
ОПТИЧНА І КВАНТОВА ЕЛЕКТРОНІКА В КОМП'ЮТЕРНИХ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

УДК 621.315.592.2

В.И. ОСИНСКИЙ, О.Д. ДЯЧЕНКО, П.В. ДЕМИНСКИЙ

УПРАВЛЕНИЕ СВОЙСТВАМИ СЛОЖНЫХ III-ОКСИДНЫХ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ТЕХНОЛОГИИ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ НА НИТРИДАХ ГАЛЛИЯ, ИНДИЯ И АЛЮМИНИЯ

*Государственное предприятие «Научно-исследовательский институт микроприборов»
НТК «Институт монокристаллов» НАН Украины,
ул. Северо-Сырецкая, 3, г.Киев, 04136,
тел./факс +38(044)434-72-77, E-mail: info@imd.org.ua*

Аннотация. В работе рассмотрены свойства III-оксидов, типа $(AB)_2C_3$, где А и В – катионы (металлы III-группы), а С – анионы (кислород), как структурных элементов оптоэлектронных информационных энергетических систем. Более детально описан $(AlGa)_2O_3$: процесс замещения атомов катионов Ga в кристаллической решетке оксида Ga_2O_3 атомами катионов Al и управление свойствами. Подобный оксид получается путем магнетронного напыления металлов Al и Ga на кремниевую пластину и дальнейшим окислением полученной пленки AlGa электролитическим методом. При концентрации Ga=93%, а Al=7% удается достичь идеального согласования с GaN по параметрам решетки *b*, *c*. Также исследовались оксиды галлия, индия и алюминия, образованные окислением моноатомных слоев арсенида галлия, фосфида индия и арсенида галлия-алюминия, выявлено наличие многоатомных образований – кластеров галлия, галлия-алюминия, индия или галлия-индия-алюминия. Установлена зависимость количества кластеров от степени легирования твердых растворов примесью селена.

Abstract. In this paper of the III-oxides properties such $(AB)_2C_3$, where A and B are cations (metals of III- group), and C are anions (oxygen) are considered. Process of substituting for the atoms of Ga cations in the crystalline lattice of Ga_2O_3 oxide by the atoms of Al cations and control of properties $(AlGa)_2O_3$ is described in detail. A similar oxide turns out by the way of magnetron sputtering metals of Al and Ga on a silicon plate, and by further oxidization of the film of AlGa by an electrolytic method. When the concentration of Ga=93%, and Al=7% it is succeeded to attain an ideal interface with GaN on the parameters of lattice of *b*, *c*. The gallium, indium and aluminium oxides, formed by oxidization of monoatomic layers, indium phosphide and gallium-aluminium arsenide were also investigated. The presence of polyatomic films - clusters of gallium, gallium-aluminium, indium or gallium-indium-aluminium are educed. The amount dependence of clusters on the degree of doping selenium of solid state solutions are setting.

Ключевые слова: III-оксид, II-оксид, кристаллическая решетка, замещение катионов (анионов), кластер, sp^3 - связь.

ВВЕДЕНИЕ

Нитриды III группы (Al, Ga, In)N имеют прямую структуру зон с шириной запрещенной зоны 6,2 эВ (AlN), 3,4 эВ (GaN), 1,9 эВ (InN). Они и твердые растворы на их основе являются перспективными материалами для оптоэлектронных устройств, работающих во всей видимой, голубой, фиолетовой и ультрафиолетовой областях спектра. Высокая эффективность излучательной рекомбинации в них обусловлена меньшей вероятностью образования дефектов в кристаллической решетке нитридов, чем в решетках арсенидов и фосфидов, в связи с более сильной связью атомов металлов с атомами азота, чем с атомами мышьяка и фосфора.

Нитриды галлия, алюминия и индия используют для изготовления ультрафиолетовых датчиков, а также для НЕМТ-транзисторов в том числе в качестве буферных слоев или подзатворных диэлектриков.

Однако их широкое применение сдерживается несоответствием параметров их кристаллических решеток и подложек. В настоящее время, в качестве основного подложечного материала используется сапфир (Al_2O_3) с буферным слоем AlN , сейчас же более активно разрабатывают буферные слои для кремниевой подложки – тройные оксиды (Ga_2O_3 , In_2O_3). Новейшее направление – это смесь тройных оксидов.

