

## Легирование магнием в молекулярно-пучковой эпитаксии нитрида галлия из аммиака

© А.А. Воробьев<sup>¶</sup>, В.В. Кораблев, С.Ю. Карпов\*

Санкт-Петербургский государственный технический университет,  
195251 Санкт-Петербург, Россия

\* Софт-Импакт, а/я 83,  
194156 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 25 марта 2003 г. Принята к печати 7 июля 2003 г.)

Модель легирования магнием верифицируется для молекулярно-пучковой эпитаксии нитрида галлия с использованием аммиака в качестве источника реактивной компоненты V группы. Хорошее количественное согласие с экспериментом позволяет на основе данной модели сравнить эффективность *p*-легирования для молекулярно-пучковой эпитаксии из плазмо-активированного азота и аммиака. В последнем случае удается получить большие концентрации Mg в кристалле за счет повышенного V/III отношения в падающих потоках.

В настоящее время нитриды III группы являются базовыми материалами оптоэлектроники сине-зеленого, фиолетового и ультрафиолетового спектрального диапазона, а также высокотемпературной и высокочастотной электроники. Для получения приборных гетероструктур на основе нитридов широко используются МОС-гидридная (МОСГЭ) и молекулярно-пучковая эпитаксия (МПЭ). Одной из актуальных проблем этих ростовых технологий является управление легированием *p*-типа, для чего традиционно используется атомарный магний (в МПЭ) или его металлоорганические соединения (в МОСГЭ). Несмотря на многочисленные исследования механизмов легирования, до сих пор еще не выработано общепризнанной модели, которая бы описывала основные закономерности этого процесса, наблюдаемые в эксперименте. В работе [1] мы предложили модель легирования GaN магнием в МПЭ, использующей плазмо-активированный азот в качестве реактивной компоненты V группы. Модель основана на предположении о конкурентном вхождении Mg и Ga в катионную подрешетку GaN, в результате чего концентрация магния  $n_{Mg}$  в GaN оказывается связанной с его падающим потоком  $F_{Mg}$  и скоростью роста кристалла  $V_g$ , измеряемыми в монослоях в секунду (МС/с), соотношением

$$n_{Mg} = \frac{N_A \rho_{GaN}}{M_{GaN}} \cdot \frac{F_{Mg}}{V_g + k_{Mg} \omega \theta_{Ga}}, \quad (1)$$

где  $N_A$  — число Авогадро,  $\rho_{GaN}$  и  $M_{GaN}$  — соответственно плотность и молярная масса GaN,  $k_{Mg} = 7.71 \cdot 10^{12} \exp(-14994/T) \text{ с}^{-1}$  и  $\theta_{Ga}$  — константа десорбции Mg с поверхности GaN [1] и ее покрытие галлием,  $\omega(T) = 3.523 \cdot 10^5 \exp(-21070/T)$  — константа равновесия, соответствующая переходу Mg из адсорбционного слоя в объем кристалла. Эта константа определена в [1] путем подгонки температурной зависимости концентрации внедренной примеси к данным работы [2].

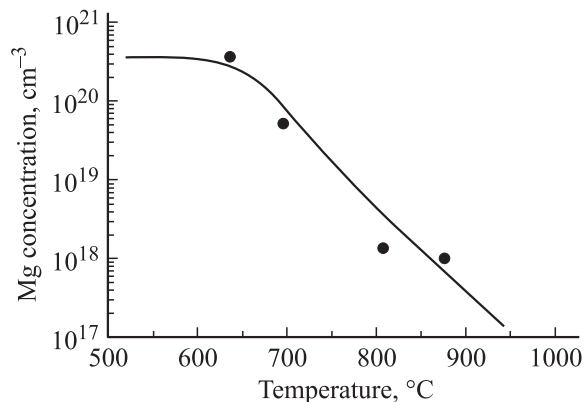
В данной работе будет показано, что модель, предложенная в работе [1], количественно описывает леги-

рование GaN магнием в МПЭ с аммиаком в качестве источника реактивного азота. Это позволяет провести сравнение эффективности легирования в двух разновидностях МПЭ — из плазмо-активированного азота и аммиака.

