

Исследование МНЕМТ гетероструктуры с каналом $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$, выращенной методом МЛЭ на подложке GaAs, с помощью построения карт обратного пространства

© А.Н. Алешин*[¶], А.С. Бугаев*, М.А. Ермакова⁺, О.А. Рубан*

* Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук, 117105 Москва, Россия

⁺ Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии, 119421 Москва, Россия

(Получена 12 января 2015 г. Принята к печати 5 февраля 2015 г.)

На основе построения карт обратного пространства были определены кристаллографические характеристики элементов конструкции МНЕМТ гетероструктуры с каналом $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$. Гетероструктура была выращена методом молекулярно-лучевой эпитаксии на видиальной поверхности подложки GaAs с углом отклонения от плоскости (001) на 2° и состояла из ступенчатого метаморфного буфера, содержащего 6 слоев, включая инверсную ступень, высокотемпературного буферного слоя постоянного состава и активных НЕМТ слоев. Содержание InAs в слоях метаморфного буфера варьировалось от 0.1 до 0.48. Карты обратного пространства строились для симметричного отражения (004) и асимметричного отражения (224)⁺. Было обнаружено, что слои гетероструктуры характеризуются как углом наклона по отношению к плоскости подложки (001), так и углом поворота вокруг оси [001]. По мере увеличения концентрации InAs в слое угол наклона слоя увеличивается. Показано, что высокотемпературный буферный слой постоянного состава имеет наибольшую степень релаксации по сравнению со всеми другими слоями гетероструктуры.

1. Введение

Широкополосные беспроводные сети передачи информации (mesh-сети, мобильные сети, скрытые сети), спутниковое зондирование атмосферы, системы безопасности (сканирование человека), радиолокация с высоким пространственным разрешением двойного назначения — все эти системы работают в миллиметровом диапазоне длин волн.

Для построения таких систем требуются базовые монолитные интегральные схемы — МИС (малошумящий усилитель — МШУ, мощный выходной усилитель — МВУ) с достаточно высокими частотными характеристиками в рассматриваемом диапазоне частот (коэффициент усиления, коэффициент шума, линейная удельная выходная мощность). Такие МИС строятся на основе полевых транзисторов с барьером Шоттки на гетероструктурах с двумерным электронным газом (НЕМТ — High Electron Mobility Transistor), формирующимся в канале InGaAs вблизи гетерограницы с более широкозонным полупроводником AlGaAs (или InAlAs). Чем больше мольная доля индия, тем выше транспортные свойства канала, т.е. способность транзистора работать на более высоких частотах, но меньше максимальное напряжение работы транзистора (напряжение пробоя). При изменении мольной доли индия от нуля до единицы напряжение пробоя транзистора уменьшается с 30 В до долей вольта, что приводит к ограничению максимальной удельной выходной мощности транзистора.

С ростом мольной доли индия быстро увеличивается постоянная решетки слоя InGaAs , которая уже не со-

гласуется с постоянной решетки подложки GaAs. Слой InGaAs с мольной долей индия 0.53 согласуется по постоянной решетки с подложкой InP, но эти подложки дорогие и крайне хрупкие, что резко ограничивает выход годных изделий и повышает их стоимость. Кроме того, именно НЕМТ с содержанием индия 30–40% в канале InGaAs позволяет получать компромиссное решение как по частотным, так и по мощностным характеристикам [1–6].

Гетероструктуры практически с любым содержанием индия в слое InGaAs/InAlAs можно выращивать на подложках GaAs с использованием специального метаморфного (ММ) буфера переменного состава, в котором постоянная решетки в начале роста близка к GaAs, а в конце роста совпадает с заранее выбранной. При этом практически все дислокации, возникающие при релаксации механических напряжений из-за несогласования кристаллических решеток, оказываются внутри ММ-буфера и не прорастают в активные слои. Подложку GaAs с выращенным на ней ММ-буфером можно рассматривать как метаподложку с желаемой постоянной решетки, на которой уже можно выращивать гетероструктуры InGaAs/InAlAs практически с любым содержанием индия. Транзисторы на таких структурах получили название МНЕМТ — Metamorphic НЕМТ [7].

