

МАТЕРИАЛЫ И ПРИБОРЫ НАНОФОТОНИКИ

УДК 621.315.592

*А.В. ВОЙЦЕХОВСКИЙ***, С.Н. НЕСМЕЛОВ*, С.М. ДЗЯДУХ*, И.И. ИЖНИН***,
Г.В. САВИЦКИЙ****, А.Ю. БОНЧИК*****

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ СПЕКТРОСКОПИИ АДМИТТАНСА МДП-СТРУКТУР НА ОСНОВЕ МЛЭ $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ПОСЛЕ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ БОРА¹

Проведено исследование влияния ионной имплантации бора с энергией ионов 100 кэВ и дозой облучения $(1-6) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ в эпитаксиальные слои HgCdTe на адмиттанс МДП-структур, созданных на их основе. В результате исследования выявлено уменьшение величины модуляции емкости после ионной имплантации бора, а также изменение угла наклона зависимости дифференциальной емкости от напряжения смещения в режиме обеднения.

Ключевые слова: МДП-структура, HgCdTe , молекулярно-лучевая эпитаксия, ионная имплантация бора, вольт-фарадная характеристика.

Узкозонный твердый раствор HgCdTe является основным материалом для создания высокочувствительных детекторов инфракрасного диапазона, действующих в областях окон прозрачности атмосферы 3–5 и 8–14 мкм [1]. Метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) HgCdTe предоставляет возможности оптимизации характеристик детекторов путем выращивания пленок HgCdTe с заданными профилями распределения содержания CdTe по толщине пленки [2]. Сегодня важной задачей является разработка методов контролируемого изменения параметров HgCdTe для формирования заданных областей приборов оптоэлектроники. Одним из распространенных методов изменения свойств HgCdTe является ионная имплантация. Исследования характеристик МДП-структур на основе HgCdTe могут дать полезную информацию об изменении свойств границы раздела и приповерхностного слоя HgCdTe после ионной имплантации. Целью данной работы является исследование влияния ионной имплантации бора на адмиттанс МДП-структур, созданных на основе имплантированного гетероэпитаксиального варизонного МЛЭ HgCdTe .

Исследуемые гетероэпитаксиальные структуры на основе HgCdTe были выращены методом МЛЭ в ИФП СО РАН на подложках из $\text{GaAs}(013)$. При выращивании гетероэпитаксиальных структур с обеих сторон рабочего слоя создавались варизонные слои с повышенным составом CdTe . Толщина рабочего слоя составляла около 7,5 мкм, толщина верхнего (приповерхностного) варизонного слоя составляла 0,6 мкм, а состав на поверхности достигал 0,44. До формирования МДП-структур был проведен отжиг эпитаксиальной пленки HgCdTe в вакууме, после которого пленка приобрела дырочный тип проводимости. Концентрация дырок в пленке, определенная при помощи метода Холла, составила после отжига $8,6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ при температуре 78 К. Для исходной гетероэпитаксиальной пленки подвижность дырок составляла $554 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, время жизни не превышало 10 нс, исходная проводимость составляла $0,78 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$. На рис. 1 приведено распределение содержания CdTe по толщине эпитаксиальной пленки, измеренное автоматическим эллипсометром в процессе выращивания. Содержание CdTe в рабочем слое поддерживалось на уровне 0,222–0,226. После отжига эпитаксиальная пленка HgCdTe была разделена на три части. Первая часть (образец № 1) не подвергалась дополнительным обработкам и на ее основе был сформирован контрольный образец МДП-структуры, которая использовалась для сравнения ее характеристик с характеристиками МДП-структур, созданных на основе пленок после ионного травления и ионной имплантации. Вторая часть пленки (образец № 2) была подвергнута травлению низкоэнергетическими ионами с энергией 0,5 кэВ и плотностью тока $0,1 \text{ мА/см}^2$ в течение пяти минут. Третья часть пленки (образец № 3) подвергалась имплантации ионами бора с энергией 100 кэВ и дозой порядка 10^{15} см^{-2} . Далее по одной технологии на основе всех трех частей эпитаксиальной пленки формировались МДП-структуры с двухслойным низкотемпературным диэлектриком $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$.

Измерения проводились на автоматизированной установке спектроскопии адмиттанса наногетероэпитаксиальных структур на базе неоптического криостата Janis и измерителя иммитанса Agilent E4980A (температурный диапазон 8–475 К, диапазон измеряемого полного сопротивления 0–1 ГОм с раз-

¹ Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашения 14.В37.21.0074 и 14.В37.21.1177.

