

06

## Кристаллографическая ориентация пластин (100) $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> методом оптической коноскопии

© С.В. Шапенков, В.М. Крымов, Т.С. Аргунова, М.П. Щеглов, В.И. Николаев

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: seva.shapenkov@yandex.ru

Поступило в Редакцию 26 марта 2026 г.

В окончательной редакции 14 мая 2026 г.

Принято к публикации 27 мая 2026 г.

Предложен быстрый и относительно точный оптический метод определения основных кристаллографических направлений в пластинках (100)  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, выколотых из объемного кристалла. Способ ориентации кристаллов основан на результатах сопоставления данных индицирования плоскостей методом рентгеновской дифрактометрии и формы коноскопических фигур в поляризационном микроскопе.

**Ключевые слова:** Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ориентация кристаллов, коноскопия, поляризационный микроскоп, рентгеновская дифрактометрия.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.17.63475.20697

Оксид галлия III (Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) — ультраширокозонный полупроводник, перспективный для развития силовой и оптоэлектроники [1,2]. Существенным технологическим преимуществом  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> перед другими широкозонными полупроводниками (SiC, GaN), кроме значительно большей ширины запрещенной зоны  $E_g \sim 4.8$  eV, является возможность относительно быстрого получения крупных объемных кристаллов (булей) из собственного расплава [3]. Дальнейшее получение пластин оксида галлия [4] путем резки кристалла требует точной кристаллографической ориентации, что решается, как правило, с использованием метода рентгеновской дифрактометрии.

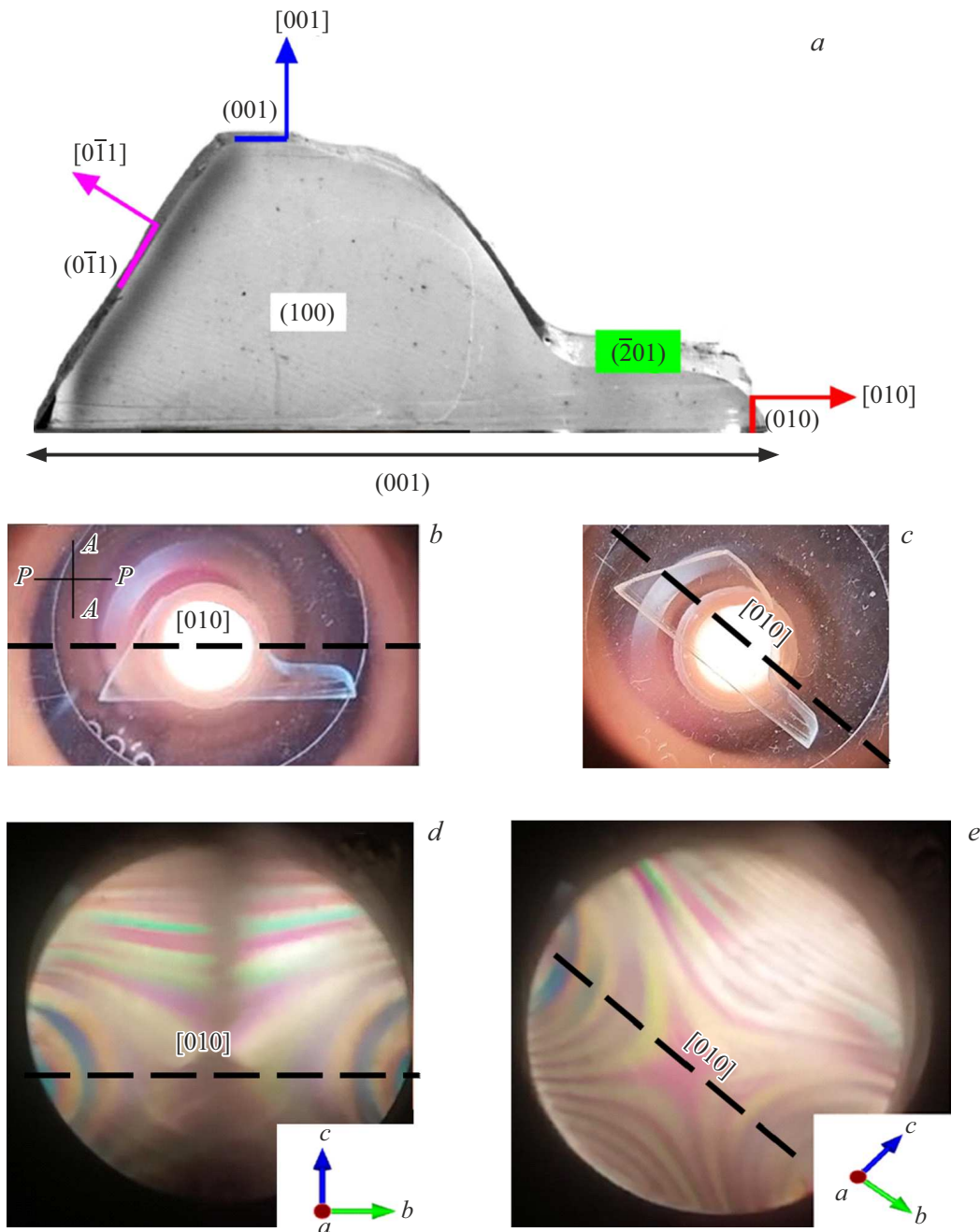
Тем не менее в случае кристаллов  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, которые прозрачны во всем видимом диапазоне, имеют моноклинную структуру и две оптические оси, есть возможность их кристаллографической ориентации в поляризационном микроскопе (ПМ) видимого света. Наличие двух плоскостей спайности способствует выявлению основных направлений:  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> имеет весьма совершенную спайность по первому пинакoidу (100) и совершенную по третьему пинакoidу (001) [5].

