

Спектры рамановского рассеяния толстых эпитаксиальных слоев GaN на SiC, полученных сублимационным сэндвич-методом

© А.Н. Анисимов¹, А.А. Вольфсон¹, Е.Н. Мохов^{2,†}

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

² Университет ИТМО, 197101 Санкт-Петербург, Россия

† E-mail: Mokhov@mail.ioffe.ru

(Получена 15 февраля 2018 г. Принята к печати 22 марта 2018 г.)

Исследованы спектры рамановского рассеяния толстых (~ 100 мкм и более) слоев GaN, выращенных на SiC кристаллах—подложках посредством сублимационного сэндвич-метода. Хорошее совпадение полученных нами спектров SiC-подложек с приводимыми в литературе свидетельствует о надежности наших измерений, а минимальные различия между нашими и литературными результатами для слоев GaN означают, что по качеству слои, выращенные нами с помощью сублимационного сэндвич-метода, не уступают изготовленным методами MOVPE или CHVPE.

DOI: 10.21883/FTP.2018.09.46283.8845

1. Введение

На сегодняшний день структуры на основе нитрида галлия и его твердых растворов являются наиболее предпочтительными для создания таких высокоэффективных оптических и электрических приборов, как коротковолновые светоизлучающие диоды, лазеры, фотодетекторы, а также силовые и высоковольтные устройства. Однако выращивание слоев нитрида галлия на инородных подложках, таких как SiC, Al₂O₃ и даже AlN, который наиболее близок по своим параметрам к GaN, приводит к появлению в слое большого количества дефектов из-за различия параметров решетки и коэффициентов термического расширения. Это вызывает значительное снижение эффективности приборов, создаваемых на основе этих слоев. Естественно, оптимальным решением было бы использование подложек, сформированных из совершенных объемных кристаллов самого GaN. Поэтому, несмотря на значительные технологические трудности, активно развиваются и совершенствуются различные способы выращивания этих кристаллов. В их ряду одним из наиболее перспективных является сублимационный сэндвич-метод (ССМ), впервые предложенный в лаборатории электроники полупроводников с большой энергией связи Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук. Первоначально этот метод использовался для выращивания кристаллов SiC [1], а позднее был успешно применен и для GaN [2]. Высокое качество получаемых этим методом толстых слоев GaN было подтверждено их микроскопическими, оптическими, рентгеновскими исследованиями, а также изучением электронного парамагнитного резонанса [2–5].

В данной работе с целью подтверждения высокого кристаллического совершенства слоев GaN, полученных посредством ССМ, проведено их исследование методом рамановской спектроскопии.

2. Эксперимент

Схема установки для реализации ССМ дана на рис. 1. Подробное описание как принципов ССМ, так и деталей ростового процесса дано в работе [3]. Ростовый процесс проводился при температуре ~ 1200°C, зазор между GaN-источником и SiC-подложкой составлял 2–5 мм, а величина потока NH₃ равнялась ~ 0.5 л/мин. Проверка качества полученных ССМ кристаллов производилась методом рамановской спектроскопии.

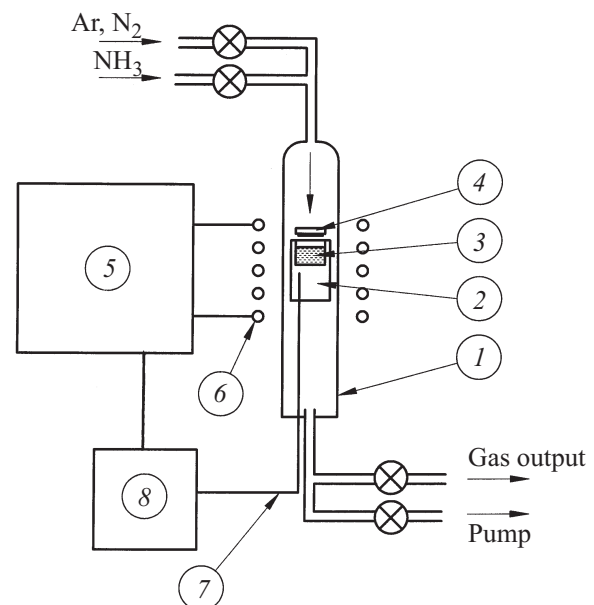


Рис. 1. Схема установки ССМ: 1 — вертикальная кварцевая труба-реактор, 2 — графитовый нагреватель, 3 — тигель с источником (смесь Ga + GaN), 4 — держатель с закрепленной на нем подложкой SiC, 5 — ВЧ генератор (440 кГц, 8 кВт), 6 — индуктор, 7 — термопара, 8 — прибор для измерения и управления температурой.

