

06

Особенности селективной эпитаксии GaN в круглых окнах

© В.В. Лундин, Е.Е. Заварин, М.М. Рожавская, С.И. Трошков,
А.Ф. Цацульников

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: lundin.vpegroup@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 8 апреля 2011 г.

Исследованы особенности селективной эпитаксии GaN в круглых окнах. Показано, что с уменьшением потока аммиака увеличивается ширина кристаллитов, а при самых малых исследованных потоках — уменьшается их высота. В результате в дополнение к обычным для таких объектов граням $\{1\bar{1}01\}$, начинают формироваться грани (0001) и $\{1\bar{1}00\}$. Обнаружены эффекты подавления роста части кристаллитов при начале их срастания и подавления селективного роста вблизи больших немаскированных поверхностей.

Несмотря на все достигнутые успехи в развитии технологии выращивания многослойных гетероструктур на основе III-N-соединений методом газофазной эпитаксии их металлоорганических соединений, варианты освоенных конструкций гетероструктур крайне ограничены. Практически все структуры выращиваются планарной эпитаксией (однородная в плоскости подложки эпитаксия на плоской поверхности), поверхность подавляющего большинства структур лежит в полярной плоскости (0001) . Селективная (пространственно-неоднородная) эпитаксия III-N-материалов потенциально позволяет решить множество задач и существенно расширить многообразие приборных структур. Однако на сегодня селективная эпитаксия нитридов развивается как крайне ограниченное множество редких, в масштабах развития эпитаксиальной технологии, частных приемов, позволяющих решить конкретные задачи.

Единственным относительно развитым видом селективной (пространственно неоднородной) эпитаксии в III-N-технологии является процесс ELOG (Epitaxial Lateral — эпитаксиальное латеральное выращивание) [1] и родственные ему методы, используемые для формирования узких (единицы микрон) полосковых областей со сниженной

плотностью дислокаций. Сообщалось также об использовании селективной эпитаксии GaN для формирования приборных структур [2–4]. Однако в подавляющем большинстве статей, посвященных применениям селективной эпитаксии GaN описаны лишь конечные результаты, что позволяет охарактеризовать их исключительно как демонстрирующие потенциальные возможности метода. Опубликованные данные об особенностях этого процесса в зависимости от условий в реакторе, несмотря на кажущееся обилие статей [5–9], на самом деле весьма ограничены и не позволяют сформировать общей картины процесса и понять его природу, что необходимо для реализации потенциальных возможностей селективной эпитаксии.

Данная работа открывает новый цикл исследований процесса селективной эпитаксии, в то же время продолжая ряд наших предшествующих работ [10]. Работа посвящена исследованию процесса селективной эпитаксии GaN в круглых окнах на маскированной поверхности планарных слоев GaN ориентации (0001) в зависимости от условий в реакторе и топологии маски.

Структуры выращивались методом газофазной эпитаксии из металл-органических соединений на модифицированной установке Epiqip при температуре подложкодержателя 1040°C и давлении в реакторе 100 mbar. Триметилгаллий, аммиак, водород и азот использовались в качестве соединений-источников и несущего газа. Маска Si₃N₄ формировалась с использованием стандартных фотолитографических процедур и плазмохимического осаждения (PECVD) на поверхности эпитаксиальных слоев GaN, выращенных на сапфировых подложках ориентации (0001) на установке AIX2000HT. Диаметр окон составлял 2.5 μm, расстояние между центрами окон 4.5 μm. Часть поверхности GaN не маскировалась, что позволило получить дополнительную информацию о влиянии немаскированной поверхности, на которой происходит обычная планарная эпитаксия, на характер селективной эпитаксии в близко расположенных окнах. Выращенные структуры исследовались методом растровой электронной микроскопии (РЭМ).

