

Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 548.4: 534.631:620.192.63

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/11484>

Исследование оксида галлия методом составного пьезоэлектрического осциллятора на частоте 100 кГц

В. В. Каминский✉, Д. А. Калганов, Д. Ю. Панов, В. А. Спиридонов, А. Ю. Иванов, М. В. Розаева, Д. А. Бауман, А. Е. Романов

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО»,
пр. Кронверкский, 49, Санкт-Петербург 197101, Российская Федерация

Аннотация

В статье приводятся результаты исследования механических свойств и дефектной структуры оксида галлия (Ga_2O_3) при помощи метода составного пьезоэлектрического осциллятора. Объемные образцы бета фазы Ga_2O_3 в виде монокристаллов и их сростков были получены при помощи роста из расплава с формообразователем (метод Степанова). Исследовались зависимости модуля продольной упругости и затухания упругих колебаний на частоте 100 кГц от амплитуды деформации. Изменения упругих и микропластических свойств образцов при различной температуре были сопоставлены с возможными релаксационными явлениями в структуре материала.

Изучение дефектной структуры в образцах чистого и легированного Ga_2O_3 необходимо для совершенствования технологии получения монокристаллов большого размера. Фундаментальными вопросами в данной области являются влияние дефектов на анизотропию электропроводности, зонную структуру и другие функциональные свойства получаемого полупроводникового материала. Цель данной статьи в установлении особенностей подготовки образцов, проведении исследований и интерпретации результатов, полученных методом составного пьезоэлектрического осциллятора для образцов оксида галлия.

В исследуемых образцах возбуждалась первая продольная мода колебаний, что соответствовало длине около 27 мм и малому поперечному сечению образца. Отдельно определялись температурные зависимости в области низких и высоких амплитуд деформаций. Для оценки кристаллического совершенства образцов, подготовленных для исследований, использовалась рентгеновская дифракция с анализом кривой качания.

Значение модуля Юнга, полученное вдоль направления роста (кристаллической ориентации $\langle 010 \rangle$), в кристаллах Ga_2O_3 $E \approx 260$ ГПа соответствует известным литературным данным. На температурных зависимостях внутреннего трения при температуре ~ 280 К обнаружены релаксационные пики, соответствующие различным дислокационным взаимодействиям.

Ключевые слова: оксид галлия, монокристалл, дефектная структура, реальная структура, полупроводник, метод составного пьезоэлектрического осциллятора

Источник финансирования: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-19-00617.

Для цитирования: Каминский В. В., Калганов Д. А., Панов Д. Ю., Спиридонов В. А., Иванов А. Ю., Розаева М. В., Бауман Д. А., Романов А. Е. Исследование оксида галлия методом составного пьезоэлектрического осциллятора на частоте 100 кГц. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2023;25(4): 548–556. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/11484>

For citation: Kaminskii V. V., Kalganov D. A., Panov D. I., Spiridonov V. A., Ivanov A. I., Rozaeva M. V., Bauman D. A., Romanov A. E. A study of gallium oxide by using the piezoelectric composite oscillator technique at a frequency of 100 kHz. *Condensed Matter and Interphases*. 2023;25(4): 548–556. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/11484>

✉ Каминский Владимир Владимирович, e-mail: vvkaminskii@itmo.ru

© Каминский В. В., Калганов Д. А., Панов Д. Ю., Спиридонов В. А., Иванов А. Ю., Розаева М. В., Бауман Д. А., Романов А. Е., 2023



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

1. Введение

Поиск новых методов изготовления и исследования монокристаллов β - Ga_2O_3 больших размеров связан с возможностью создания из них подложек и функциональных частей полупроводниковых устройств [1]. Благодаря уникальным свойствам различных форм оксида галлия возможно его применение при миниатюризации существующих и разработке новых компонентов силовой электроники [2, 3]. Наличие собственной подложки из β - Ga_2O_3 в этом случае позволит использовать преимущества гомоэпитаксии, упростит технологию производства и обеспечит долговечность эксплуатации готовых устройств [4]. Также описаны применения Ga_2O_3 для создания ультрафиолетовых [5, 6] и рентгеновских детекторов [7], датчиков газа [8, 9] и других устройств [10]. На данный момент получены монокристаллы β - Ga_2O_3 с наибольшими линейными размерами до 11 см [11]. Возникновение собственных дефектов (кислородных вакансий [12]) и преднамеренное легирование в процессе роста, как правило, негативно влияет на их функциональные свойства [13, 14]. Однако контроль плотности и распределения дефектов различного вида может позволить целенаправленно изменять теплопроводность, электропроводность, зонную структуру и многие другие свойства кристаллов [15, 16].

