

Применение и оптические характеристики монокристаллического парателлуриата для акустооптики диапазонов 0.355–5 μm и ТГц

© Г.И. Кропотов¹, В.Е. Роголин², И.А. Каплун³, А.А. Шахмин¹, С.А. Третьяков³, А.С. Гук^{2,4}

¹ ООО „Тидекс“,
194292 Санкт-Петербург, Россия

² Институт электрофизики и электроэнергетики РАН,
191186 Санкт-Петербург, Россия

³ Тверской государственный университет,
170100 Тверь, Россия

⁴ ПАО „Красногорский завод им. С.А. Зверева“,
143402 Красногорск, Московская обл., Россия

e-mail: grigorykropotov@tydex.ru, kaplunov.ia@tversu.ru, v-rogalin@mail.ru

Поступила в редакцию 27.08.2023 г.

В окончательной редакции 27.08.2023 г.

Принята к публикации 20.02.2024 г.

В широком спектральном диапазоне исследовано оптическое пропускание монокристаллического парателлуриата, выращенного из сырья разной чистоты и разных производителей. Исследования были выполнены для трех кристаллографических направлений, соответствующих кристаллографическим плоскостям (001), (100) и (110). Получены спектры отражения и проанализировано влияние обработки поверхности на особенности спектра. Отмечено незначительное различие в спектрах пропускания для сырья, отличающегося по содержанию примесей на 3 порядка. Рассмотрена возможность применения устройств на основе парателлуриата для УФ и терагерцового диапазонов.

Ключевые слова: парателлурит, акустооптика, спектр отражения, спектр пропускания.

DOI: 10.61011/OS.2024.04.58226.5519-24

Введение

Приборы, в том числе акустооптические (АО) устройства, в основе работы которых лежит дифракция света на фазовых решетках, создаваемых упругими волнами в материале благодаря модуляции показателя преломления, применяются в различных областях для управления лазерным излучением или спектрального анализа изображений. Одним из наиболее востребованных материалов для создания АО устройств, работающих в широком спектральном диапазоне (край УФ, видимый, ближний ИК) является парателлурит. Монокристаллы парателлуриата — тетрагональная модификация диоксида теллура ($\alpha\text{-TeO}_2$) — обладают рядом уникальных физических свойств. Удачное сочетание этих свойств обеспечило парателлуриату лидирующее положение среди АО материалов [1–4]. TeO_2 обладает широким диапазоном прозрачности (длина волны $\lambda = 0.35 - 5.5 \mu\text{m}$) без заметных полос поглощения. Кристаллы практически нерастворимы в воде, имеют невысокую твердость, вследствие чего легко обрабатываются — режутся, шлифуются и полируются. В силу принадлежности к тетрагональной сингонии (точечная группа симметрии 422) парателлурит обладает достаточно большим двулучепреломлением (до +0.19 в видимом диапазоне), что позволяет использовать его в акустооптических электронно-перестраиваемых фильтрах и акустооптических дисперсионных линиях задержки (АОДЛ). Вы-

сокие значения показателей преломления (2.29 – 2.45 для $\lambda = 0.5461 \mu\text{m}$) обыкновенного и необыкновенного лучей в сочетании с уникально малыми для твердых тел скоростями распространения ультразвука в направлении [110] (616 м/с) обеспечивают парателлуриату необычно большое значение коэффициента АО качества $M_2 = n^6 p^2 / \rho C_{\text{зв}}^3$ (n — показатель преломления, p — действующая константа фотоупругости, ρ — плотность, $C_{\text{зв}}$ — скорость звука) [1–4].

Поскольку эффективность АО устройства η ($\eta = I_d / I_0$, где I_0 — интенсивность падающего света, I_d — интенсивность дифрагированного света) пропорционально зависит от величины M_2 и от мощности ультразвука, высокое значение (для наиболее востребованного диапазона прозрачности) M_2 парателлуриата и определяет его главное техническое преимущество среди АО материалов [5,6]. Оно состоит в возможности эффективного управления световыми потоками при малых акустических мощностях. Процесс управляется сигналом генератора высокой частоты ($\sim 50 - 250 \text{ MHz}$) мощностью 0.5 – 5 W, подаваемого на пьезопреобразователь [7–9]. Малое энергопотребление позволяет обойтись без принудительного охлаждения АО устройства и обеспечивает сравнительно невысокие оптические и акустические искажения, вызываемые выделением тепла в светозвукопроводе (СЗП) [10–13].

Эти преимущества обусловили широкое использование парателлуриата, которое реализуется в различных

устройствах. Из TeO_2 изготавливают элементы для модуляторов, которые управляют интенсивностью проходящего через СЗП (светозвукопровод) электромагнитного излучения. С их помощью можно передавать сигналы (информацию) по лазерному лучу. Другое назначение модуляторов — импульсный вывод излучения из лазерного резонатора [2–5,14]. Используя дифракцию Брэгга, дефлекторы (сканеры) на основе парателлурифта применяются для управления направлением распространения выходного лазерного луча в телесном угле порядка $3^\circ \times 3^\circ$ [4–6].

Акустооптические дефлекторы (АОД) применяют в лазерных локаторах, дальномерах, гравировальных установках. Можно выделить применение АОД для управления лазерным излучением, быстродействие которого составляет 20 – 50 kHz.

При использовании АОД необходимо учитывать ряд особенностей, таких как сравнительно небольшой угол сканирования (как правило, не более $3^\circ \times 3^\circ$), требование к линейной поляризации лазерного излучения, потери управляемого лазерного излучения порядка 20% (при использовании двухкоординатного дефлектора) и температурная зависимость. К числу несомненных достоинств АОД можно отнести отсутствие подвижных элементов, малое энергопотребление, простоту конструкции и микросекундное быстродействие.

Электронно-перестраиваемые акустооптические фильтры (АОПФ) применяются для анализа различной оптической информации, для спектрального анализа светового излучения — как проходящего через исследуемую среду, так и излучаемого источниками, например звездами, планетами, факелами пламени и т.д. [4,5,14]. Парателлурифт применяется в АОПФ не только для всего видимого диапазона, но и для ИК диапазона, примерно до 2 – 3 μm .