Ранее нами было показано, что характер анизотропии скоростей роста при селективной эпитаксии GaN в полосковых окнах зависит от равновесного покрытия поверхности растущего GaN атомами галлия в результате его разложения в присутствии водорода [10]. Степень этого покрытия возрастает с увеличением парциального давления водорода и уменьшением парциального давления аммиака. В ходе данной работе

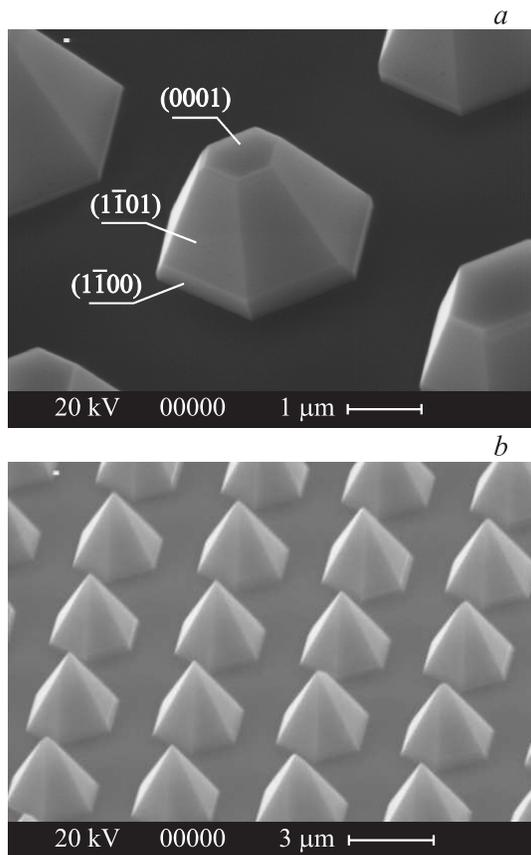


Рис. 1. РЭМ-фотографии структур, выращенных при отношении потоков $\text{NH}_3 : \text{H}_2 = 1 : 18$ (a), $\text{NH}_3 : \text{H}_2 = 1 : 6$ (b).

изучались аналогичные явления при селективной эпитаксии в круглых окнах малого диаметра, при которых огранка вырастающего материала уже не зависит от ориентации полоска, а определяется исключительно процессами при росте. Во всех проведенных экспериментах наблюдался устойчивый селективный характер эпитаксиального роста — рост происходил только в окнах в маскирующем покрытии. При малом потоке

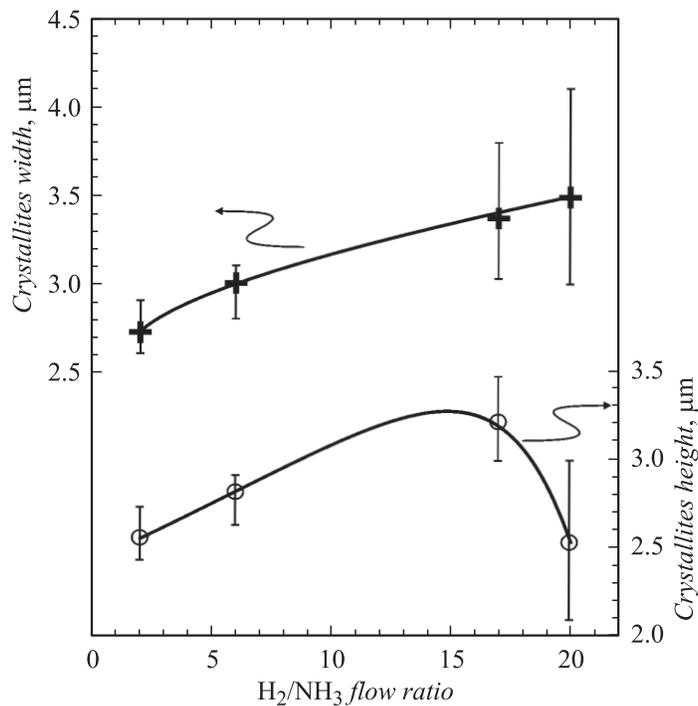


Рис. 2. Зависимость средней высоты и ширины кристаллитов от отношения потоков водорода и аммиака. Вертикальными отрезками показан диапазон флуктуации соответствующих размеров.

аммиака выращенные кристаллиты были ограничены по плоскостям $\{0001\}$, $\{1\bar{1}01\}$ и $\{1\bar{1}00\}$ (рис. 1, *a*) и имели большой разброс размеров и формы. С увеличением потока аммиака уменьшаются латеральные размеры кристаллитов и увеличивается их высота (рис. 2). При больших потоках аммиака наблюдается четкая огранка кристаллитов по наклонным плоскостям $\{1\bar{1}00\}$ и они становятся практически одинакового размера (рис. 1, *b*). При такой форме высота кристаллитов однозначно связана с их шириной и также уменьшается с увеличением потока аммиака (рис. 2). Следует отметить, что огранка по плоскостям $\{1\bar{1}01\}$ и $\{0001\}$, в отличие от плоскостей $\{1\bar{1}00\}$, типична для кристаллитов,

