

Механизм формирования квантово-размерных слоев гетероструктур AlGaN/GaN/InGaN/GaN

Е.Н. Вигдорович

Физико-технологический институт Московского технологического университета, г.Москва, Россия

evgvig@mail.ru

Электрофизические свойства кремния ограничивают его применение для оптоэлектронных элементов и приборов СВЧ-техники. В этой области материалы с большей шириной запрещенной зоны, в частности GaN, AlN, InN и твердые растворы на их основе, значительно превосходят кремний. В результате появляется возможность изготовления устройств с высокой эффективностью, например светодиодов и фотоприемников, которые могут работать в широкой области спектра излучения. Кроме того, материалы на основе GaN успешно используются для создания мощных СВЧ-приборов, таких как транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT), работающие при высоких температурах.

Рассмотрены технологические особенности формирования активных слоев в гетероструктурах AlGaN/GaN/InGaN/GaN с использованием металлоорганических соединений. В качестве исходных веществ применялись особо чистый аммиак NH_3 и металлоорганические соединения галлия, алюминия и индия в триметильной форме. Исследована температурная зависимость скорости роста эпитаксиальных слоев GaN. Показано, что данная зависимость незначительная в широком интервале температур. Подтверждено важное значение адсорбционных процессов на поверхности роста. Для моделирования процесса и определения условий формирования состава твердых растворов на основе GaN проведен термодинамический анализ закономерностей при реализации изучаемого процесса. Установлено, что при формировании твердых растворов $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}$ в области высоких температур не удается получить содержание InN больше 0,4 мольных долей, при снижении температуры роста до 600 °С заметно улучшаются условия вхождения In в твердый раствор и концентрация InN увеличивается до 0,9 мольных долей. Выяснено, что при выращивании твердых растворов GaAlN в широком диапазоне температур можно получать твердые растворы с содержанием AlN от 0,1 до 0,9 мольных долей.

Экспериментальные исследования подтвердили расчеты. Поэтому при выращивании слоев квантовых ям $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}$ в активной области гетероструктур для промышленных чипов синих светодиодов с содержанием индия $x = 0,1 \dots 0,15$ необходимо снижать температуру роста. Однако при низких температурах возникают трудности с ростом эпитаксиальных слоев высокого кристаллического качества.

Ключевые слова: нитриды; светодиоды; транзисторы; гетероструктуры; металлоорганические соединения.

Для цитирования: Вигдорович Е.Н. Механизм формирования квантово-размерных слоев гетероструктур AlGaIn/GaN/InGaIn/GaN // Изв. вузов. Электроника. – 2017. – Т. 22. – № 4. – С. 322–330. DOI: 10.214151/1561-5405-2017-22-4-322-330

Mechanism of Forming of Quantum-Size Layers of AlGaIn/GaN/InGaIn/GaN Layers

E.N. Vigdorovich

*Physics and Technology Institute of Moscow Technological University,
Moscow, Russia*

evgvig@mail.ru

The electro-physical properties of silicon limit its application for optoelectronic elements and for microwave technology devices. In this case silicon is replaced by the material with higher band gap. These materials include the nitrides of the III-group elements, in particular, GaN, AlN, InN and solid solutions based on them. As a result, it becomes possible to manufacture devices with the high efficiency, for example, the light diodes and photoreceivers, capable to operate in a very broad radiation spectrum. Besides, the materials based on GaN are successfully used for creation of powerful microwave devices, such as the transistors with high electron mobility (YEMT) operating at high temperatures.

Some technological features of formation of the active layers in heterostructures of AlGaIn/GaN/InGaIn/GaN MOS using the metal organic compounds have been considered. As the initial substances the high-purity ammonia (NH₃) and organometallic compounds of gallium, aluminum and indium (MOC Ga, MOC Al and Mosp) in trimethylene form have been used. The temperature dependence of the growth rate has been investigated in a wide temperature range, which has shown the critical role of the absorption processes on the surface of the growth. To simulate the process and to determine the conditions of forming the composition of solid solutions based on GaN the thermodynamic analysis of patterns in the implementation of the process under study has been performed. It has been found that while obtaining solid solutions in the high temperature range the InN content in them exceeds 0.4 mole frac. and while reducing the growth temperature to 600 °C the conditions of In occurrence in the solid solution are significantly improved and the concentration increases up to 0.9 mole.frac. It has been shown that while growing the GaAlN solid solutions in the wide temperature range it is possible to obtain solid solutions with AlN content from 0.1 to 0.9 mole frac.