решением по емкости и нормированной на частоту проводимости до 1 фФ, диапазон выставяемого напряжения -40 – $+40$ В, частоты – 20 Гц – 2 МГц). За прямое направление развертки при измерениях принимается изменение напряжения от отрицательных значений к положительным, а за обратное направление развертки – от положительных к отрицательным.

На рис. 2 приведены вольт-фарадные характеристики (ВФХ) МДП-структуры № 1, измеренные при температуре 7,7 К. Из рис. 2 видно, что вольт-фарадные характеристики соответствуют дырочному типу проводимости полупроводника. На частоте 1 МГц наблюдается близкий к высокочастотному вид ВФХ. Уменьшение емкости МДП-структуры в обогащении связано с влиянием на измеряемую емкость сопротивления объема эпитаксиальной пленки [3]. Отметим, что для МДП-структур на основе p -HgCdTe сопротивление объема эпитаксиальной пленки обычно значительно из-за малой подвижности основных носителей (дырок). На частоте 10 кГц наблюдается низкочастотный вид ВФХ, значительная глубина провала низкочастотной емкости свидетельствует о наличии в структуре приповерхностного варизонного слоя с повышенным составом CdTe [4].

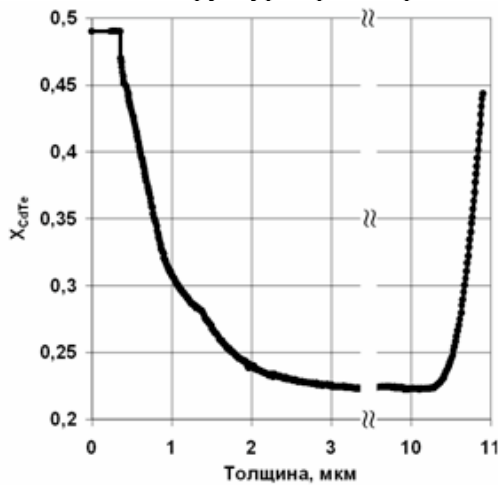


Рис. 1. Распределение содержания CdTe по толщине эпитаксиальной пленки Hg_{1-x}Cd_xTe, измеренный автоматическим эллипсометром в процессе выращивания эпитаксиальной пленки

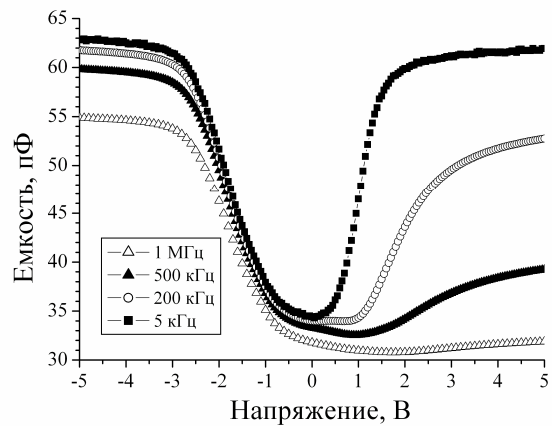


Рис. 2. Вольт-фарадные характеристики МДП-структуры № 1 на основе HgCdTe, измеренные при температуре 77 К на различных частотах переменного тестового сигнала при прямом направлении развертки напряжения

На рис. 3 показаны ВФХ МДП-структуры № 3, измеренные после ионной имплантации бора при температуре 77 К при прямой развертке по напряжению. Из рис. 3 видно, что в результате ионной имплантации произошла смена типа проводимости полупроводниковой пленки. Можно отметить, что концентрация основных носителей после ионной имплантации бора резко возросла, что привело к малой модуляции емкости на ВФХ. На рис. 4 показаны ВФХ МДП-структуры № 2

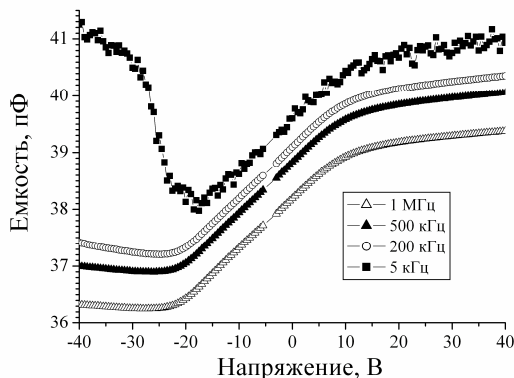


Рис. 3. Вольт-фарадные характеристики МДП-структуры № 3 на основе HgCdTe после ионной имплантации бора, измеренные при температуре 77 К на различных частотах переменного тестового сигнала

