**Жданова Татьяна Павловна. Электронная энергетическая структура соединений AIIIBV, AIVBIV и твёрдых растворов на их основе : диссертация ... кандидата физико-математических наук : 01.04.07.- Ростов-на-Дону, 2006.- 155 с.: ил. РГБ ОД, 61 07-1/201**

Российская государственная библиотека, 2007 (электронный текст)

61**:**07**-**1/201

ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

*на правах рукописи*

ЖДАНОВА Татьяна Павловна

ЭЛЕКТРОННАЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА СОЕДИНЕНИЙ АШВУ, AIVB1V и ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ НА ИХ ОСНОВЕ.

01.04.07 - физика конденсированного состояния диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Научные руководители; доктор физико-математических наук, профессор Никифоров И.Я. доктор технических наук, доцент Илясов В.В.

Ростов-на-Дону 2006 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.

ГЛАВА 1. ОСОБЕННОСТИ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ И ЭЛЕКТРОННОЙ СТРУКТУРЫ, ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ХИМИЧЕСКОЙ СВЯЗИ СОЕДИНЕНИЙ A'V и AIVBIV, А ТАКЖЕ ИХ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ.

1.1.Общая характеристика соединений типа АШВУ и A1VBIV и их кристаллическая структура.

1. Химические и электронные свойства соединений АШВУ и A1VB1V
2. Экспериментальные и теоретические исследования ЭЭС соединений A10BV и A1 BiV в различных модификациях.
3. Теоретические и экспериментальные данные возникновения твердых растворов на основе нитрида бора и карбида кремния.
4. Выводы по главе. Постановка задачи.

ГЛАВ А,2 .МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОННОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ БИНАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТИПА ВЮРЦИТ И ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ.

1. Применение метода полного многократного рассеяния в приближении локального когерентного потенциала для расчета ЭЭС соединений типа вюртцит.
2. Формирование кластера, распределение атомов по координационным сферам и вычисление констант Маделунга,
3. Построение кристаллического потенциала-
4. Вычисление фаз рассеяния
5. Вычисление локальных парциальных и полных плотностей электронных состояний.
6. Исследования метода на сходимость. Выводы по главе,

ГЛАВА 3. ЭЛЕКТРОННАЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И РЕНТГЕНОВСКИЕ СПЕКТРЫ НИТРИДА БОРА И КАРБИДА КРЕМНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ МОДИФИКАЦИЯХ.

1. .Электронная структура рассматриваемых кристаллографических модификаций нитрида бора и сравнение с экспериментальным рентгеновским фотоэлектронным спектром.
2. Электронная структура и рентгеновские спектры ЗС SiC и 2Н SiC.
3. ЭЭС и рентгеновские спектры широкозонных кристаллов AIN, BN. 57

3.4 Выводы по главе 62

ГЛАВА 4. ЭЛЕКТРОННАЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И 63 РЕНТГЕНОВСКИЕ СПЕКТРЫ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ НА ОСНОВЕ СОЕДИНЕНИЙ AmBv и AIVBIV

1. Особенности расчета электронной структуры твердых растворов 63 замещения: B]\_XNRXBNi JR\* и Sit.xCRx (х=0^0,75; R=C, О, Al, Ga).
2. ЭЭС и особенности химической связи твердых растворов на основе 65 соединений А3В5.
3. .Твердые растворы замещений Вi\_XNRX и BNi„xRx(R=C50, х=0-И), 65
4. Структурные и электронные свойства широкозонных 76 полупроводников AIN, BN и их твердых растворов BxAl].xN(x =0 +1).
5. Электронная энергетическая структура и рентгеновские спектры 89 w-GaN—► iv’-BxGai.xN-> w-BN (0<х<1).
6. Электронная структура рада oGaN —» *с*- BxGai.xN —> c-BN (0<х<1). 95
7. ЭЭС и рентгеновские спектры широкозонных полупроводников 101 GaN, A1N и AlN-GaN
8. Электронная структура и эволюция полосы запрещенных энергий в 109 твёрдых растворах AlxGai\_xN со структурой сфалерита..
9. Рентгеновские спектры и ЭЭС азота в твёрдых растворах AlxGai\_xN 114
10. Расчет плотностей электронных состояний твердых растворов 118 замещения на основе карбида кремния.
11. Расчет плотностей электронных состояний твердых растворов 118 замещения: Sij.xCRx(x=0-K).75; R= С, А1, Ті).