Данная статья посвящена решению проблемы несоответствия параметров решетки подложки и активного слоя с помощью буферного слоя III -оксида $(\text{AlGa})_2\text{O}_3$. Исследуется возможность прецизионного управления параметрами решетки III -оксидов с помощью катионного замещения.

ТЕХНОЛОГИЯ III -ОКСИДОВ

Оксид типа $(\text{AlGa})_2\text{O}_3$ можно получать различными методами.

Метод совместного осаждения заключается в смешивании $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ и $\text{Ga}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, добавлении гидроксида аммония, в количестве необходимом для установления $\text{pH}=8$, нагревании на маленьком огне, на протяжении 24 часов, и непрерывном помешивании. Готовые кристаллы промываются в дистиллированной воде и сушатся при 100°C [1].

Гликольтермический метод – галлий ацетилацетонат и фосфид алюминия помещаются в пробирку с гликолем, ее помещают в автоклав, в зазоре между стенкой автоклава и пробиркой располагается гликоль. Автоклав нагревается до температуры 300°C с шагом $2,5^\circ\text{C}/\text{мин.}$, эта температура удерживается 2 часа, затем охлаждается до комнатной температуры. При всем процессе через автоклав прогоняется азот, полученный продукт промывается в ацетоне и высушивается на центрифуге [2].

В данной статье предлагается использовать комбинированный метод: магнетронное напыление плюс электролитическое окисление. При магнетронном напылении использовались две мишени: галлиевая и алюминиевая. Пленка AlGa напылялась на подложку Si (111) при температуре 540°C . Дальнейшее электролитическое окисление пленки AlGa проходило в два этапа: 1-й этап – окисление в щавелекислом электролите при напряжении 60 В, получали 80 % необходимой толщины оксида; 2-й этап – окисление в фосфорнокислом электролите при напряжении 120 В. Во время процесса, окисляемые пластины постоянно двигались со скоростью 20 м/мин. Готовую пленку $(\text{AlGa})_2\text{O}_3$ промывали в дистиллированной воде и высушивали на центрифуге.

УПРАВЛЕНИЕ РЕШЕТКОЙ ИЗМЕНЕНИЕМ СОСТАВА ЭЛЕМЕНТОВ III -ГРУППЫ

Для прецизионного управления параметрами решетки широко используются методы зонной инженерии [3], в которой производится замещение атомов катионов и/или анионов в кристаллических решетках III -оксидов другими атомами III (катионы) или V (анионы) группы, что позволяет расширить или сузить решетку в определенном направлении.

Впервые анионно-катионное управление параметрами кристаллических решеток в полупроводниковых структурах A^3B^5 было осуществлено нами в системе твердых растворов InGaAsP [4]. В настоящей работе обосновывается применение этого принципа для оксидов III -группы $(\text{AlGaIn})_2\text{O}_3$.

Сложные химические соединения III -оксидов с различными атомами элементов третьей группы обладают более сложными структурными и физико-химическими характеристиками, чем простые с одним сортом атомов III -группы с аналогичной кристаллической решеткой, что обусловлено различием размеров и масс атомов III -группы и различием сил связи между разными атомами. Поэтому представляет существенный интерес раздельное определение статических смещений для каждого сорта атомов в сложном соединении.

Смещение атомов кристаллической решетки характеризует ее энергию и характер межатомных связей [5]. Различие масс атомов компонентов обуславливает различие сил связи между разными атомами. Дифракционные спектры рентгеновских лучей не позволяют определить одновременно два структурных фактора для одной и той же спектральной линии. На основании рентгенографического анализа определены статические смещения атомов для оксида алюминия-галлия $(\text{AlGa})_2\text{O}_3$. Более легкие и меньшие атомы алюминия смещаются больше при образовании сложного соединения, чем тяжёлые и большие атомы галлия. Соответствующие смещения атомов сложного соединения $(\text{AlGa})_2\text{O}_3$ занимают промежуточные положения.