The experimental studies have confirmed the calculations. Therefore, when growing layers of Ga_{1-x}In_xN quantum wells in the active region of heterostructures for industrial chips of blue LEDs with the indium content $x = 0.1 - 0.15$ it is necessary to reduce the growth temperature. However, at low temperatures some difficulties with the growth of the epitaxial layers, having high crystalline quality, arise.

Keywords: nitrides; light emitting diodes; transistors; heterostructures; metalorganic compounds.

For citation: Vigdorovich E.N. Mechanism of Forming of Quantum-Size Layers of AlGaIn/GaN/InGaIn/GaN Layers // Proc. of Universities. Electronics. – 2017. – Vol. 22. – No. 4. – P. 322–330. DOI: 10.214151/1561-5405-2017-22-4-322-330

Введение. Особенность электрофизических свойств кремния ограничивает его применение для оптоэлектронных элементов и приборов СВЧ-техники. В этой области уже используются полупроводниковые соединения $A^{III}B^V$ (GaAs, AlAs, InP, GaP и их твердые растворы). Однако они не позволяют решать задачи по созданию приборов высокой мощности, работающих на высоких частотах в условиях высокой температуры, и приборов, генерирующих фотоны высоких энергий. Эти проблемы решаются при использовании нитридов элементов III группы таблицы Менделеева, в частности GaN, AlN, InN. Твердые растворы на их основе [1–6] позволяют непрерывно изменять ширину запрещенной зоны от 6,2 эВ (AlN) до 3,4 эВ (GaN) и до 1,9 эВ (InN). Данные особенности нитридов элементов III группы обуславливают возможность изготовления устройств с высокой эффективностью, например светодиодов и фотоприемников, которые могут работать в очень широкой области спектра излучения. Кроме того, материалы на основе GaN успешно используются для создания мощных СВЧ-приборов, работающих при высоких температурах, например транзисторов с высокой подвижностью электронов (HEMT).

Решающим фактором для широких исследований твердых растворов на основе нитридов элементов III группы стало создание новых методов их получения – молекулярно-лучевой эпитаксии и газовой эпитаксии с применением металлоорганических соединений (МОС-гидридная эпитаксия) [9].

В настоящей работе исследовались технологические особенности формирования активных слоев в гетероструктурах AlGaIn/GaN/InGaIn/GaN методом МОС-гидридной эпитаксии. Исследования проводились на установке D-180 (VEECO). В качестве исходных веществ использовались особо чистый аммиак NH_3 и металлоорганические соединения галлия, алюминия и индия (МОС Ga, МОС Al и МОС In) в триметильной форме.

Механизм кристаллизации слоев GaN. Для выяснения механизма кристаллизации слоев GaN методом МОС-гидридной эпитаксии исследовалась температурная зависимость их скорости роста при различных расходах аммиака (рис.1). Анализ полу-

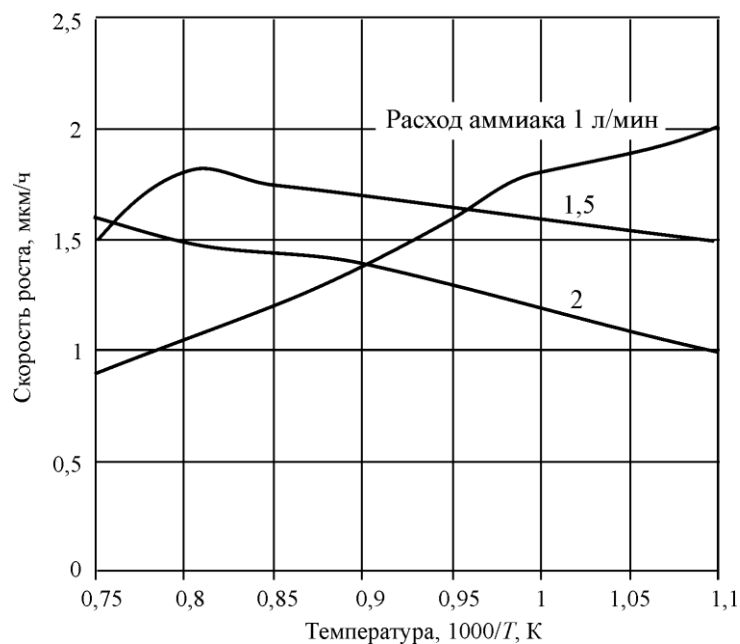


Рис. 1. Зависимость скорости роста эпитаксиальных слоев GaN от температуры при разном расходе аммиака (скорость вхождения МОС Ga равна 20 мкмоль/мин)

