



«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель директора по научной работе
ФГБУН «ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН»

Лебедев С.В.

« 28 » _____ 01 _____ 2016 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации о диссертации Михайлюк Екатерины Андреевны на тему «Электрофизические свойства полупроводниковых гетероструктур $In_2Te_3/InAs$ и $In_{2x}Ga_{2(1-x)}Te_3/InAs$ », представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – «физика полупроводников».

Актуальность темы диссертации

Пути расширения и улучшения функциональных возможностей современных электронных устройств могут быть связаны и с использованием новых типов слоистых гетероструктур, и с улучшением качества границ раздела в гетероструктурах, например: диэлектрик-полупроводник, и с углублением знаний о свойствах и возможностях полупроводниковых материалов. Основным требованием, предъявляемым к полевым гетероструктурам, является низкая плотность центров локализации заряда на границе раздела и возможность управления зарядовым состоянием приповерхностной области полупроводника внешним электрическим полем. Исследование именно этих аспектов, определяющих совокупность электрических характеристик полевых приборов, является важным и актуальным для физики полупроводников.

В работе Михайлюк Е.А. представлены результаты исследования электрофизических свойств полевых гетероструктур типа $A_2^{III}B_3^{VI}/InAs$ (n – типа), обусловленных как механизмами токопрохождения в гетероструктурах, так и свойствами самих слоёв типа $A_2^{III}B_3^{VI}$. В качестве материала изолирующего слоя в таких гетероструктурах использовались In_2Te_3 и твёрдый раствор $In_{2x}Ga_{2(1-x)}Te_3$ ($x \sim 0.65$) – представители полупроводниковых соединений типа $A_2^{III}B_3^{VI}$ со стехиометрическими вакансиями. Из-за высокой концентрации стехиометрических вакансий ($\sim 10^{21}$ см⁻³) электрические характеристики $A_2^{III}B_3^{VI}$ нечувствительны и к легирующим примесям и к радиационным воздействиям. В работе обосновывается возможность использования гетероструктур $In_2Te_3/InAs$ (n – типа) и $In_{2x}Ga_{2(1-x)}Te_3$ ($x \sim 0.65$)/ $InAs$ (n – типа) в качестве полевых и удовлетворяющих требованиям, предъявляемых к МДП – структурам с идеальным диэлектриком.

В связи с этим, комплексное исследование гетероструктур $In_2Te_3/InAs$ (n – типа) и $In_{2x}Ga_{2(1-x)}Te_3$ ($x \sim 0.65$)/ $InAs$ (n – типа) электрофизическими методами и методом адмиттанса расширяет возможности использования полупроводниковых соединений группы $A_2^{III}B_3^{VI}$ ограниченной толщины в качестве слоев П в структурах МПП, удовлетворяющих требованиям МДП – структур с идеальным диэлектриком, что является актуальным как с научной, так и с практической точек зрения.

Новизна полученных результатов и выводов

Новизна представленной работы Михайлюк Е.А. определяется тем, что в ней впервые:

- методом анализа вольт – фарадных характеристик гетероструктуры $In_{2x}Ga_{2(1-x)}Te_3$ ($x \sim 0.65$)/ $InAs$ (n – типа) зафиксировано снижение ёмкости до значений, менее геометрической ёмкости C_T при частотах $f < 10^3$ Гц, которое интерпретировано как реактивное сопротивление индуктивного характера.
- построена эквивалентная схема гетероструктур $Al/In_2Te_3/InAs$ (n – типа) и $Al/In_{2x}Ga_{2(1-x)}Te_3$ ($x \sim 0.65$)/ $InAs$ (n – типа), которая легла в основу определения параметров центра локализации заряда (ЦЛЗ) в тонких слоях In_2Te_3 и $In_{2x}Ga_{2(1-x)}Te_3$ методом адмиттанса.

- установлено появление на зависимостях нормированной проводимости $\frac{G_p(\omega)}{\omega}$ нового максимума при $f \sim 4.6$ кГц с энергией 0.36 эВ, соответствующего нейтральной ловушке.
- предложено модифицированное уравнение электронейтральности и его решение для гетероструктур $In_2Te_3/InAs$ (n – типа) с учётом двух типов глубоких уровней в запрещённой зоне материала слоя In_2Te_3 .
- в результате моделирования процессов токопрохождения в слоях типа $A_2^{III}B_3^{VI}$ гетероструктур на основе арсенида индия доказано изменение типа проводимости с электронного на дырочный при температуре выше $T \sim 250$ К, обусловленное участием центра с энергией 0.36 эВ в процессах захвата и выброса электронов с энергетического уровня.

Значимость научных и практики результатов диссертации

Определена энергия и тип глубоких уровней в тонких слоях соединений $A_2^{III}B_3^{VI}$ на $InAs$ (n – типа), один из которых с энергией 0.5 эВ ниже дна зоны проводимости является центром донорного типа, второй – с энергией 0.36 эВ отвечает характеру поведения нейтральной ловушки.

Установлено, что совместное использование анализа эквивалентных схем и метода адмиттанса в тонких слоях In_2Te_3 и $In_{2x}Ga_{2(1-x)}Te_3$ позволяет определить присутствие энергетических уровней с низкой концентрацией ($N_l \sim 6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$) и наблюдать различие в частотных факторах, обуславливающих их проявление. Определен тип ЦЛЗ и рассчитаны их параметры.