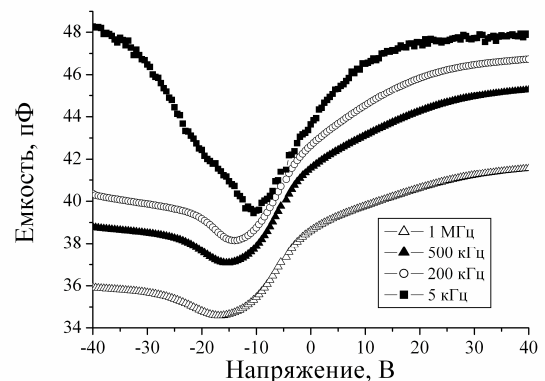


Рис. 4. Вольт-фарадные характеристики МДП-структуры № 2 на основе HgCdTe после ионного травления, измеренные при температуре 77 К на различных частотах переменного тестового сигнала

на основе пленки $HgCdTe$, подвергнутой ионному травлению, измеренные при 77 К на разных частотах при прямой развертке напряжения. Из рис. 4 видно, что и в случае ионного травления произошла смена типа проводимости эпитаксиальной пленки.

Модуляция емкости на ВФХ для МДП-структуры № 2 больше, чем для структуры № 3, что свидетельствует о том, что концентрация основных носителей заряда после ионного травления также возросла, но не так значительно как после ионной имплантации. По углу наклона зависимости квадрата величины обратной емкости в режиме обеднения на частоте 2 МГц от напряжения была проведена оценка концентраций основных носителей заряда для исследованных образцов при температуре 77 К [5]. Определенная при помощи данной методики концентрация основных носителей заряда в приповерхностном слое составила $2,57 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ для контрольной структуры № 1. Для структуры № 2 концентрация основных носителей заряда после ионного травления составила $5,88 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, а после ионной имплантации концентрация электронов достигла значения $2,47 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (структура № 3).

Исследованы температурные спектры нормированной на циклическую частоту дифференциальной проводимости (рис. 5–7). Из представленных рисунков видно, что при проведении операций ионного травления и ионной имплантации происходит значительное изменение вида спектра нормированной дифференциальной проводимости, что свидетельствует о появлении в энергетическом спектре структуры новых уровней, связанных с возникшими дефектами кристаллической решетки, в результате проведения данных операций, повлекших конверсию типа проводимости.

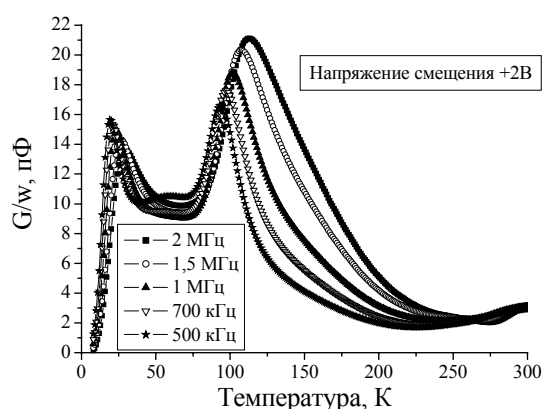


Рис. 5. Температурный спектр проводимости МДП-структуры № 1 на основе $HgCdTe$

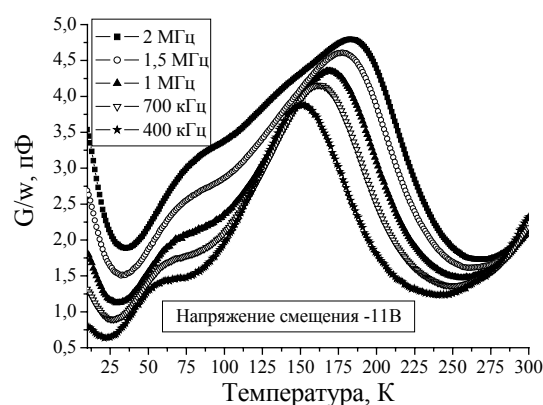


Рис. 6. Температурный спектр проводимости МДП-структуры № 2 на основе $HgCdTe$, подвергнутого ионному травлению

Для температурного спектра нормированной проводимости структуры № 1 (рис. 5) характерно наличие двух ярко выраженных максимумов. Максимумы в исследованном диапазоне частот локализируются в диапазонах температур 10–50 К и 80–120 К. Энергии активации уровней дефектов в исходном материале p -типа проводимости, соответствующие первой и второй группам максимумов, составили $(2,1 \pm 1,5) \text{ мэВ}$ и $(45,6 \pm 15,2) \text{ мэВ}$ соответственно.