Fig. 1. The dependence of the rate of growth of epitaxial GaN layers on temperature at different costs of ammonia (MOVPE Ga – 20 μ mol/min)

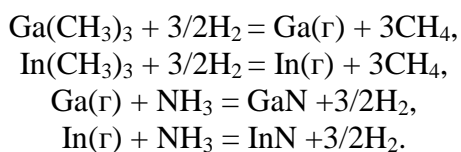
ченной температурной зависимости скорости роста позволяет сделать некоторые заключения о механизме кристаллизации. В отличие от хлоридного и хлоридно-гидридного процессов, в которых четко наблюдаются две области – кинетическая (лимитирующей стадией является гетерогенная реакция на поверхности растущего слоя) и диффузионная (определяющей стадией является массоперенос в газовой фазе), в рассматриваемом случае зависимость скорости роста от температуры в широком интервале температур незначительная. Из рисунка видно, что при разном расходе аммиака зависимость имеет различный характер.

Таким образом, можно говорить о решающей роли адсорбционных процессов на поверхности кристаллизации. При невысоких расходах аммиака (до 1 л/мин) или низких соотношениях элементов A^V/B^{III} при повышении температуры скорость роста уменьшается. Это может быть связано со снижением на поверхности концентрации адсорбированных молекул элемента III группы, которая и лимитирует скорость роста слоев. При избытке аммиака (1–2 л/мин) наблюдается незначительное увеличение скорости роста при повышении температуры. Это объясняется или хемосорбцией элементов V группы, или гетерогенным разложением аммиака на поверхности кристаллизации. Дальнейшее увеличение расхода аммиака (более 2 л/мин) приводит к снижению скорости роста, что, вероятнее всего, связано с блокировкой центров сорбции на поверхности и снижением концентрации.

Термодинамика формирования состава твердых растворов на основе GaN. Для моделирования процесса и определения условий оптимизации формирования состава твердых растворов на основе GaN необходимы данные по физико-химическим закономерностям при их реализации. Методика физико-химического анализа для газофазного синтеза разрабатывается и используется уже много лет для GaAsP, InGaAsP и других многокомпонентных твердых растворов на основе $A^{III}B^V$. В последние годы ее активно применяют для термодинамического анализа систем на основе GaN, AlN, InN [7–11].

При образовании в конденсированной фазе химического соединения в системе, содержащей e элементов в газовой и конденсированной фазах, число независимых уравнений материального баланса r , задающих состав этого соединения, можно рассчитать по уравнению $r = u - e$. Здесь u – число компонентов, образуемых этими элементами, e – число сортов атомов. Если в конденсированной фазе находится один компонент, то коэффициент активности его равен единице и уравнение для коэффициента активности не записывается. При образовании в конденсированной фазе твердого раствора двух полупроводниковых соединений, имеющих общий катион или анион $(A_1B)_{1-x}(A_2B)_x$, необходимо записать два уравнения материального баланса для конденсирующихся сортов атомов. Первым уравнением задается молярная доля x элемента A в катионной части твердого раствора, вторым – атомная доля элемента B в твердом растворе, равная 0,5. Так как в конденсированной фазе находятся два компонента, необходимо записать два уравнения для расчета коэффициентов активности.

Процесс эпитаксиального наращивания твердых растворов на основе GaN, например для $Ga_{1-x}In_xN$, можно записать в следующем виде:



В связи с тем что аммиак чрезвычайно устойчивое соединение в исследуемой области температур, реакцию его разложения не учитывали.

Для рассматриваемого случая имеем пять сортов атомов e (Ga, C, H, N, In) и девять компонентов u ($\text{Ga}(\text{CH}_3)_3$, NH_3 , GaN , CH_4 , $\text{In}(\text{CH}_3)_3$, InN , Ga , In , H_2). Следовательно, число независимых реакций $r = 4$.