Рассеяние рентгеновских лучей происходит в основном на электронах, что позволяет определить распределение потенциала в кристалле и косвенно определить положение ядер в решетке. Функция атомного рассеяния выражается соотношением:

$$f = 2\pi^2 r \rho' \sum_j Z_j + \int_0^\infty U(r) \frac{\sin(\mu r)}{\mu r} dr ,$$

где $U(r)$ – радиальная электронная плотность в атоме, Z_j – атомный номер j элемента, входящего в состав молекулы.

$$U(r) = 4\pi \rho'(r) r^2 dr ; \mu = \frac{4\pi \sin \nu}{\lambda} ;$$

где $\rho'(r)$ - электронная плотность в точке с координатой r .

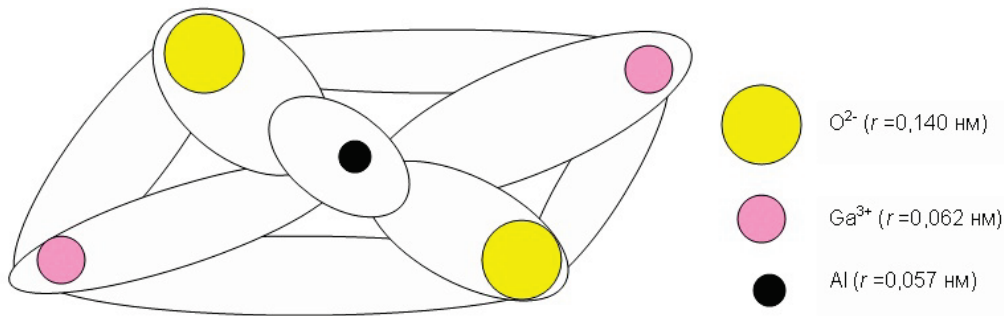


Рис.1. Области перекрытия мостиков sp^3 -связей в $(AlGa)_2O_3$

Области перекрытия электронных областей характеризуют sp^3 -связи, осуществляющиеся при замене части атомов алюминия на атомы галлия в оксиде алюминия Al_2O_3 . Области перекрытия мостиков sp^3 -связей можно представить эллипсоидами вращения (рис.1), для которых:

$$\rho(x, y, z) = A \exp(-\gamma x^2 - \beta(y^2 + z^2)),$$

где величины A , γ и β характеризуют форму мостиков и близлежащие межатомные расстояния.

При смещении ядер происходит изменение перекрытий электронных оболочек, что в свою очередь приводит к появлению дипольных моментов электронных оболочек и следовательно дополнительных кулоновских сил, которые характеризуют гетерополярные кристаллы.

Структурные параметры оксидов с различной концентрацией Al и Ga приведены в табл.1 [1], где также указаны их параметры при различной температуре отжига.

Рассмотрим особенности управления параметрами решетки (периодом идентичности) на примере $(AlGa)_2O_3$. Он представляет собой комбинацию: $Ga_2O_3 + Al_2O_3$, виды их кристаллических решеток представлены на рис.2 (2,3). Ga_2O_3 являет собой призму, а Al_2O_3 вытянутый куб. В зависимости от преобладания концентрации Al или Ga в $(AlGa)_2O_3$, меняются и параметры решетки (табл.3). Металлы Al и Ga называют катионами(A, B), а кислород O анионом (C).

Рассмотрим общий случай: $(AB)_2O_3$. В стехиометрических формулах соединений $(AB)_2C_3$ число анионов равно числу катионов. При неупорядоченном распределении катионов образуется кубическая структура сфалерита (см. рис.2 (1)). При упорядоченном распределении атомов двух сортов катионов элементарная ячейка деформируется в направлении оси c , и структура становится тетрагональной (халькопирита). Впервые примененное нами анионно-катионное управление периодом идентичности твёрдых растворов A^3B^5 позволило получать почти идеальные гетерограницы в системе $InGaAsP$, что существенно снизило дефектность и увеличило квантовый выход излучательной рекомбинации в светодиодах и гетеролазерах.

