

06;12

Начальные стадии роста GaN на оксидированном кремнии

© В.Н. Бессолов, Ю.В. Жилияев, Е.В. Коненкова, С.А. Кукушкин,
А.В. Лукьянов, С.Д. Раевский, В.А. Федирко

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург
Институт проблем машиноведения РАН, С.-Петербург
Фонд поддержки науки и образования, С.-Петербург
Московский государственный технологический университет "Станкин"

Поступило в Редакцию 25 июля 2001 г.

Методом атомно-силовой микроскопии изучались начальные стадии роста GaN слоя на оксидированной кремниевой подложке. Рост осуществлялся методом HVPE при температуре 520°С.

Установлено: а) рост островков GaN контролируется поверхностной диффузией; б) распределение зародышей по размерам на поверхности существенно меняется при изменении времени роста от 10 до 200 минут, средний размер увеличивается от 15 до 400 nm, а разброс по размерам возрастает в 20 раз.

Показано, что экспериментально определенная скорость роста зародышей и функция распределения их по размерам находятся в хорошем согласии с теорией роста GaN на начальных стадиях.

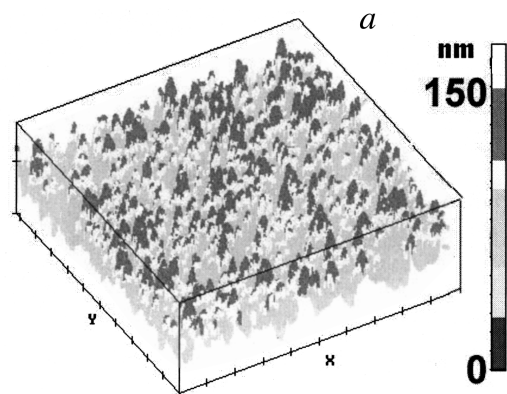
Гетероэпитаксиальный рост слоев нитрида галлия газофазной эпитаксией (HVPE) изучается уже более 30 лет [1], однако только в последние годы, в связи с успехами получения качественных слоев методом эпитаксии из металлоорганических соединений (MOCVD) [2] интерес к HVPE стремительно возрос. Это связано, во-первых, с тем, что HVPE — практически единственный метод получения толстых слоев полупроводников III-нитридов [3] и, во-вторых, метод получения низкотемпературных буферных слоев, например GaN [4]. Зарождение слоев при гетероэпитаксии при низкой температуре представляет существенный интерес, во-первых, как один из путей улучшения качества слоя при гетероэпитаксии уже на стадии зародышеобразования [5] и во-вторых, как один из методов получения наноразмерного GaN на подложке SiO₂, представляющий интерес для нового направления в физике полупроводников–поликристаллической фотоники [6].

Предпринимаются попытки выращивания слоев полупроводников III-нитридов на Si подложках методом HVPE при высоких температурах 1150°C [7] и 800°C [8] и было показано, что рост при $T > 800^\circ\text{C}$ монокристаллических слоев полупроводников III-нитридов на кремниевых подложках затруднен из-за взаимодействия кремния с NH_3 с образованием аморфного слоя Si_3N_4 [9]. Снижение температуры должно привести к уменьшению скорости взаимодействия подложки, как с аммиаком, так и с хлористым водородом.

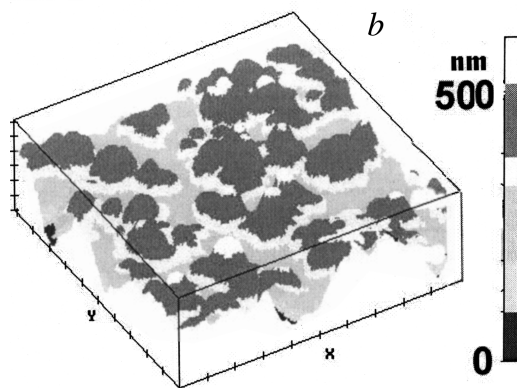
В этой работе сообщается о механизмах зарождения и кинетике роста слоя GaN(0001) на оксидированной подложке Si (111) методом HVPE при низких ($T = 520^\circ\text{C}$) температурах роста и проводится сравнение результатов с моделью [10].