Широко применяются методы исследования дефектно-примесной структуры полупроводников, основанные на их оптических и электронных радиочастотных свойствах [13, 17]. Зонная структура Ga_2O_3 и другие важные для прикладных задач свойства исследуются аналитически [18], численно и комплексно [19]. Однако один из наиболее универсальных методов анализа структуры основан на взаимодействии дефектов с полем упругих волн [20, 21]. Для возбуждения упругих колебаний широко используется техника составного пьезоэлектрического осциллятора (СПО) [22]. В зависимости от температуры, ориентации кристалла, частоты и амплитуды колебаний такому взаимодействию будет соответствовать различная величина потерь энергии – внутреннее трение [21, 23]. Максимальная чувствительность метода СПО к взаимодействию дислокаций с точечными дефектами различного рода достигается при амплитудах деформации от 10^{-7} до 10^{-4} в диапазоне частот $10^5 \div 10^6$ Гц [24, 25]. Амплитудно-независимая часть затухания упругих колебаний позволяет составить так называемые указательные поверхности фона

внутреннего трения [23], определить ориентацию и активность систем скольжения дислокаций. Затухание высокоамплитудных колебаний характеризует различные процессы размножения дислокаций и их движения в упругих полях других дефектов [26].

Несмотря на большой объем накопленных сведений о структурных свойствах β - Ga_2O_3 [27] продолжают исследования, посвященные активации различных систем скольжения дислокаций [28, 29]. Также мало изучены механические свойства объемных кристаллов β - Ga_2O_3 , необходимые для эффективного изготовления пластин-подложек из них. Сложность исследований таких свойств обусловлена высокими требованиями к подготовке образцов нужной формы и размера, а также необходимостью дополнительных исследований другими методами. В этой связи исследования механических свойств Ga_2O_3 на данный момент проводились лишь теми методиками, которые могли быть адаптированы для измерений на тонких пленках и маломерных кристаллах.

Цель данной работы – провести исследование объемных кристаллов Ga_2O_3 методом составного пьезоэлектрического осциллятора на частоте 100 кГц с получением информации об упругих и пластических особенностях механических характеристик Ga_2O_3 .

2. Экспериментальная часть

Объемные кристаллы β - Ga_2O_3 были получены методом жидкофазного роста из расплава с формообразователем (метод Степанова) [11, 12] (рис. 1а).

В качестве основного метода исследования механических свойств в настоящей работе использовалась методика составного пьезоэлектрического осциллятора (СПО) с частотой измерений около 100 кГц [25, 26]. Эксперименты проводились при амплитудах деформации от 10^{-7} до 10^{-4} в широком температурном диапазоне от 120 до 320 К.

Составной пьезоэлектрический осциллятор, представляет собой два спаянных монокристалла кварца. Исследуемый материал прикрепляется к осциллятору при помощи различных адгезионных веществ. При подаче переменного напряжения на электроды одного из кристаллов он начинает осциллировать, передавая упругие колебания на образец. Из отношения сигнала на электродах второго измерительного кристалла к первому получают величину коэффициента

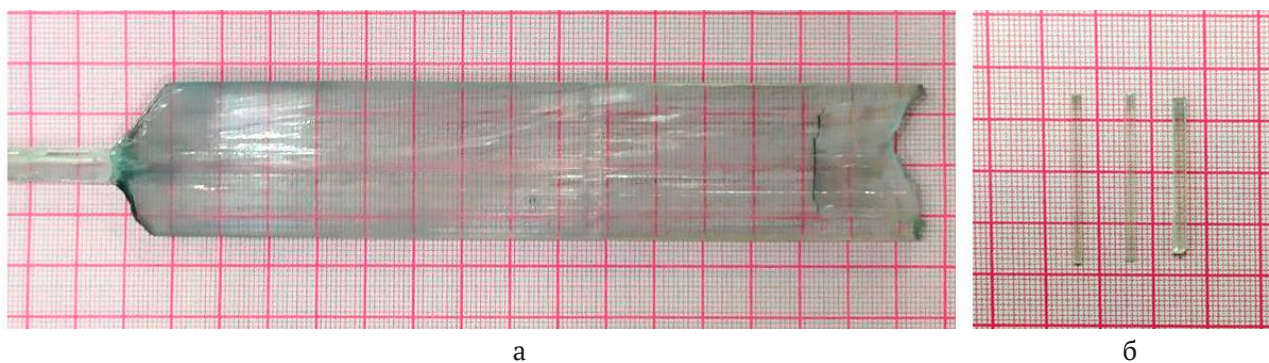


Рис. 1. Внешний вид объемных кристаллов $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ полученных методом роста из расплава с формообразователем (а) и образцов для исследования методом составного пьезоэлектрического осциллятора (б)

затухания. Также измеряют частоту колебаний всей системы. С учётом характеристик кварцевого осциллятора и коэффициента связи по измеренным значениям находят величины внутреннего трения и модулей упругости. В данной работе измерения проводили на частоте резонанса около 100 кГц для первой моды продольных колебаний. Изменение частоты при этом соответствуют величине модуля Юнга. Модуль Юнга и внутреннее трение, определяемые данным методом, дают интегральную информацию о динамических свойствах микроструктуры и их изменении под действием деформации в исследуемом материале:

$$m_{\text{osc}} \delta_{\text{osc}} = m_{\text{qu}} \delta_{\text{qu}} + m_{\text{sam}} \delta_{\text{sam}},$$

$$m_{\text{osc}} f_{\text{osc}} = m_{\text{qu}} f_{\text{qu}} + m_{\text{sam}} f_{\text{sam}},$$

где m_{osc} – масса всего осциллятора; m_{qu} – масса кварца; m_{sam} – масса образца; δ_{osc} – затухания колебаний на всем осцилляторе; δ_{qu} – затухания колебаний на кварце; δ_{sam} – затухания колебаний на образце; f_{osc} – частота колебаний всего осциллятора; f_{qu} – частота колебаний кварца; f_{sam} – частота колебаний на образце.