Таблица 1

Характеристики оксида (AlGa)₂O₃

Состав катионов	T _{отж} (К)	Al/Ga соотношение атомных радиусов	Фаза	Размер, Å		
				a	b	c
Al ₁ Ga ₀			аморфный			
Al _{0,75} Ga _{0,25}			аморфный			
Al _{0,50} Ga _{0,50}			аморфный			
Al _{0,25} Ga _{0,75}			аморфный	4,5493	9,7548	2,9531
Al ₁ Ga ₀	673		GaOОН	4,5695	9,8105	2,9734
Al ₀ Ga ₁			γ -Al ₂ O ₃			
Al _{0,75} Ga _{0,25}			γ -Al ₂ O ₃			
Al _{0,50} Ga _{0,50}			γ -Al ₂ O ₃			
Al _{0,25} Ga _{0,75}			α -Ga ₂ O ₃	4,9568		13,3677
Al ₁ Ga ₀	1073		α -Ga ₂ O ₃	4,9787		13,4322
Al ₀ Ga ₁			γ -Al ₂ O ₃	7,9028		
Al _{0,75} Ga _{0,25}		3* 4.48+	γ -Al ₂ O ₃	7,9439		
Al _{0,50} Ga _{0,50}		1* 1.61+	γ -Al ₂ O ₃	8,0222		
Al _{0,25} Ga _{0,75}		0.33* 0.53+	β -Ga ₂ O ₃	12,1892	3,0199	5,7886
Al ₁ Ga ₀	1473	0	β -Ga ₂ O ₃	12,2604	3,0326	5,8077
			α -Ga ₂ O ₃			
Al ₀ Ga ₁			α -Al ₂ O ₃	4,7558		12,9741
Al _{0,75} Ga _{0,25}			α -Al ₂ O ₃	4,7861		13,0400
Al _{0,50} Ga _{0,50}			β -Ga ₂ O ₃	11,5951	2,9892	5,8854
Al _{0,25} Ga _{0,75}			β -Ga ₂ O ₃	12,0086	3,0006	5,7294
Al ₀ Ga ₁			β -Ga ₂ O ₃	12,1905	3,0439	5,7888

(*) номинальный атомный радиус.

(+) экспериментальный атомный радиус.

В настоящей работе рассмотрены особенности катионного управления периодом идентичности оксидов галлия-индия-алюминия аналогично твердым растворам соединений A³B⁵.