Для изучаемых реакций составим уравнения закона действующих масс:

$$K_1 = \frac{P_{\text{Ga}} \cdot P_{\text{CH}_4}^3}{P_{\text{МОС Ga}} \cdot P_{\text{H}_2}^{3/2}}, \quad K_2 = \frac{P_{\text{In}} \cdot P_{\text{CH}_4}^3}{P_{\text{МОС In}} \cdot P_{\text{H}_2}^{3/2}}, \quad K_3 = \frac{\alpha_{\text{GaN}} \cdot P_{\text{H}_2}^{3/2}}{P_{\text{Ga}} \cdot P_{\text{NH}_3}}, \quad K_4 = \frac{\alpha_{\text{InN}} \cdot P_{\text{H}_2}^{3/2}}{P_{\text{In}} \cdot P_{\text{NH}_3}},$$

где $\alpha_j = x_j \gamma_j$ – активность компонента в твердой фазе; x_j , γ_j – мольная доля и коэффициент активности компонента в твердой фазе соответственно.

Константы равновесия для химических реакций определяются по уравнению изотермы Вант-Гоффа: $\Delta G = -RT \ln K_j$.

Так как неизвестных больше, чем уравнений закона действующих масс, запишем дополнительно уравнения материального баланса:

$$\begin{aligned} P_{\text{МОС Ga}} + P_{\text{МОС In}} + P_{\text{NH}_3} + P_{\text{H}_2} + P_{\text{CH}_4} + P_{\text{Ga}} + P_{\text{In}} &= 1, \\ \frac{(P_{\text{МОС In}}^0 - P_{\text{МОС In}} - P_{\text{In}})}{(P_{\text{МОС In}}^0 - P_{\text{МОС In}} - P_{\text{In}}) + (P_{\text{МОС Ga}}^0 - P_{\text{МОС Ga}} - P_{\text{Ga}})} &= x_{\text{InN}}, \\ \frac{(P_{\text{NH}_3}^0 - P_{\text{NH}_3})}{(P_{\text{NH}_3}^0 - P_{\text{NH}_3}) + (P_{\text{МОС In}}^0 - P_{\text{МОС In}} - P_{\text{In}}) + (P_{\text{МОС Ga}}^0 - P_{\text{МОС Ga}} - P_{\text{Ga}})} &= 0,5, \\ P_{\text{NH}_3}^0 - P_{\text{NH}_3} &= \sum P_{\text{МОС}}^0 - \sum P_{\text{МОС}}, \end{aligned}$$

здесь P_i^0 и P_i – исходные и равновесные парциальные давления пара компонентов.

Коэффициенты активности выразим в соответствии с теорией регулярных растворов:

$$\gamma_{\text{GaN}} = \exp\left(\frac{x^2 \alpha}{RT}\right), \quad \gamma_{\text{InN}} = \exp\left(\frac{1-x^2 \alpha}{RT}\right),$$

где α – параметр смешения для данной системы.

В результате получена и решена система из восьми уравнений с восемью неизвестными. Аналогичная система получена и для твердых растворов $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$. Для этих систем наибольший интерес представляет определение влияния технологических параметров МОС-гидридного процесса на состав получаемых твердых растворов. Расчет проводился на основе наиболее надежных термодинамических данных [5]. При расчете коэффициента активности компонентов твердого раствора использовались полученные значения параметра смешения, которые для InN-GaN и AlN-GaN равны 17601 и 3741 Дж/моль соответственно.

На рис.2 и 3 приведены расчетные зависимости состава твердой фазы от состава газовой фазы при МОС-гидридной эпитаксии твердых растворов на основе нитрида галлия при разной температуре.

Экспериментальное исследование формирования состава твердых растворов. Как показывает термодинамический анализ, зависимости состава твердых растворов $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}$ и $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ от состава газовой фазы имеют отличительные особенности, что определяется физико-химическими свойствами участвующих в процессе эпитаксии ве-

ществ. Исследовалось влияние температуры эпитаксии на состав твердых растворов $Ga_{1-x}In_xN$ и $Ga_{1-x}Al_xN$ при различных концентрациях In и Al в газовой фазе, которая задавалась соотношением МОС In (МОС Ga + МОС In) и МОС Al (МОС Ga + МОС Al) в газовой фазе при МОС-гидридной эпитаксии. При этом суммарное количество МОС в газовой фазе оставалось постоянным. На рис.4 и 5 приведены полученные в результате экспериментальных исследований зависимости.