Рассчитаны значения подвижности свободных носителей заряда в диапазоне температур (77 – 400) К, которые обеспечивают возможность использования слоев In_2Te_3 или $In_{2x}Ga_{2(1-x)}Te_3$ ($x \sim 0.65$) в качестве изолирующих в полевых гетероструктурах на основе $InAs$.

Рекомендации по использованию результатов и выводов

Предложенная методика построения эквивалентных схем гетероструктур и метод адмиттанса для оценки параметров ЦЛЗ в тонких слоях In_2Te_3 и

$In_{2x}Ga_{2(1-x)}$, может быть использована для других гетероструктур подобного типа, например: $A_2^{III}B_3^{VI}/GaAs$, $A_2^{III}B_3^{VI}/GaP$.

Использованная в работе методика моделирования с учетом числа и типов глубоких уровней позволяет рассчитать энергию уровня Ферми, концентрацию носителей заряда и их подвижность. Выводы по результатам моделирования могут использоваться для анализа генерационно-рекомбинационных процессов в гетероструктурах типа МПП.

Результаты диссертации могут быть использованы в организациях и предприятиях электронной промышленности и научных центрах, занимающихся исследованием и разработкой приборов и устройств на основе полупроводников типа $A^{III}B^V$: ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН (г. Санкт-Петербург), НИИ Полус (г. Москва), МИЭТ (г. Зеленоград), СПбГУ (г. Санкт-Петербург), ЛЭТИ (г. Санкт-Петербург), НГУ им Н.И. Лобачевского (г. Нижний Новгород), ИФТТ РАН (г. Черноголовка, Московская обл.), ИФП СО РАН (г. Новосибирск), НГУ (г. Новосибирск), Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН (г. Черноголовка, Московская обл.), ИФМ РАН (г. Нижний Новгород), ОАО «НИИ Материалов электронной техники» (г. Калуга), «НПО Орион» (г. Москва), АО «НПП «Исток» им. Шокина» (г. Фрязино, Московская обл.), ОАО «НПП «Квант» (г. Москва).

Материалы диссертации рекомендованы к использованию при разработке учебных курсов для подготовки бакалавров (магистров) по направлениям 22.03.01 (22.04.01) – Материаловедение и технологии материалов, 28.03.00 (28.04.00) – Нанотехнологии и наноматериалы, 11.03.04 (11.04.04) – Электроника и нанoeлектроника.

Замечания по диссертации и автореферату

1. Каким же всё-таки методом (из приведённых во второй главе) и почему предпочтительнее формировать гетероструктуры типа $In_2Te_3/InAs$?

2. Построение эквивалентной схемы гетероструктуры и расчет параметров ЦЛЗ в тонких слоях In_2Te_3 и $In_{2x}Ga_{2(1-x)}Te_3$ ($x \sim 0.65$) произведен с учетом двух глубоких уровней (донорного и акцепторного типа). В связи с этим возникает вопрос о применимости теоретической модели решения уравнения электронейтральности и использованных в нем выражений для аналогичного типа структур с большим количеством ЦЛЗ и, возможно, другим набором типов центров.
3. Какое влияние оказывает тип глубоких уровней на диэлектрические свойства исследованных халькогенидов индия?
4. На рис. 2.3 толщина слоя $In_{2x}Ga_{2(1-x)}Te_3$, определяемая по сколу, приблизительно равна 600 нм и получена за 2 часа, а скорость напыления, указанная в тексте в пять раз меньше (~ 1 нм/мин).

В тексте диссертации и автореферата имеются отступления от общепринятых правил оформления и отдельные опечатки: используются разные обозначения для геометрической ёмкости C_1 или C_2 (с. 74 в диссертации и с. 8 в автореферате). Некоторые графики, отражающие результаты моделирования, (рис. 5а автореферата, рис. 4.7, 4.8. и 4.10 диссертации) имеют оси с плохо различимым масштабом.

Отмеченные выше недостатки не снижают общего положительного впечатления от диссертации. Основные результаты и положения, выносимые на защиту, достаточно полно отражены в 7 публикациях в журналах из перечня ВАК. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Заключение

Диссертация Михайлюк Е.А. «Электрофизические свойства полупроводниковых гетероструктур $In_2Te_3/InAs$ и $In_{2x}Ga_{2(1-x)}Te_3/InAs$ », представляет собой целостное научное исследование и соответствует требованиям к кандидатским диссертациям, изложенным в «Положении о присуждении учёных степеней», а соискатель заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – «физика полупроводников».

Диссертация и автореферат обсуждались на научном семинаре Лаборатории полупроводниковой люминесценции и инжекционных излучателей Центра физики наногетероструктур:

протокол № 1 от «26» 01 2016 г.

Председатель семинара,
заведующий лабораторией
д.ф.м.-н., профессор

Тарасов Илья Сергеевич

Ведущий научный сотрудник,
д.т.н., профессор

Арсентьев Иван Никитич

Секретарь семинара,
старший научный сотрудник,
к.ф.-м.н.

Пихтин Никита Александрович

Адрес организации:

ФГБУН «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской Академии Наук»,

194021, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26,

Лаборатория полупроводниковой люминесценции и инжекционных излучателей Центра физики наногетероструктур,

тел.: 8(812) 292-73-79, эл. почта: tarasov@hpld.ioffe.ru

Подпись <u>Тарасова И.С.</u>
<u>Арсентьева И.Н.; Пихтина Н.А.</u>
Завещаю
Зав. канцелярией
« <u>26</u> » <u>01</u> 20 <u>16</u> г.