Модуль Юнга для материала образца определяется как:

$$E = 4\rho l^2 f_{\text{sam}}^2,$$

ρ – плотность исследуемого материала; l – длина образца.

Относительное изменение упругих свойств, связанное с нагревом образца и его обратимой дислокационной деформацией, характеризуется дефектом модуля Юнга. Эта величина в случае продольных колебаний определяется из соотношения:

$$\Delta E = \frac{(E_i - E(\epsilon))}{E_i},$$

где E_i – модуль упругости на амплитудно-независимой стадии, а $E(\epsilon)$ – модуль упругости на амплитудно-зависимой стадии, ϵ – амплитуда деформации образца.

Для измерения методом СПО были подготовлены образцы в форме параллелепипеда с размерами около $27 \times 2 \times 1$ мм³ при помощи дисковой пилы с алмазным напылением. Длинная сторона образцов совпадала с направлением роста $\langle 010 \rangle$ и направлением распространения упругих колебаний от пьезоэлектрического осциллятора к образцу. Для достоверности результатов измерения проводили на трёх однотипных образцах (рис. 1б).

Плотность образцов определялась методом гидростатического взвешивания при помощи весов третьего класса точности GH-252 (A&D Company) и измерителя температуры V7-78/1 (АКИП). Для исследованного материала среднее значение плотности составило $\rho = 5915 \pm 12$ кг/м³.

В данном эксперименте для оценки кристаллического совершенства исследуемых образцов, помимо метода СПО, использовалась методика рентгendifракционного анализа (дифрактометр ДРОН-8 $\text{CuK}\alpha$ -излучение в щелевой конфигурации, трубка БСВ-29, детектор NaI-Tl). Подготовленные для СПО кристаллы исследовались в непрерывном и дискретном режимах съёмки в широком диапазоне углов. Также исследовались кривые качания для максимальной интенсивности рефлекса (12 0 0). Так как максимум деформирующего напряжения при первой продольной моде локализован в центре образца, исследовалась именно эта область. Размер пучка рентгеновского излучения на поверхности примерно соответствовал ширине образца ~ 2 мм.

2. Результаты и обсуждение

Полученные дифракционные данные приведены на рис. 2. На общей картине дифракции

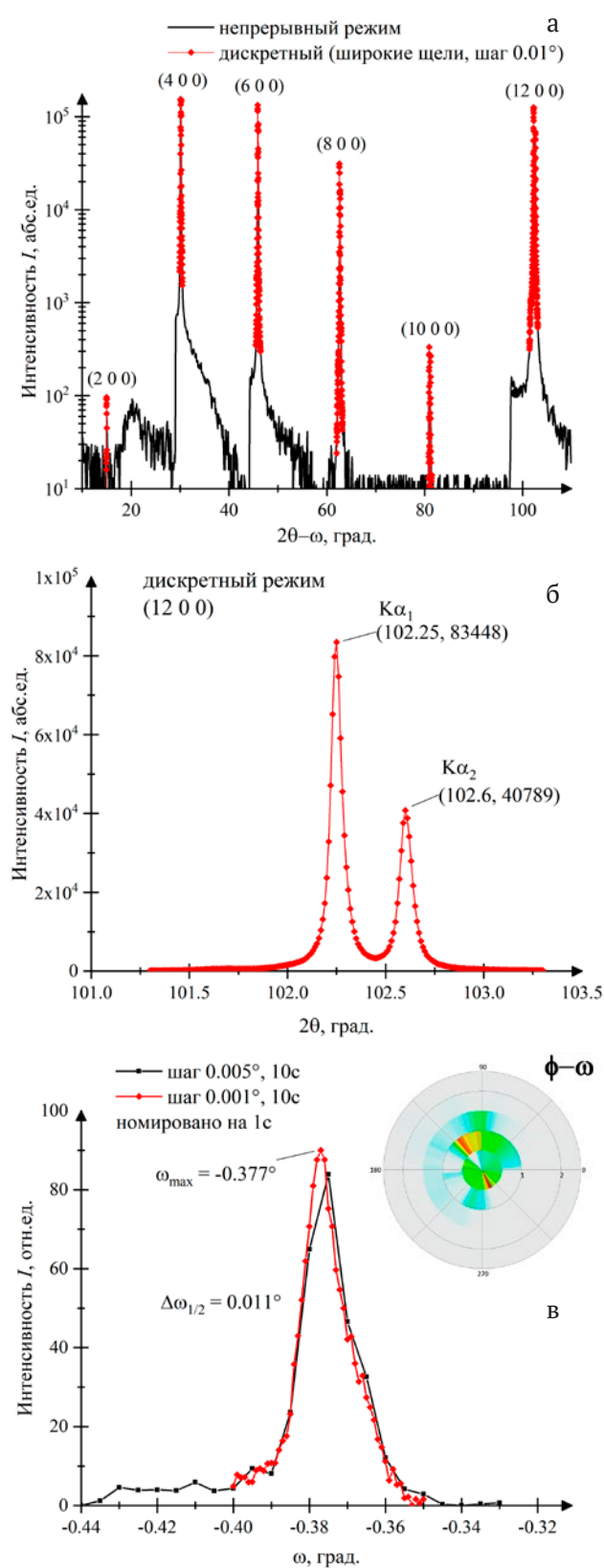


Рис. 2. Рентгеновская дифракция центральной области образца $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ в широком диапазоне углов (а), профиль и кривая качания максимума (12 0 0) (б) и (в) соответственно