Измерения рамановских спектров были выполнены при комнатной температуре с помощью монохроматора фирмы Solar Instruments, оборудованного CCD камерой, позволяющей одновременно регистрировать спектр от 100 до 800 см^{-1} . В качестве источника возбуждения был использован Nd:YAG-лазер ($\lambda = 532 \text{ нм}$). Размер лазерного пятна составлял 1 $\mu\text{м}$, а спектральное разрешение — 2 см^{-1} . Мощность излучения, падающего на образец, составляла около 30 мВт. Спектры регистрировались как со стороны слоя GaN, так и со стороны SiC-подложки в геометрии рассеяния назад. Для исследования использовались толстые слои GaN, выращенные на подложках 6H-SiC с помощью ССМ. Согласно рентгеновским измерениям, полная ширина на половине высоты ($FWHM$) линий ω_{scan} для слоев GaN лежала в пределах 2.5–10 угл. мин, а для кристаллов-подложек SiC была около 15 угл. сек.

3. Результаты и их обсуждение

На рис. 2 и 3 приведены типичные рамановские спектры, полученные в геометрии рассеяния $z(x,y)\bar{z}$, для слоев GaN, выращенных нами, и 6H-SiC кристаллов-подложек соответственно. Известно, что идеальные GaN- и SiC-кристаллы имеют гексагональную структуру (пространственная группа симметрии C_{6v}^4). Элементарная ячейка GaN содержит четыре атома, и, таким образом, в Γ -точке оптические фононы принадлежат неприводимому представлению

$$\Gamma_{\text{opt}} = A_1(z) + 2B_1 + E_1(x, y) + 2E_2,$$

где x, y, z — направления поляризации. Здесь направление z совпадает с направлением гексагональной оси слоя c , а направление x перпендикулярно оси c и лежит в плоскости слоя.

Элементарная ячейка 6H-SiC содержит 12 атомов и в Γ -точке оптические фононы принадлежат неприводимому представлению [7]

$$\Gamma_{\text{opt}} = 5A_1(z) + 6B_1 + 5E_1(x, y) + 6E_2.$$

В литературе эти фононы так же обозначаются как FTA, FLA, FTO и FLO. К раман-активным фононам принадлежат моды симметрии $A_1(z)$, $E_1(x, y)$ и E_2 , в то время

Частоты фононов (см^{-1}) для GaN и SiC

Материал	Мода	Наш опыт	[6]	[7]
GaN	$E_2(\text{low})$	145.3	144.0	
	$E_1(\text{TO})$	559.5	558.8	
	$E_2(\text{high})$	568.0	567.6	
	$A_1(\text{LO})$	733.2	734.0	
SiC	FTA	145.3, 152.1		145, 150
	FTO	766.6, 788.1, 797.3		767, 789, 797
	FLA	504.5, 513.6		504, 514
	FLO	965.6		889, 965

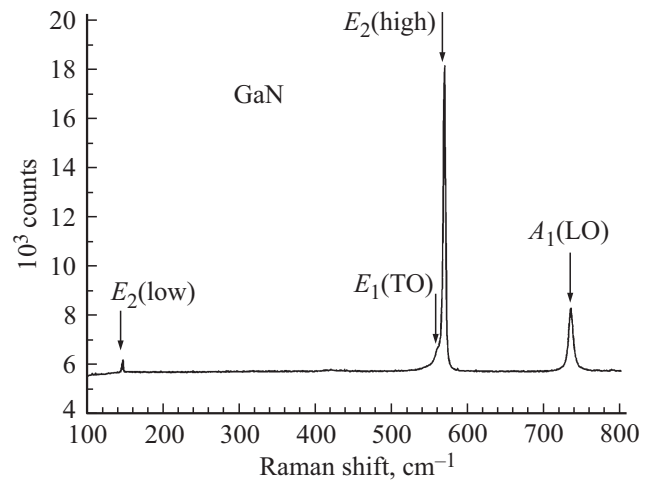


Рис. 2. Типичный рамановский спектр толстого (100 мкм и более) слоя GaN, выращенного посредством ССМ.

