

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Котова Геннадия Ивановича на тему
«Электронные и фотоэлектрические явления в гетероструктурах типа
 $A^{III}B^{VI}_2/A^{III}B^V$ с барьером Шоттки», представленной на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук по специальности 01.04.10 – «физика
полупроводников»

В текущем столетии стремительно развиваются исследования физических явлений в наноструктурированных материалах. Очевидно, что сформировалось новое научное направление, одним из объектов которого являются конденсированные среды с неоднородностями структуры нанометрового масштаба. Устройства электронной техники, изготавливаемые из наноматериалов и наноструктур, обладают рядом преимуществ: малые габариты, низкие управляющие напряжения и рабочие токи, высокие скорости срабатывания или переключения. Особое место среди этих систем занимают интегральные схемы и оптоэлектронные устройства на основе полупроводников типа $A^{III}B^V$ и гетероструктур на их основе. В свою очередь это требуют более детального и широкого исследования взаимосвязи физических явлений, протекающих на поверхности полупроводников в процессе формирования наноразмерных гетероструктур. В частности, высокая плотность поверхностных электронных состояний в запрещенной зоне полупроводников типа $A^{III}B^V$ и отсутствие однозначных данных об их природе являются одной из основных причин, сдерживающих расширение функциональных характеристик оптоэлектронных и СВЧ - устройств. В связи с этим цель и основные задачи данной работы являются актуальными.

Системный подход к анализу уже известных закономерностей изменения свойств полупроводников типа $A^{III}B^V$ и $A^{III}B^{VI}_2$ позволили автору более конкретно определить направления проведения исследований. Наиболее важными результатами, имеющими несомненную научную ценность, являются:

1. Впервые установлен факт снижения плотности поверхностных электронных состояний и, как результат, усиление зависимости высоты барьера Шоттки от работы выхода металлов в гетероструктуре $\text{Me}/\text{A}_2^{\text{III}}\text{B}_3^{\text{VI}}/\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ (для GaAs и GaP). Показано, что это приводит к увеличению фототока и напряжения холостого хода в гетероструктурах из-за уменьшения скорости поверхностной рекомбинации.

2. Впервые установлено, что образование поверхностной фазы $\text{A}_3^{\text{III}}\text{B}_4^{\text{VI}}(100)\text{c}(2\times 2)$ и $\text{A}_2^{\text{III}}\text{B}_3^{\text{VI}}(111)(\sqrt{3}\times\sqrt{3})-\text{R}30^0$ на подложках $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}(100)$ и $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}(111)$, соответственно, определяется конкуренцией влияния кристаллографической ориентации подложки и концентрации стехиометрических вакансий катионов в халькогенидах. Показано, что необходимым условием проявления данных закономерностей является образование монокристаллической поверхностной фазы халькогенида $\text{A}_2^{\text{III}}\text{B}_3^{\text{VI}}$ в квазистационарных условиях протекания реакции гетеровалентного замещения.

3. Впервые на основе установленного механизма протекания реакции гетеровалентного замещения предложен критерий начальной стадии данной реакции. Новым является интерпретация и применение вакансационной модели для описания атомной структуры поверхностных фаз и тонких слоёв халькогенидов.

4. На основе установленного механизма реакции гетеровалентного замещения предложен способ получения атомно-гладкой поверхности арсенида галлия и получен патент РФ. Электрофизическими методами показана возможность управления составом дефектов в приповерхностной области GaAs и соответствующими электронными состояниями, спектр которых можно стабилизировать на долгосрочный период. Эти результаты послужили основанием для получения патента РФ на способ консервации поверхности подложек из GaAs.

5. Анализ фотоэлектрических и структурных исследований позволил автору предложить перспективную модель многопереходного солнечного элемента на основе кремния типа $\text{GaAs}/\text{Ga}_2\text{Se}_3/\text{Si}(111)$ с увеличенным почти в 1,5 раза КПД по сравнению с однопереходной моделью.