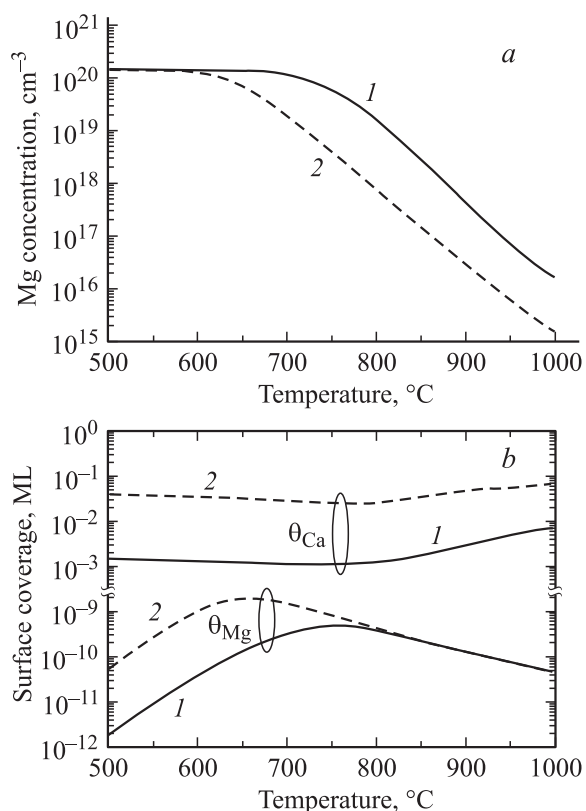
Скорость роста GaN в аммиачной МПЭ рассчитывалась в рамках кинетической модели [3], позволяющей предсказывать покрытие поверхности атомами галлия и азота. Эта модель учитывает адсорбированный на поверхности водород посредством введения эффективной константы десорбции молекул азота, заметно меньшей аналогичной константы в отсутствие водорода. Концентрация Mg в кристалле определялась из выражения (1). Для проверки работоспособности модели мы использовали экспериментальные данные работы [4] по легированию GaN магнием в аммиачной МПЭ. На рис. 1 показано, что предсказания модели находятся в хорошем количественном согласии с экспериментом. Видно, что наклонная температурная зависимость концентрации Mg в кристалле переходит в плато при температурах ниже чем  $\sim 650^\circ\text{C}$ . Этот переход соответствует смене механизма захвата примеси, обсуждаемой в [1]. При  $T \geq 650^\circ\text{C}$  концентрация Mg в адсорбционном слое определяется в основном балансом между падающим и десорбированным потоками магния, в то время как при  $T \leq 650^\circ\text{C}$  — балансом между поступлением Mg на растущую поверхность и его уходом в кристалл. В последнем случае концентрация Mg в твердой фазе становится зависимой не от температуры, а от отношения  $F_{Mg}/V_g$ , как это следует из выражения (1) при  $V_g \gg k_{Mg} \omega \theta_{Ga}$ .

Хорошее согласие теории с экспериментом позволяет провести сравнительный анализ эффективности внедрения Mg в МПЭ GaN, использующей различные источники реактивной компоненты V группы — плазмо-активированный азот и аммиак. Для этого мы выбрали типичные ростовые условия в этих двух технологиях, считая, что в обоих случаях падающий поток Ga составляет  $\sim 1$  МС/с. В МПЭ из плазмо-активированного азота (английская аббревиатура РЕМВЕ) возможно кратко-

<sup>¶</sup> E-mail: type@bk.ru



**Рис. 1.** Температурная зависимость концентрации магния в GaN. Точки — экспериментальные данные работы [4], кривая — предсказания теории. Поток  $F$ , МС/с: Ga — 1.1,  $\text{NH}_3$  — 32, Mg — 0.008.