Гетероэпитаксия GaN осуществлялась на предварительно окисленных подложках кремния диаметром 50 mm, которые вращались потоком водорода с частотой 1 Hz. Соотношение потоков $\text{H}_2/\text{NH}_3 = 2 : 1$, температура эпитаксии $T = 520^\circ\text{C}$. Время нахождения подложки SiO_2/Si в зоне роста было разным и составляло 10, 25, 50, 100, 200 min. После гетероэпитаксии, с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ) при комнатной температуре в атмосферных условиях, производилась регистрация картины начальных стадий роста GaN. Измерения выполнялись на приборе компании NT-MDT, с использованием стандартных кантиллеров из нитрида кремния. Сравнение и анализ АСМ изображений показывает, что в этих условиях происходит островковое зарождение слоя GaN (рис. 1), в форме диска, причем высота островка h в момент его возникновения, по-нашему мнению, соизмерима с радиусом основания диска R . С увеличением времени роста число зародышей на единицу площади подложки уменьшается (рис. 2). Распределение же зародышей GaN по размерам на поверхности подложки изменяется: с увеличением времени от 10 min до 200 min, средний размер h увеличивается от 15 nm до 400 nm (рис. 3), а диапазон изменения зародышей по размерам, который определяется по полуширине кривой распределения — Δh , возрастает в 20 раз (рис. 3). Скорость роста зародышей V составляет величину порядка $3 \cdot 10^{-2}$ nm/s. Следует отметить, что средняя величина шероховатости подложки Si после температурной обработки при 520°C составляет около 10 nm. Функция распределения зародышей по размерам при разных временах при этой температуре (рис. 2) находится в согласии с теоретически полученной функцией [10].

Такое развитие событий при зарождении островков GaN на поверхности Si при низких температурах можно интерпретировать так. Как



scale: Y = 1000 nm, X = 1000 nm, Z = 100 nm



scale: Y = 1000 nm, X = 1000 nm, Z = 100 nm

Рис. 1. Профиль поверхности GaN/SiO₂ при различных временах гетероэпитаксии (время в мин.): *a* — 100, *b* — 200.

известно [11], если длина свободного пробега атомов (молекул) по поверхности λ_s существенно больше среднего радиуса основания островка R , то островки растут посредством поверхностной диффузии атомов. Если $\lambda_s \ll R$, то островки могут расти, как за счет поверхностной диффузии, так и за счет механизма встраивания атомов (молекул) в

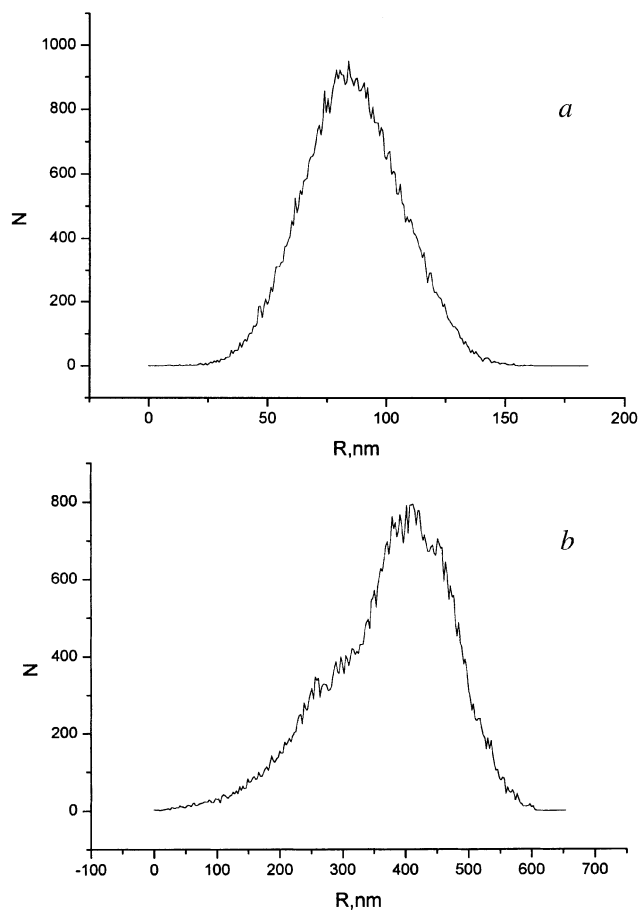


Рис. 2. Распределение зародышей GaN по размерам при различных временах роста (время в мин): *a* — 100, *b* — 200.

островок, т.е. когда химическая реакция на поверхности по контуру островка лимитирует его рост. Оценки длин свободного пробега атомов Ga и N [10], показали, что λ_{Ga} при $T = 520^\circ\text{C}$ составляет величину порядка 100 nm, и, следовательно, зарождение GaN и его рост должно осуществляться посредством поверхностной диффузии атомов. В этом

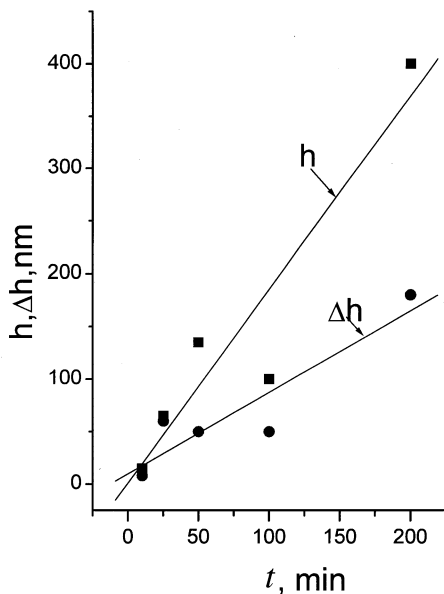


Рис. 3. Зависимости среднего размера высоты зародыша GaN (h) и средней величины разброса зародышей по размерам (Δh) от времени роста зародыша.