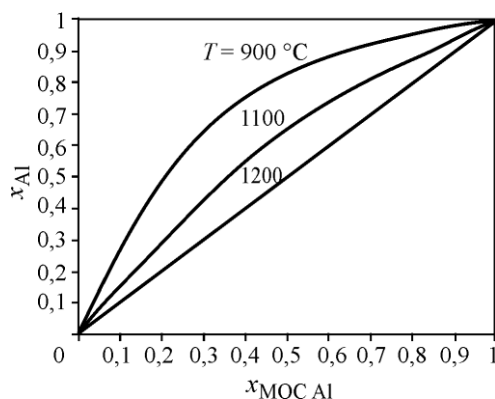


Рис.2. Зависимость состава твердого раствора $Ga_{1-x}Al_xN$ от содержания МОС Al в газовой фазе при разной температуре

Fig.2. Based on the composition of the solid solution $Ga_{1-x}Al_xN$ the concentration of MOVPE Al in the gas phase at different temperatures

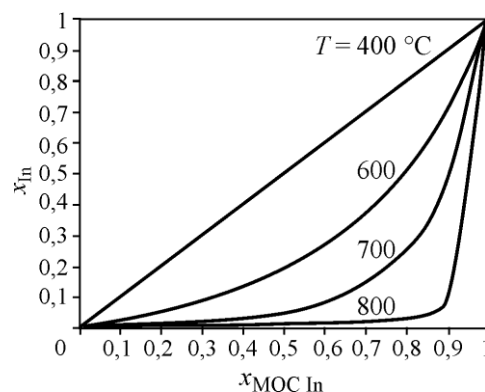


Рис.3. Зависимость состава катионной подрешетки твердого раствора $Ga_{1-x}In_xN$ от содержания МОС In в газовой фазе при разной температуре

Fig.3. Based on the composition of the cationic sublattice solid solution $Ga_{1-x}In_xN$ the concentration of MOVPE In in the gas phase for various temperature

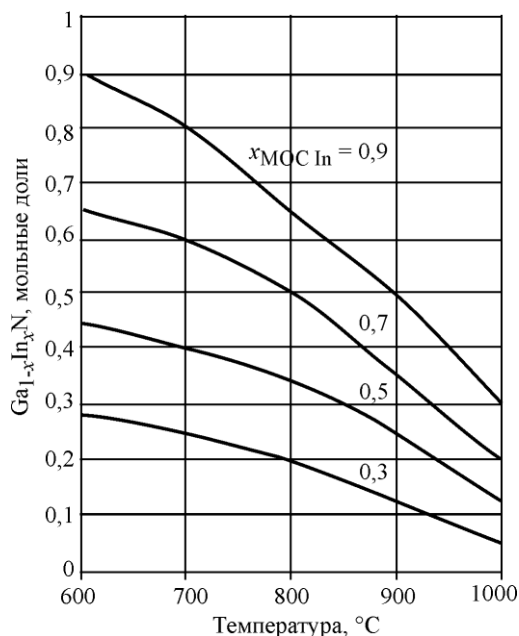


Рис.4. Зависимость состава твердого раствора $Ga_{1-x}In_xN$ от температуры при разном содержании МОС In в газовой фазе

Fig.4. The change in composition of the $Ga_{1-x}In_xN$ solid solution on temperature with different concentration MOVPE In in the gas phase

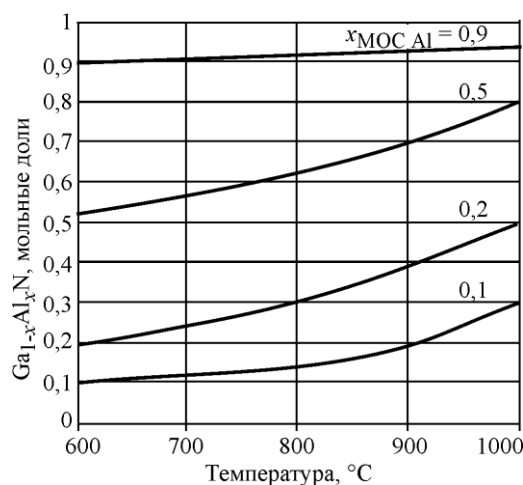


Рис.5. Зависимость состава твердого раствора $Ga_{1-x}Al_xN$ от температуры при разном содержании МОС Al в газовой фазе

Fig.5. The effect of temperature on the composition of the solid solution of $Ga_{1-x}Al_xN$ with different concentration MOVPE Al in the gas phase