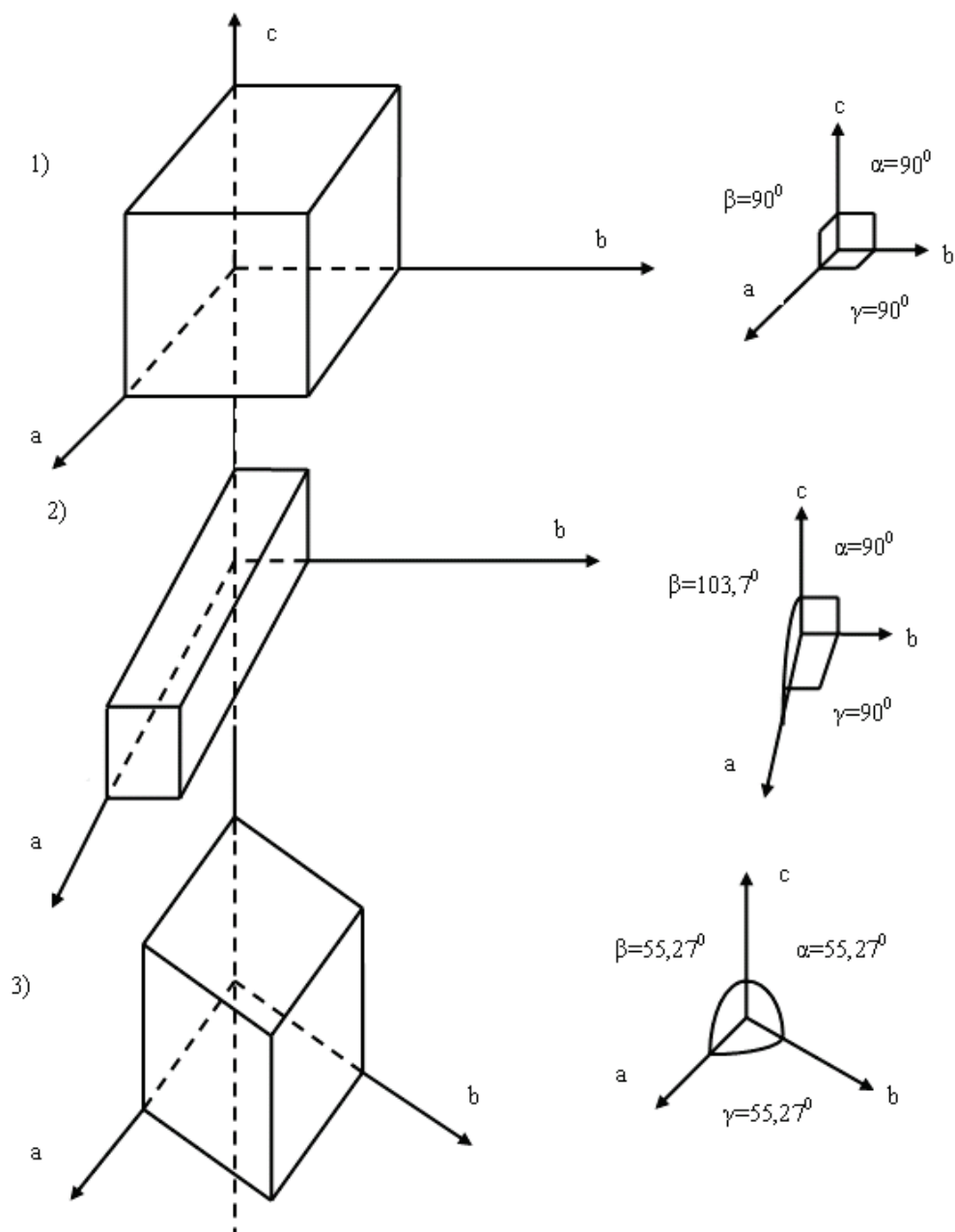


Рис.2. Кристаллическая решетка: 1) кубическая сингония (In_2O_3) ($a = b = c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$); 2) моноклинная сингония (Ga_2O_3) ($a \neq b \neq c$, $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$); 3) тригональная ромбоэдрическая сингония (Al_2O_3) ($a = b = c$, $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$)

АНАЛИЗ ХИМИЧЕСКОЙ СВЯЗИ В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ III-ОКСИДАХ

Бинарные полупроводниковые соединения кристаллизуются в кубической алмазоподобной решетке сфалерита, в которой на каждый атом кристаллической структуры должно приходиться четыре валентных электрона, а число анионов равно числу катионов.

В трёх и больше компонентных соединениях типа ABC элементарная ячейка кристалла имеет увеличенный размер по сравнению со структурой алмаза. Результатом этого является увеличение периода идентичности в направлении оси c , а элементарная ячейка становится тетрагональной со структурой халькопирита. Кристаллическая решетка трёх и более компонентных соединений приобретает дополнительное тетрагональное искажение которое характеризуется отношением периодов идентичности по направлениям, например, отношение c/a лежит между 1 и 2. Степень

тетрагонального искажения характеризуется величиной:

$$\delta = a - \frac{c}{2}.$$

Величина δ связана с различием размеров катионов и/или анионов. Элементарные тетраэдры оказываются деформированными. Деформация тетраэдров приводит к различному изменению параметров решетки в направлении координатных осей a , b и c . Тетрагональное искажение решетки δ тем сильнее, чем больше разность ионных радиусов катионов и больше ионность связей всего соединения [5]. Величина тетрагональности δ пропорциональна фактору $\Delta r \Delta \bar{x}$, где Δr – разность ионных радиусов катионов, а $\Delta \bar{x}$ – средняя разность электроотрицательностей в связях соответствующего соединения, т.е. δ связано с наличием не менее двух разных сортов атомов в катионной или анионной подрешетках. Так как энергия ковалентной связи пропорциональна величине перекрытия валентных оболочек атомов, то в результате появления тетрагонального искажения энергия ковалентной связи уменьшается по сравнению со значением энергии ковалентной связи в кристалле без тетрагонального искажения, т.е. величина тетрагонального искажения решетки δ характеризует степень искажения sp^3 -связей. С этим искажением связано изменение ширины запрещенной зоны E_g , которая в большей степени определяется ионной, а не ковалентной составляющей энергии связи. Ширина запрещенной зоны E_g у соединений обладающих большей тетрагональностью и относительно уменьшенной энергией ковалентного взаимодействия оказывается выше, чем у соответствующих соединений, связи в которых искажены слабо. Этим объясняется характер уменьшения E_g в ряду твердых растворов $Al_2O_3 \rightarrow Ga_2O_3 \rightarrow In_2O_3$ (5,9 эВ \rightarrow 4,9 эВ \rightarrow 3,6 эВ) и соответствующего изменения параметров идентичности кристаллической решетки по направлениям координат (табл.2).