случае скорость роста островка, выраженная в числе молекул GaN в секунду [10]

$$V_i = \frac{\xi_{\text{GaN}}}{t_0}, \quad (1)$$

где

$$t_0 = \frac{1}{D_s^0 \pi N_0}, \quad (2)$$

$$D_s^0 = \frac{D_{a\text{Ga}} D_{a\text{N}} C_{0\text{Ga}} C_{0\text{N}}}{4(D_{a\text{Ga}} C_{0\text{Ga}} \lambda_{0\text{N}} + D_{a\text{N}} C_{0\text{N}} \lambda_{0\text{Ga}})}, \quad (3)$$

$$\xi_0 = \frac{J_{\text{Ga}} J_{\text{N}} \tau_{\text{Ga}} \tau_{\text{N}}}{N_{sa}} - 1, \quad (4)$$

ξ_{GaN} — пересыщение по GaN, для многокомпонентной системы, t_0 — характерное время островка, GaN, D_s^0 — обобщенный коэффициент

диффузии (для GaN он характеризует скорость движения границы островка), N_0 — число мест адсорбции на поверхности подложки, $N_0 \sim 1/B^2$ (B — параметр решетки подложки SiO₂/Si). J_i — поток падающих на подложку атомов, τ_i — время жизни i -компонента на подложке, $N_{sa} = C_{0Ga}C_{0N}N_0$, C_{0Ga} , C_{0N} — равновесные концентрации Ga и N, N_0 — равновесное число молекул GaN на подложке, D_{ai} — коэффициент диффузии i компонента, λ_{si} — длина свободного пробега атомов по поверхности.

Оценка по (1)–(4) показала, что при температуре $T = 520^\circ\text{C}$ характерное время t_0 достаточно велико $\sim 2 \cdot 10^4$ s, а величина пересыщения $\zeta_0 \sim 1$. Видно, что скорость роста островка V_i составит величину порядка $5 \cdot 10^{-5}$ mol/s, или при условии $h = R$, $V \sim 1 \cdot 10^{-2}$ nm/s и находится в хорошем согласии с экспериментом.

Таким образом, начальные стадии роста GaN на оксидированном кремнии при гетероэпитаксии методом HVPE происходят путем зарождения островков GaN с размерами порядка 10 nm, причем экспериментальная скорость роста зародышей и функция их распределения по размерам находятся в хорошем согласии с теорией роста GaN на начальных стадиях [10].

Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить С.-Петербургский научный центр РАН и Фонд поддержки науки и образования (С.-Петербург) за финансовую поддержку работы в этом направлении. Работа была частично поддержана программой "Поверхностные атомные структуры" (грант 5–4–99).

Список литературы

- [1] Maruska H.P., Tietjen J.J. // Appl. Phys. Lett. 1969. V. 15. P. 327.
- [2] Amano H., Sawaki N., Akasaki I., Toyoda Y. // Appl. Phys. Lett. 1986. V. 48. P. 353.
- [3] Nakamura S., Senoh M., Nagahama S., Iwasa N., Ymada T., Matsushita T., Kiyoku H., Sugimoto Y., Kozaki T., Umemoto H., Sano M., Chocho K. // Appl. Phys. Lett. 1998. V. 73. P. 832.
- [4] Tavernier P.R., Etzkon E.V., Wang Y., Clarke D.R. // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 77. P. 1804.
- [5] Cheung S.H., Zheng L.X., Xie M.H., Tong S.Y. // Phys. Rev. 2001. B. 64.
- [6] Yamada K., Asahi H., Tampo H., Imanishi Y., Ohnishi K., Asami K. // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 78. P. 2849.

- [7] *Norejka A.J., Ing D.W.* // J. Appl. Phys. 1968. V. 39. P. 5578.
- [8] *Bauer I., Biste L., Bolze D.* // Phys. Status Sol. 1977. V. 39a. P. 173.
- [9] *Ефимов А.Н., Лебедев А.О., Царегородцев А.М.* // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. С. 52.
- [10] *Кужушкин С.А., Бессолов В.Н., Осипов А.В., Лукьянов А.В.* // ФТТ (в печати).
- [11] *Кужушкин С.А., Слезов В.В.* Дисперсные системы на поверхности твердых тел. С.-Петербург: Наука, 1996. 304 с.