(рис. 2а) присутствуют четные максимумы плоскости (100) различных порядков дифракции. Профиль и углы дифракции соответствуют данным картотеки PDF 01-087-1901. Образец был исследован и выставлен по отражению (12 0 0). На рис. 2б представлены дифрактограммы рефлекса в дискретном режиме для определения $2\Theta_{K\alpha_1} = 102.24^\circ$. Кривая качания для рефлекса (12 0 0) получена с помощью узкой щелевой конфигурации дискретного режима при двух значениях шага (рис. 2в). Профиль кривой качания имеет ассиметричную форму с «хвостом» при меньших ω , ширина на половине максимума интенсивности примерно соответствует 0.011° .

При комнатной температуре методом СПО получены амплитудные зависимости внутреннего трения и модуля Юнга (рис. 3).

Для всех образцов наблюдается амплитудный гистерезис как внутреннее трение (ВТ), так и модуль Юнга (МЮ), иными словами, зависимости, измеренные последовательно при увеличении и уменьшении амплитуды, не совпадают друг с другом. Зависимость, измеренная при убывании амплитуды, располагается выше зависимости, измеренной при возрастании амплитуды. Такое поведение является характерным для различных типов кристаллов и поликристаллов [30, 31]. С точки зрения теории амплитудный гистерезис указывает на колебательное движение дислокаций в силовых полях стопоров – закрепляющих дислокации точечных дефектов [32, 33]. Гистерезис зависит от максимальной амплитуды деформации, при которой снимались зависимости. Так, при амплитуде меньше 10^{-5} (синие кривые) гистерезис не наблюдался. При дальнейшем незначительном повышении амплитуды (красные кривые) возникает небольшой по величине обратимый гистерезис. При амплитуде существенно выше 10^{-5} (черные кривые) наблюдается сильный как обратимый, так и необратимый гистерезис.

Данные кривые можно разделить на две стадии: (i) малоамплитудная – характеризующаяся умеренным ростом ВТ и падением МЮ; (ii) высокоамплитудная – при которой наблюдается существенный рост ВТ и падение МЮ. При первой стадии происходят колебания дислокаций, закрепленных на точечных дефектах (центров пиннинга) в виде атомов примесей и вакансий, а при второй – колебания дислокаций уже после открепления [30]. Переход от первой стадии ко второй происходит при амплитуде деформации около 10^{-5} .

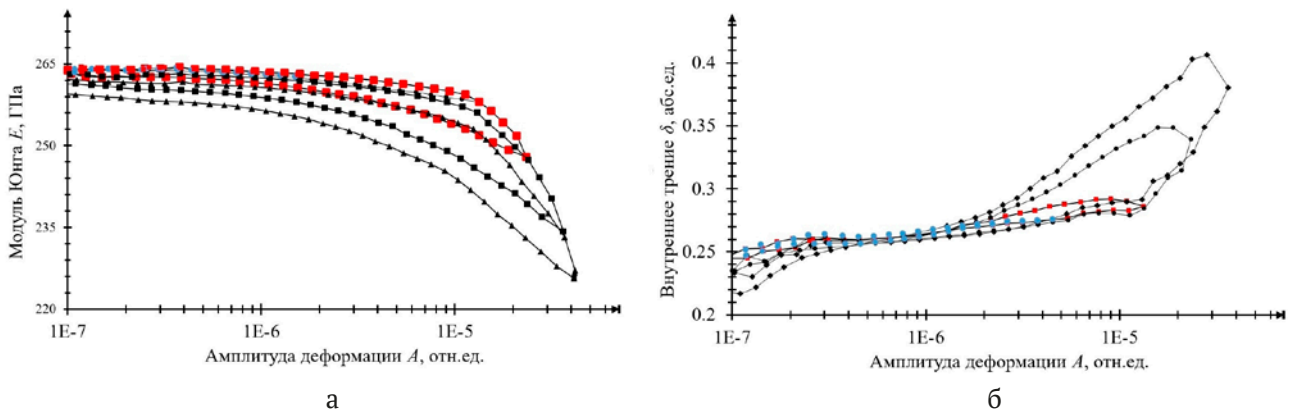


Рис. 3. Амплитудные зависимости модуля Юнга (а) и внутреннего трения (б) при комнатной температуре

Отдельно на рис. 4 показан дефект модуля Юнга, возникающий при деформации образцов Ga_2O_3 . Кривые были сняты при трёх температурах: 300, 225 и 118 К. В данном случае амплитудные зависимости дефекта модуля Юнга связаны с двумя стадиями микродеформации образца, описанными выше. Несмотря на то, что дефект МЮ определяется в первую очередь плотностью дефектных структур и распределением их по сечению и длине исследуемого образца, температура также оказывает существенное влияние на данную характеристику [30]. При повышении температуры рост дефекта МЮ обоснован разблокировкой дислокаций [34]. Отметим, что график строился из зависимостей $E(\epsilon)$, снятых при самом первом увеличении амплитуды на образцах, ни разу не подвергавшихся воздействию высоких амплитуд.