Поскольку катионное управление периодом идентичности (параметром кристаллической решетки) связано с окислением металлических нанослоев галлия, индия и алюминия и их твердых растворов, в наноизмерении важно учитывать образование кластеров, которое экспериментально наблюдается в соединениях A^3V^5 , особенно в арсениде галлия [7].

Исследование спектров рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии оксидов галлия, индия и алюминия, образованных окислением монокристаллических слоев арсенида галлия, фосфида индия и арсенида галлия-алюминия показывают наличие многоатомных образований – кластеров галлия, галлия-алюминия, индия или галлия-индия-алюминия. Кластеры образуются при газоразрядном легировании этих структур селеном из ионных источников сплавов селена с галлием, индием и алюминием [8]. Наблюдается малая зависимость процессов образования нанокластеров от состава распыляемых электродов, что может быть обусловлено механизмами автоэлектронной эмиссии, а образование кластеров обусловлено неравномерным распределением энергии связи в кристаллической решетке. Зависимость коэффициента ионного распыления (K) от параметров веществ можно определить в виде:

$$K = \sigma \sqrt{\frac{\varepsilon E}{E_c}},$$

$$\varepsilon = \frac{2M_1M_2}{(M_1 + M_2)^2},$$

где M_1 и M_2 – массы распыляемых атомов, σ – фактор взаимодействия атомов в решетке, E – энергия разрыва связей электрическим полем искрового разряда, E_c – энергия связи ионов металлов в образующейся плёнке оксида. При анализе окисленной поверхности арсенида галлия-алюминия наблюдаются скопления галлия, галлия-алюминия, и не замечено образования кластеров алюминия, хотя чувствительность метода рентгеновский фотоэлектронной спектроскопии была достаточна для их регистрации. Установлена зависимость количества кластеров от степени легирования твердых растворов примесью селена.

Эксперименты показывают отсутствие чисто статистического характера распределения кластеров, а наличие некоторой закономерности в их пространственном распределении, которую необходимо учитывать в приборных наноструктурах (рис.3). Это свидетельствует о том, что кластеры

являются продуктом взаимодействия атомов основного вещества с атомами примесей, которые участвуют в образовании периодических волн энергии связи, которые наблюдаются в многокомпонентных материалах [9], что особенно важно учитывать при формировании наноповрхности для последующей эпитаксии на ней приборных гетероструктур с высоким соответствием параметров идентичности решетки.

В табл. 2 приведены параметры кристаллических решеток III-нитридов и III-оксидов [10-12]. Как видно из нее расхождение между параметрами решеток наиболее используемой подложки сапфира Al_2O_3 и нитрида галлия GaN значительно (14 %). Лучшее согласование при использовании в качестве подложек карбида кремния SiC (3,5 %), однако его высокая стоимость удорожает приборы, что сдерживает их массовое применение для освещения. Используя соединение $(AlGa)_2O_3$ можно добиться лучшего согласования с GaN, а именно в направлениях b и c оно будет идеальным (см. табл.3). Аналогично для AlGaN и InGaN.