В спектре для структуры, подвергнутой ионному травлению низкоэнергетическими ионами аргона (рис. 6), обнаружена лишь одна группа четко выраженных максимумов (от 150 до 220 К). Перегибы на температурной зависимости проводимости, расположенные в диапазоне температур от 50 до 100 К, являются максимумами меньшей амплитуды, практически не различимыми на фоне максимумов большей амплитуды. Энергия активации для структуры, подвергнутой ионному травлению, определенная из спектра проводимости, составила $(73,7 \pm 3,5) \text{ мэВ}$.

Для структуры, изготовленной на основе материала, имплантированного ионами бора, температурный спектр проводимости содержит два четко выраженных максимума (рис. 7). Первая группа максимумов достаточно хорошо поддается обработке, при этом определяемая по положению температурных максимумов энергия активации носителей заряда составляет $(66,2 \pm 17,4) \text{ мэВ}$.

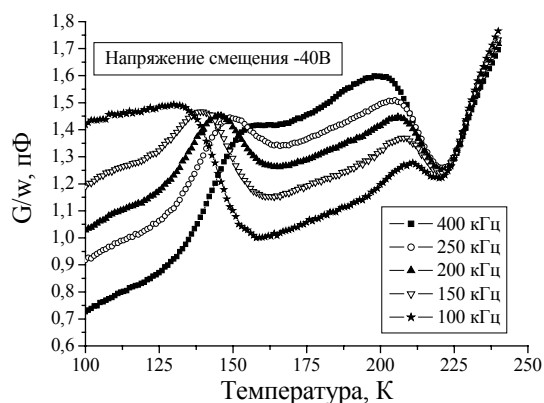


Рис. 7. Температурный спектр проводимости МДП-структуры № 3 на основе HgCdTe после ионной имплантации

Таким образом, проведено исследование влияния ионного травления и ионной имплантации бора на адмиттанс МДП-структур на основе варизонного МЛЭ HgCdTe. Показано, что в результате ионного травления и ионной имплантации эпитаксиальных пленок *p*-HgCdTe происходит смена типа проводимости пленок. Определены концентрации основных носителей после воздействий и исследованы температурные спектры проводимости до и после ионного травления пленок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rogalsky A. Infrared detectors. – New York: CRC Press, Taylor and Francis Group, 2011. – 876 p.
2. Овсяк В.Н., Курышев Г.Л., Сидоров Ю.Г. и др. Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона. – Новосибирск: Наука, 2001. – 376 с.
3. Войцеховский А.В., Несмелов С.Н., Дзядух С.М. // Изв. вузов. Физика. – 2005. – Т. 48. – № 6. – С. 31–37.
4. Voitsekhoovskii A.V., Nesmelov S.N., and Dzyadukh S.M. // Thin Solid Films. – 2012. – V. 522C. – P. 261–266.
5. Gelder W. and Nicollian E.H. // J. Electrochem. Soc. – 1971. – V. 118. – No. 1. – P. 138–141.

*Сибирский физико-технический институт им. В.Д. Кузнецова
Национального исследовательского Томского государственного университета,
г. Томск, Россия

Поступила в редакцию 15.07.13.

**Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, Россия

***НПП «Карат», г. Львов, Украина

****Институт прикладных проблем механики и математики НАНУ, г. Львов, Украина
E-mail: vav@elefot.tsu.ru

Войцеховский Александр Васильевич, д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой;
Несмелов Сергей Николаевич, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр.;
Дзядух Станислав Михайлович, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр.;
Ижнин Игорь Иванович, д.ф.-м.н., зав. лабораторией;
Савицкий Григорий Владимирович, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр.;
Бончик Александр Юрьевич, ст. науч. сотр.

A.V. VOITSEKHOVSKII, S.N. NESMELOV, S.M. DZYADUKH, I.I. IZHININ, G.V. SAVITSKY, A.Yu. BONCHIK

ADMITTANCE SPECTROSCOPY INVESTIGATION BY MIS-STRUCTURES BASED ON MBE Hg_{1-x}Cd_xTe AFTER ION IMPLANTATION OF BORON

We investigated the influence of ion implantation of boron with energy of 100 keV and a dose of irradiation (1–6)·10¹⁵ cm⁻² in HgCdTe epitaxial layers on admittance of MIS-structures based on this layers. The study found a decrease the modulation of capacitance after ion implantation of boron, as well as changing the angle of slope of dependency of the differential capacitance from the voltage bias in the depletion mode.

Keywords: MIS-structures, HgCdTe, molecular-beam epitaxy, ion implantation of boron, capacitance-voltage characteristic.