Наибольшее распространение получили МНЕМТ с ММ-буфером InAlAs с линейно или ступенчато возрастающей мольной долей индия, который выращивается методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках GaAs при пониженной до $\sim 300\text{--}400^\circ\text{C}$ температуре. После формирования метаморфного буфера выращиваются активные слои НЕМТ гетерострукту-

[¶] E-mail: a.n.aleshin@mail.ru

ры InAlAs/InGaAs/InAlAs при стандартной температуре $\sim 500^\circ\text{C}$. В правильно сконструированном и выращенном ММ-буфере все дислокации, образующиеся при релаксации механических напряжений, возникающих из-за рассогласования кристаллических решеток, должны оставаться внутри ММ-буфера и не прорасти в верхние активные слои НЕМТ гетероструктуры. Для этого необходимо также, чтобы верхние слои ММ-буфера были свободны от механических напряжений, что достигается при больших степенях релаксации решетки.

При оптимизации конструкции ступенчатого ММ-буфера можно варьировать толщину каждой ступени, величину приращения мольной доли индия [8], а также параметры так называемой инверсной ступени [9]. При оптимальной структуре ступенчатого ММ-буфера в активных слоях гетероструктуры, а также в верхнем высокотемпературном буферном слое постоянного состава, расположенного над инверсной ступенью, должна реализовываться наиболее высокая степень релаксации решетки по сравнению со всеми другими слоями.

Наиболее распространенным методом определения механических напряжений, а также степени релаксации решетки в тонкопленочных системах является высокоразрешающая рентгеновская дифрактометрия [10]. Однако корректное определение степени релаксации в буферных слоях стандартными методами рентгеноструктурного анализа (на основе съемки кривых дифракционного отражения) осложняется многослойностью и сложностью архитектуры гетероструктуры. Сложность архитектуры многослойной гетероструктуры заключается в образовании между слоями углов наклона, которые зачастую имеют также и компоненту кручения [11]. Такое сложное в кристаллографическом отношении устройство гетероструктуры требует построения карт обратного пространства [12,13], которые позволяют путем качественного сравнения определить также и степень совершенства слоя [14]. Следует отметить, что корректное построение карт обратного пространства требует больших временных затрат работы рентгеновского дифрактометра и значительных усилий. Поэтому зачастую в рентгенографических исследованиях многослойных гетероструктур с использованием этого метода ограничиваются получением качественной информации, сочетая симметричную и асимметричную съемки. Такой прием был применен, в частности, при исследовании согласования слоев сверхрешеток [15].

Настоящая работа выполнена с целью проведения кристаллографической аттестации и определения структурного состояния слоев МНЕМТ гетероструктуры с каналом $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$, выращенной методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на подложке GaAs, с помощью построения карт обратного пространства. В работе показано, что подбирая определенным образом толщину буферных слоев и изменение концентрации In в буферных слоях, представляющих собой ряд тройных твердых растворов InAlAs переменного состава, а также используя в конструкции гетероструктуры инверсную ступень,

можно добиться наибольшей степени релаксации в верхнем высокотемпературном буферном слое постоянного состава. Ценность такого исследования заключается в том, что оно позволяет оптимизировать конструкцию и технологию изготовления ММ-буфера.

2. Экспериментальная часть

2.1. Структура образца

В работе была исследована МНЕМТ гетероструктура, выращенная на вицинальной поверхности подложки GaAs с ориентацией (001) с углом отклонения 2° . Гетероструктура была выращена на установке МЛЭ RIBER 32P. Гетероструктура состояла из активных слоев InAlAs/InGaAs/InAlAs с содержанием индия в каждом слое 40% и 6-ступенчатого ММ-буфера с толщиной каждого слоя 0.2 мкм. Изменение мольной доли индия в твердом растворе InAlAs при переходе от одной ступени к другой для первых четырех ступеней было равно $+0.1$; для пятой ступени $+0.08$; для шестой (инверсной) ступени -0.09 . Слои ступенчатого ММ-буфера выращивали при температуре подложки 400°C при постоянной температуре источника алюминия. Прерывание роста между ступенями ММ-буфера не проводилось. Высокотемпературный буферный слой постоянного состава $\text{In}_{0.4}\text{Al}_{0.6}\text{As}$ выращивался при температуре 500°C и имел толщину 0.2 мкм. Состав элементов конструкции гетероструктуры контролировался температурой молекулярных источников In, Al, Ga, As и Si на основе калибровки температурной зависимости молекулярных потоков. Последовательность роста эпитаксиальных слоев МНЕМТ гетероструктуры, а также содержание InAs в каждом слое представлены на рис. 1.