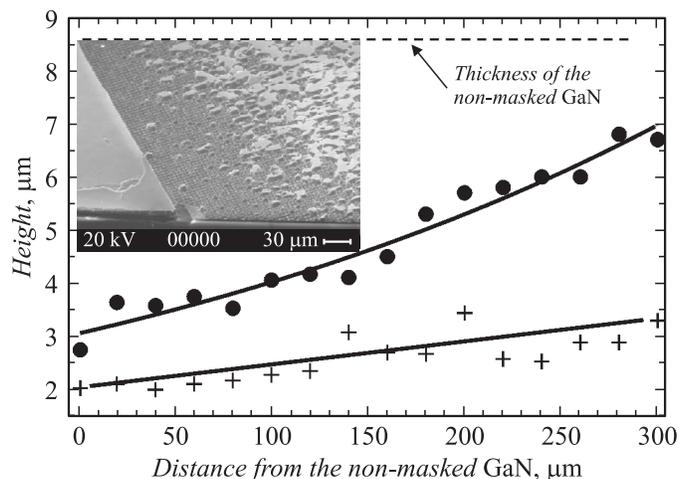


Рис. 3. Зависимость средней высоты кристаллитов от расстояния до немаскированной области. Круги — высота крупных кристаллитов, кресты — высота мелких кристаллитов. Пунктиром показана толщина слоя, вырастающего на немаскированной области вблизи края маски.

выращенных селективной эпитаксией в круглых окнах [6,9]. Таким образом, в экспериментах наблюдалась существенная зависимость процесса роста кристаллитов от потока аммиака.

На рис. 3 показана зависимость размеров кристаллитов от расстояния до немаскированной области структуры и РЭМ-фотография этой структуры. Рост производился при малом потоке аммиака достаточно долго для начала коалесценции кристаллитов. Хорошо видно, что кристаллиты разделились на 2 массива: крупные, представляющие собой объединения сросшихся кристаллитов, и мелкие, расположенные между крупными. Близость немаскированной поверхности снижает частоту образования крупных кристаллитов и их размеры. Этот эффект, постепенно ослабевая, наблюдается на расстояниях сотни микрон, что указывает на обеднение газовой фазы вблизи немаскированной поверхности. В то же время размеры мелких кристаллитов зависят от расстояния до немаскированной поверхности намного слабее.

Природа зависимости огранки кристаллитов от условий в реакторе на данный момент не ясна. Можно только предположить, что при селективной эпитаксии наличие соседних граней разной ориентации может приводить к миграции галлия с грани на грань. Скорость десорбции галлия с разных граней также может быть различной. Это приводит к различию скорости роста граней и влияет на огранку кристаллита. Кроме того, при селективной эпитаксии значительная часть поверхности структуры покрыта маской, на которой рост не происходит. Атомы галлия на маске могут или испариться, что приводит к обогащению газовой фазы, или диффундировать по ее поверхности к растущему кристаллиту. Оба процесса можно рассматривать как дополнительные каналы доставки галлия к растущим граням. В начале процесса селективной эпитаксии на частично маскированном слое GaN ориентации (0001) площадь грани (0001) определяется площадью окна на маске. При достаточно больших потоках аммиака в процессе роста площадь этой грани уменьшается, и в конечной фазе кристаллит оказывается полностью огранен по имеющим наименьшую скорость роста плоскостям $\{1\bar{1}01\}$. Присутствие грани (0001) на кристаллитах, выращенных при малых потоках аммиака, можно связать с большей скоростью роста наклонных и вертикальных граней в этих условиях, что приводит к большей ширине этих кристаллитов — они просто не успевают полностью ограниться по плоскостям $\{1\bar{1}01\}$.

В описываемых экспериментах при минимальных потоках аммиака формировались также вертикальные грани $\{1\bar{1}00\}$. Возможно, это связано с избытком галлия, доставляемого к растущему кристаллу за счет диффузии по поверхности маски, увеличивающейся при малом парциальном давлении аммиака. Это предположение подтверждает огранка кристаллитов, зарождающихся на дефектах в области сплошного маскирования, т. е. в условиях очень большого отношения полной площади поверхности к площади растущего кристаллита. В этом случае грани $\{1\bar{1}00\}$ доминируют, а вместо граней $\{1\bar{1}01\}$ формируются вицинальные поверхности, близкие к (0001).