Метод коноскопии в ПМ заключается в фокусировке ПМ при скрещенных поляризаторах на задней фокальной плоскости объектива, в которой формируется интерференционная картина (коноскопическая фигура), представляющая собой пространственное распределение интерферирующих лучей, прошедших через кристалл, с различной разностью хода. Коноскопические фигуры, полученные для различных граней кристалла  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, определяются не только кристаллографической ориентацией поверхности, но и ориентацией осей индикатрисы относительно плоскостей поляризации в ПМ. Другими словами, угол с поляризаторами, который составляют кристаллографические оси, лежащие в плоскости изображения, влияет на поворот коноскопической фигуры

относительно поляризаторов. Единственное исключение — это изотропные (круговые) сечения индикатрисы, но они, как правило, не совпадают с основными кристаллографическими плоскостями в моноклинных кристаллах [6]. Следует отметить, что в других промышленных подложках широкозонных полупроводников (SiC, GaN и др.) такой зависимости нет, так как они имеют кристаллическую структуру, соответствующую одноосным оптическим кристаллам.

Таким образом, в моноклинном  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> можно точно установить соответствие между формой коноскопической фигуры для конкретной грани и кристаллографическими направлениями с помощью индицирования плоскостей методами дифракции. Это соответствие можно в дальнейшем использовать для ориентации кристаллов в ПМ, которая быстрее и существенно проще метода рентгеновской дифрактометрии. В настоящей работе представлен оптический метод ориентации пластин (100)  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с помощью коноскопических фигур в ПМ на основе этого подхода.

Для исследований использовались пластины (100)  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с двумя гранями большой площади, параллельными плоскости спайности (100), и поперечными гранями — торцами. Пластины были получены путем скальвания из объемного кристалла, выращенного по методу Чохральского из расплава оксида галлия. Исходным сырьем служил порошок Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 4N. Для исследования был отобран образец размером 20 × 10 mm высокого качества, прозрачный, без видимых трещин или расслоения и с гладкими поверхностями. Двухкристалльные кривые дифракционного отражения подготовленного образца были измерены в геометрии Брэгга от различных участков поверхности скола на двухкристалльном рентгеновском дифрактометре ДРОН-7. В излучении  $\text{CuK}\alpha$  монохроматором служил почти совершенный кристалл германия с ориентацией поверхности (100),



Фотография пластины (100)  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  с индексами кристаллографических направлений и плоскостей, определенных методом рентгеновской дифрактометрии (a); фотографии пластины в двух положениях (b, c) и соответствующие им коноскопические картины (d, e), полученные в поляризационном микроскопе. Черная штриховая линия показывает направление  $[010]$ . В верхнем левом углу на фрагменте b указана взаимная ориентация плоскостей поляризации ПМ для фрагментов b–e.

