

Доменная структура материала полупроводниковых лазеров на основе GaN/SiC

© М.Е. Бойко, М.Д. Шарков, А.М. Бойко, С.И. Нестеров, С.Г. Конников

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Санкт-Петербург, Россия
E-mail: m.e.boiko@mail.ioffe.ru

Доменная структура пленок гексагональных полупроводников GaN/SiC исследована методом малоуглового рассеяния рентгеновских лучей с целью определения возможных конфигураций доменов в пленке GaN/SiC, способных повлиять на свойства лазера на ее основе.

В результате обработки спектров малоуглового рассеяния рентгеновских лучей согласно моделям Порода и Брэгга получены данные о таких особенностях образцов, как геометрические свойства кластеров и расстояния в сверхструктурах (слоях, сверхрешетках) соответственно. Предложена модель регулярной сетки доменных стенок в пленке GaN/SiC. Подтверждена гипотеза о формировании нитевидных структур вблизи интерфейса пленки-подложки.

1. Введение

Среди соединений, на которых основана работа полупроводниковых лазеров, особое внимание уделяется таким веществам, как нитрид галлия и карбид кремния. Нитрид галлия GaN является гексагональным полупроводником с решеткой типа вюрцита, симметрия $P6_3mc$ (точечная группа C_{6v}). Параметры решетки: $a = 3.19 \text{ \AA}$, $c = 5.17 \text{ \AA}$. Данный полупроводник — прямозонный, с большой шириной запрещенной зоны ($E_g = 3.4 \text{ eV}$ при комнатной температуре). Карбид кремния α -SiC также представляет собой гексагональный полупроводник, встречается в природе как минерал муассанит. Симметрия решетки $P6_3mc$, как и у нитрида галлия; параметры решетки $a = 3.07 \text{ \AA}$, $c = 15.11 \text{ \AA}$. Ширина запрещенной зоны 3.05 eV .

В этой работе проводились исследования пленки GaN/SiC. Слои GaN были выращены сублимационным сэндвич-методом в атмосфере аммиака. В качестве источника пара GaN были использованы поликристаллический порошок и металлический Ga. Рост проводился в кварцевых реакторах горизонтального и вертикального типов с высокочастотным нагревом. Подложка α -SiC была выращена методом Лели [1], ось (0001) перпендикулярна развитой поверхности роста гетероэпитаксиальной пленки GaN.

Начиная с 1997 года проводятся исследования кристаллической и доменной структуры данного образца методами рентгеновской дифрактометрии (РД) и малоуглового рассеяния рентгеновских лучей (МУРР) [2].

Методы РД и МУРР дают сведения об образце, дополняющие друг друга. Если рентгеноструктурный анализ (РСА) позволяет определить основные кристаллические компоненты в образце, то с помощью МУРР можно получить ряд данных, относящихся к доменной структуре образца. А именно, возможно оценить размеры микро- и нанообъектов (отдельных частиц, зерен, пор, кластеров) в материале, определить геометрический характер атомной матрицы образца (трехмерная, мембраны, цепочки) и его сверхструктурные особенности (тол-

щины регулярных слоев, межплоскостные расстояния сверхрешетки) [3], а также характер распределения этих неоднородностей в материале исследуемого образца.

Одной из наиболее любопытных особенностей полупроводниковых материалов типа $A^{III}B^V$ является то, что они могут формировать нитевидные структуры вблизи интерфейса роста [4]. В то же время метод МУРР известен своей чувствительностью к низкоразмерным объектам, что дает ему дополнительное преимущество при структурном анализе пленок GaN/SiC. Более того, модель Порода позволяет дать геометрическую характеристику низкоразмерным компонентам образца (например: плотные трехмерные, плоскостные, нитевидные) и оценить величину их фрактальной размерности тип этих объектов.

2. Эксперимент

Были проведены измерения данных РСА и МУРР для образца GaN/SiC, выращенного методом Лели, и спектров МУРР образца SiC, подвергнутого с одной из сторон процедуре генерации пор. Сбор экспериментальных данных от образца GaN/SiC проходил в режиме Лауэ (на прохождение) при измерении как РД, так и МУРР. Кривые МУРР для эпитаксиального слоя GaN были зарегистрированы в режиме отражения (Брэгга), а пористого образца SiC — с обеих сторон образца, — как подвергнутой процессу генерации пор, так и противоположной. Регистрация всех дифрактограмм проводилась на лабораторных установках ДРОН-УМ, ДРОН-8 и МАРС-2 [5] в ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Использовалось излучение $CuK_{\alpha 1}$ (длина волны 1.54 \AA) с применением однокристалльного плоского монохроматора Si(111).