В рамках существующих представлений о механизмах планарной и селективной эпитаксии можно предложить объяснение отмеченной выше неоднородности размеров кристаллитов при малых потоках аммиака. Высокое отношение потоков H_2/N_2 приводит к большому покрытию поверхности GaN подвижными атомами галлия, легко перетекающими между гранями, и к значительному переиспарению галлия с поверх-

ности [10]. Логично предположить, что в этих условиях интенсивный массообмен возможен не только между соседними гранями, но и между соседними кристаллитами. Если по какой-либо причине площадь грани (0001) одного из кристаллитов оказывается больше, чем у соседних, интенсивный рост этой грани локально снижает концентрацию атомов галлия (на поверхности маски и/или в газовой фазе) в окрестностях этого кристаллита, что снижает скорость роста остальных кристаллитов в этой области. Этот нарастающий процесс и приводит к заметному разбросу размеров кристаллита.

Влияние немаскированных участков поверхности и коалесценции кристаллитов на неоднородность их размеров (рис. 3), скорее всего, вызывается теми же причинами. При коалесценции „в ущелье“ между сомкнувшимися кристаллитами начинает расти новая грань (0001) большой площади, активно усваивающая материал. В результате кристаллиты разделяются на 2 массива: крупные, продолжающие разрастание, и мелкие, рост которых практически остановлен. В свою очередь, разрастание крупных кристаллитов подавляется немаскированной поверхностью, имеющей еще большую площадь грани (0001). Для уверенности в правильности этих предположений необходимо исследовать развитие процесса во времени. Однако полученные экспериментальные результаты и сами по себе демонстрируют существенное влияние ширины немаскированных поверхностей на характер роста в соседних окнах и необходимость учета этого явления при разработке топологии маски для селективной эпитаксии сложных неоднородных структур.

Проведенное исследование имеет как фундаментальную, так и прикладную ценность. Полученные в работе экспериментальные результаты будут в дальнейшем использоваться для разработки модели процесса селективной эпитаксии. Процесс срастания кристаллитов при селективной эпитаксии во многом близок к процессу срастания трехмерных островков при планарной эпитаксии GaN на сапфировых подложках. Сходны могут быть и механизмы развития неоднородностей при срастании, влияющие на свойства приборных структур. И наконец, полученные результаты могут быть напрямую использованы для создания технологии формирования полевых катодов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (10-02-00821).

Список литературы

- [1] Mukai T., Takekawa K., Nakamura S. // Jpn. J. Appl. Phys. 1998.
- [2] Wbunerer T., Bruckner P., Neubert B., Scholz F., Feneberg M., Lipski F., Schirra M., Thonke K. // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 89. P. 041121.
- [3] Akasaka T., Andro S., Nishida T., Saito H., Kobayashi N. // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 79. N 10. P. 1414–1416.
- [4] Kuramoto M., Kimura A., Sasoaka C., Rakida T., Nido M., Mizura M. // Jpn. J. Appl. Phys. 2001. V. 40. P. L925–L927.
- [5] Chua S.J., Hailong Zhou, Srolovitz D.J., Danxu Du // Phys. Stat. Sol. (C). 2008. V. 5. N 6. P. 1589–1593.
- [6] Kopolnek D., Underwood R.D., Kellrer B.P., Keller S., Denbaars S.P., Mishra U.K. // J. Cryst. Growth. 1997. V. 170. P. 340–343.
- [7] Hiramatsu K., Nishiyama K., Motogaito A., Miyake H., Iyechika Y., Maeda T. // Phys. Stat. Sol. (A). 1999. V. 176. P. 535.
- [8] Kopolnek D., Keller S., Vetury R., Underwood R.D., Kozodoy P., Den Baars S.P., Mishra K. // Appl. Phys. Lett. 1997. V. 71 (9). P. 1204.
- [9] Kitamura S., Hiramatsu K., Sawaki N. // Jpn. J. Appl. Phys. 1995. V.34. P. L1184–L1186.
- [10] Yakovlev E.V., Talalaev R.A., Kondratyev A.V., Segal A.S., Lobanova A.V., Lu W.V., Zavarin E.E., Sinitsyn M.A., Tsasulnikov A.F., Nikolaev A.E. // Cryst. Growth. 2008. V. 310. P. 4862–3866.