**Рис. 2.** Концентрация Mg (a) и поверхностные покрытия магнием и галлием (b) в зависимости от ростовой температуры, рассчитанные для типичных режимов роста GaN с помощью МПЭ из аммиака ( $\text{NH}_3$ -МВЕ) — 1 и плазмо-активированного азота (РЕМВЕ) — 2.

временно реализовать лишь небольшое превышение потока азота над потоком галлия из-за фасетирования поверхности GaN в процессе роста. Поэтому в расчетах мы приняли V/III отношение:  $F_{\text{N}}/F_{\text{Ga}} = 1.1$ . Для аммиачной МПЭ (английская аббревиатура  $\text{NH}_3$ -МВЕ) характерны

заметно большие V/III отношения в падающих потоках. С учетом малости коэффициента прилипания аммиака на поверхности GaN ( $\alpha_{\text{NH}_3} = 0.04$  [5]) это отношение составляет  $\alpha_{\text{NH}_3} F_{\text{NH}_3} / F_{\text{Ga}} = 4.0$ .

Сравнение концентраций Mg в кристалле, рассчитанные для МПЭ из плазмо-активированного азота и аммиака с потоком магния  $F_{\text{Mg}} = 0.003$  МС/с, представлено на рис. 2. Видно, что в случае прямого захвата примеси кристаллом ( $T \leq 650^\circ\text{C}$  для МПЭ из плазмо-активированного азота и  $T \leq 700^\circ\text{C}$  для МПЭ из аммиака) обе технологии имеют одинаковую эффективность внедрения примеси, максимальная концентрация которой достигает  $10^{20}$  см $^{-2}$ . Однако при более высоких температурах, благоприятных для получения высококачественных кристаллов GaN, в МПЭ из аммиака могут быть получены более высокие концентрации Mg (рис. 2, a). Это прямо связано с влиянием на эффективность внедрения Mg-покрытия ростовой поверхности галлием, которое тем меньше, чем больше V/III отношение в падающих потоках (рис. 2, b). В сочетании с более высокими достижимыми температурами роста [3] последнее обстоятельство дополнительно подчеркивает преимущества аммиачной МПЭ для выращивания приборных гетероструктур оптоэлектроники.

Таким образом, в данной работе осуществлена верификация модели легирования GaN магнием [1] для МПЭ из аммиака и проведено сравнение эффективности легирования для двух типов источника реактивной компоненты V группы — аммиака и плазмо-активированного азота. Показано, что с точки зрения эффективности р-легирования аммиачная МПЭ имеет преимущество по сравнению с МПЭ из плазмо-активированного азота за счет возможности использования более высокого V/III отношения в падающих потоках.

## Список литературы

- [1] А.А. Воробьев, В.В. Кораблев, С.Ю. Карпов. ФТП, **37**, 866 (2003).
- [2] S. Guha, N.A. Bojarzuk, F. Cardone. Appl. Phys. Lett., **71**, 1685 (1997).
- [3] S.Yu.Karpov, R.A. Talalev, Yu.N. Makarov, N. Grandjean, J. Massies, B. Damilano. Surf. Sci., **450**, 191 (2000).
- [4] M. Kamp, M. Mayer, A. Pelzmann, K.J. Ebeling. MRS J. Nitride Semicond. Res., **2**, 26 (1997).
- [5] M. Mesrine, N. Grandjean, J. Massies. Appl. Phys. Lett., **72**, 350 (1998).

Редактор Л.В. Беляков

## Mg-doping GaN in molecular-beam epitaxy with ammonia

A.A. Vorobyev, V.V. Korablev, S.Y. Karpov\*

St. Petersburg State Technical University,  
195251 St. Petersburg, Russia

\* Soft-Impact, post box #33,  
194156 St. Petersburg, Russia