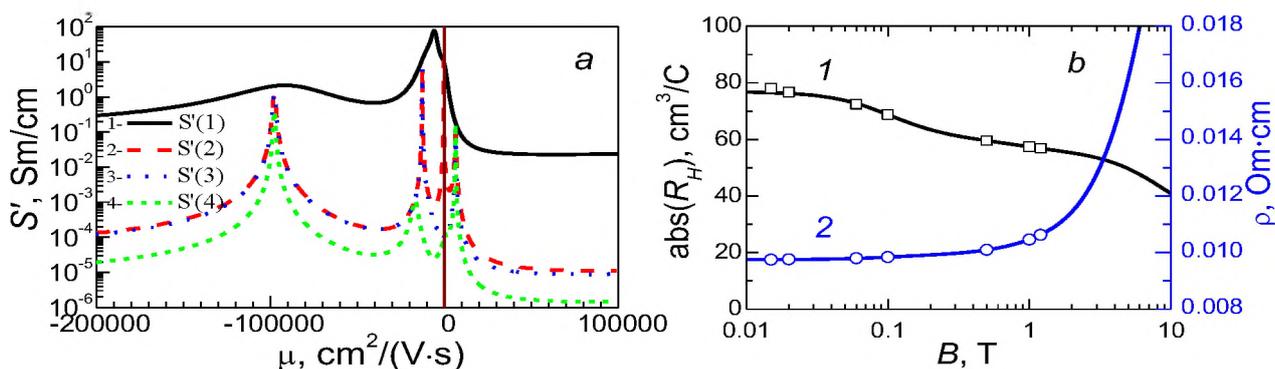


Рис. 2. a) – огибающие спектров подвижности образца №2 после ИИ V^+ ($E = 150 \text{ кэВ}$, $\Phi = 10^{14} \text{ см}^{-2}$): 1 – первичная, 2 – после первого шага дискретизации, 3 – после второго шага дискретизации, 4 – после третьего шага дискретизации. b) – экспериментальные (точки) и расчетные (линии) полевые зависимости $R_H(B)$ (1, $R_H < 0$) и $\rho(B)$ (2);

Как видно из рис. 2а, после ИИ с $E = 150 \text{ кэВ}$ и $\Phi = 10^{14} \text{ см}^{-2}$ основной вклад в проводимость образца дают электроны с наиболее низкой подвижностью $\mu_{h2} = 5810 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ (первичная огибающая спектра подвижности рис. 2а, кривая S_1 , максимум расположен на отрицательной оси подвижности). Средняя концентрация $n_{av,h2} = 8.4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и средняя парциальная проводимость $\sigma_{av,h2} = 78.0 \text{ (Om}\cdot\text{см)}^{-1}$ при интегральной проводимости $\sigma_0 = 102.5 \text{ (Om}\cdot\text{см)}^{-1}$. После первого шага дискретизации (после вычитания вклада электронов с наиболее низкой подвижностью) получали вторичную огибающую (рис. 2а, кривая S_2), где в точке главного максимума огибающей основной вклад в проводимость дают электроны со средней подвижностью $\mu_{h1} = 12700 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ (максимум расположен на отрицательной оси подвижности); средняя концентрация $n_{av,h1} = 5.8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и средняя парциальная проводимость $\sigma_{av,h1} = 11.8 \text{ (Om}\cdot\text{см)}^{-1}$. После второго шага дискретизации (после вычитания вклада электронов со средней подвижностью) получали вторичную огибающую (рис. 2а, кривая S_3), где основной вклад в проводимость дают электроны с высокой подвижностью $\mu_n = 97700 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ (максимум расположен на отрицательной оси подвижности). Средняя концентрация $n = 1.3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и средняя парциальная проводимость $\sigma_{av,n} = 2.06 \text{ (Om}\cdot\text{см)}^{-1}$. После третьего шага дискретизации (после вычитания вклада электронов с высокой подвижностью) получали вторичную огибающую (рис. 2а, кривая S_4), где в точке главного максимума огибающей основной вклад в проводимость дают тяжелые и легкие дырки с подвижностями $\mu_{ph} = 500 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ и $\mu_{pl} = 6420 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ (максимумы расположены на положительной оси подвижности), эти дырки различаются плохо из-за малого вклада в проводимость. Рассчитанные на основании полученных параметров полевые

зависимости $R_H(B)$ (1, $R_H < 0$) и $\rho(B)$ (2) (линии) адекватно описывают экспериментальные зависимости $R_H(B)$ и $\rho(B)$ (точки), см. рис. 2b. Аналогичные результаты получены и для образца №1 после ИИ при 50 кэВ.

В обоих образцах p -типа в результате ИИ бора была сформирована типичная n^+-n-p структура. Аналогичные структуры наблюдались нами ранее во всех исследованных образцах p -типа с $x_a \sim 0.22$ после ИИ мышьяка с различными флюенсами в интервале $10^{12}-10^{15}$ см⁻² и энергиями 190 и 350 кэВ [7]. В таких структурах p -область представляет собой часть материала, не модифицированную при ИИ, а n^+-n -область характеризует результат действия ИИ, поскольку наблюдаемые в ней носители отсутствуют (или же их вклад пренебрежимо мал) в исходных структурах. По аналогии можно предположить, что n^+ -область в такой структуре и в случае ИИ бора сформирована радиационными донорными дефектами, и в ней природа донорных центров, дающих электроны с низкой и средней подвижностью, обусловлена междоузельной ртутью, захваченной соответственно протяженными (дислокационные петли) и квазиточечными радиационными дефектами. Механизм образования n -области структуры хорошо известен и связан с генерацией междоузельной ртути в области радиационного дефектообразования, ее диффузии вглубь образца и аннигиляции с исходными акцепторными дефектами – вакансиями ртути. Электронный тип проводимости этой области определяется остаточными донорами в исходном образце. Поэтому параметры носителей в ней (электроны с высокой подвижностью) характерны для КРТ с низкой степенью компенсации.