установленный в отражение (400). Полуширина кривой качания в отражении 800 (угол Брэгга  $\theta = 31^\circ 15' 45''$ ) немного изменялась по площади образца от 40 до  $50''$ . Подробная оценка структурного совершенства и качества таких пластинок дана в предыдущей публикации [7] и здесь для краткости опущена.

На рисунке, a приведена фотография пластины (100)  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ , использованной для кристаллографических исследований. Стрелками указаны кристаллографи-

ческие направления, а линиями — кристаллографические плоскости моноклинной решетки  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ . Индексы Миллера были установлены с помощью рентгеновского дифрактометра ТРС-1 (СКБ ИКРАН). Падающее на образец излучение формировалось щелевым коллиматором. Дифрагирующее излучение регистрировалось счетчиком с широко открытой щелью под двойным углом Брэгга, соответствующим одному из разрешенных отражений. Индексирование и приблизительная оценка

интенсивности разрешенных отражений (по величине поляризуемости кристалла в условиях рэлеевского рассеяния) были проведены заранее.

Пластина устанавливалась на гониометрической головке в положение, в котором ее большая грань (поверхность скола (100)) была горизонтальна. Ориентация производилась последовательно для каждого участка боковой поверхности пластинки, отмеченной на рисунке, *a*. Гониометрическая головка обеспечивала повороты вокруг трех осей и прецизионные перемещения в трех направлениях. Следует отметить, что держатель образца специальной конструкции предоставлял возможность дополнительного перемещения головки в направлении, перпендикулярном пучку. Благодаря этому поверхность торца делила пучок строго пополам. Нормаль к отражающей плоскости выводилась в плоскость рассеяния. Поиск симметричного отражения с известными индексами завершался определением угла Брэгга. Для проверки правильности индирования установленного рефлекса производилась настройка на другие порядки того же отражения.

По результатам рентгеновской дифрактометрии основная (наибольшая по площади) грань пластины соответствует плоскости спайности (100), при этом длинная боковая грань, отмеченная нижней черной двунаправленной стрелкой на рисунке, *a*, параллельна второй плоскости спайности (001). Наклонная поверхность (201) показана прямоугольником. Для дальнейшего сопоставления с результатами коноскопии удобно выделить два взаимно перпендикулярных направления: [010] и проекцию направления [001] на плоскость (100).

Для наблюдения коноскопических фигур использовался ПМ ПОЛАМ-Р с объективом  $\times 60$  и окуляром  $\times 12.5$  при скрещенных поляризаторах и включении линз Лазо и Бертрана в оптическую систему. В верхнем левом углу на рисунке, *b* дана схема взаимной ориентации плоскостей поляризации ПМ, которая сохраняется на фрагментах *c–e* рисунка. На фрагментах *b, c* показаны два положения кристалла относительно поляризатора: в случае, когда направление [010] (черная штриховая линия на фрагментах *b–e*) параллельно горизонтальной плоскости поляризации (рисунок, *b*), и при повороте его на угол  $\sim 40^\circ$  по часовой стрелке (рисунок, *c*). На фрагментах *d, e* рисунка приведены коноскопические фигуры, полученные от пластины в двух указанных положениях соответственно. Как можно видеть, коноскопическая фигура повернулась вместе с [010] на  $40^\circ$  относительно горизонтальной плоскости поляризатора. Направление [010] строго совпадает с прямой, соединяющей точки выхода оптических осей — центров, вокруг которых окольцовываются изохромы по краям линии [010]. Так как проекция [001] на плоскость (100) располагается строго перпендикулярно [010], можно указать кристаллографические оси относительно плоскости изображения, как сделано в нижнем правом углу на фрагментах *d, e*.

На основе проведенных исследований можно сформулировать методику для определения кристаллографи-

ческих направлений в пластинках (100)  $\beta$ -фазы оксида галлия, полученных путем выкальвания по плоскости спайности (требования к образцу для получения четкого коноскопического изображения: пластина должна иметь гладкие плоскопараллельные поверхности, толщина пластины от 0.2 mm, поперечные размеры от 2 mm).