4.3.2.Электронная энергетическая структура широкозонных 126 полупроводниковых кристаллов А1,, Si j.xC с малой концентрацией.

1. ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 132

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ. 133

ЛИТЕРАТУРА 135

**ВВЕДЕНИЕ**

Одной из фундаментальных задач физики является описание сред с различного рода нарушениями регулярности. Так, наличие в кристаллической решетке дефектов типа случайного замещения, даже при достаточно малом проценте замещения, затрудняет последовательную постановку задачи расчета электронной структуры в рамках подходов, базирующихся на точной трансляционной симметрии. С другой стороны, по понятным причинам, привлечение чисто феноменологических теорий, равно как и создание “правдоподобных” компьютерных моделей, вряд ли следует считать приемлемым выходом из положения. Компромиссом здесь является нахождение оптимального сочетания первопринципных соображений с модельными допущениями, основанными на опытных данных. Именно такая попытка и делается в настоящей работе. Примененный здесь метод позволяет рассчитывать электронную структуру твердых растворов с произвольным числом замещения, а степень детализации описания - достаточна для уверенного различения разных структурных модификаций одного и того же состава по расчетным электронным распределениям.

Изучаемые в работе бинарные соединения (AIN, GaN, BN, Si С, алмаз и др.) и их твёрдые растворы, с одной стороны, являются наиболее перспективными широкозонными полупроводниками, а с другой - относятся к особо термостойким высокотемпературным соединениям]^ 1-4].

Полупроводниковые материалы на их основе представляют в настоящее время большой практический интерес для ряда новых отраслей техники, космической и атомной промышленности, тонких химических технологий и т.д. В частности, такие материалы находят широкое применение при создании высокоэффективных оптических накопителей информации, дисплеев, лазеров для полевых условий, экологических детекторов и пр. Действующие в твёрдых растворах возмущающие факторы, как-то: рассогласование решеток между слоями, деформация слоев в сверхрешётках вследствие спонтанной поляризации и т.п., - могут оказывать существенное влияние на электротехнические характеристики и электронную структуру полупроводников. Поэтому изучение эффектов, обусловленных взаимодействиями на уровне электронной подсистемы твёрдых растворов, является актуальной задачей

Для решения поставленной задачи потребовалась адаптация программ расчета электронной энергетической структуры (ЭЭС) к материалам со структурой типа вюртцит и нестехиометрическим твердым и сверхтвердым материалам. С этой целью в данной работе использовано кластерное приближение метода локального когерентного потенциала (ПЛКП), отличительной особенностью которого является принципиальная возможность учета локальных искажений кристаллической симметрии. Этот метод впервые был предложен Джиорффи [5,6] для сплавов и успешно развит для неупорядоченных систем [7,8]. Для нового класса соединений со структурой типа вюртцит ZnS и твердых растворов на их основе примененный метод ПЛКП ранее не использовался. В ряде случаев полученные расчеты позволяют не только объяснить, но и прогнозировать результаты эксперимента.

Цель работы. Исследование электронной структуры соединений AIHBV и AIVBIV в различных кристаллографических модификациях и твёрдых растворов на их основе.

При этом решались следующие основные задачи:

* Исследовать применимость метода локального когерентного потенциала для соединений АШВ\ AiVBiV в различных модификациях;
* Объяснить особенности и форму рентгеновских спектров исследованных соединений на основе рассчитанных локальных парциальных плотностей электронных состояний;
* Исследовать динамику перестройки в электронной энергетической структуре вюртцитных и сфалеритных твердых растворах AlN-GaN, BN-A1N, BN-GaN по мере изменения взаимной концентрации компонент;
* Изучить концентрационные зависимости ширины валентной и запрещенной полос твердых растворов вышеупомянутых систем.

В качестве **объектов исследования** были выбраны нитриды элементов 3-й группы периодической таблицы: такие как нитриды бора, алюминия, галлия, а также некоторые карбиды элементов 4-й группы, такие как карбид кремния и твердые растворы на их основе. Эти соединения могут существовать в вюртцито-(и’-), сфалерито-(с-) и графитоподобной (*h*-) модификациях. Исследовано 10 бинарных соединений и более 30 твердых растворов на их основе.