Адаптивные акустооптические дисперсионные линии задержки (АОДЛ) — новые представители класса АО устройств — отличаются от традиционных АО устройств чрезвычайно широкими спектрами электромагнитного и акустического полей. Особенностью АОДЛ является их необычно высокое спектральное разрешение, которое должно достигать 10000 [15–17]. На настоящий момент времени такое спектральное разрешение является рекордным для АО приборов, в том числе при использовании фемтосекундных лазеров ближнего ИК диапазона (0.8 – 1.5 μm).

АО процессоры — устройства, предназначенные для спектрального анализа слабых радиосигналов на фоне помех. Задача решается за счет применения АО процессоров на кристаллах парателлурифта [18–20], в которых используется фурье-метод для получения спектра радиосигналов.

В классической оптике парателлурифт (благодаря очень большому двулучепреломлению в видимом и ближнем ИК диапазонах) используется для изготовления достаточно крупных оптических призм. Определенные

перспективы имеются у парателлурифта как нового фазовращательного и магнитооптического материала [21]. Уникальные пьезоэлектрические свойства потенциально позволяют создавать новые гироскопические датчики и высокоточные приводы крутильных микроэлектромеханических систем (MEMS) [22]. В ядерной физике парателлурифт применяется для детектирования актов двойного бета-распада [23–26].

Прогресс в области лазерной физики привел к созданию промышленных твердотельных лазеров, работающих на третьей гармонике основного излучения 1064 nm, а именно на $\lambda = 355$ nm. Эти лазеры являются мощными и компактными приборами, что предопределяет их широкое прикладное использование [27]. В настоящее время для УФ диапазона используют коллинеарные АО ячейки на кварце, перспективным является применение кристаллов редкоземельных вольфраматов, однако для $\lambda = 355$ nm представляется актуальным создание АО двухкоординатных дефлекторов на парателлурифте.

Парателлурифт в последнее время стал интересен для применения в терагерцовом (ТГц) диапазоне длин волн [28–32], где по-прежнему ощущается недостаток природных оптических материалов. Так, в работе [29] сообщается о генерации ТГц излучения в монокристаллах $\alpha\text{-TeO}_2$, облученных фемтосекундными лазерными импульсами с длиной волны 800 nm. Парателлурифт имеет относительно большие значения коэффициента поглощения ($\sim 10 \text{ cm}^{-1}$ на $\lambda = 300 \mu\text{m}$ и $\sim 2 \text{ cm}^{-1}$ на $\lambda = 800 \mu\text{m}$) и значительный коэффициент преломления (~ 5.2) в ТГц диапазоне [23,31]. Тем не менее высокое АО качество, высокая энергоэффективность АО устройств [32] позволяют считать, что TeO_2 обладает высоким потенциалом в создании АО модуляторов, дефлекторов и фильтров дальнего ТГц диапазона. Однако оптические свойства парателлурифта в ТГц области изучены слабо. Приведенные в литературе [29,30] значения являются результатом расчетов на основе феноменологической модели для материалов с характерными резонансными частотами (или другими характерными масштабами энергии) для оптического поглощения, например для ионных и молекулярных колебаний (модель осциллятора Лоренца).

Для использования парателлурифта в акустооптике концентрация дефектов структуры в кристаллах — примесей, дислокаций — должна быть минимизирована, что является одной из основных задач специалистов, занимающихся вопросом выращивания данного материала. Некоторые дефекты, как, например, газовые пузырьки, совершенно недопустимы в материале СЗП (по крайней мере в объемах, через которые проходит свет и ультразвук). Оптические аномалии (ОА) в кристаллах, а также искажения акустических фронтов и повышенное затухание ультразвука связаны со структурными дефектами и обусловленными ими механическими напряжениями [33].

Несмотря на большие успехи, достигнутые за последние 15–20 лет в области выращивания достаточ-

но крупных и оптически однородных монокристаллов парателлуриата, проблемы дальнейшего увеличения их размеров, снижения концентраций примесей, а также уменьшения оптических потерь, связанных с рассеянием и поглощением света, актуальны до настоящего времени [34–44]. Если кристаллы парателлуриата обладают одинаково высокими характеристиками структурного и оптического качества, то решающим фактором при выборе материала для ряда применений (например, в качестве светозвукопровода АОДЛ) становятся размеры. Поскольку и спектральное разрешение фильтров, и время задержки для линии задержки, также являющейся разновидностью АО фильтра, прямо пропорциональны длине светозвукопровода, возникает потребность в парателлуриате большого диаметра, чтобы можно вырезать СЗП длиной до 80 – 100 мм вдоль направления распространения лазерного луча [5].

Структурные дефекты (благодаря эффекту фотоупругости) являются основной причиной различных оптических неоднородностей и аномалий в кристаллах, вызывают повышенное поглощение и рассеяние излучения. Оптические поверхности элементов из кристаллов в реальности также никогда не являются плоскими, поскольку имеют свой микро- и нанорельеф, что создает диффузную компоненту отражения световых потоков.

Следует заметить, что как поглощение, так и рассеяние света присутствуют и в идеальном кристалле. Причина поглощения — взаимодействие электромагнитных волн с электронными оболочками атомов; рассеяние обусловлено флуктуациями показателя преломления и исчезает только при абсолютном нуле температуры (0 К). Поэтому улучшение структурного качества кристаллов за счет оптимизации ростовых технологий позволяет лишь приблизиться к неким идеальным значениям оптических характеристик. Поскольку структурное качество реальных монокристаллов весьма далеко от идеала, то любое существенное продвижение технологии роста сопровождается и улучшением оптических характеристик.