2.2. Рентгеновская съемка

Рентгеновская съемка была выполнена с помощью рентгеновского дифрактометра Bruker d8 discover с

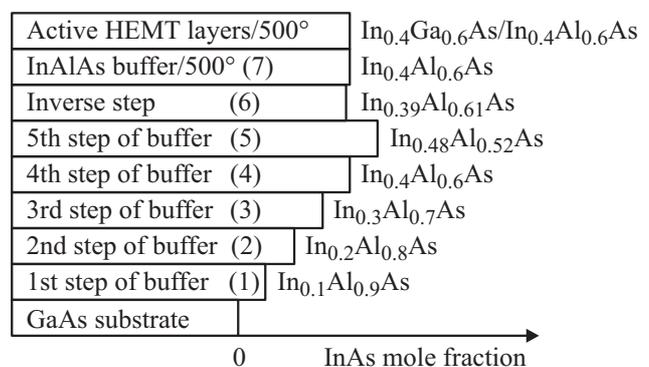


Рис. 1. Схематическое изображение последовательности элементов конструкции МНЕМТ гетероструктуры с содержанием мольной доли индия в канале 0.4.

водоохлаждаемым медным катодом в трех- и двухосевой геометрии. При трехосевой геометрии в качестве кристалла-анализатора использовался монокристалл германия с ориентацией (022). В случае двухосевой геометрии ширина щели детектора рентгеновского излучения равнялась 0.1 мм. Рентгеновская съемка проводилась в медном излучении K_{α_1} с длиной волны 0.154056 нм в пошаговом режиме работы дифрактометра: для симметричного отражения 004 при азимутальных углах 0° (с использованием третьего кристалла), 90° , 180° и 270° и для асимметричного отражения 224+ — скользящее отражение — при азимутальном угле 0° (двухосевая геометрия с узкой щелью детектора). Во время съемки производилась регистрация рентгеновского излучения для выбранного отражения путем сканирования вдоль вектора рассеяния H_{hkl} : H_{001} (при симметричной съемке) и H_{224} (при асимметричной съемке) в режиме так называемого $\omega - 2\theta$ сканирования. При симметричной съемке 004 исходное положение подложки ($\Delta\omega = 0$) соответствовало брэгговскому максимуму. При асимметричной съемке 224+ варьировались значения hkl , что позволило разложить вектор рассеяния H_{224} по направлениям [001] и [110]. Асимметричная съемка 224+ дает наиболее четкое разрешение рентгеновских интерференционных максимумов (каждый из которых соответствует определенному слою гетероструктуры) по сравнению с отражением 224— (скользящее падение) и с отражением 224. Более подробно процедура проведения рентгеновской съемки для построения карт обратного пространства описана в [12,13].

2.3. Построение карт обратного пространства

Для эпитаксиальных гетероструктур, имеющих планарную геометрию, карты обратного пространства представляют собой контуры равной интенсивности отраженного рентгеновского излучения, представленные в осях обратного по отношению к кристаллической решетке пространства. Для эпитаксиальных пленок, выращенных на подложках GaAs с ориентацией (001), актуальными осями обратного пространства являются ось [110] (ось Y) и ось [001] (ось Z). Выявляемые на картах обратного пространства пучности изоконцентрационных контуров соответствуют интерференционным максимумам рентгеновского излучения. Координаты пучностей (рентгеновских максимумов) определяются векторами q_{110} и q_{001} , которые представляют собой отклонения (вдоль соответствующих осей обратного пространства) неосновных рентгеновских максимумов от основного рентгеновского максимума, H_{hkl}^0 , соответствующего подложке. Величина вектора q_{110} , имеющего направление вдоль оси обратного пространства Y, определяется угловым отклонением $\Delta\omega$ подложки от положения под углом Брэгга. При симметричной съемке 004 для определения координат рентгеновских максимумов в случае их частичного перекрытия, например для слоев 3