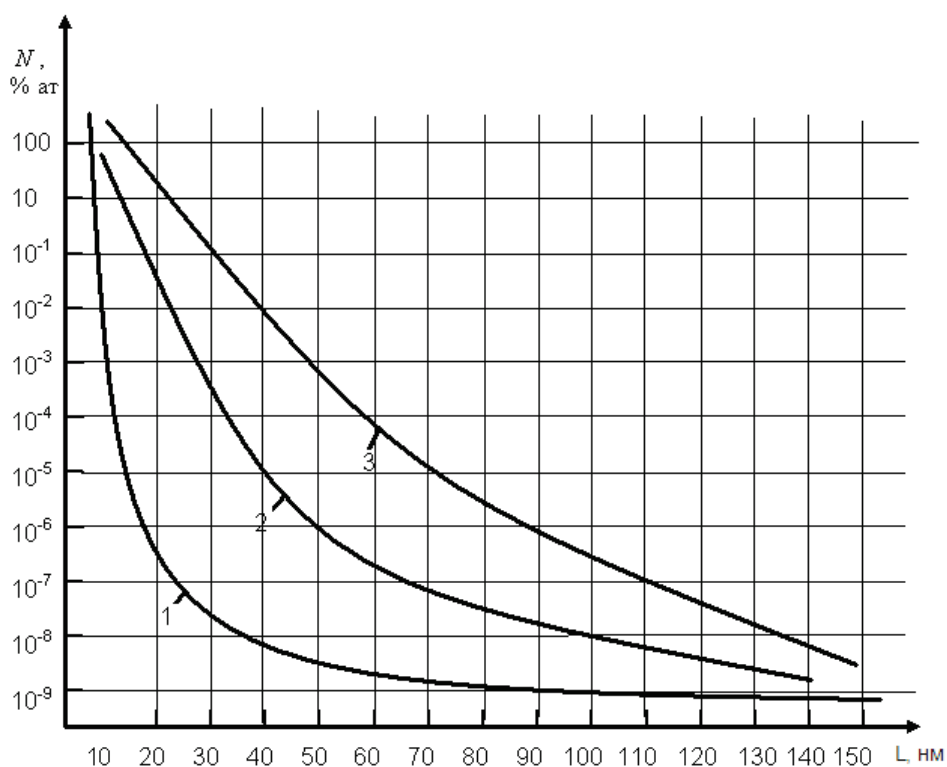


Рис.3. Зависимость количества кластеров (N) от их размера (L) в направлениях кристаллической решетки a (1), b (2) и c (3)

Таблица 2

Параметры кристаллической решетки III-оксидов и III-нитридов

	$a, \text{Å}$	$b, \text{Å}$	$c, \text{Å}$
In_2O_3	10,1056	10,1056	10,1056
Ga_2O_3	12,23	3,0371	5,7981
Al_2O_3	5,128	5,128	5,128
GaN	3,189	3,189	5,1851
AlGaN	3,1725	3,1725	5,1503
InGaN	3,2309	3,2309	5,2987

Таблиця 3

Ідеальний склад оксиду для активного шару

Напрямок кристалічної осі	Активний шар	Ідеальний склад оксиду для активного шару	Параметр ідентичності, Å
<i>b</i>	GaN	$(Al_{0,073}Ga_{0,927})_2O_3$	3,189
	AlGaN	$(Al_{0,065}Ga_{0,935})_2O_3$	3,1725
	InGaN	$(Al_{0,093}Ga_{0,907})_2O_3$	3,2309
<i>c</i>	GaN	$(Al_{0,915}Ga_{0,085})_2O_3$	5,1851
	AlGaN	$(Al_{0,967}Ga_{0,033})_2O_3$	5,1503
	InGaN	$(Al_{0,745}Ga_{0,255})_2O_3$	5,2987