Начало исследования оптических характеристик парателлуриата было положено в работах [45,46]. Представлены спектры пропускания в образцах кристалла перпендикулярно и параллельно оптической оси [45], дисперсия для обыкновенного и необыкновенного показателей преломления от края УФ границы пропускания до 1 мкм, коэффициент поглощения в видимой области, исследовано оптическое вращение [46,47]. В [48] получены спектры отражения в поляризованном свете перпендикулярно и параллельно оптической оси для температур 295 и 85 К в частотном спектральном интервале 50 – 1000 см⁻¹. В работе [21] визуализированы распределения интенсивности рассеянного лазерного излучения на длинах волн 488, 531 и 633 нм вдоль оптической оси парателлуриата, вычислены значения удельного вращающего момента и получена кривая оптического вращающего момента для видимого диапазона спектра.

Согласно данным [40,41], суммарный коэффициент экстинкции, включающий показатель поглощения и рассеяния на $\lambda = 0.535 \mu\text{m}$, не превышает значения 0.03 см⁻¹. Для ближнего ИК диапазона величина коэффициента экстинкции лежит в пределах (10⁻³ – 10⁻²) см⁻¹. Френелевское отражение успешно сводится к минимуму с помощью просветляющих покрытий. Всё это позволяет создавать АО устройства на парателлуриате длиной до 60 мм и более, а также использовать достаточно мощные непрерывные и импульсные лазеры.

В работе [30] получены спектры показателя преломления и коэффициента поглощения в диапазоне частот 0.25 – 2 ТГц (1200 – 150 мкм) при комнатной температуре методом ТГц спектроскопии чистого кристалла $\alpha\text{-TeO}_2$ как потенциального материала для ТГц применений. Измеренные коэффициенты поглощения в данном спектральном диапазоне изменяются в пределах 1 – 100 см⁻¹. Значения коэффициента поглощения больше в направлении распространения света, соответствующего необыкновенному показателю преломления.

Авторы [49] изучили электродинамические характеристики парателлуриата в широком диапазоне частот при температурах от 77 до 300 К с помощью импульсной широкополосной ТГц спектроскопии и ИК фурье-спектроскопии. Оценена температурная эволюция комплексного показателя преломления, а также поглощение излучения вдоль кристаллографических направлений [001] и [110]. Определено, что при температурах менее 100 К процессы собственного поглощения значительно подавляются. Получены температурные зависимости показателя преломления и коэффициента поглощения парателлуриата в ТГц диапазоне. Показано, что охлаждение кристалла приводит к смещению высокочастотной границы поглощения ТГц излучения с 15 до 40 см⁻¹ (с 670 до 250 мкм соответственно) для кристаллографического направления [001].

В настоящей работе исследованы оптические характеристики (пропускание и отражение) в широком спектральном диапазоне (УФ–видимый–ИК–ТГц) парателлуриата, выращенного из сырья различной чистоты разными производителями. Работа выполнена на современной приборной базе, увязанной в единый измерительный комплекс. Исследования выполнены на образцах, отличающихся тремя основными для парателлуриата кристаллографическими направлениями ([110], [100] и [001]). Детально исследованы характеристики поверхностей, соответствующих указанным кристаллографическим ориентациям.

Образцы парателлуриата для исследований

Для исследований спектральных характеристик оптического пропускания парателлуриата были подготовлены

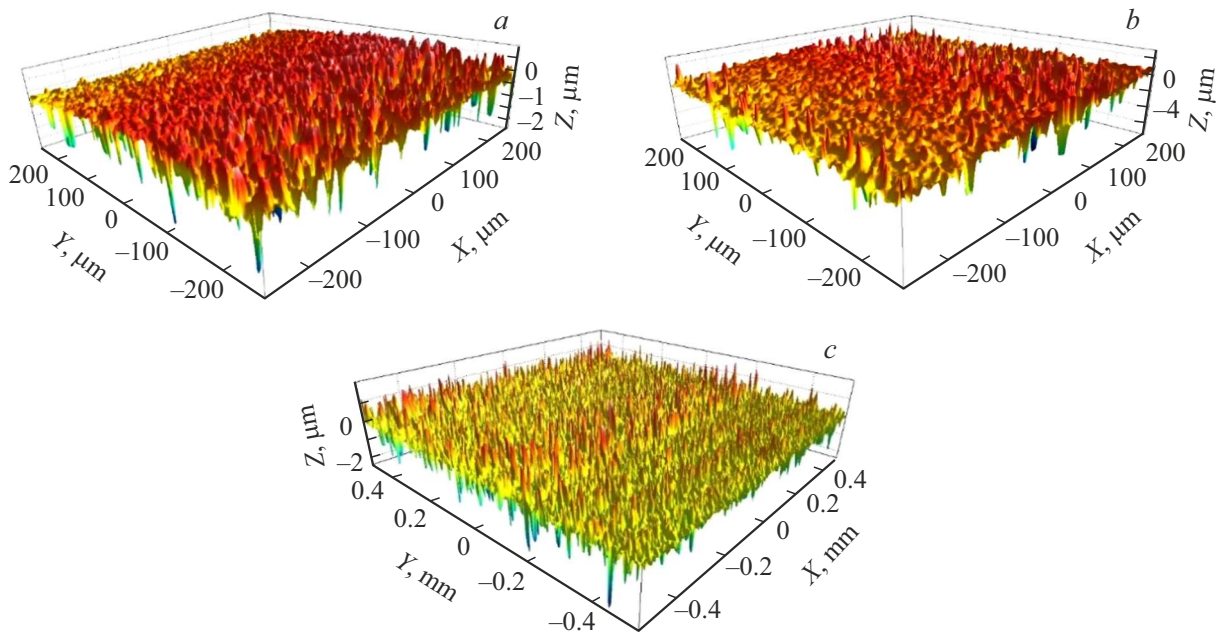


Рис. 1. 3D-профиль поверхности плоскостей (001) (a), (100) (b) и (110) (c) после тонкой шлифовки порошком M10.

образцы от разных производителей монокристаллов, использовавшие исходное сырье разной степени чистоты. Все исследованные монокристаллы α -TeO₂ выращены методом Чохральского в воздушной среде при нормальном давлении.