Кроме того, при регистрации и анализе данных МУРР важно помнить о следующей особенности рентгеновского излучения. Для электромагнитного излучения с частотой, превышающей плазменную частоту в данной среде, коэффициент преломления оказывается комплексной величиной с вещественной частью меньше единицы [6].

Как правило, плазменные частоты находятся в более мягких диапазонах энергий, чем рентгеновский. Поэтому при падении рентгеновских фотонов на поверхность образца под небольшим углом (не больше градуса) может произойти оптический эффект полного внешнего отражения (ПВО). В первом приближении величина угла ПВО составляет $\theta_0 = \omega_0/\omega$, где ω — частота падающего фотонного пучка, а ω_0 — плазменная частота материала.

Таким образом, при организации эксперимента по измерению МУРР в режиме отражения по Брэггу существует нижняя граница углового диапазона, внутри которого имеет смысл проводить обработку данных в соответствии со стандартными методами анализа МУРР [3]. Впрочем, при анализе кривых МУРР, зарегистрированных в режиме прохождения по Лауэ, подобного ограничения нет.

На рис. 1 показаны результаты регистрации РД для пленки нитрида галлия. Рис. 2 отображает кривую

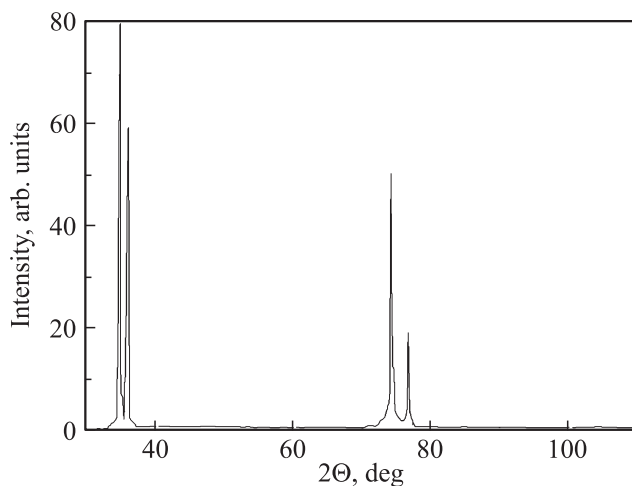


Рис. 1. Данные РД на образце GaN/SiC.

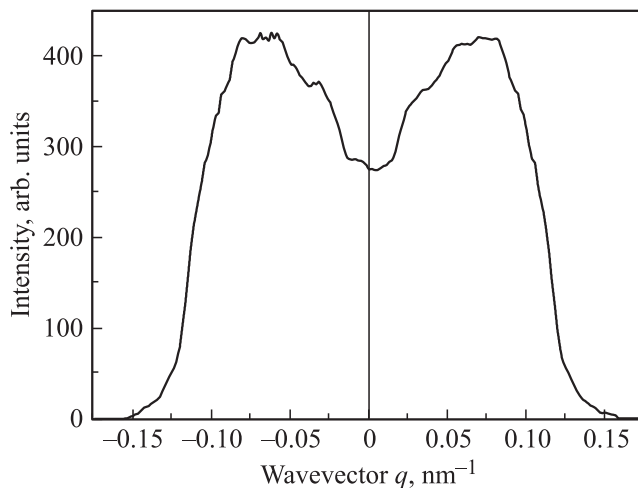


Рис. 2. Спектр МУРР от образца GaN/SiC.