ВИВОДИ

Незважаючи на значительний технологічний прогрес в розробці та випуску оптоелектронних пристроїв на основі тонких плінок нітридів III групи (AlN, GaN, InN), збільшення ефективності, часу життя та зниження вартості цих пристроїв вимагають суттєвого покращення якості використовуваних матеріалів, в першу чергу зменшення густоти дислокацій, що довго не вдавалося досягти через відсутність підходящих підложок. З розробкою III-оксидів цю проблему можна вирішити. Як показано в цій роботі, підбираючи концентрацію елементів III-групи можна досягти ідеального узгодження між активним шаром та буфером (див. табл. 3). В даний час отримані оксиди з такими складом: $(Al_{0,75}Ga_{0,25})_2O_3$, $(Al_{0,25}Ga_{0,75})_2O_3$. Ведуться роботи по отриманню різних концентрацій Al та Ga в $(AlGa)_2O_3$. Оксиди галію та індію є провідними матеріалами, прозорими в усьому видимому та ультрафіолетовому діапазоні, що дає нові можливості для конструювання пристроїв та виробництва.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Solid state characterization of coprecipitated alumina-gallia mixed oxide powders / V.S. Escribano, J.M.G. Amores, E.F. Lopez, M. Panizza, C. Resini, G. Busca // Journal of materials science. – 2005. – Vol.40. – P. 2013–2021.
2. Synthesis of γ -Ga₂O₃-Al₂O₃ Solid Solutions by the Glycothermal Method / Masaru Takahashi, Noriyuki Inoue, Tatsuya Takeguchi, Shinji Iwamoto, Masashi Inoue. // J. Am. Ceram. Soc. – 2006. – Vol.89, № 7. – P. 2158–2166.
3. Осинский В.И., Вербицкий В.Г. Зонная инженерия: ионная реализация виртуальных квантово-размерных гетероструктур наноэлектроники / В.И. Осинский, В.Г. Вербицкий // Оптико-электронные информационно-энергетические технологии. – 2001. – №1. – С.169-183.
5. Сирота Н.Н. Некоторые вопросы химической связи в полупроводниках / Н.Н. Сирота // Химическая связь в полупроводниках и твердых телах. – Мн.: Наука и техника, 1965. – С. 12–45.
6. Сирота Н.Н., Осинский В.И. Излучение p-n переходов на кристаллах твердых растворов фосфида индия – арсенида галлия / Н.Н. Сирота, В.И. Осинский // Доклады АН СССР, сер. физ. – 1966. – Т.171–142. – С. 317–319.
7. Чупахин М.С. Кластеры в полупроводниковых материалах // Химическая связь в полупроводниках и твердых телах / М.С. Чупахин, Г.Г. Главин, В.И. Фистуль. – Мн.: Наука и техника, 1965. – С. 130–134.
8. Осинский В.И. Интегральные светодиодные структуры на газоразряднолегированных эпитаксиальных пленках GaAs_{1-x}P_x / В.И. Осинский, Ф.М. Кацапов, В.И. Привалов // Изв. АН БССР, сер. физ.-мат. наук. – 1977. – №5. – С. 73–76.
9. Осинский В.И. Космические нанотехнологии создания гетерогенных информационных сред / В.И. Осинский // Збірник наукових праць інституту кібернетики НАН України. – Київ, 2000. – С. 122–128.
10. Zinkevich M. Thermodynamic Assessment of Gallium-Oxygen System / M. Zinkevich, F. Aldinger // J. Am. Ceram. Soc. – 2004. – №4. – P. 683–691.
11. Lefebvre A. Periodic antiphase boundary spinel-based structures in aluminates, gallates, aluminium oxynitrides and transition aluminas / A. Lefebvre, D. Jacob, Y. Androussi // Philosophical Magazine. –

2005. – Vol. 85, № 20. – P. 2211–2225.
12. Field-induced current modulation in epitaxial film of deep-ultraviolet transparent oxide semiconductor Ga₂O₃ / Kosuke Matsuzaki, Hiroshi Yanagi, Toshio Kamiy, Hidenori Hiramatsu, Kenji Nomura, Masahiro Hirano, Hideo Hosono // Applied physics letters. – 2006. – №88. – P. 092106–092109.
 13. Growth of hexagonal GaN films on the nitridated β-Ga₂O₃ substrates using RF-MBE / Ohira S., Suzuki N., Minami H., Takahashi K., Araki T., Nanishi Y. // Phys. stat. sol. – 2007. – Vol. 4, № 7. – P. 2306–2309.
 14. Шаскольская М.П. Кристаллография: [Учеб. Пособие для вузов; изд. 2-е, перераб. и доп.] / М.П. Шаскольская. – М.: Высшая школа, 1984. – 376с.
 15. Фазовый распад и безизлучательная рекомбинация носителей в активных областях светоизлучающих приборов на основе квантовых точек InGaN в матрице GaN или AlGaN / Сизов В.С., Гуткин А.А., Сахаров А.В., Лундин В.В., Брунков П.Н., Цацульников А.Ф. // Физика и техника полупроводников. – 2009. – Т. 43. – №6. – P. 836–840.

Надійшла до редакції 14.10.2010р.

ОСИНСКИЙ ВЛАДИМИР ИВАНОВИЧ – д.т.н., проф., директор Центра оптоэлектронных технологий Института микроприборов НАН Украины, Киев, Украина.

ДЯЧЕНКО ОЛЬГА ДМИТРОВНА – инженер-электроник, Институт микроприборов НАН Украины, Киев, Украина.

ДЕМИНСКИЙ ПЁТР ВИТАЛЬЕВИЧ – аспирант НТУУ «КПИ», младший научный сотрудник Центра оптоэлектронных технологий НИИ Микроприборов НАН Украины, Киев, Украина.