На рис. 5 показаны температурные зависимости МЮ и ВТ. В целом при понижении температуры модуль Юнга растёт, в то время как ВТ падает. Данное поведение зависимостей механических характеристик является классическим. Также произошел небольшой разрыв зависимостей в районе 273 К, по-видимому, связанный с наличием остаточной влаги в измерительной ячейке. Заметим, что МЮ находится в интервале 261–272 ГПа (рис. 5а) и при комнатной температуре полностью соотносится с данными других работ [35, 36]. Так, в работе [35] исследуются наномеханические резонаторы на основе наночешуек $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$, выращенного методом химического осаждения из паровой фазы низкого давления (LPCVD). Измерения, проведенные в этой работе, показывают модуль Юнга $E = 261$ ГПа и анизотропное двухосное встроенное растяжение 37.5 и

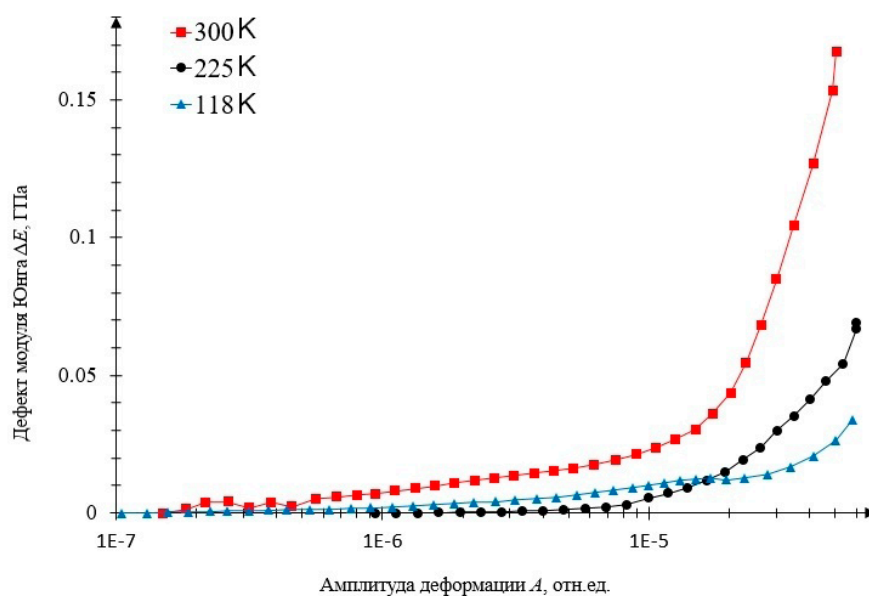


Рис. 4. Амплитудная зависимость дефекта модуля Юнга

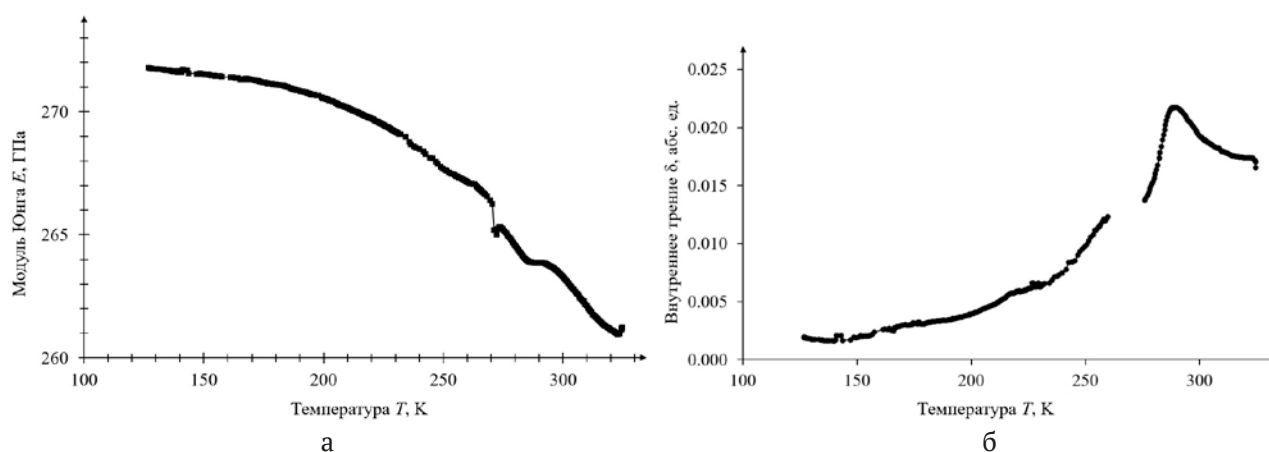


Рис. 5. Температурные зависимости модуля Юнга (а) и внутреннего трения (б) Ga_2O_3