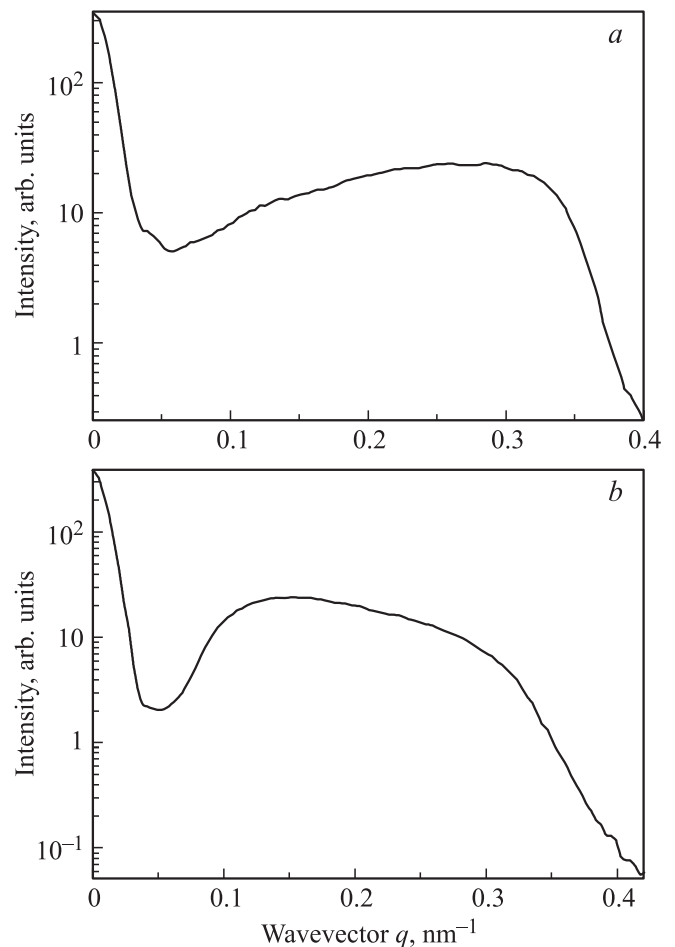


Рис. 3. *a* — спектр МУРР, полученный на непористой стороне образца SiC. *b* — спектр МУРР, полученный на пористой стороне образца SiC.

МУРР для образца GaN/SiC, полученную в режиме Лауэ. На рис. 3, *a* изображена дифрактограмма МУРР от образца карбида кремния, полученная на стороне образца, не подвергнутой ранее процедуре генерации пор, а на рис. 3, *b* — аналогичный результат для пористой стороны SiC. Оба спектра МУРР, показанные на рис. 3, записаны в режиме Брэгга.

3. Анализ данных и обсуждение результатов

3.1. Данные РСА. На кривой качания, полученной на образце GaN/SiC (рис. 1), наблюдаются интенсивные дифракционные пики при углах 2θ , равных 34.9, 36.0, 74.2, 76.7. Эти дифракционные пики отвечают узлам обратной решетки GaN(0002) (34.7°), SiC(0006) (35.6°), GaN(0004) (73.2°), SiC(00012) (75.4°) соответственно.

Как известно [7], соотношение Селякова—Шерера позволяет определить размеры зерен в поликристалле, однако для монокристаллического образца оно дает только

оценку размеров частиц в конкретных кристаллографических направлениях. В случае исследуемого образца GaN/SiC такая оценка привела к следующим величинам: 36 нм для GaN(0002), 39 нм для GaN(0004), 20 нм для SiC(0002), 33 нм для SiC(0004). Таким образом, толщины однородных слоев в направлении (0001) могут быть оценены как 30–40 нм для слоя GaN, 20–30 нм для подложки SiC.

3.2. Данные МУРР. Обработка спектра МУРР представляет собой комбинированную задачу, состоящую из трех не зависящих друг от друга подзадач [3,8].

В работе используется не угол рассеяния θ , а вектор рассеяния, равный по модулю $q = \frac{4\pi}{\lambda} \sin \theta$ (где λ — длина волны рентгеновских фотонов). Это позволяет сравнивать кривые качания, полученные при разных значениях длины волны пучка. Кривая МУРР, таким образом, является функцией величины q , что и предполагается при дальнейшем описании ее особенностей.

Пик, образующийся на дифрактограмме МУРР в окрестности нулевого угла рассеяния (прямого пучка в схеме Брэгга), имеет форму гауссиана, форма которого определяется характерными значениями пространственных размеров отдельных частиц (зерен, кластеров или пор) в среде образца. Крайя этого пика в то же время описываются степенной функцией, показатель которой связан с геометрическими особенностями частиц, формирующих образец. Если у плотного порошка из сферических зерен этот показатель обычно равен 4 (закон Порода [8]), то для образца, состоящего из низкоразмерных компонент, данный показатель будет примерно соответствовать фрактальной размерности материала [3,8]. Наконец, если образец содержит сверхрешетку или регулярные слои, на малоугловой дифрактограмме отображаются пики, положения которых связаны с межплоскостными расстояниями сверхрешетки (или толщинами слоев) d по закону Брэгга–Вульфа $qd = 2\pi n$ (где n — порядок отражения).