В Тверском государственном университете (ТвГУ, <https://tversu.ru/>) и на предприятии „Элент А“ (г. Днепропетровск, www.elent-a.net) рост монокристаллов происходил в кристаллографическом направлении [110], их диаметр составлял 60 – 80 мм. Средняя плотность дислокаций в монокристаллах — $(1.5–3.5) \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$. Образцы для исследований в ТвГУ были получены из монокристаллов, выращенных из исходной шихты марки ОСЧ (массовая доля примесей менее 0.0001%) и из шихты марки ХЧ (чистота основного вещества 99.5%). На предприятии „Элент А“ образцы выращивались из исходной шихты с чистотой не хуже 99.9995% основного вещества. Во всех образцах атомно-эмиссионный спектральный анализ показал, что в качестве основных примесей были выявлены Fe, Cu, Al, Bi, Mg.

Для каждого типа кристаллов, отличающихся производителем и чистотой, были подготовлены образцы трех кристаллографических направлений: [110], [100] и [001].

Подготовка оптических поверхностей образцов парателлурита для измерений пропускания и отражения

Резка и шлифование образцов проводились обычными методами [50]. Тонкое шлифование суспензией шлифпорошка M10 (F800) перед полировкой для такого матери-

ала, как парателлурит, считается достаточным. Величину снимаемого шлифованием слоя контролировали с точностью 0.5 μm . Оценка поверхности, подготовленной для полировки, проводилась визуально с использованием линзы 8 \times .

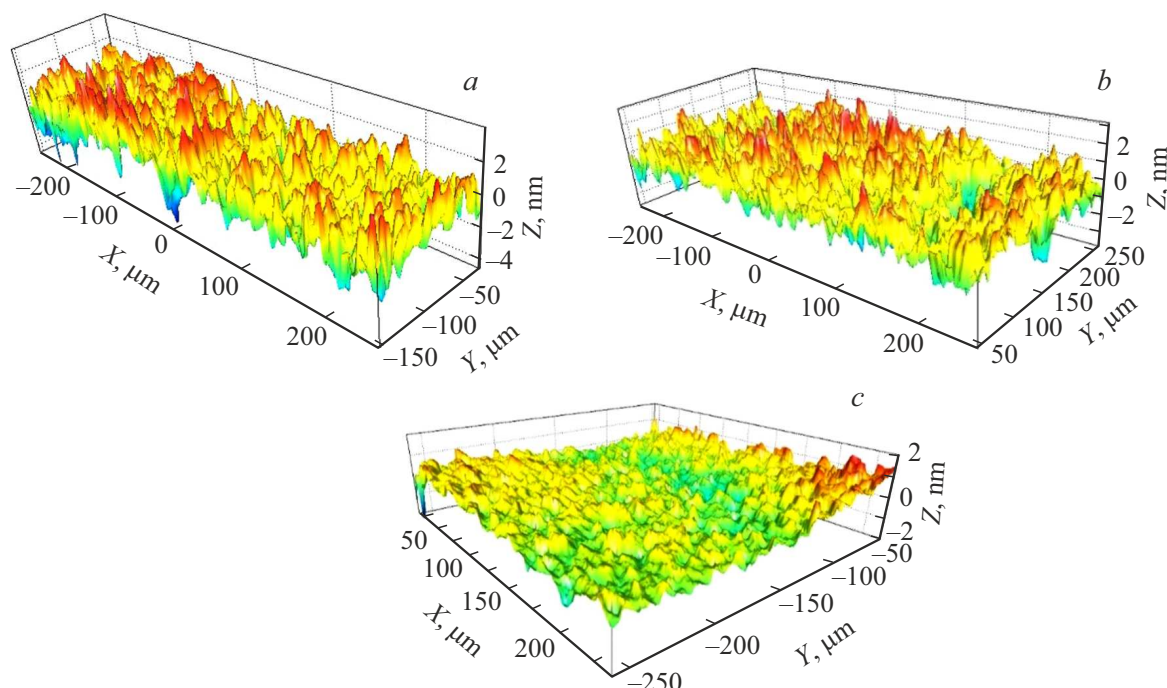
Различие всех трёх выбранных плоскостей проявилось уже на этапе тонкой шлифовки порошком M10. Для плоскости (001) было достаточно снимать слой материала 10 μm . При этом уходит „матовость“ поверхности и дефекты предыдущего процесса шлифовки M28 (F400). Для плоскости (110) недостаточно сошлифовать толщину 10 μm , пришлось снимать слой 15 – 20 μm . Наибольший слой (около 70 μm) удаляли на плоскости (100). Однако процесс тонкой шлифовки каждой из плоскостей длился одинаково; таким образом, скорости удаления материала различались в несколько раз. Указанная особенность определяется разными механическими характеристиками поверхности, обусловленными разной ретикулярной плотностью плоскостей и направлениями связей Te-O относительно обрабатываемой поверхности.

Контроль рельефного слоя, остающегося после тонкой шлифовки, для оценки величины трещиноватого слоя и времени, требуемого на его удаление полировкой, проведен с помощью оптического профилометра NanoMap WLI1000. На рис. 1 представлены профили поверхностей; средние параметры шероховатости полученных поверхностей представлены в табл. 1.

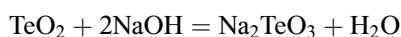
Полирование поверхностей производилось на станке вручную при давлении на образец 0.7 – 0.8 ат стандартным методом в течение одного часа. Слабощелочная суспензия с pH 10 для полирования была изготовлена на основе алмазного микропорошка марки AM 0.5/0 и дистиллированной воды с модифицирующей добавкой

Таблица 1. Характеристики поверхностей образцов парателлурифта после шлифования

Характеристика	Плоскость	(001)	(100)	(110)
Средняя шероховатость трехмерного профиля (Sa)		289.6 nm	594.6 nm	219.1 nm
Максимальная высота трехмерного профиля (Sz)		3062.1 nm	10905.0 nm	4509.2 nm
Средняя шероховатость линейного профиля (Ra)		308.8 nm	488.5 nm	158.1 nm
Максимальная высота шероховатости линейного профиля (Rt)		2009.2 nm	3587.5 nm	1049.1 nm
Средняя максимальная высота линейного профиля (Rz)		1708.0 nm	2824.2 nm	928.4 nm
Среднее расстояние между неровностями трехмерного профиля (Sm)		19.619 μm	22.097 μm	17.441 μm

**Рис. 2.** 3D-профили поверхностей (001) (a), (100) (b), (110) (c) после полировки.

NaOH. Использование щелочи стимулирует протекание реакции



и „мягкое“, безабразивное снятие части материала поверхностного слоя.