107.5 МПа. При температуре около 280 К наблюдается пик ВТ (рис. 5б), в то время как на температурной зависимости МЮ наблюдается перегиб. Данный пик и перегиб связаны с дислокационными взаимодействиями, по-видимому, с релаксацией Хазигути или релаксацией Снука–Кёстера [37]. Релаксация Хазигути связана с взаимодействием дислокаций (перегибов) с собственными дефектами: межузельными атомами, вакансиями и их комплексами. Релаксация Снука–Кёстера в нашем случае может быть связана с «волочением» или «отрывом» примесных атмосфер при движении дислокаций. Связать полученные результаты можно с технологией получения монокристаллических сростков. При ростовых температурах расплав нестабилен и подвержен разложению на газоподобные составляющие: двухвалентный оксид галлия, одновалентный оксид, металлический галлий и кислород: ($\text{Ga}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{GaO} \rightarrow \text{Ga}_2\text{O} \rightarrow \text{Ga}$ и O). Этот процесс не может в полной мере быть компенсирован за счёт избытка кислорода в ростовой атмосфере, что, как правило, приводит к возникновению кислородных вакансий в растущем объемном кристалле [38]. Логично предположить релаксацию Хазигути основным механизмом ответственным за формирование пика ВТ и перегиба на зависимости МЮ. Однако для достоверности определения природы пиков требуется проведение дополнительных исследований. При сравнении эквивалентных образцов из одного исходного материала релаксационные максимумы Хазигути в части из них могут «отжигаться» на стадии возврата [37].

3. Выводы или заключение

Полученный профиль кривой дифракции (рис. 2а) и значение параметра a решетки синтезированной моноклинной фазы соответствуют

эталонным данным базы PDF и данным других научных публикаций [39], что может свидетельствовать о высокой степени структурного совершенства полученных образцов $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ и малой величине остаточных напряжений в кристалле. Малое значение (для использованной щелевой конфигурации) полуширины кривой качания позволяет говорить о высокой степени кристаллического совершенства исследуемой области образца. Небольшая асимметричность данной кривой в области малых углов может быть обусловлена различными факторами, такими как малоугловая разориентация блоков (зёрен), либо наличие двойников. Кристаллическая структура исследованных образцов соответствует исходному материалу [11, 12].

При помощи метода СПО получены механические характеристики образцов на частоте 100 кГц. В результате экспериментов получены и интерпретированы амплитудные зависимости МЮ и ВТ. Амплитудные зависимости можно разделить на две стадии: (i) малоамплитудную, при которой колебания дислокаций происходит внутри примесных атмосфер; (ii) высокоамплитудную, при которой колебания дислокаций происходит уже вне примесных атмосфер. Получены значения амплитуды, при которой одна стадия сменяет другую. В результате работы определены температурные зависимости МЮ и ВТ на частоте около 100 кГц для $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$, подтверждающиеся результатами других экспериментов. Интерпретация природы релаксационного пика ВТ при 285 К, связанного с дислокационными взаимодействиями, требует дополнительных исследований.

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в исследование и подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы

1. Кицай А. А., Носов Ю. Г., Чижирыка А. В., Николаев В. И. Выращивание монокристаллов β -Ga₂O₃ раствор-расплавным методом. *Письма в журнал технической физики*. 2023;49(14): 16–18. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2023.14.55819.19589>
2. Калыгина В. М., Николаев В. И., Алмаев А. В., Цымбалов А. В., Петрова Ю. С., Печников И. А., Бутенко П. Н. Свойства резистивных структур на основе полиморфных фаз оксида галлия. *Письма в журнал технической физики*. 2020;46(17): 33–36. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2020.17.49891.18341>
3. Green A. J., Speck J., Xing G., ... Higashiwaki M. β -gallium oxide power electronics. *Apl Materials*. 2022;10(2): 029201. <https://doi.org/10.1063/5.0060327>
4. Калыгина В. М., Лыгденова Т. З., Петрова Ю. С., Черников Е. В. Влияние материала подложки на свойства пленок оксида галлия и структур на его основе. *Физика и техника полупроводников*. 2019;53(4): 468–473. <https://doi.org/10.21883/FTP.2019.04.47442.8990>
5. Kaur D., Kumar M. A strategic review on gallium oxide based deep-ultraviolet photodetectors: recent progress and future prospects. *Advanced Optical Materials*. 2021;9(9): 2002160. <https://doi.org/10.1002/adom.202002160>
6. Калыгина В. М., Киселева О. С., Кушнарев Б. О., Олейник В. Л., Петрова Ю. С., Цымбалов А. В. Фотодиоды на основе структур Ga₂O₃/n-GaAs, способные работать в автономном режиме. *Физика и техника полупроводников*. 2022;56(9): 928–932. <https://doi.org/10.21883/FTP.2022.09.53417.9868>
7. Lu X., Zhou L., Chen L., Ouyang X., Liu B., Xu J., Tang H. Schottky X-ray detectors based on a bulk β -Ga₂O₃ substrate. *Applied Physics Letters*. 2018;112(10): 103502 <https://doi.org/10.1063/1.5020178>
8. Zhu J., Xu Z., Ha S., Li D., Zhang K., Zhang H., Feng J. Gallium oxide for gas sensor applications: A comprehensive review. *Materials*. 2022;15(20): 7339. <https://doi.org/10.3390/ma15207339>
9. Николаев В. И., Алмаев А. В., Кушнарев Б. О., ... Черников Е. В. Газочувствительные свойства пленок твердого раствора In₂O₃-Ga₂O₃. *Письма в журнал технической физики*. 2022;14: 37–41. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2022.14.52869.19211>
10. Petrenko A. A., Kovach Ya. N., Bauman D. A., Odnoblyudov M. A., Bougrov V. E., Romanov A. E. Current state of Ga₂O₃-based electronic and optoelectronic devices. Brief review. *Reviews on Advanced Materials and Technologies*. 2021;3(2): 1–26. <https://doi.org/10.17586/2687-0568-2021-3-2-1-26>
11. Bauman D. A., Panov D. Iu., Spiridonov V. A., Romanov A. E. High quality β -Ga₂O₃ bulk crystals, grown by edge-defined film-fed growth method: growth features, structural and thermal properties. *Journal of Vacuum Science and Technology A*. 2023;41: 053203. <https://doi.org/10.1116/6.0002644>
12. Bauman D. A., Panov D. I., Spiridonov V. A., Kremleva A. V., Romanov A. E. On the successful growth of bulk gallium oxide crystals by the EFG (Stepanov) method. *Functional Materials Letters*. 2023: 2340026. <https://doi.org/10.1142/S179360472340026X>
13. Son N. T., Goto K., Nomura K., ... Jánzén E. Electronic properties of the residual donor in unintentionally doped β -Ga₂O₃. *Journal of Applied Physics*. 2016;120(23): 235703. <https://doi.org/10.1063/1.4972040>
14. Иванова Е. В., Дементьев П. А., Загорянская М. В. ... Бугров В. Е. Исследование ловушек носителей заряда в объемном оксиде галлия β -Ga₂O₃. *Физика твердого тела*. 2021;63(4): 421–426. <https://doi.org/10.21883/FTT.2021.04.50705.236>
15. Wang Z., Chen X., Ren F. F., Gu S., Ye J. Deep-level defects in gallium oxide. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2020;54(4): 043002. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/abeb1>
16. Manikantababu N., Sheoran H., Siddham P., Singh R. Review of radiation-induced effects on β -Ga₂O₃ materials and devices. *Crystals*. 2022;12(7): 1009. <https://doi.org/10.3390/cryst12071009>
17. Seyidov P., Ramsteiner M., Galazka Z., Irmischer K. Resonant electronic Raman scattering from Ir⁴⁺ ions in β -Ga₂O₃. *Journal of Applied Physics*. 2022;131(3): 035707. <https://doi.org/10.1063/5.0080248>
18. Абдрахманов В. Л., Завьялов Д. В., Конченков В. И., Крючков С. В. Влияние сильной электромагнитной волны на проводимость β -Ga₂O₃. *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. 2020;84(1): 61–66. <https://doi.org/10.31857/S0367676520010032>
19. Гузилова Л. И., Гращенко А. С., Печников А. И., ... Николаев В. И. *Materials Physics and Mechanics*. 2016;29(2): 166–171. Режим доступа: https://www.ipme.ru/e-journals/MPM/no_22916/MPM229_09_guzilova.pdf
20. Quimby S. L. On the experimental determination of the viscosity of vibrating solids. *Physical Review*. 1925;25(4): 558. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.25.558>
21. Kimball A. L., Lovell D. E. Internal friction in solids. *Physical Review*. 1927;30(6): 948. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.30.948>
22. Marx J. Use of the piezoelectric gauge for internal friction measurements. *Review of Scientific In-*

struments. 1951;22(7): 503–509. <https://doi.org/10.1063/1.1745981>

23. Naimi E. K. Internal-friction anisotropy in a real crystal and construction of characteristic internal-friction surfaces. *Soviet Physics Journal*. 1975;18: 371–375. <https://doi.org/10.1007/BF00889303>

24. Granato A. V., Lüke K. Application of dislocation theory to internal friction phenomena at high frequencies. *Journal of Applied Physics*. 1956;27(7): 789–805. <https://doi.org/10.1063/1.1722485>

25. Robinson W. H., Edgar A. The piezoelectric method of determining mechanical damping at frequencies of 30 to 200 KHz. *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*. 1974;21(2): 98–105. <https://doi.org/10.1109/T-SU.1974.29798>

26. Tyapunina N. A., Zinenkova G. M., Shtrom E. V. Dislocation multiplication in alkali halide crystals exposed to ultrasonic waves. The original stage. *Physica Status Solidi (a)*. 1978;46(1): 327–336. <https://doi.org/10.1002/pssa.2210460143>

