О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию Котова Геннадия Ивановича «Электронные и фотоэлектрические явления в гетероструктурах типа $A^{III}{}_2B^{VI}{}_3/A^{III}B^{V}$ с барьером Шоттки», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.10 - физика полупроводников

Актуальность темы диссертации

Полупроводники типа $A^{III}B^{V}$ (арсенид галлия GaAs, арсенид индия InAs, фосфид галлия GaP и другие материалы из этого класса) имеют ряд перспективных преимуществ над кремнием в использовании для создания оптоэлектронных и сверхвысокочастотных устройств. Тем не менее, разработка и производство устройств на основе таких полупроводников частично ограничена из-за высокой плотности поверхностных электронных (ПЭС) состояний. Это особенно очевидно проявляется в низкоразмерных системах и в структурах с барьером Шоттки, которые формируются на поверхности. Отсутствие контроля электронных свойств поверхности и границ раздела оказывает некоторые ограничения на более широкое использование этих материалов.

Поверхностные электронные состояния приводят к такому явлению, как закрепление уровня Ферми или наличие постоянного изгиба зон на поверхности. Это может наблюдаться не только на свободной поверхности полупроводника, но и на границах раздела диэлектрик-полупроводник или металл-полупроводник. Во всех этих случаях высокая плотность ПЭС может быть обусловлена собственными дефектами полупроводника, несоответствием параметров кристаллических решёток контактирующих материалов или химическими реакциями на границе раздела. Именно поэтому **актуальным** является изучение этих явлений на примере гетероструктур типа $A^{III}{}_2B^{VI}{}_3/A^{III}B^{V}$ в рамках сформулированных в диссертации задач.

Научная новизна диссертационной работы

Основные результаты и выводы диссертации являются оригинальными и новыми. В процессе выполнения работ были разработаны новые методики

исследования, использованы новые подходы к анализу и сравнению полученных результатов, созданы новые объекты.

К таковым можно отнести следующие результаты и выводы:

1) Установлено, что общей причиной снижения плотности ПЭС и открепления уровня Ферми в гетероструктуре типа $Me/A_2^{III}B_3^{VI}/A^{III}B^{V}$, является образование в квазистационарных условиях монокристаллических поверхностных фаз халькогенидов. Условие минимальной степени рассогласования параметров решёток в гетероструктуре типа $A_2^{III}B_3^{VI}/A^{III}B^{V}$ обеспечивает минимальную плотность ПЭС на границе раздела, что приводит к уменьшению скорости поверхностной рекомбинации, увеличению интенсивности фотолюминесценции и эффективности фотопреобразования света.

2) Обработка в парах селена позволяет контролируемо изменять состав дефектов в приповерхностной области GaAs и уменьшать плотность всех типов ПЭС, наблюдаемых в наших экспериментах на реальной поверхности GaAs. Предложен способ консервации подложек из GaAs эпитаксиальным слоем Ga_2Se_3, предотвращающим образование собственных оксидов и последующих твёрдофазных реакций, которые могли бы ухудшить электронные свойства поверхности.

3) Предсказанная на основе зависимостей параметра решётки полупроводников $A^{III}B^{V}$ и $A_2^{III}B_3^{VI}$ от электроотрицательности аниона впервые обнаружена кубическая фаза селенида индия $In_2Se_3(100)(1\times1)$ с параметром решётки 0,564 нм на поверхности InAs(100).

4) С увеличением температуры подложек $A^{III}B^{V}(100)$ и ростом концентрации халькогена в $A^{III}B^{V}$ происходит структурный переход от поверхностной фазы типа $A_3^{III}B_4^{VI}(100)c(2\times2)$ к структуре типа $A_2^{III}B_3^{VI}(100)(2\times3)$ без упорядочения вакансий, и далее к образованию тонких слоёв монокристаллической фазы типа $A_2^{III}B_3^{VI}(100)(1\times1)$. А в исследованных диапазонах температуры подложек $A^{III}B^{V}(111)$ (GaAs (603 – 623 К), InAs (503 – 553 К) и GaP (723 – 803 К)) и длительности процесса ГВЗ (1 – 5 минут) наблюдается образование поверхностных фаз и тонких слоёв типа $A_2^{III}B_3^{VI}(111)(\sqrt{3}\times\sqrt{3})\text{-}R30^0$.