Толщина снимаемого слоя материала образцов контролировалась через каждые 15 min полировки толщиномером с точностью $0.5 \mu\text{m}$, дополнительно проводилась визуальная оценка поверхности. Толщина сполитрованных за 1 h слоёв материала для всех исследуемых поверхностей, соответствующих кристаллографическим плоскостям, оказалась разная: с плоскости (001) удалась $12 \mu\text{m}$, а для плоскостей (110) и (100) — только $8 \mu\text{m}$.

Подготовленные для измерений образцы имели следующие характеристики полированных поверхно-

стей: плоскостность $N < 0.3$, $\Delta N < 0.1$; клиновидность $\Theta \sim 20''$; чистота P = III. Конечная толщина обработанных пластинок составляла $5.21 \pm 0.01 \text{ mm}$.

Полированные поверхности были исследованы с помощью оптического профилометра NanoMap WLI1000 и программного обеспечения SPIP; подсчет параметров шероховатости поверхностей осуществлялся с помощью специализированного программного обеспечения Gwyddion.

На рис. 2 и 3 представлены 3D- и 2D-профили поверхностей, а в табл. 2 средние характеристики поверхности полированных образцов. Сравнение со шлифованными поверхностями (табл. 1) показывает, что шероховатость поверхности и высота неровностей снизилась на 3 порядка. Расстояние между неровностями практически не изменилось.

Таблица 2. Характеристики поверхностей образцов парателлурида после полирования

Характеристика	Плоскость	(001)	(100)	(110)
Средняя шероховатость трехмерного профиля (Sa)		0.8 nm	0.7 nm	0.4 nm
Максимальная высота трехмерного профиля (Sz)		7.8 nm	7.3 nm	4.0 nm
Средняя шероховатость линейного профиля (Ra)		0.7 nm	0.3 nm	0.2 nm
Максимальная высота шероховатости линейного профиля (Rt)		4.5 nm	2.0 nm	1.7 nm
Средняя максимальная высота линейного профиля (Rz)		3.7 nm	1.8 nm	1.4 nm
Среднее расстояние между неровностями трехмерного профиля (Sm)		16.561 μm	17.980 μm	15.403 μm

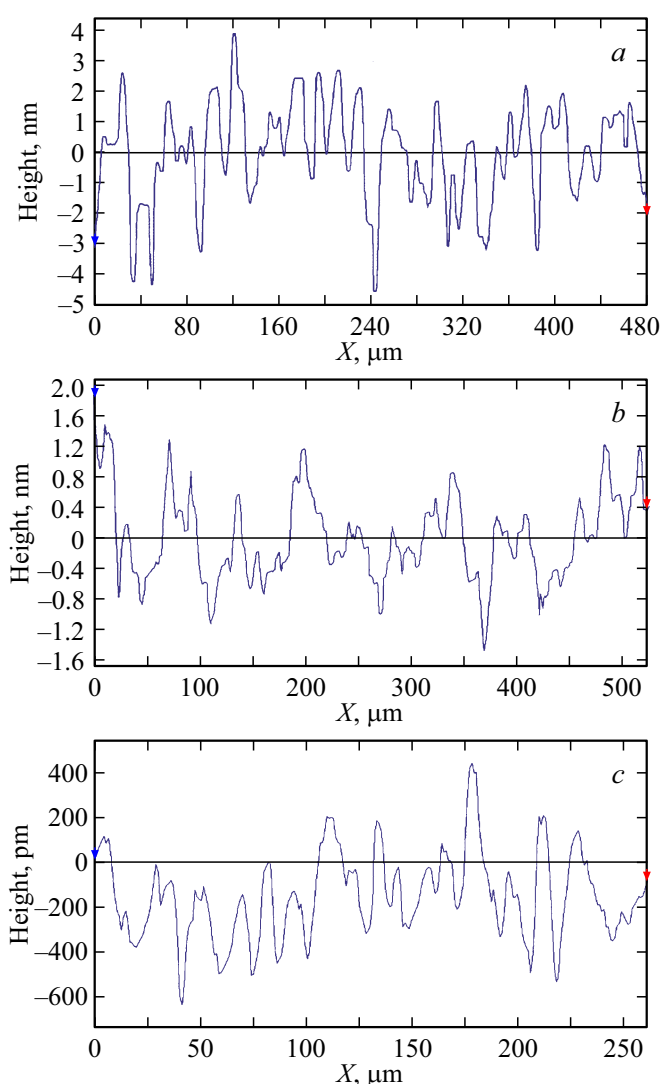


Рис. 3. 2D-профили поверхностей (001) (a), (100) (b), (110) (c) после полировки.

Согласно полученным измерениям, сделан вывод, что при полировке образцов при одинаковых условиях значения параметров шероховатости для различных кри-

сталлографических плоскостей могут отличаться в 2–3 раза, что, в свою очередь, может влиять на значения коэффициентов отражения и пропускания.

Различие в значениях параметров шероховатости для различных кристаллографических плоскостей обусловлено соответствующими значениями поверхностной энергии. Анализ геометрии полированных кристаллографических плоскостей парателлурида показал, что минимальная шероховатость, минимальная высота неровностей наблюдается для плоскости (110), которая в парателлуриде является наиболее плотноупакованной, обладающей минимальной поверхностной энергией и являющейся сингулярной гранью. Именно в этом направлении производится рост монокристаллов из расплава методом Чохральского, формирование поверхности фронта кристаллизации, совпадающего по геометрии в идеальном случае с плоскостью (110). Это позволяет получать монокристаллы с более совершенной структурой и с минимальной концентрацией газовых включений.