**Научная и практическая ценность**

В работе *впервые* проведены расчеты электронной структуры вюртцитных нитридов и карбидов методом ЛКП в рамках теории многократного рассеяния, что позволило провести интерпретацию экспериментальных данных по фотоэлектронному и рентгеновскому рассеянию для этих соединений. Метод расчета *впервые* апробирован для твердых растворов замещения, таких как BXNA1].X, B^NGa^ AlxNGai„x (х = 0;

1. 1; 0.25; 0.5; 0.7; 0.75; 1), R\*B]\_XN, R\*BN,\_X (R= С, О; х=0-1) и R\*Sij\_xC (x =
2. 01-0.5; R = С, Al, Ті). Рассчитанные парциальные электронные плотности сопоставлены с рентгеновскими спектрами бора, азота, алюминия, галлия, углерода и кремния в соответствующих бинарных соединениях. В предположении неизменности кристаллографической симметрии решетки, *впервые* прослежены изменения электронной энергетической структуры при постепенной замене одного из компонентов соединения другим. *Впервые* доказана применимость расчетов приближения виртуального кристалла для интерпретации электронных спектров твердых растворов (на примере соединения AlxNGaj.x).

*Впервые* в качестве исследуемого объекта рассматривалось не единичное соединение, а диаграмма состава как целое, что позволило качественно расширить классы изучаемых объектов и обеспечить универсальность постановки и серийность получаемых результатов. *Впервые* получены концентрационные зависимости модуля всестороннего сжатия В0 и ширины валентной и запрещенной полос для кубических и вюртцитных кристаллов

изученного класса соединений. Полученные результаты дают возможность новой интерпретации экспериментальных рентгеновских спектров для реальных полупроводниковых материалов.

**Основные научные положения» выносимые на защиту:**

1. Метод локального когерентного потенциала применим для расчетов электронной структуры широкозонных полупроводников со структурой вюртцита, сфалерита и графита. Метод дает результаты, согласующиеся с экспериментом, и имеет удовлетворительную сходимость по числу атомов в кластере,
2. В ряду “сфалерит - вгортцит - графит” переход от одного представителя к другому сопровождается качественным изменением формы распределения электронных состояний по энергии в валентной полосе, причем во всех рассмотренных случаях в сфалерите доминирует1 низкоэнергетический пик плотности электронных состояний, тогда как в вюртците - высокоэнергетический пик. В графитоподобиой модификации понижение симметрии сопровождается расщеплением спектра валентной полосы на отдельные компоненты.
3. Для твердых растворов системы Al-Ga-N расчеты электронной структуры по методу локально-случайного замещения и расчеты в приближении виртуального кристалла, дают эквивалентные результаты. Однако применение второго из сопоставляемых методов позволяет проводить расчеты для произвольных концентраций компонент, что значительно расширяет спектр соединений, доступных изучению.
4. В исследованных системах Al-Ga-N, B-Ga-N и B-A1-N имеет место нелинейная зависимость ширины запрещенной и валентной полос от концентрации компонент. Отклонение от линейности особенно велико в системе B-A1-N типа вюртцит, где оно достигнет - 0.9 эВ.

**Апробация работы.**

Результаты диссертации докладывались и обсуждались на:

• ЕМС-17 Seventeenth European Cry stallo graphic Meeting (Lissabon-Portugal, 24-28 Aug. 1997);

* Международной конференции “Новейшие процессы и материалы в порошковой металлургии” ("Киев, 1997);
* ЕСМ- 18: Materials Structure in Chemistry, Biology, Physics and Technology: Bui. of the Czech and Slovak Crystallographic Association. (Praha, 15-20 Aug. 1998);
* XVI научной школе-семинаре “Рентгеновские и электронные спектры и химическая связь” (г. Ижевск 15-18 декабря 1998);
* XVIII th IUCr Congress. (Glasgow, Scotland, Aug. 4-13 1999):
* XVII научной школе-семинаре “Рентгеновские и электронные спектры и химическая связь57, (г. Екатеринбург, 15-17 сентября 1999);
* 3rd Russian-German Seminar on Electron and X-Ray Spectroscopy. (Yekaterinburg, 1999);
* XVIII Научная школа-семинар “Рентгеновские и электронные спектры и химическая связь”: программа и тез. докл., 1Ы4 сеит.-Воронеж, 2000.