Научная и практическая значимость результатов и выводов, полученных в работе, заключается в возможности их применения для анализа экспериментальных результатов, закономерностей и теорий, полученных на основе исследований других полупроводниковых гетеросистем. Полученные результаты открывают перспективы для дальнейших исследований в области управления дефектами и поверхностными электронными состояниями в гетероструктурах на основе композитных тройных и четверных твёрдых растворов полупроводников $A^{III}B^V$.

Анализ известных закономерностей (ширина запрещённой зоны от параметра решётки, параметра решётки от электроотрицательности) позволяет устанавливать дополнительные корреляции и взаимосвязи между полученными результатами, что обеспечивает достоверность и убедительность заключений и выводов. Эксперименты проводились автором многократно, поэтому сформулированные выводы являются следствием анализа большого числа полученных аналогичных результатов. Некоторые результаты и выводы согласуются с уже опубликованными в научной литературе результатами, полученными для других аналогичных гетероструктур. Результаты исследований и положения, сформулированные в диссертации, получены с применением современных методов исследования (атомно-силовой, растровой, просвечивающей микроскопии, рентгеноспектрального микроанализа). Дополнительную достоверность полученным результатам придаёт их непротиворечивость и возможность согласования с системой наиболее общих закономерностей и известных теорий физики полупроводников. В целом это обеспечивает достоверность полученных результатов и выводов.

Вместе с тем в работе обнаружены некоторые упущения и недостатки, по которым можно сделать следующие **замечания**.

1. **Положение 5** работы сформулировано неудачно, поскольку скорее представляет один из результатов работы (хотя и важный), нежели одну из установленных физических закономерностей.

2. В работе уделено мало внимания обоснованию выбора объектов исследования. В частности, не ясно, почему для исследования были выбраны гетероструктуры именно с использованием селенидов галлия или индия?

3. Автором установлено, что максимальная плотность наноостровков селенида галлия не зависит от температуры и типа подложки (InAs, GaAs, GaP), но не сказано, влияет ли плотность и размеры островков селенида галлия на электрофизические свойства исследованных гетероструктур?

4. В тексте диссертации имеются отступления от общепринятых правил оформления:

- в работе достаточно часто используются внесистемные обозначения толщины, температуры, давления;
- применяется нестандартная нумерация рисунков и формул не по главам, а по разделам (из четырех и трех цифр);
- с новой страницы начинаются не главы, а подразделы, при этом стр. 127 вообще оказалась пустой;
- в работе имеются отдельные опечатки (например, с. 41, 62, 75 и др.).

Однако, несмотря на отмеченные недостатки и возникшие вопросы, диссертация Котова Г.И. оставляет хорошее положительное впечатление. Рассматривая диссертационную работу Котова Г.И. в целом, следует отметить, что она является законченной научно-исследовательской работой, обладающей актуальностью, новизной, большим экспериментальным материалом по изучению электронных и фотоэлектрических явлений в гетероструктурах типа $A^{III}{}_2B^{VI}{}_3/A^{III}B^V$ с барьером Шоттки.

Текст диссертации Котова Г.И. изложен в доступной форме и снабжен достаточным количеством иллюстраций. Полученные в диссертации результаты по исследованию гетероструктур типа $A^{III}{}_2B^{VI}{}_3/A^{III}B^V$ с барьером Шоттки имеют важное научное и практическое значение. Содержание диссертации с необходимой полнотой отражено в автореферате. Основные результаты работы достаточно подробно опубликованы в виде научных статей в зарубежных и отечественных изданиях.

Диссертация Котова Г.И. своей актуальностью, степенью обоснованности положений, результатов и выводов соответствует требованиям к докторским диссертациям, установленным в «Положении о присуждении учёных степеней», а соискатель заслуживает присуждения ему учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.10 – «физика полупроводников».

Официальный оппонент
д.ф.-м.н., профессор

Калинин Юрий Егорович

Дата: 01.06.2015 г.

Заведующий кафедрой физики
твёрдого тела ФГБОУ ВПО «ВГТУ»,
394026, г. Воронеж,
Московский пр-т, 14,
Тел.: +7 (473) 246-66-47,
Электронная почта: kalinin48@mail.ru



Подпись Калинина Ю.Е.

ЗАВЕРЯЮ

А.В.Мандрыкин