и 7, 4 и 7, применяли технику моделирования скана рентгеновского излучения набором гауссианов, для чего использовали программу Origin 8.1. При таком моделировании медианное значение гауссиана $q_{001}^{(7)}$ всегда совпадало с центром рентгеновского пика, полученного от высокотемпературного буферного слоя постоянного состава, который имел максимальную высоту по сравнению со всеми другими пиками и всегда фиксировался. Координаты $q_z^{(3)}$ и $q_z^{(7)}$ определяли в соответствии с максимальными значениями высоты смоделированных рентгеновских пиков. В модельном спектре гауссиан, соответствующий слою 4, являлся фактически подгоночным и слой 4 при построении экспериментальных графиков не учитывался. При асимметричной съемке 224+ значения векторов q_y и q_z для всех рентгеновских максимумов (за исключением максимумов, соответствующих слоям 4 и 6, которые на фоне максимума от слоя 7 были не видны) определяли на основе определения максимального значения рентгеновского излучения, используя специальную опцию Origin 8.1.

2.4. Определение угловых характеристик эпитаксиальных структур

На основе двумерных карт обратного пространства были определены следующие кристаллографические параметры эпитаксиальных слоев: азимутальный угол наклона α , непосредственно измеряемый в эксперименте, угол наклона пленки к подложке α_0 и угол азимутальной коррекции φ_c , который отражает наличие во взаимном расположении пленки и подложки компоненты кручения. Данные угловые характеристики описывают взаимное расположение двух кристаллических фаз в пространстве в общем случае, что иллюстрирует рис. 2. Расчет велся на основе следующих выражений, связывающих угловые

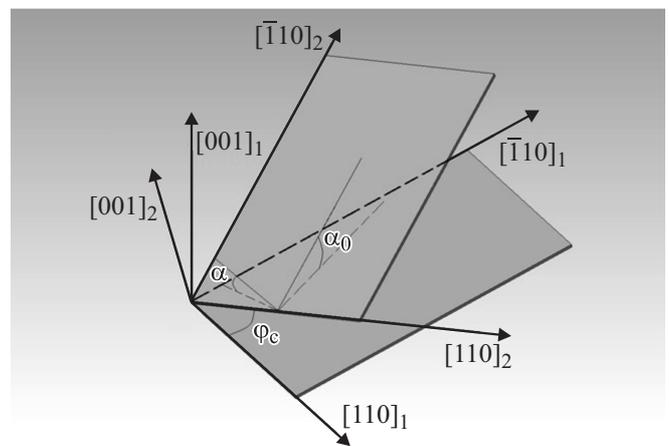


Рис. 2. Взаимное пространственное расположение эпитаксиальной пленки и подложки, имеющее как компоненту наклона, так и компоненту кручения.