*і* h \*

* XAFS XI The 11 International Conference on X-ray Absorption Fine Structure, Ako Hygo Prefecture (Japan, 26-30 July 2000);
* PM2004 Powder Metallurgy World Congress (17-21 October, Vienna, 2004);
* 8-м международном симпозиуме “Фазовые превращения в твердых растворах и сплавах” (г. Сочи, 12-16 сентября 2005г);
* 2-й международной научно-технической конференции “Исследование разработка и применение высоких технологий промышленности” (г. Санкт - Петербург февраль 2006г.);
* 9-м международном симпозиуме “Упорядочение в металлах и сплавах” (г. Сочи, 12-16 сентября 2006г);

• 23rd European С crystallographic Meeting (Leuven, Belgium, 6-11 Aug.2006).

**Личный вклад соискателя.**

Лично автором проведены: анализ литературных источников по свойствам

объектов исследования для использования в качестве исходных данных в

расчетах; адаптация комплекса программ расчета электронной плотности

соединений со структурой вюртцит; все расчеты электронной структуры

соединений AmBv, A,VBIV и твердых растворов на их основе методом локального когерентного потенциала в приближении многократного рассеяния; создание вспомогательных интерфейсных элементов визуального контроля построения кристаллической решетки.

Апробация и сравнительное исследование метода расчета электронной энергетической структуры в приближения виртуального кристалла на примере твердых растворов проводились совместно с к.ф.-м.н. Б.В.Габрельяном.

Постановка задачи, анализ результатов и формулировка положений, выносимых на защиту, сделаны совместно с руководителями

И *.Я* .Ники ф ор овым и В.В. Плясовым.

Разработка методики расчета электронной энергетической структуры в приближении локального когерентного потенциала, алгоритм и базовая версия компьютерных программ выполнена сотрудниками группы **И.Я** .Никифоровы м.

1. ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ.

Сравнение ЭЭС рассмотренных твердых растворов и бинарного сфалеритного и вюртцитного нитрида бора, проведенное в рамках единого приближения приводит к следующим выводам:

Совпадение рассчитанных парциальных плотностей электронных состояний с экспериментальными рентгеновскими спектрами атомов бора, азота и примесей в исследованных соединениях следует призпатъ удовлетворительными.

В дефектных структурах (Bi.xNCx и BNi.xCx (B]\_xNO\* и BNi\_4Ox) х=(Ы).75) ВВП уширена и сдвинута в сторону более высоких энергий по сравнению с бинарными соединениями. В бинарном BN существует перенос заряда (0,3 5 е) от бора *к* азоту, а в случае B0.75NC0.25 направление переноса меняется на противоположное. В последнем случае азот «передает» бору 0.19е, а углерод выступает в роли донора электронных конфигураций и бора, и азота.

Для твердых растворов системы Al-Ga-N расчеты электронной структуры по методу локально-случайного замещения и расчеты в приближении виртуального кристалла, дают эквивалентные результаты. Однако применение второго из сопоставляемых методов, допускает расчет для произвольных концентраций компонент, что позволяет радикально расширить спектр изучаемых соединений.

Концентрационные зависимости ширины запрещенной и валентной полос в системах Al-Ga-N, B-Ga-N и B-A1-N носит нелинейный характер. Отклонение от линейности особенно велико в системе w-B-Al-N, где оно составляет ~ 0.9 эВ.

В твердых растворах BxAli.\*N (х = 0.25; 0.5; 0.75) зафиксирован перенос заряда от алюминия к азоту; величина переноса возрастает в обеих кристаллографических модификациях, по мере легирования бором.

В твердых растворах Sij.\*CRx (х = 0.25; R = С, А1, Ті) возникновение заполненных 3d-состояний алюминия и кремния с максимумом в окрестности пика Di может быть связано с понижением энергии d-состояний в карбидной системе кремния.

В исследуемых твердых растворах делокализация квазиостовных резонансов состояний, присущих бинарным соединениям, означает ослабление химической связи. Во всех рассмртренных соединениях перенос парциальных зарядов валентных электронов влияет на уширение ВВП, а легирующий элемент выступает в роли донора для электронных конфигураций основных атомов подрешеток.