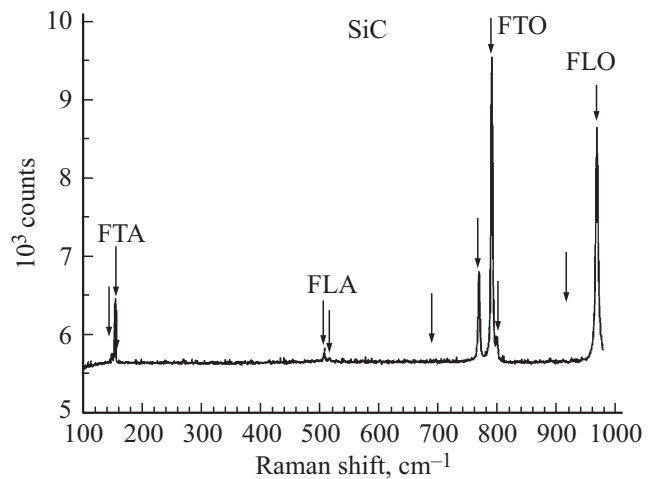


Рис. 3. Типичный рамановский спектр SiC кристалла-подложки.

как B_1 -моды не проявляются в рамановских спектрах [6]. Моды поперечных акустических и оптических ветвей хорошо заметны. В области 150 см^{-1} наблюдаются острые пики, соответствующие фононным модам симметрии E_2 . В SiC они дублетны для сложенных поперечных акустических мод, которые соответствуют краю базовой зоны Бриллюэна, и расщепление дублета составляет 7 см^{-1} , что характерно для нашей геометрии эксперимента с рассеянием назад [7]. Анализ мод 6H-SiC показывает, что $FWHM$ линий лежит в интервале от 3 до 3.5 см^{-1} для мод FTA, FTO, FLA и около 6 см^{-1} для моды FLO. Для GaN соответственно данные параметры равны 4 и 8 см^{-1} . Полученные экспериментальные результаты приведены в таблице. На основании наших измерений, в сравнении с данными работ [6,7], приведенными в таблице, мы получили хорошее совпадение экспериментальных результатов по 6H-SiC и GaN. Минимальные различия в результатах для GaN означают, что по качеству выращенные нами с помощью ССМ слои не

уступают изготовленным посредством методов MOVPE и CHVPE [6].

4. Заключение

На основании сопоставления литературных данных [6,7], линий, наблюдаемых в наших спектрах (см. таблицу), и значений их полуширины можно с большой уверенностью утверждать, что исследованные кристаллы, выращенные с помощью ССМ метода, обладают высоким совершенством кристаллической решетки, не уступающим тем, что изготовлены методами MOVPE и CHVPE [6].

Список литературы

- [1] Yu.A. Vodakov, E.N. Mokhov, A.D. Roenkov. Patent of USSR N 1136501 (1983).
- [2] Yu.A. Vodakov, E.N. Mokhov, A.D. Roenkov, M.E. Boiko, P.G. Baranov. *J. Cryst. Growth*, **183** (1/2), 10 (1997).
- [3] P. Baranov, E. Mokhov, A. Ostroumov, M.G. Ramm, M.S. Ramm, V. Ratnikov, A. Roenkov, Yu. Vodakov, A. Wolfson, G. Saparin, S. Karpov, D. Zimina, Yu. Makarov, H. Juer-gensen. *MRS Internet J. Nitride Semicond. Res.*, **3**, 50 (1998).
- [4] P.G. Baranov, I.V. Ilyin, E.N. Mokhov, A.D. Roenkov. *Inst. Phys. Conf. Ser. N 155*, chap. 12, 985 (1997).
- [5] P.G. Baranov, I.V. Ilyin, E.N. Mokhov. *Sol. St. Commun.*, **101** (8), 611 (1997).
- [6] V.Yu. Davydov, Yu.E. Kitaev, I.N. Goncharuk, A.N. Smirnov, J. Graul, O. Semchinova, D. Uffmann, M.B. Smirnov, A.P. Mirgorodsky, R.A. Evarestov. *Phys. Rev. B*, **58** (19), 12899 (1998).
- [7] S. Nakashima, H. Harima. *Phys. Status Solidi A*, **162** (1), 39 (1997).

Редактор А.Н. Смирнов

Raman scattering spectra of thick GaN layers on SiC obtained by sublimation sandwich method

A.N. Anisimov¹, A.A. Wolfson¹, E.N. Mokhov²

¹ Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

² ITMO University,
197101 St. Petersburg, Russia

Abstract Raman scattering spectra of thick (~ 100 mkm and more) GaN layers grown on SiC crystal substrates by the use of sublimation sandwich method were investigated. Good agreement of SiC substrates spectra we got with literature sources forgives the accuracy of our measurements and quite satisfactory coincidence of our and literary results for GaN layers means that the quality of our layers is not worse than of the layers grown by MOVPE or CHVPE methods.