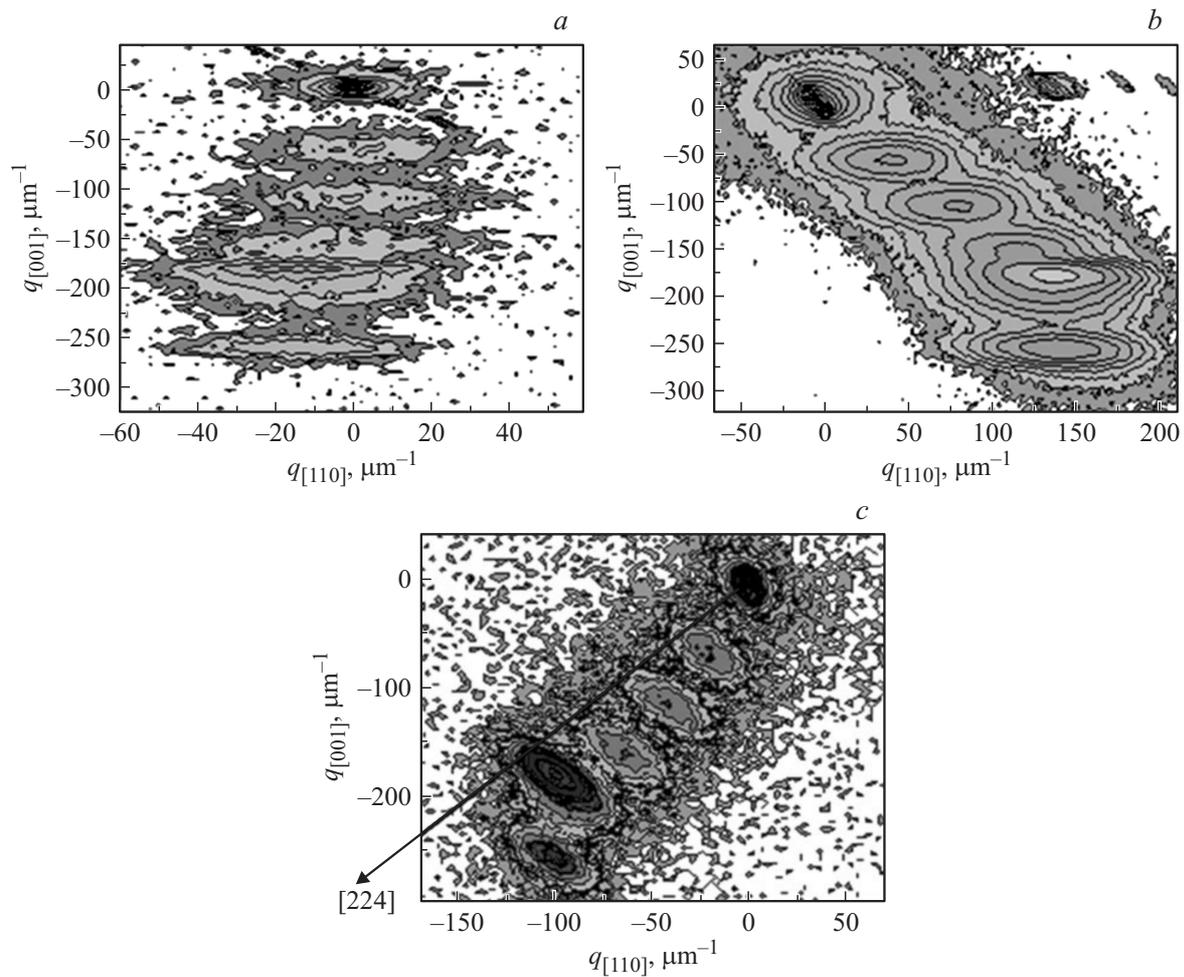


Рис. 3. Карты обратного пространства для симметричного отражения 004 при азимутальном угле 0° (a), при азимутальном угле 90° (b) и для асимметричного отражения 224+ при азимутальном угле 0° (c).

характеристики между собой [11,14]:

$$\alpha = \arctg \frac{|(q_{x,0} - q_{x,180})/2|}{(4/a_s - |q_z|)}, \quad (1)$$

$$\alpha = \alpha_0 \sin(\phi + \phi_c), \quad (2)$$

$$\phi_c = \arctg \frac{\alpha_1}{\alpha_2}, \quad (3)$$

где ϕ — азимутальный угол, α_1 и α_2 — азимутальные углы наклона при азимутах 0 и 90° .

3. Результаты и обсуждение

Карты обратного пространства приведены на рис. 3. Расположение интерференционных максимумов на картах обратного пространства, полученных для отражении 004 при азимутальных углах 180° и 270° , было симметрично относительно оси $[001]$ расположению интерференционных максимумов для азимутальных углов 0° и 90° соответственно. Полученные максимумы были идентифицированы в соответствии с элементами

(слоями) конструкции гетероструктуры. Последовательность значений $|q_z|$ в порядке возрастания их величины соответствует следующим элементам конструкции ММ-буфера: 1, 2, 3, 7, 5 (наличием слоев 4 и 6 в силу невозможности определить значение $|q_z|$ пренебрегали). Значения $|q_y|$, $|q_z|$, α , α_0 и ϕ_c приведены в таблице.