27. Nikolaev V. I., Stepanov S. I., Romanov A. E., Bougrov V. E. Gallium oxide. In: *Single Crystals of Electronic Materials*. R. Fornari (ed.). Woodhead Publishing; 2019. 487–521. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102096-8.00014-8>

28. Yamaguchi H., Kuramata A., Masui T. Slip system analysis and X-ray topographic study on β -Ga₂O₃. *Superlattices and Microstructures*. 2016;99: 99–103. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2016.04.030>

29. Wu Y., Rao Q., Best J. P., Mu D., Xu X., Huang H. Superior room temperature compressive plasticity of submicron beta-phase gallium oxide single crystals. *Advanced Functional Materials*. 2022;32(48): 2207960. <https://doi.org/10.1002/adfm.202207960>

30. Kaminskii V. V., Kalganov D. A., Podlesnov E., Romanov A. E. Influence of dislocation and twin structures on the mechanical characteristics of Ni-Mn-Ga alloys at ultrasonic frequencies. *Frontier Materials & Technologies*. 2022;2: 28–36. <https://doi.org/10.18323/2782-4039-2022-2-28-36>

31. Kaminskii V. V., Lyubimova Y. V., Romanov A. E. Probing of polycrystalline magnesium at ultrasonic frequencies by mechanical spectroscopy. *Materials Physics and Mechanicals*. 2020;44(1): 19–25. https://doi.org/10.18720/MPM.4412020_3

32. Гузилова Л. И., Кардашев Б. К., Печников А. И., Николаев В. И. Упругость и неупругость объемных кристаллов нитрида галлия. *Журнал технической физики*. 2020;90(1): 138–142. <https://doi.org/10.21883/JTF.2020.01.48675.24-19>

33. Сапожников К. В., Голяндин С. Н., Кустов С. Б. Амплитудная зависимость внутреннего трения и дефекта модуля Юнга поликристаллического индия. *Физика твердого тела*. 2010;52(1): 43–47. <https://doi.org/10.1134/S1063783410010087>

34. Лебедев А. Б., Кустов С. В., Кардашов Б. К. О внутреннем трении и дефекте модуля юнга в процессе деформирования кристаллов. *Физика твердого тела*. 1992;34(9): 2915. Режим доступа: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/22631>

35. Zheng X. Q., Lee J., Rafique S., Han L., Zorman C. A., Zhao H., Feng P. X. L. Ultrawide band gap β -Ga₂O₃ nanomechanical resonators with spatially visualized multimode motion. *ACS Applied Materials and Interfaces* 2017;9(49): 43090–43097. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b13930>

36. Zheng X. Q., Zhao H., Feng P. X. L. A perspective on β -Ga₂O₃ micro/nanoelectromechanical systems. *Applied Physics Letters*. 2022;120(4). <https://doi.org/10.1063/5.0073005>

37. Golovin I. S. Internal friction and mechanical spectroscopy of metals and alloys. *Metal Science and Heat Treatment*. 2012;54(5–6): 207–208. <https://doi.org/10.1007/s11041-012-9482-7>

38. Закгейм Д. А., Панов Д. Ю., Спиридонов В. А., ... Бугров В. Е. Выращивание объемных кристаллов оксида галлия из расплава методом Чохральского в кислородсодержащей атмосфере. *Письма в журнал технической физики*. 2020;46(22): 43–45. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2020.22.50308.18499>

39. Самойлов А. М., Копытин С. С., Орешкин К. В., Шевченко Е. А. Синтез химически чистых порошков β -фазы оксида галлия (III). *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2022;24(3): 345–355. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/9857>

Информация об авторах

Каминский Владимир Владимирович, к. ф.-м. н., заведующий лабораторией, Университет ИТМО (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-4388-2459>
vvkaminskii@itmo.ru

Калганов Дмитрий Александрович, м. н. с. Института перспективных систем передачи данных, Университет ИТМО (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0003-1986-3693>
kalganov@itmo.ru

Панов Дмитрий Юрьевич, к. ф.-м. н., заведующий лабораторией, Университет ИТМО (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-8715-9505>
dmitriipnv@itmo.ru

Спиридонов Владислав Алексеевич, инженер Института перспективных систем передачи данных, Университет ИТМО (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-5751-8597>
vladspiridonov@itmo.ru

Иванов Андрей Юрьевич, инженер Института перспективных систем передачи данных, Университет ИТМО (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0003-0737-9079>
aiivanov@itmo.ru

Розаева Маргарита Владимировна, студент, инженер Института перспективных систем передачи данных, Университет ИТМО, (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0009-0000-2978-5380>
412189@niuitmo.ru

Бауман Дмитрий Андреевич, к. ф.-м. н., доцент Института перспективных систем передачи данных, Университет ИТМО, (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-5762-5920>
dabauman@itmo.ru

Романов Алексей Евгеньевич, д. ф.-м. н., профессор, директор Института перспективных систем передачи данных, Университет ИТМО (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0003-3738-408X>
aeromanov@itmo.ru

Поступила в редакцию 20.09.2023; одобрена после рецензирования 13.10.2023; принята к публикации 16.10.2023; опубликована онлайн 25.12.2023.