Спектр МУРР от образца GaN/SiC, приведенный на рис. 2, содержит два симметричных брэгговских пика. Анализ их размытой формы потребовал дополнительного моделирования, которое показало, что эти пики могут соответствовать первому рефлексу при величине межплоскостного расстояния около 77 нм. Процедура фильтрации на основе двукратного Фурье-преобразования, в свою очередь, привела к величинам положений брэгговских пиков, отвечающих межплоскостному расстоянию примерно 52 нм. Наблюдаемая периодичность в пленке GaN/SiC может быть объяснена существованием в ней регулярной доменной структуры с размерами доменов 50–80 нм.

Кроме того, была проведена запись спектра МУРР на исследуемом образце GaN/SiC с использованием более жесткого излучения ($\text{MoK}_{\alpha 1}$, 0.707 Å), что позволило исследовать более глубокие слои нитрида галлия. При этом применение модели Порода дало степенной

показатель около 1.6. Это указывает на образование нитевидных кластеров в области интерфейса.

Спектры МУРР, полученные для образца SiC как с непористой (рис. 3, *a*), так и с пористой (рис. 3, *b*) стороны, были зарегистрированы в режиме отражения. Поэтому при анализе дифрактограмм необходимо учитывать фактор полного внешнего отражения. В частности, для α -SiC (плазменная частота 23.1 eV) и излучения CuK_{α} угол ПВО отвечает величине 2θ около 20 угловых минут.

Это обстоятельство приводит к интересному выводу в отношении малоугловой кривой, отвечающей материалу α -SiC, не прошедшему процедуры упоривания (рис. 3, *a*). У данной кривой наблюдается локальный максимум при значении $q \approx 0.285 \text{ nm}^{-1}$ ($2\theta \approx 0.400^\circ$), что лишь незначительно превосходит величину, соответствующую ПВО для α -SiC. Поэтому стандартные методы обработки данных МУРР были применены лишь к той части спектра, которая находится в области углов выше величины этого локального максимума. При этом был учтен также тот момент, что дифрактограмма была зарегистрирована на серийном приборе ДРОН-УМ, дающем пучки низкой интенсивности. Поэтому анализу были подвергнуты лишь такие данные МУРР, которые существенно превосходили уровень приборного шума. Обработка по модели Порода выбранного в конечном счете набора данных (в промежутке от 0.29 nm^{-1} до 0.32 nm^{-1}) дала степенной показатель примерно 2.2. По-видимому, это свидетельствует о склонности α -SiC к образованию двумерных структур в приповерхностной области.

Для спектра МУРР, полученного от пористой стороны SiC, также проводилась обработка лишь по модели Порода. В диапазоне величин от 0.17 nm^{-1} до 0.30 nm^{-1} были определены два участка степенной зависимости с показателями, примерно равными 1.4 и 4. Как было упомянуто выше, показатель 4 характерен для плотной зернистой среды [8]. В то же время величина степени 1.4 типична для среды со значительным вкладом одномерных, нитевидных, сверхструктурных компонент. Таким образом, в упоренной части образца SiC проявляются признаки наличия одномерной структурной составляющей (наподобие атомных цепочек-колонн, расположенных перпендикулярно поверхности).

4. Заключение

Получена оценка размеров кристаллических зерен и межплоскостных расстояний сверхрешетки в структуре GaN/SiC. Сформулировано предположение о регулярной доменной сетке внутри пленки GaN/SiC. Подтверждена гипотеза об образовании нитевидных кластеров вблизи интерфейса GaN/SiC.

Показано, что в пористом карбиде кремния и в приграничной области интерфейса нитрида галлия возможно формирование структурных компонент, облада-

ющих низкоразмерной (преимущественно одномерной) геометрией.

Список литературы

- [1] J.A. Lely. *Ber. Dtsch. Keram. Ges.* **32**, 229 (1955).
- [2] Yu.A. Vodakov, E.N. Mokhov, A.D. Roenkov, M.E. Boiko, P.G. Varanov. *J. Cryst. Growth* **183**, 10 (1997).
- [3] Т.Н. Василевская, Р.И. Захарченя. *ФТТ* **38** 10, 3129 (1996).
- [4] В.Г. Дубровский, Г.Э. Цырлин, В.М. Устинов. *ФТП* **43**, 12, 1585 (2009).
- [5] К.Ю. Погребицкий, М.Д. Шарков. *ФТП* **44**, 6, 753 (2010).
- [6] Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. *Электродинамика сплошных сред*. Физматлит, М. (2005). 656 с.
- [7] А.А. Русаков. *Рентгенография металлов*. Атомиздат, М. (1977). 480 с.
- [8] *Small Angle X-Ray Scattering* / Ed. O. Glatter, O. Kratky. Academic Press, London (1982). 516 p.