Полученная карта обратного пространства для отражения 224+ позволяет качественно определить степень релаксации в эпитаксиальных слоях, для которых были идентифицированы рентгеновские максимумы. При проведении оценки степени релаксации следует учесть, что на оси обратного пространства $[224]$ могут располагаться только рентгеновские максимумы, соответствующие изоморфным структурам, в нашем случае — соответствующие подложке и полностью релаксированным структурам. Неполная релаксация решетки, а также угол наклона эпитаксиальной пленки к подложке, на которой она выращена, смещают интерференционный максимум рентгеновского отражения от линии $[224]$ на расстояние h , что схематически показано на рис. 4. Изображенные на рис. 4 рентгеновские максимумы соответствуют

Значения векторов обратного пространства для симметричного отражения 004 и угловые характеристики слоев наногетероструктуры

Слой	q_{001} , $мкм^{-1}$	q_{110} , $мкм^{-1}$		α , град		α_0 , град	ϕ_c , град
		Азимут 0°	Азимут 90°	Азимут 0°	Азимут 90°		
1	-62.74	0	40.21	0	0.344857	0.35	0
2	-110.24	0	78.80	0	0.648169	0.65	0
3	-152.43	-3.00	114.64	0.024828	0.948671	0.95	1.50
7	-181.52	-13.60	138.78	0.1130349	1.1533006	1.16	5.60
4	-187.94	-12.90	133.00	0.1073104	1.10624193	1.11	5.54
5	-260.73	-13.75	139.50	0.1156029	1.17268169	1.18	5.63

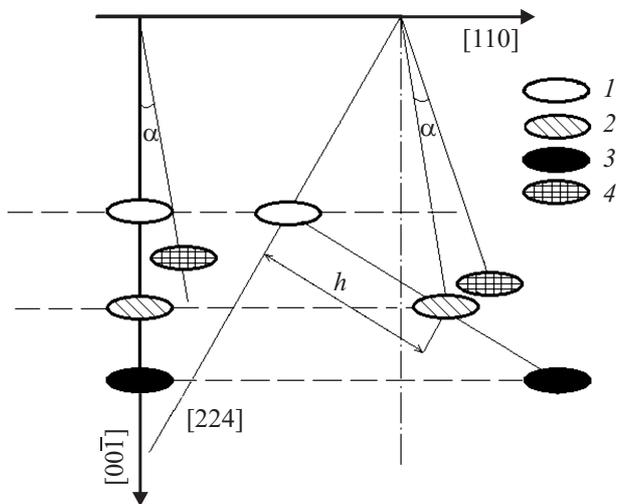


Рис. 4. Схематическое расположение интерференционных максимумов на картах обратного пространства для симметричного отражения 004 и асимметричного отражения 224. Положения рентгеновских максимумов 1, 2, 3 соответствуют полностью релаксированной, частично релаксированной и полностью деформированной эпитаксиальным структурам. Положение рентгеновского максимума 4 соответствует частично релаксированной эпитаксиальной структуре при угле наклона более 5° .

полностью релаксированной, частично релаксированной и полностью деформированной структурам. При симметричной съемке 004 в отсутствие угла наклона переход от полностью релаксированной структуры к полностью деформированной сопровождается только изменением величины вектора q_z , появление угла наклона приводит к смещению рентгеновского максимума вдоль оси Y , а при больших углах наклона (более 5°) к дополнительному смещению вдоль оси Z . Из рис. 4 также видно, что для асимметричной съемки 224 при переходе от полностью релаксированной структуры к полностью деформированной структура величина h возрастает. Если смещение рентгеновского максимума от оси $[224]$ обусловлено одновременно влиянием релаксации решетки и углом наклона α_0 , то выявление влияния на величину h

степени релаксации решетки возможно только в случае, если зависимости h и α_0 от какого-либо общего для них параметра демонстрируют разный тип поведения. В нашей работе в качестве такого параметра была выбрана концентрация InAs в твердом тройном растворе InAlAs.