Для исследования отражения от полированных поверхностей были подготовлены 3 клиновидных образца с индексами плоскости поверхностей, соответствующими направлению исследуемых на оптическое пропускание образцов: [110], [100] и [001]. Полированная плоскость соответствовала характеристикам обработанных поверхностей, представленным выше; на остальных плоскостях образцов формировали матовую поверхность. Угол между поверхностями клиновидных образцов обеспечивал отсутствие возможных отражений от второй матовой поверхности.

Оборудование и методики

Спектральное пропускание образцов регистрировалось с помощью спектрофотометра Photon RT (Essent Optics) и фурье-спектрометра Vertex 70 (Bruker) в спектральном диапазоне 0.185 – 670 μm . Для Photon RT в диапазоне 0.185 – 1.7 μm спектральное разрешение составляло $\sim 1\text{ nm}$ и точность измерения до 0.01%. Для Vertex 70 точность определения волнового числа составляла 0.3 – 0.5 cm^{-1} , а фотометрическая точность

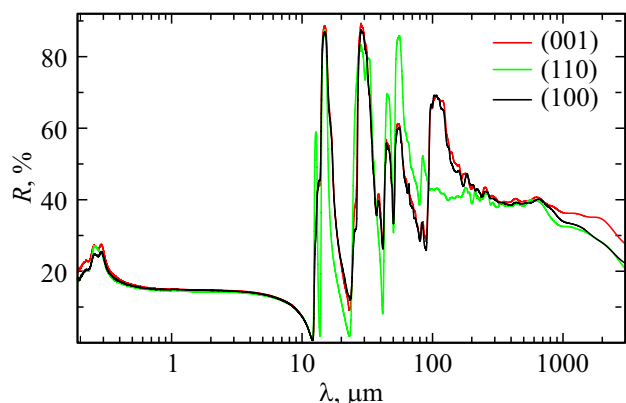


Рис. 4. Спектр отражения в УФ, видимом, ИК и ТГц диапазонах клиновидных образцов парателлурифта различной кристаллографической ориентации.

0.1%. В диапазоне $150 - 3000 \mu\text{m}$ измерения осуществлялись на приборе TeraK8 (MenloSystems); спектральное разрешение составляло 1 GHz, погрешность в измерении коэффициента пропускания на приборе $\sim 0.5\%$.

Измерения пропускания выполнялись в неполяризованном свете до $300 \mu\text{m}$ (спектрофотометр Photon RT и фурье-спектрометр Bruker Vertex 70). После $300 \mu\text{m}$ (спектрометр TeraK8 MenloSystems) излучение поляризовано.

С целью исключения ошибок в измерении, связанных с возможным влиянием на величину пропускания степени поляризации, проведены тестовые исследования пропускания излучения на спектрофотометре Photon RT с использованием поляризованного (*s*-поляризация) излучения. Было установлено, что влияние поляризации света на пропускание кристаллов отсутствует.

Расчет показателей поглощения (ослабления) α проводился по стандартной методике, учитывающей многократные отражения [51,52]. Значения коэффициентов отражения для исследуемых кристаллов получены нами во всем исследуемом диапазоне длин волн (для видимого и ближнего ИК диапазонов производилось сравнение с данными источников [1,53]). Абсолютная погрешность расчетов $\Delta\alpha$ определялась согласно работе [54].

Результаты и обсуждение

На рис. 4 представлены спектры отражения, полученные на клиновидных образцах с поверхностями, соответствующими кристаллографическим плоскостям (001), (100) и (110) в УФ, видимом, ИК и ТГц спектральных диапазонах.

В видимом диапазоне отражение увеличивается с уменьшением длины волны, при этом величина показателя преломления n для диапазона длин волн составляет $\sim 2.3-2.5$. В УФ диапазоне наблюдается пиковый рост отражения, максимум приходится на $0.275 \mu\text{m}$. Длина волны $0.355 \mu\text{m}$, соответствующая излучению третьей

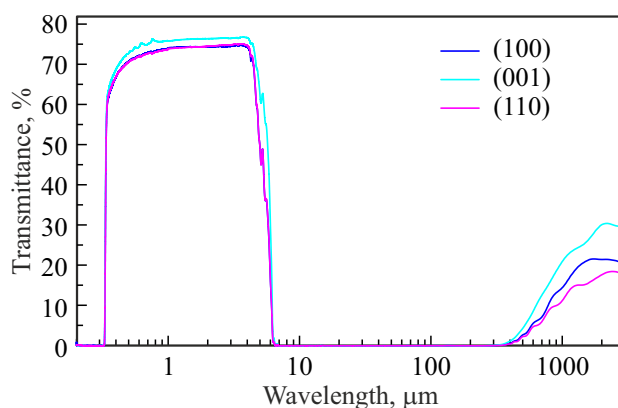


Рис. 5. Спектр пропускания парателлурифта, полученного из сырья марки ОСЧ, с разной кристаллографической ориентацией.

гармоники Nd:YAG-лазера, отвечает отражению 19.2% (при падении излучения вдоль оптической оси), соответствующая величина n составляет 2.56.

Отражение в ТГц диапазоне существенно выше. Показатель преломления для парателлурифта, определенный на основе зависимостей отражения в ТГц диапазоне, уменьшается с ростом длины волны и составляет $\sim 4.4 - 5.1$ в диапазоне $130 - 700 \mu\text{m}$. Его величина обеспечивает АО качество (M_2 , для поперечной акустической волны, распространяющейся вдоль оси [110]). Это на порядки выше, чем для большинства известных материалов в данном диапазоне [32]. После $700 \mu\text{m}$ происходит снижение n до значений ~ 2.6 при $3000 \mu\text{m}$.