Научная и практическая значимость работы

Обширный экспериментальный материал, представленный в работе, позволил обосновать и сформулировать ряд новых значимых для физики полупроводников закономерностей и практических результатов. Обнаруженные закономерности уменьшения плотности ПЭС в гетероструктурах $Me/A^{III}{}_2B^{VI}{}_3$ – GaAs и $Me/A^{III}{}_2B^{VI}{}_3$ – GaP с барьером Шоттки несомненно имеют важное практическое значение для улучшения электрических и фотоэлектрических свойств гетероструктур на основе полупроводников $A^{III}B^{V}$. Также к практически значимым новым результатам следует отнести предложенный способы получения атомно-гладкой поверхности арсенида галлия с неоднородностью не более 0,3 нм. В перспективе данный способ может быть актуален для формирования низкоразмерных наногетероструктур. Кроме того, предложенный способ консервации поверхности подложек из GaAs также имеет перспективы практического применения в электронной промышленности. На основе предварительных электронно-микроскопических и фотоэлектрических исследований предлагается многопереходный солнечный элемент на основе гетероструктуры GaAs - Ga_2Se_3-Si(111).

Замечания и вопросы по диссертационной работе

1. Полученный в работе вывод о возможности получения гетероструктур $A^{III}{}_2B^{VI}{}_3/A^{III}B^{V}$ с низкими плотностями электронных состояний и открепленнием уровня Ферми было бы полезно количественно сравнить результатами других исследований, выполненных на материалах $A^{III}B^{V}$, например, научными группами В.Л.Альперовича и E.Yablonovich, что позволило бы лучше оценить практическую значимость разработанного в диссертации подхода.

2. Использование в работе метода фотолюминесценция для исследования фотоэлектронных свойств и плотности поверхностных электронных состояний изучаемых материалов и гетероструктур является слишком фрагментарным и не сопровождается количественными выводами. В то же время при использовании данного метода в более широком интервале температур и энергий фотонов возбуждающего излучения можно было бы получить более полную и количественную информацию об исследуемых свойствах.

3. В Гл.5 теоретически исследуются характеристики солнечных элементов на основе монокристаллических GaAs и Si с использованием эпитаксиальных слоев Ga_2Se_3 в качестве буферных и пассивирующих, но из приведенных выкладок не ясно, учитываются ли при этом электронные и оптические свойства последних. Поэтому вывод о перспективности предлагаемого солнечного элемента представляется не достаточно обоснованным.

4. В рукописи диссертации отсутствует список используемых сокращений и обозначений, что затрудняет ее чтение; в тексте имеются опечатки, в том числе в химических формулах анализируемых веществ, например, на стр.12 приведена формула «Ca_2Se_3»; сделанные в конце работы выводы являются чрезмерно лаконичными и техническими, например, выводы 7 и 9, содержат нерасшифрованные сокращения, например, ГВЗ,ХДП, и опечатки, например, слово «механизма» в выводе 4.

Заключение

Отмеченные замечания, недостатки и неточности не влияют на общее благоприятное впечатление от работы. Диссертация Котова Г.И. является научно-квалифицированной работой, обладающей новизной, научной и практической значимостью для физики полупроводниковых гетероструктур.

Текст диссертации обладает внутренней логикой и единством. Содержание работы соответствует поставленным целям и задачам исследования. На все источники заимствования в тексте диссертации имеются ссылки. Основные положения, выносимые на защиту, результаты и выводы достаточно полно отражены в 27 работах, опубликованных в изданиях из перечня ВАК, и прошли апробацию на российских и международных конференциях.

Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Считаю, что диссертация Котова Г.И. «Электронные и фотоэлектрические явления в гетероструктурах типа $A^{III}{}_2B^{VI}{}_3/A^{III}B^{V}$ с барьером Шоттки» соответствует требованиям к докторским диссертациям, установленным в «Положении о порядке присуждения учёных степеней», а её автор заслуживает

присуждения ему учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.10 – «физика полупроводников».

Дата: 08.06.2015 г.

Официальный оппонент:

Профессор кафедры физики низких температур
и сверхпроводимости физического факультета
ФГБОУ ВПО «Московский государственный
университет им. М.В. Ломоносова»
д.ф.-м.н., профессор Тимошенко Виктор Юрьевич

119991, Москва ГСП-2, Ленинские Горы, д.1, стр.2,
телефон: 8(495)939-46-81,

E-mail: timoshen@physics.msu.ru

Декан физического факультета
МГУ им. М.В. Ломоносова,
профессор Н.Н. Сысоев