Состав твердых растворов $Ga_{1-x}Al_xN$ зависит от ростовых условий. Механизм пиролиза компонентов реакции в газовой фазе широко изучен. Обнаружено, что возникновение паразитных реакций в газовой фазе существенно влияет на кристаллическое качество слоев. Одним из эффективных способов решения данной проблемы может быть уменьшение давления в реакторе, что сокращает вероятность нежелательных взаимодействий в газовой фазе. Для создания резких границ между слоями гетероструктуры потребовалось бы быстро изменять давление, но это практически невозможно для реакторов промышленного типа. Поэтому для увеличения вхождения Al в слой следует снижать скорость роста, уменьшая расход МОС Ga. Зависимость вхождения Al при изменении отношения расхода МОС Al к сумме расходов всех алкилов имеет прямолинейный характер при рабочем давлении в реакторе 200 мм рт. ст. и температуре роста 1020 °С. На рис.6 представлена зависимость содержания Al в растущих слоях $Ga_{1-x}Al_xN$ от расхода МОС Ga (МОС Ga/(МОС Ga + МОС Al)).

При росте слоев $Ga_{1-x}In_xN$ имеет место иной механизм, препятствующий формированию твердого раствора с большим содержанием In (рис.7). В отличие от МОС Al и МОС Ga, МОС In не образует побочных продуктов реакции, но имеет тенденцию легко

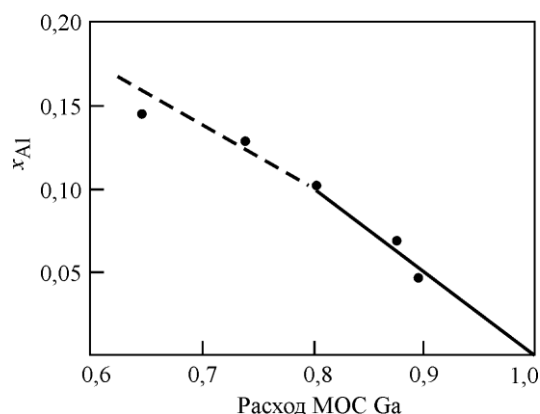


Рис.6. Влияние потока МОС Ga на содержание Al в слое $Ga_{1-x}Al_xN$
Fig.6. The effect of MOVPE Ga flow on the Al content in $Ga_{1-x}Al_xN$ layer

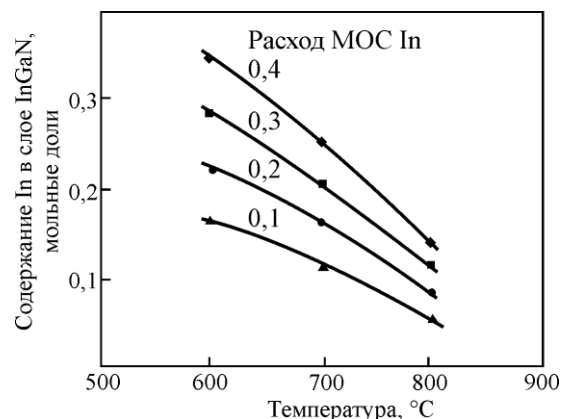


Рис.7. Зависимость содержания In в слоях $Ga_{1-x}In_xN$ от температуры при разном расходе МОС In (МОС In/(МОС In + МОС Ga))
Fig.7. The dependence of the In content in $Ga_{1-x}In_xN$ layers of flow and temperature MOVPE In (МОС In/(МОС In + МОС Ga))

распадаться с формированием большого количества атомов In в газовой фазе.

Если наступает пересыщение In в газовой фазе, то образуемые в ней частицы In уносятся из зоны роста вместе с газом-носителем, не успевая адсорбироваться на поверхности растущего слоя. Такое поведение приводит к потерям МОС In. Этот эффект усугубляется еще и тем, что при высоких температурах происходит десорбция атомов индия с поверхности. Это также препятствует получению слоев $Ga_{1-x}In_xN$ с большим содержанием In.

Частично увеличение вхождения In удастся достичь повышением расхода МОС In, но этот подход неэффективен. Поэтому приемлемым способом увеличения содержания индия в слоях $Ga_{1-x}In_xN$ является снижение температуры их выращивания.