Анализ спектра отражения показывает, что для диапазона $10 - 100 \mu\text{m}$ наблюдается серия минимумов и максимумов величиной от 5 до 85%. Данные особенности могут быть связаны с аномалией дисперсии показателя преломления; аналогичная картина наблюдается оксидах, в частности в SiO_2 и кристаллическом кварце. Пикам соответствуют длины волн, примерно равные 15, 30, 45 и $55 \mu\text{m}$, что кратно горизонтальным значениям расстояния между неровностями поверхности (табл. 2, величина Sm ; рис. 3), из чего можно также предположить наличие эффекта интерференции волн, обусловленной технологией обработки материала. Данной особенности спектра отражения парателлурифта посвящены несколько работ [29,30,48]. В работе [48] производились измерения показателя отражения парателлурифта в диапазоне от 0 до 100cm^{-1} , и были получены спектры отражения с аналогичными максимумами и минимумами. Причины появления данных пиков и впадин в настоящей работе установить не удалось. Их появление связывают с трудностями эксперимента или наличием многофоновых процессов. Такая же картина спектра отражения наблюдалась в работе [29] в диапазоне до 14 THz.

Влияние кристаллографической ориентации на спектр пропускания парателлурифта, полученного из чистого исходного сырья, в диапазоне $0.185 - 3000 \mu\text{m}$ представлено на рис. 5. Наблюдается различие в про-

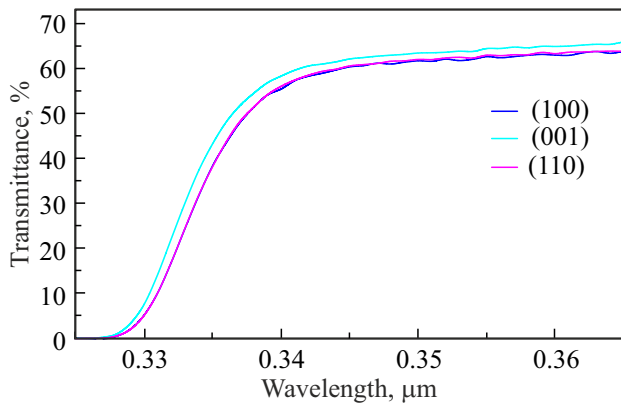


Рис. 6. Спектральная зависимость пропускания вблизи коротковолновой границы пропускания парателлуриата разной кристаллографической ориентации, полученного из сырья марки ОСЧ.

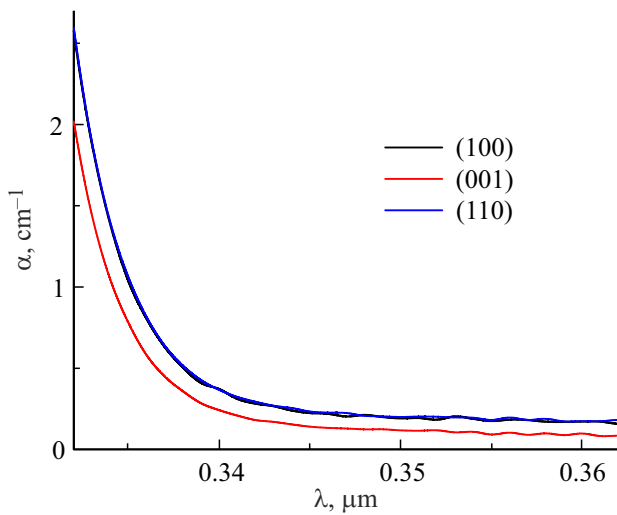


Рис. 7. Коротковолновая область спектра поглощения парателлуриата разной кристаллографической ориентации, полученного из сырья марки ОСЧ.

пускании образцов для видимого и ИК диапазонов на 2 – 3%, в диапазоне 800 – 3000 μm различие существенно больше и достигает 6 – 12%. Существенный рост пропускания излучения в ТГц диапазоне начинается с ~ 340 μm и достигает максимума в районе 1800 – 2100 μm. Максимальным пропусканием в УФ, видимом и ТГц диапазонах обладают монокристаллы с кристаллографической ориентацией, соответствующей плоскости (001).

Коротковолновый край пропускания характеризуется его резким ростом. Для $\lambda = 355 \text{ nm}$ пропускание достигает 64% (рис. 6). Рассчитанные спектры коэффициентов ослабления (поглощения) для коротковолновой границы пропускания и для ТГц диапазонов представлены на рис. 7 и 8 соответственно. Коэффициент поглощения в УФ области для $\lambda = 0.355 \text{ μm}$ составляет 0.092 cm^{-1} . Это значение свидетельствует о достаточно большом

поглощении, не позволяющем применять материал для управления мощным непрерывным лазерным излучением, однако материал вполне пригоден для использования в моноимпульсных источниках малой и средней мощности.

В спектральном ТГц диапазоне поглощение снижается с 20 cm^{-1} при 235 μm до 11 cm^{-1} при 300 μm ; при 800 μm поглощение составляет 1.7 cm^{-1} ; минимальное значение 0.77 cm^{-1} имеет место при 2000 μm (рис. 8; для образцов, полученных из сырья марки ОСЧ). Сравнение парателлуриата с возможными средами для акустооптики ТГц диапазона (кристаллы AlSb, GaAs, Ge, Si, GaP) показало его преимущество для создания АО устройств [32]. АО качество парателлуриата оказалось на порядки выше. В данном случае коэффициент поглощения на уровне единиц cm^{-1} не является критической величиной, ограничивающей применение материала.