На рис. 5 представлены зависимости α_0 и h от мольной доли X_{InAs} . Видно, что эти зависимости разные:

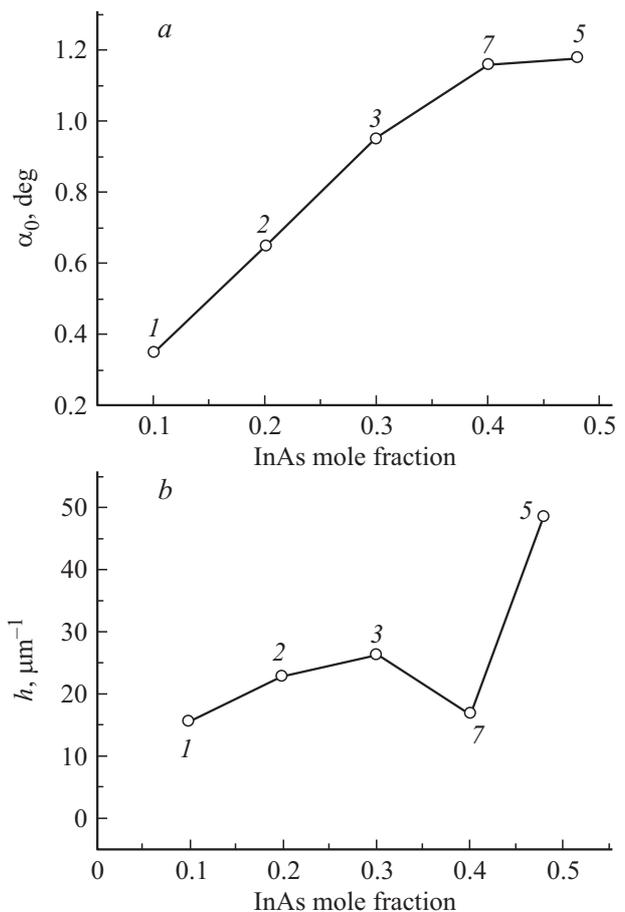


Рис. 5. Зависимости угла наклона α_0 (a) и отклонение положения рентгеновского максимума h от оси $[224]$ (b) от содержания InAs в соответствующих элементах конструкции гетероструктуры. Цифрами 1, 2, 3, 5, 7 обозначен порядковый номер элементов гетероструктуры в соответствии с рис. 1.

зависимость $\alpha_0(X_{\text{InAs}})$ представляет собой гладкую монотонную функцию, имеющую при больших значениях X_{InAs} асимптотический характер, в то время как зависимость $h(X_{\text{InAs}})$ имеет минимум в области значений $X_{\text{InAs}} = 0.4$. Наличие такого минимума ясно указывает на более высокую степень релаксации решетки высокотемпературного буферного слоя постоянного состава 7 (а следовательно, и более высокое совершенство его структуры) по сравнению со всеми другими слоями. Таким образом, данное экспериментальное исследование подтверждает перспективность введения инверсной ступени в метаморфный буфер ступенчатого типа, а также правильность выбора всей конструкции ММ-буфера и МНЕМТ гетероструктуры в целом.

4. Заключение

Методом построения карт обратного пространства было показано, что пространственное расположение слоев эпитаксиальной МНЕМТ гетероструктуры с мольной долей индия $X_{\text{InAs}} = 0.4$ характеризуется набором угловых параметров, включающих не только угол наклона, но и азимутальный угол коррекции. В структурном отношении сложная архитектура такой гетероструктуры может быть аттестована величиной линейного отклонения центров рентгеновских максимумов от оси [224] при построении карты обратного пространства для асимметричного отражения 224+ (скользящего отражения). Результаты измерений показывают, что при выбранной конструкции ММ-буфера с инверсной ступенью высокотемпературный буферный слой постоянного состава $\text{In}_{0.4}\text{Al}_{0.6}\text{As}$, на котором выращены НЕМТ активные слои, обладает более совершенной структурой по сравнению со всеми другими слоями метаморфного буфера, что позволяет улучшить параметры МНЕМТ на основе такой гетероструктуры.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение о предоставлении субсидии № 14.607.21.0011, уникальный идентификатор проекта RFMEF160714X0011).

