

УДК 621.793.162

© В. В. Вороненков, Н. И. Бочкарева, М. В. Вирко, Р. И. Горбунов, А. С. Зубрилов, В. С. Коготков, Ф. Е. Латышев, Ю. С. Леликов, А. А. Леонидов, Ю. Г. Шретер

## УСТАНОВКА ХЛОРИД-ГИДРИДНОЙ ГАЗОФАЗНОЙ ЭПИТАКСИИ ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ ОБЪЕМНЫХ СЛОЕВ НИТРИДА ГАЛЛИЯ

Хлорид-гидридная газофазная эпитаксия — перспективный метод для промышленного производства подложек нитрида галлия. Однако HVPE-реакторов для выращивания объемных слоев GaN и AlN на рынке нет. Нами разработан HVPE-реактор для массового производства объемных эпитаксиальных слоев нитридов галлия и алюминия.

Кл. сл.: HVPE, реактор, GaN, подложки, III-нитриды

### ВВЕДЕНИЕ

Подавляющее большинство нитридных приборов выпускается в настоящее время на подложках сапфира, кремния или карбида кремния. Подложки объемного нитрида галлия применяются только для структур, требующих высокого кристаллического качества эпитаксиальных слоев. До недавних пор рынок подложек GaN ограничивался производством голубых лазеров. В последние годы номенклатура приборов на объемном GaN, массово производящихся или готовящихся к производству, существенно расширилась — это зеленые лазеры [1], мощные светодиоды [2], вертикальные силовые приборы [3]. Основные методы производства пластин GaN — хлорид-гидридная газофазная эпитаксия (HVPE) и выращивание из раствора: аммонотермальный метод и метод Na-Flux. Метод HVPE позволяет получать эпитаксиальные слои высокой чистоты, вплоть до некомпенсированных полуизолирующих [4], при этом структурное качество таких слоев определяется применяемой стартовой подложкой: при использовании подложки объемного GaN плотность дислокаций в эпитаксиальных слоях не превышает плотности дислокаций в подложке. Методы выращивания из раствора позволяют получать высоколегированные кристаллы с высоким структурным совершенством [5, 6]. Использование таких кристаллов в качестве зародышей для разращивания в HVPE-установке [7] обеспечивает возможность производства кристаллов GaN с концентрацией примесей менее  $10^{14} \text{ см}^{-3}$  при плотности дислокаций менее  $10^3 \text{ см}^{-2}$ .

Таким образом, промышленные установки для хлорид-гидридной газофазной эпитаксии нитрида галлия востребованы, но на рынке не представле-

ны. Нашей целью было создание подобного оборудования.

### ОПИСАНИЕ РАЗРАБОТАННОЙ УСТАНОВКИ

Разработанная нами установка (рис. 1) включает в себя систему подачи газов, реакционную камеру с вакуумным загрузочным шлюзом и устройства очистки отработанных газов.

Реакционная камера — вертикальная, с горячими стенками, температура держателя подложки — до  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ . Диаметр подложки —  $50 \text{ мм}$ ; неоднородность толщины осаждаемого слоя  $< 5 \%$ . Скорость эпитаксиального роста GaN — до  $400 \text{ мкм/ч}$ .



Рис. 1. Установка для выращивания объемных эпитаксиальных слоев GaN

Несколько источников хлоридов ( $\text{GaCl}$ ,  $\text{AlCl}_3$ ,  $\text{SiCl}_4$ ,  $\text{TiCl}_4$ ,  $\text{BCl}_3$ ) позволяют в одном процессе с выращиванием GaN наносить слои AlN, BN, TiN,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ .

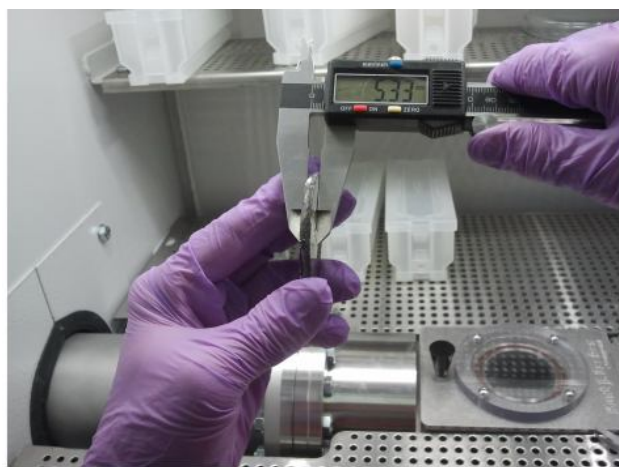
В реакционной камере отсутствуют детали сложной формы из кварца и иных хрупких материалов. Наличие вакуумной шлюзовой камеры обеспечивает возможность перезагрузки пластин без остановки реактора.