Сравним полученные нами результаты для образца №2 с данными образца L1 из [5], имплантированных при одинаковых режимах и где также вклад в проводимость давали после ИИ давали 3 типа электронов с низкой, средней и высокой подвижностью. В нашем случае парциальный вклад электронов с низкой подвижностью в проводимость был доминирующим. В образце L1 доминирующий вклад в проводимость вносили электроны со средней подвижностью, при этом их слоевая концентрация $N_{Si2} = 9.1 \cdot 10^{14}$ см⁻² была более чем на два порядка выше, чем в образце №2. Главное отличие наблюдали для электронов с высокой подвижностью: $\mu_n = 97700$ см²/(В·с) против 25640 см²/(В·с) в образце L1, что в нашем случае лучше согласуется со свойствами формируемых при ИИ n -слоев. Результат работы [5] трудно объяснить, так как такому низкому значению подвижности должна соответствовать концентрация донорных центров порядка $(1.5) \cdot 10^{17}$ см⁻³, однако о легировании образца L1 в [5] не сообщалось. Авторы [5] с помощью метода HRMSA при послойном травлении определили также пространственную локализацию выявленных носителей: электроны с низкой подвижностью 2940 см²/(В·с) были локализованы в верхнем 220 нм поверхностном слое; электроны со средней подвижностью 7490 см²/(В·с) были локализованы в области распределения ионов бора толщиной 500 нм; электроны с высокой подвижностью были локализованы в переходной $n-p$ области на глубине порядка 700 нм. Эти данные хорошо согласуются с данными по локализации носителей в ИИ мышьяком МЛЭ структурах КРТ, полученными нами в [7].

Таким образом, измерения полевых зависимостей $R_H(B)$ и $\sigma(B)$ и их анализ с помощью метода DMSA позволили обнаружить и идентифицировать донорные дефекты, образовавшиеся в результате ионной имплантации бора в образцах ГЭС КРТ, выращенные МЛЭ. В материале p -типа проводимости в результате ИИ сформировалась n^+-n-p структура. В её n^+-n -области обнаружены три типа электронов с разной подвижностью, и по аналогии с данными для ГЭС, имплантированных мышьяком, сделано предположение о природе донорных радиационных дефектов, ответственных за появление электронов с низкой и средней подвижностью. Природа донорного центра, обуславливающего наличие электронов с низкой подвижностью – атом междоузельной ртути, захваченный дислокационной петлей, а донорного центра, обуславливающего наличие электронов с промежуточной подвижностью – комплексы, образованные атомами междоузельной ртути с другими точечными дефектами. Электроны с высокой подвижностью ~ 97700 см²/(В·с) локализованы в n -слое, формирование которого связано с диффузией междоузельной ртути, генерируемой при имплантации, и ее аннигиляцией с вакансиями ртути в материале p -типа проводимости. В общих чертах картина радиационного дефектообразования при имплантации бора а эпитаксиальных слоях КРТ, установленная с помощью метода DMSA, аналогична таковой, установленной авторами [5] методом HRMSA.

Список публикаций:

- [1] Rogalski A. *HgCdTe photodetectors*, Chapter 7 in: E. Tournié, L. Cerutti (Eds.), *Mid-Infrared Optoelectronics*, Woodhead Publishing (Elsevier), Duxford, Cambridge, Kindlington, 2020, P. 235.
- [2] Mollard L., Bourgeois G., Lobre C., Gout S., Violet-Bosson S., Baier N., Destefanis G., Gravrand O., Barnes J.P., Milesi F., Kerlain A., Rubaldo L., Manissadjian A. // *J. Electron. Mater.* 2014. Vol. 43. № 3. P. 802.
- [3] Таунов Н.Х., Войцеховский А.В., Григорьев Д.В. // *Изв. ВУЗов. Физика*. 2014. Т. 57. № 3. С. 54.
- [4] Voitsekhovskii A.V., Grigor'ev D.V., Talipov N.Kh. // *Russ. Phys. J.* 2008. Vol. 51. No. 10. P. 1001.
- [5] Umana-Membreno G.A., Kala H., Antoszewski J., Ye Z.H., Hu W.D., Ding R.J., Chen X.S., Lu W., He L., Dell J.M., Faraone L. // *J. Electron. Mater.* 2013. Vol. 42. No. 11. P. 3108.
- [6] Yakushev M.V., Brunev D.V., Varavin V.S., Vasilyev V.V., Dvoretiskii S.A., Marchishin I.V., Predein A.V., Sabinina I.V., Sidorov Yu.G., Sorochkin A.V. // *Semiconductors*. 2011. Vol. 45. P. 385.
- [7] Izhnin I.I., Syvorotka I.I., Fitych O.I., Varavin V.S., Dvoretzky S.A., Marin D.V., Mikhailov N.N., Remesnik V.G., Yakushev M.V., Mynbaev K.D., Voitsekhovskiy A.V., Koromaev A.G. // *Semicond. Sci. Technol.* 2019. Vol. 34. N3. – 035009.