Основные результаты и выводы:

1. Программа расчета кристаллического потенциала модифицирована в направлении увеличения допустимого числа атомов в рассчитываемом кластере. Это привело к качественному улучшению совпадения всех расчетных электронных распределений с соответствующими экспериментальными данными, взятыми из литературных источников,
2. Оценен вклад различных координационных сфер в формирование локальных парциальных электронных состояний компонентов исследованных соединений. Установлено минимальное число координационных сфер (около тридцати, что соответствует кластеру, состоящему из 251атомов), необходимых для достижения согласия с экспериментом, по крайней мере, для подобных соединений.
3. Хорошее соответствие рассчитанных результатов - экспериментальным данным у всех исследованных соединений (АШВУ , A1VBIV) подтверждает применимость метода локального когерентного потенциала для исследования электронной энергетической структуры подобных соединений.
4. Апробация подхода виртуального кристалла, более перспективного для расчетов нестехиометрических соединений, чем метод локально-случайного замещения, продемонстрировала эквивалентность (с точки зрения информативности и разрешения) результатов, полученных в рамках обоих подходов.
5. Благодаря использованию виртуального кристалла, удалось перейти от рассмотрения единичного соединения - к работе с диаграммой состава как целым, т.е. качественно расширить класс рассматриваемых объектов, общность применяемого подхода и серийность получаемых результатов.
6. При обсуждении влияния концентрации раствора на значения ширины ВВП (VB I), и запрещенной полосы (Eg) и модуля всестороннего сжатия (В0) была применена простая оценка степени нелинейности (‘"величина прогиба”) зависимости, хорошо согласующаяся с экспериментальными значениями.
7. Установлено, что ВВП соединений типа AmBv сформирована s-, р-, и d -состояниями элемента А и p-состояниями элемента В (азота).
8. Показано, что при расчете электронной энергетической структуры *w-* A1N и c-AIN d-состояния учитывать необходимо; в этом случае зафиксировано хорошее соответствие формы расчетных и экспериментальных электронных спектров.
9. В системе Si|,vCRx (х = 0.25; R = С, AI, Ті) возникновение заполненных 3 d-состояний алюминия и кремния можно связать с понижением энергии d- состояний в карбидной системе кремния.
10. Методом виртуального кристалла проведен расчет концентрационной зависимости электронной структуры твердых растворов: c-B^NR\*. c-BNi^R\*, *с-* Si].xC.Rx (R=C, О); *w-* и c-BxGai\_xN; *w-* и c-AlxGat.xN; *w-* и c-BxAit.xN во всем диапазоне концентраций (0<х<1). Показано, что в дефектных структурах вершина валентной полосы во всех случаях уширена и сдвинута в сторону более высоких энергий, по сравнению с положением в бинарных соединениях.
11. При вычислении парциальных зарядов электронов в ВВП соединений типа AinBv, обнаружено, что в некоторых случаях (например, в c-BJMC /\_д) перенос заряда, при одних значениях *х* (0< *х<* 0.75) протекающий от элемента А - к элементу В, при других значениях (х>0.75) может происходить в обратном направлении (от В - к А), причем третий элемент (С, в данном примере - углерод) во всех случаях выступает в роли донора электронов как для А, так и для В.
12. Концентрационные зависимости модуля всестороннего сжатия Во, а также ширин валентной(\/В I) и запрещенных полос(Еа) для обеих кристаллографических модификаций заметно отклоняются от линейности, причем величина «прогиба» концентрационных зависимостей Eg(x) и VBI(x) ~
13. 3 2 эВ. У сфалеритной модификации это значение примерно в ] .5^2 раза