Список литературы

- [1] M. Zaknour, M. Ardouin, Y. Cordier, S. Bollaert, B. Bonte, D. Theron. *IEEE Electron Dev. Lett.*, **24**, 724 (2003).
- [2] M. Boudrissa, E. Delos, C. Gaquiere, M. Rousseau, Y. Cordier, D. Theron, J.C. Jaeger. *IEEE Trans. Electron Dev.*, **48**, 1037 (2001).
- [3] S. Bollaert, Y. Cordier, V. Hoel, M. Zaknour, H. Happy, S. Lepilliet, A. Cappy. *IEEE Electron Dev. Lett.*, **20**, 123 (1999).
- [4] Sung-Won Kim, Kang-Min Lee, Sae-Hak Lee, Kwang-Seok Seo. *IEEE Electron Dev. Lett.*, **26**, 787 (2005).
- [5] А.С. Бугаев, Г.Б. Галиев, П.П. Мальцев, С.С. Пушкарев, Ю.В. Федоров. *НМСТ*, **10**, 14 (2012).
- [6] V.A. Kulbachinskii, N.A. Yuzeeva, G.B. Galiev, E.A. Klimov, I.S. Vasil'evskii, R.A. Khabibullin, D.S. Ponomarev. *Semicond. Sci. Technol.*, **27**, 035021 (2012).
- [7] D.V. Lavrukhin, A.E. Yachmenev, R.R. Galiev, R.A. Khabibullin, D.S. Ponomarev, Yu.V. Fedorov, P.P. Maltsev. *Semiconductors*, **48**, 69 (2014).
- [8] Hyonkwang Choi, Joongseok Cho, Minhyon Jeon. *J. Korean Phys. Soc.*, **54**, 643 (2009).
- [9] Y. Cordier, D. Ferre. *J. Cryst. Growth*, **201/202**, 263 (1999).
- [10] Ю.П. Хапачев, Ф.Н. Чухновский. *Кристаллография*, **34**, 776 (1989).
- [11] D. Lee, M.S. Park, Z. Tang, H. Luo, R. Beresford. *J. Appl. Phys.*, **101**, 063 523 (2007).
- [12] В.А. Бушуев, Р.Н. Кютт, Ю.П. Хапачев. *Физические принципы рентгенодифрактометрического определения параметров реальной структуры многослойных эпитаксиальных пленок* (Нальчик, Кабардино-Балкарский гос. ун-т, 1996).
- [13] Д.К. Боуэн, Б.К. Таннер. *Высокоразрешающая рентгеновская дифрактометрия и топография* (СПб., Наука, 2002).
- [14] J.-M. Chauveau, Y. Androussi, A. Lefebvre, J. Di Persio, Y. Cordier. *J. Appl. Phys.*, **93**, 4219 (2003).
- [15] J.W. Eldredge, K.M. Matney, M.S. Goorsky, H.C. Chui, J.S. Harris, jr. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **13**, 689 (1995).

Редактор А.Н. Смирнов

Investigation of MHEMT heterostructure with $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ channel, grown by MBE on GaAs substrate, using reciprocal space mapping

A.N. Aleshin*, A.S. Bugaev*, M.A. Ermakova⁺, O.A. Ruban*

* Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics, Russian Academy of Sciences, 117105 Moscow, Russia

⁺ Center for study of surface and vacuum properties, Federal Agency on Technical Regulating and Metrology, 119421 Moscow, Russia

Abstract The crystallographic parameters of elements constituted a MHEMT heterostructure with $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ channel, grown on GaAs substrate, were determined by X-ray reciprocal space mapping. The heterostructure consists of six layers of metamorphic step-graded InAlAs buffer including an inverse step, a high-temperature InAlAs buffer of permanent composition and the active HEMT layers. The mole fraction of InAs in a ternary solid solution of InAlAs was ranged from 0.1 up to 0.48. Reciprocal space mapping was performed for 004 symmetrical and 244+ asymmetrical reflections. It was established that the heterostructure layers are characterized by both a tilt angle and a twist angle. As the mole fraction of InAs in a layer increases the tilt angle is also increased. It is shown that the high-temperature buffer layer of permanent composition manifests the highest degree of structure relaxation in comparison with all another buffer epilayers.