Заключение. Как показал термодинамический анализ и эксперименты, при формировании твердых растворов $Ga_{1-x}In_xN$ в области высоких температурах не удастся получить содержание InN больше 0,4 мольных долей. При снижении температуры роста

до 600° С заметно улучшаются условия вхождения In в твердый раствор и содержание InN увеличивается до 0,9 мольных долей. При выращивании твердых растворов $Ga_{1-x}Al_xN$ в широком диапазоне температур можно получать твердые растворы с содержанием AlN от 0,1 до 0,9 мольных долей. Полученные результаты позволяют предложить следующие рекомендации: при выращивании слоев твердых растворов $Ga_{1-x}In_xN$ управлять составом твердых растворов путем изменения температуры, а при выращивании $Ga_{1-x}Al_xN$ – путем изменения состава газовой фазы на входе в реактор.

Эффективность вхождения Al в слои $Ga_{1-x}Al_xN$ имеет неоднозначную зависимость. Так, увеличение потоков аммиака и МОС Al не приводит к пропорциональному увеличению содержания Al. Кроме того, изменение потока МОС Al менее эффективно для контроля состава твердых растворов по сравнению с изменением МОС Ga. Такое поведение связано с существованием паразитных реакций между аммиаком и МОС Al в газовой фазе. Механизм, способствующий протеканию химических реакций, описан в [9]. Содержание МОС Al в газовой фазе быстро падает после ввода в реактор из-за возникновения побочного продукта реакции – МОС Al:NH₃. Кроме того, образуются молекулы DMA:NH₂ (DMA – диметилалюминий), которые имеют тенденцию создавать сложные цепные молекулы вида (DMA:NH₂)_n, где $n = 1, 2, 3, \dots$. Большая часть таких молекул, не успев диссоциировать и принять участие в росте, уносится газом-носителем из реактора.

При температуре выше 850 °С вхождение In в выращиваемый слой стремительно уменьшается и возникает резкая зависимость содержания In от температуры роста при различных расходах МОС In. Поэтому при выращивании слоев квантовых ям $Ga_{1-x}In_xN$ в активной области гетероструктур для промышленных чипов синих светодиодов с содержанием индия $x = 0,1 \dots 0,15$ необходимо снижать температуру роста. Однако при низких температурах возникают трудности с ростом эпитаксиальных слоев высокого кристаллического качества. Это связано, с одной стороны, с уменьшением доли диссоциировавшего аммиака, а с другой – с уменьшением длины поверхностной диффузии адсорбированных атомов, что приводит к огрублению поверхности. Поэтому оптимальная температура с точки зрения эффективности вхождения In и поддержания условий роста слоев с гладкой морфологией поверхности находится в диапазоне 720–770 °С.

Литература

1. Юнович А.Э. Светодиоды на основе гетероструктур из нитрида галлия и его твердых растворов // Светотехника. – 1996. – Вып. 5, 6. – С. 28–33.
2. Шуберт Ф.Е. Светодиоды. – М.: Физматлит, 2008. – 496 с.
3. Куэй Р. Электроника на основе нитрида галлия: пер. с англ. под ред. д. ф.-м. н. А.Г. Васильева. – М.: Техносфера. 2011. – 578 с.
4. Туркин А. Н. Нитрид галлия как один из перспективных материалов в современной оптоэлектронике // Компоненты и технологии. – 2011. – № 5. – С. 6–10.
5. Белкин М.Е., Кудж С.А., Сигов А.С. Новые принципы построения радиоэлектронной аппаратуры СВЧ-диапазона с использованием радиотонной технологии // Российский технологический журнал. – 2016. – № 1 (10). – С. 4–20.
6. Крапунин Д.В., Мальцев П.П. Монолитная интегральная схема малошумящего усилителя на нитриде галлия для диапазона 57–64 ГГц // Российский технологический журнал. – 2016. – Т. 4. – № 4 (13). – С. 42–53.
7. Vigdorovich E.N., Sveshnikov Yu.N. Termodinamic stability of the GaN-InN-AlN system // Inorganic Materials. – 2000. – Vol. 36. – No. 5. – P. 465–467.
8. Леонович Б.И., Трофимов Е.А., Жеребцов Д.А. Термодинамический анализ системы галлий – азот // Вестник ЮУрГУ. Сер. Химия. – 2013. – Т. 5. – № 4. – С. 43–50.