1. Помещаем пластину на столик поляризационного микроскопа с объективом  $\times 60$  и окуляром  $\times 12.5$  в режиме скрещенных поляризаторов при включении линз Лазо и Бертрана в оптическую систему для получения коноскопического изображения.

2. Вращением предметного столика приводим образец в положение, когда линия между точками выхода оптических осей горизонтальна и появляется характерный темный крест, совпадающий с плоскостью поляризации (рисунок, *d*).

3. Затем поворачиваем столик на угол  $40–45^\circ$ , при этом коноскопическое изображение также поворачивается и области выхода оптических осей становятся более четкими.

4. Фиксируем эту коноскопическую картину, например, с помощью фотографии. Линия, проходящая через центры кольцевых изохром (выходы оптических осей), совпадает с кристаллографической осью *b* с индексами [010].

5. Чтобы зафиксировать найденную кристаллографическую ось на самом образце, нужно, не меняя положение кристалла, сделать его снимок через микроскоп, предварительно сняв с него объектив (рисунок, *c*). Наложение двух фотографий дает искомую кристаллографическую ориентацию пластинки.

Таким образом, были получены необходимые данные для формулировки метода кристаллографической ориентации пластин (100)  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в ПМ с точностью порядка  $\pm 1–2^\circ$ . Основная погрешность измерения заключается в проведении линии через центры выхода оптических осей на коноскопическом изображении. С другой стороны, привлечение современных алгоритмов машинного зрения и методов лазерной коноскопии, вероятно, может позволить значительно увеличить точность ориентации. Предложенный нами оригинальный способ ориентации можно использовать для любых пластин  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, плоскость большой грани которых не совпадает с круговыми изотропными сечениями индикатрисы в решетке  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Определение кристаллографических направлений в оксиде галлия является необходимым условием для производства подложек промышленного качества с вицинальной поверхностью, образующей малый угол („miscut-angle“ [8]) с сингулярной гранью. Предложенный оптический метод позволяет заметно быстрее и проще ориентировать кристаллы  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> без привлечения рентгеновского оборудования. Технология производства подложек из кристаллов  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, включающая ориентацию, резку и химико-механическую полировку, может явно выиграть от использования описанного выше подхода на основе метода оптической коноскопии.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] S.I. Stepanov, V.I. Nikolaev, V.E. Bougrov, A.E. Romanov, *Rev. Adv. Mater. Sci.*, **44** (1), 63 (2016).
- [2] Y. Wang, M. Zhu, Y. Liu, *China Foundry*, **21** (5), 491 (2024). DOI: 10.1007/s41230-024-4131-5
- [3] Z. Galazka, *IEEE Trans. Semicond. Manuf.*, **38** (4), 796 (2025). DOI: 10.1109/TSM.2025.3603605
- [4] S. Bin Anooz, R. Grüneberg, C. Wouters, R. Schewski, M. Albrecht, A. Fiedler, K. Irmscher, Z. Galazka, W. Miller, G. Wagner, J. Schwarzkopf, A. Popp, *Appl. Phys. Lett.*, **116** (18), 182106 (2020). DOI: 10.1063/5.0005403
- [5] J.D. Blevins, D. Thomson, K. Stevens, G. Foundos, A.A. Lindsey, J. Leach, J. Rumsey, in *2020 Int. Conf. on compound semiconductor manufacturing technology (CS MANTECH)* (Online, 2020), p. 49.
- [6] S.T. Schmidt, *Transmitted light microscopy of rock-forming minerals. An introduction to optical mineralogy* (Springer, Cham, 2023), p. 24.
- [7] A. Almaev, V. Nikolaev, N. Yakovlev, P. Butenko, A. Tsymbalov, M. Boiko, V. Kopyev, V. Krymov, B. Kushnarev, S. Shapenkov, M. Sharkov, A. Zarichny, *J. Vac. Sci. Technol. A*, **42**, 042802 (2024). DOI: 10.1116/6.0003618
- [8] R. Schewski, M. Baldini, K. Irmscher, A. Fiedler, T. Markurt, B. Neuschulz, T. Remmele, T. Schulz, G. Wagner, Z. Galazka, M. Albrecht, *J. Appl. Phys.*, **120** (22), 225308 (2016). DOI: 10.1063/1.4971957