Система самоочистки реактора позволяет очищать ростовую камеру и держатель подложки без

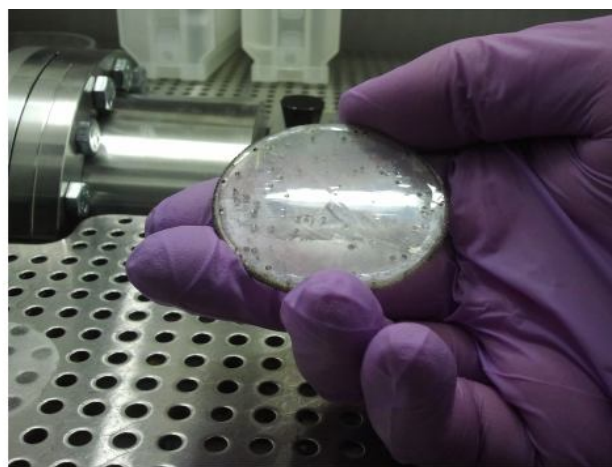
остановки реактора в промежутках между ростовыми процессами, что позволило улучшить воспроизводимость и повысить срок службы элементов ростовой камеры.

Установка приспособлена к продолжительным ростовым процессам и позволяет выращивать слои толщиной до 10 мм и более.

Объемные кристаллы нитрида галлия толщиной 5 мм, выращенные на этой установке, показаны на рис. 2.



а



б

**Рис. 2.** Кристаллы GaN, выращенные на разработанной установке.

а — в непрерывных ростовых процессах продолжительностью 24 ч получены кристаллы толщиной до 5 мм;  
б — поверхность полученных кристаллов гладкая, плотность макродефектов на поверхности — менее  $5 \text{ см}^{-2}$

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Miyoshi T., Masui S., Okada T. et al. 510–515 nm In-GaN-based green laser diodes on C-plane GaN substrate // Applied Physics Express. 2009. Vol. 2, no. 6. 062201. Doi: 10.1143/APEX.2.062201.
2. Cich M.J., Aldaz R.I., Chakraborty A. et al. Bulk GaN based violet light-emitting diodes with high efficiency at very high current density // Applied Physics Letters. 2012. Vol. 101, no. 22. 223509. Doi: 10.1063/1.4769228.
3. Nie H., Diduck Q., Alvarez B. et al. 1.5-kV and 2.2-mOhm-cm<sup>2</sup> Vertical GaN Transistors on Bulk-GaN Substrates // IEEE Electron Device Letters. 2014. Vol. 35, no 9. P. 939–941.
4. Fujikura H., Yoshida T., Shibata M., Otoki Y. Recent progress of high-quality GaN substrates by HVPE method // Proceedings of "Gallium Nitride Materials and Devices XII". International Society for Optics and Photonics. 2017. Vol. 10104. 1010403. Doi: 10.1117/12.2257202.
5. Mori Y., Imade M., Maruyama M., Yoshimura M. Growth of GaN crystals by Na flux method // ECS Journal of Solid State Science and Technology. 2013. Vol. 2, no. 8. P. N3068–N3071. Doi: 0.1149/2.015308jss.
6. Kucharski R., Zajac M., Doradziński R. et al. Non-polar and semi-polar ammonothermal GaN substrates // Semiconductor Science and Technology. 2012. Vol. 27, no. 2. 024007. Doi: 10.1088/0268-1242/27/2/024007.
7. Bockowski M., Iwinska M., Amilusik M. et al. Challenges and future perspectives in HVPE-GaN growth on ammonothermal GaN seeds // Semiconductor Science and Technology. 2016. Vol. 31, no. 9. 093002. Doi: 10.1088/0268-1242/31/9/093002.

**Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург** (Вороненков В.В., Бочкарева Н.И., Горбунов Р.И., Зубрилов А.С., Леликов Ю.С., Шретер Ю.Г.)

**АО "ТРИНИТРИ", Санкт-Петербург** (Вирко М.В., Коготков В.С., Латышев Ф.Е.)

**Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), Санкт-Петербург** (Леонидов А.А.)

Контакты: *Вороненков Владислав Валерьевич*,  
voronenkov@mail.ioffe.ru

Материал поступил в редакцию 26.06.2018

## HYDRIDE VAPOR PHASE EPITAXY SYSTEM FOR BULK GAN LAYERS DEPOSITION

V. V. Voronenkov<sup>1</sup>, N. I. Bochkareva<sup>1</sup>, M. V. Virko<sup>2</sup>, R. I. Gorbunov<sup>1</sup>, A. S. Zubrilov<sup>1</sup>,  
V. S. Kogotkov<sup>2</sup>, F. E. Latyshev<sup>2</sup>, Y. S. Lelikov<sup>1</sup>, A. A. Leonidov<sup>3</sup>, Y. G. Shreter<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*The Ioffe Institute of the Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russia*

<sup>2</sup>*JSC "Trinitri", Saint-Petersburg, Russia*

<sup>3</sup>*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia*

Hydride Vapor Phase Epitaxy is a promising method for the industrial production of GaN substrates. However, no HVPE reactors for the GaN and AlN bulk layer deposition are available on the market. We have developed a HVPE reactor for mass production of bulk GaN and AlN epitaxial layers with thickness up to 10 mm and diameter of 50 mm. A load-lock vacuum chamber and dry in-situ cleaning of growth chamber and substrate holder were implemented to improve the process reproducibility. High-capacity precursor sources have been developed to implement non-stop growth of layers with total thickness of 10 mm and higher. Freestanding GaN crystals with thickness of 5 mm and diameter of 50 mm have been grown with the reactor.

*Keywords:* HVPE, reactor, GaN, substrate, III-nitrides

### REFERENCES

- Miyoshi T., Masui S., Okada T. et al. 510–515 nm In-GaN-based green laser diodes on C-plane GaN substrate. *Applied Physics Express*, 2009, vol. 2, no. 6, 062201. Doi: 10.1143/APEX.2.062201.
- Cich M.J., Aldaz R.I., Chakraborty A. et al. Bulk GaN based violet light-emitting diodes with high efficiency at very high current density. *Applied Physics Letters*, 2012, vol. 101, no. 22, 223509. Doi: 10.1063/1.4769228.
- Nie H., Djiduck Q., Alvarez B. et al. 1.5-kV and 2.2-mOhm-cm<sup>2</sup> Vertical GaN Transistors on Bulk-GaN Substrates. *IEEE Electron Device Letters*, 2014, vol. 35, no 9, pp. 939–941.
- Fujikura H., Yoshida T., Shibata M., Otoki Y. Recent progress of high-quality GaN substrates by HVPE method. *Proceedings of "Gallium Nitride Materials and Devices XII". International Society for Optics and Photonics*, 2017, vol. 10104, 1010403. Doi: 10.1117/12.2257202.
- Mori Y., Imade M., Maruyama M., Yoshimura M. Growth of GaN crystals by Na flux method. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 2013, vol. 2, no. 8, pp. N3068–N3071. Doi: 0.1149/2.015308jss.
- Kucharski R., Zajac M., Doradziński R. et al. Non-polar and semi-polar ammonothermal GaN substrates. *Semiconductor Science and Technology*, 2012, vol. 27, no. 2, 024007. Doi: 10.1088/0268-1242/27/2/024007.
- Bockowski M., Iwinska M., Amilusik M. et al. Challenges and future perspectives in HVPE-GaN growth on ammonothermal GaN seeds. *Semiconductor Science and Technology*, 2016, vol. 31, no. 9, 093002. Doi: 10.1088/0268-1242/31/9/093002.

Contacts: *Voronenkov Vladislav Valerievitch*,  
voronenkov@mail.ioffe.ru

Article received in edition 26.06.2018