9. Материалы Всероссийских совещаний и конференций «Нитриды галлия, индия и алюминия: структуры и приборы» за 1997–2017 гг. URL: <http://nitridesconf.ioffe.ru/history.htm> (дата обращения: 13.03.2017).
10. Стрельченко С.С., Лебедев В.В. Соединения $A^{III}B^V$: справочник. – М.: Металлургия, 1984. –144 с.
11. Thermodynamic properties of inorganic materials compiled by SGTE. P. 1–4: Elements and compounds. – Springer: Scientific Group Thermodata Europe, 1999–2000.

Поступила 16.03.2017 г.; принята к публикации 25.04.2017 г.

Вигдорович Евгений Наумович – доктор технических наук, профессор кафедры оптических и биотехнических систем и технологий Физико-технологического института Московского технологического университета, лауреат Государственной премии СССР (Россия, 107076, г. Москва, Стромьнка, 20), evgvig@mail.ru

References

1. Yunovich A.E. Svetodiody na osnove geterostruktur iz nitrída galliya i ego tverdykh rastvorov [LEDs based on heterostructures of gallium nitride and its solid solutions]. *Svetotekhnika – Light and Engineering*, 1996, vol. 5, 6, pp. 28–33. (In Russian).
2. Shubert F.E. *Svetodiody* [Light Emitting Diodes]. Moscow, Fizmatlit, 2008. (In Russian).
3. Kuehij R. *Elektronika na osnove nitrída galliya*. Pod red. A.G. Vasil'eva. [Electronics based on gallium nitride. Under the editorship of A. G. Vasiliev. The world of electronics]. Moscow, Technosphaera, 2011. 578 p. (In Russian).
4. Turkin A.N. Nitrid galliya kak odin iz perspektivnykh materialov v sovremennoj optoelektronike [Gallium nitride as one of the most promising materials in modern optoelectronics]. *Komponenty i tekhnologii – Components and technologies*, 2011, no. 5, pp. 6–10. (In Russian).
5. Belkin M.E., Kudzh S.A., Sigov A.S. Novye printsipy postroeniya radioelektronnoj apparatury SVCH-diapazona s ispol'zovaniem radiofotonnoy tekhnologii [The new principles of construction of electronic equipment of microwave range using radiational technology]. *Rossiiskij tekhnologicheskij zhurnal – Russian technology magazine*, 2016, no.1 (10), pp. 4–20. (In Russian).
6. Krapukhin D.V., Mal'tsev P.P. Monolitnaya integral'naya skhema maloshumyashhego usilitelya na nitrída galliya dlya diapazona 57–64 GGts [Monolithic integrated circuit low noise amplifier on gallium nitride for a range of 57–64 GHz]. *Rossiiskij tekhnologicheskij zhurnal – Russian technology magazine*, 2016, vol. 4, no. 4 (13), pp. 42–53. (In Russian).
7. Vigdorovich E.N., Sveshnikov Yu.N. Termodinamic stability of the GaN-InN-AlN system. *Inirganic Materials*, 2000, vol. 36, no. 5, pp. 465–467.
8. Leonovich B.I., Trofimov E.A., Zhrebtsov D.A. Termodinamicheskij analiz sistemy gallij-azot [Thermodynamic analysis of the system gallium-nitrogen]. *Vestnik YUUrGU, seriya Khimiya – Bulletin of SUSU, series Chemistry*, 2013, vol. 5, no. 4, pp. 43–50. (In Russian).
9. *Materialy Vserossiiskikh soveshhanij i konferentsij «Nitrída galliya, indiya i alyuminiya: struktury i pribory» za 1997-2017 gg.* [Materials of all-Russian meetings and conferences «Nitrides of gallium, indium and aluminum: structures and devices» for 1997-2017 . Available at: <http://nitridesconf.ioffe.ru/history.htm> (accessed: 13.03.2017). (In Russian).
10. Strel'chenko S.S., Lebedev V.V. *Soedineniya $A^{III}B^V$. Spravochnik* [Compound III-V semiconductors. Reference]. Moscow, Metallurgiya, 1984.144 p. (In Russian).
11. *Thermodynamic Properties of Inorganic Materials compiled by SGTE. Part 1-4: Elements and Compounds*. Scientific Group Thermodata Europe. Springer, 1999–2000.

Submitted 16.03.2017; accepted 25.04.2017.

Vigdorovich Evgeny N. – doctor of technical sciences, professor of the Optical and Biotechnical Systems and Technologies Department, Physics and Tehnology Institute of Moscow Technology University (Russia, 107076, Moscow, Stromynka, 20), evgvig@mail.ru