меньше, чем у вюртцнтной. Физическая причина обнаруженной нелинейной зависимости, предположительно, связана со сложным характером зависимости перекрывания электронных волновых функций от длины химсвязи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Synthesis and Properies of Boron Nitride. Edited by J.J. Pouch and Alteroviz // Trans Tech. Aedermannsdirf, Switzerland, 1990. 220 p.
2. Новиков H.B., Оситинская Т.Д., Шульженко А.А.. Теплопроводность монокристаллов кубического нитрида бора.// Докл. АН УССР, 19 83-Сер. А-10,- с.74-77.
3. Новиков Н.В., Шульженко А.А., Петруша И.А..Поликристаллический сфалеритоподобный нитрид бора высокой теплопроводности.// Сверхтвердые материалы.1987.- 6. с.3-8.
4. Калашников *Я.* А. Физическая химия веществ, при высоких давлениях. М. “Высшая ш кол а”1987. -23 8с.
5. Gyorffy B.L. Coherent-potential approximation for a non-over- lapping muffm-tin model of random substitutional alloys// Pliys.ReV. B: Condensed Matter -1972.- 5,
6. -p.23 82-23 84.
7. House D., Gyorffy B.L., Stocks G.M. The coherent potential approximation for a cluster of nonoverlapping scatterers // J. de Physique (Paris). -1974.- 35, 5,-p,C4-75 - C4-85.
8. Штерн E.B. Электронная структура бинарных неупорядоченных сплавов замещения А1 с Bd-металлами и Nb-W . Дисс. канд. физ.-мат наук. Ростов н/Д. 1981,222с.
9. Сафоицева Н.Ю. Электронная энергетическая структура некоторых алмазоподобных полупроводниковю Дисс. канд. физ.-мат. Наук. Ростов н/Д. 1994,185с.
10. Китгель Ч. Введение в физику твердого тела. М: Наука, 1978. - 791с.
11. Шаскольская М.П. Кристаллография. М.: Высшая школа, 1984.-375с.
12. Уманский Я.С., Скаков Ю.А., Иванов А.Н., Расторгуев JI.H. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия.// Металлургия. 1982.-631с.
13. Анималу А. Квантовая теория кристаллических твердых тел. М.;Мир.1981- 574с.
14. Приходько Л.И. Исследование условий получения материалов на основе нитрида бора и алюминия.//Порошковая металлургия.-1966.- l-c.17-22.
15. Шишонок Н.А., Шипило В.Б. Электропроводность поликристаллов ЕШСф, полученных прямым фазовым превращением из пиролитического нитрида бора.//Г1орошковая металл у р г ия. -1992. -8. ~ с. 14-18.
16. Русакова Л,Н., Романии Ф.Г., Куликова Г.И., Голубева О Л. Проблемы и перспективы развития керамики из BN.// Порошковая металлургия -1988.-1.- с.23-31.
17. Курдюмов А.В., Островская II. Ф., Пилянкевич А.Н. и др. Кристаллическая структура вюртцита нитрида бора, образующегося при высоких статических давлениях.//Докл. АН СССР.-1976.- **229, 2.-С.338-340.**
18. Самсонов Г.В. Неметаллические нитриды. М.: Металлургия 1969-264с.
19. Bugrov V., Levinshtein М.Е., Rumyantsev S.L., Zubrilov A., in Properties of Advanced SemiconductorMaterials GaN, AIN, InN, BN, SiC, SiGe. Eds. Levinshtein ME., Rumyantsev S.L., Shur M.S., John Wiley & Sons, Inc., New York, 2001. p.l- 30
20. Wentorf R.H. Synthesis of the cubic form of boron nitide.//J.Chem.Phys.,1961- **34,** 3.-p,809-812
21. Leszczynsld, М., H. Teisseyre, T. Suski, 1, Grzegory, M. Bockowski, J. Jun, S. Porowski, K. Pakula, J.M. Baranowski, C.T. Foxon, T.S. Cheng. Lattice parameters of gallium nitride.//Appl. Phys. Lett. 1996.-69,1.- p.73-75
22. Jin-Cheng Zheng, Hui-Qiong Wang, C.H.A.Huan and A.T.S.Wee. The structural and electronic properties of (AlN)x(C2)i„x and (A!N)x(BN)j\_x // J.Phys.:Condens. Matter 2001- 13-P.5295-5311.
23. Qian W., Skowronski М., Rohrer G.R. Structural defects and their relationship to nucleation of GaN thin films, in ПІ-Nitride, SiC, and Diamond Materials for Electronic Devices. Eds. Gaskill D.K, Brandt C.D. and Nemanich R.J., Material.// Research Society Symposium Proceedings, Pittsburgh, PA. 1996,- 423 -p. 475-486.
24. ГнесинГ.Г. Карбидокремниевые материалы. М.Металлургия 1977.-215с.
25. Rumyantsev S.L., Levinshtein М.Е., Jackson A.D., Mohammmad S.N., Harris G.L., Spencer M.G., Shur M.S. in Properties of Advanced SemiconductorMaterials GaN, AIN, InN, BN, SiC, SiGe . Eds. Levinshtein M.E., Rumyantsev S.L., Shur M.S., John Wiley & Sons, Inc., New York, 2001, p. 67-92.