Сравнение оптических характеристик монокристаллов, выращенных из разного сырья, разных произво-

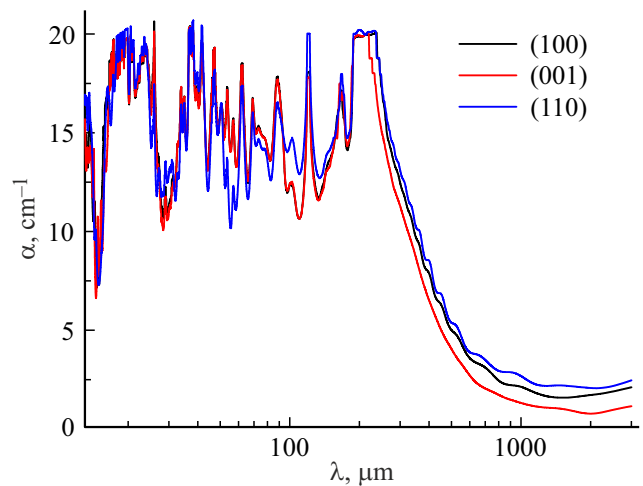


Рис. 8. ТГц спектр поглощения парателлуриата разной кристаллографической ориентации, полученного из сырья марки ОСЧ.

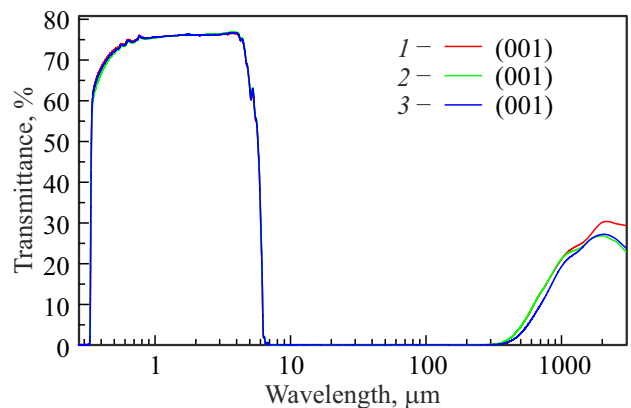


Рис. 9. Спектр пропускания парателлуриата, полученного из сырья марки ОСЧ (1) и ХЧ (2) в ТвГУ и на предприятии „Элент“ (Э) (3) (плоскость (001)).

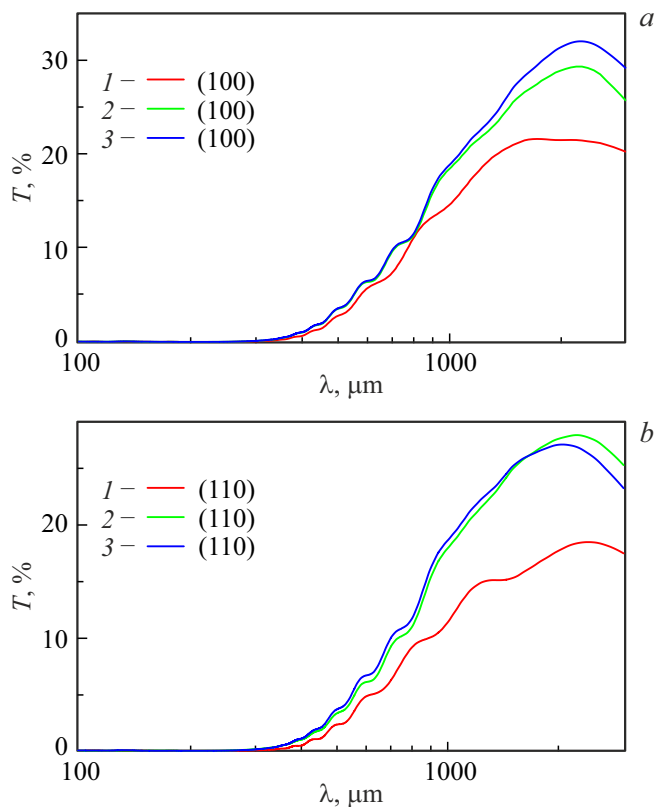


Рис. 10. Спектр пропускания парателлурифта, полученного из сырья марки ОСЧ (1) и ХЧ (2) в ТвГУ и на предприятии „Элент“ (Э) (3); (а) плоскость (100), (b) плоскость (110).

дителей представлено на рис. 9. Кристаллографическая ориентация образцов соответствует плоскости (001). В УФ и видимом диапазонах пропускание мало различается для кристаллов, выращенных из сырья, в котором концентрация примесей на три порядка выше (сырье марки ХЧ, содержание примесей достигает 0.5 wt.%). Такая же картина наблюдается при исследовании пропускания излучения в других направлениях (соответствующих кристаллографическим плоскостям (100) и (110), рис. 10). Однако в этих случаях пропускание для парателлурифта, выращенного из сырья марки ОСЧ, оказалось на 5 – 9% ниже, чем для других исследуемых образцов.

Заключение

Выполнены исследования оптического пропускания и отражения монокристаллов парателлурифта в спектральном диапазоне 0.185 – 3000 μm для различных кристаллографических направлений ([110], [100] и [001]). Изучено влияние качества сырья разной чистоты и особенностей технологии разных производителей на пропускание образцов. Показано, что на оптическое пропускание практически не влияет чистота сырья даже при снижении концентрации примесей на три порядка.

Установлено, что параметры шероховатости различных плоскостей парателлурифта отличаются в 2 – 3 раза при полировке, производимой при одинаковых условиях, что может влиять на абсолютную величину отражения. На основе анализа спектров отражения в диапазоне 10 – 100 μm, где имеет место серия минимумов и максимумов, сделано предположение о проявлении эффекта интерференции волн, связанного с технологией оптической обработки.

Измерены величины пропускания и коэффициента ослабления парателлурифта на длине волны 355 nm. Они составляют более 64% и менее 0.092 cm⁻¹ соответственно, что позволяет их использовать для создания АО двухкоординатных дефлекторов этого диапазона.

Обнаружено уменьшение коэффициента поглощения в области свыше 300 – 400 μm, что показывает возможность использования парателлурифта в ТГц диапазоне длин волн.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания по научной деятельности №75-03-2022-056 и №0817-2023-0006 с использованием ресурсов Центра коллективного пользования Тверского государственного университета и ресурсов ООО „Тидекс“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] А.А. Блистанов, В.С. Бондаренко, Н.В. Переломова, Ф.Н. Стрижевская, В.В. Чкалова, М.П. Шаскольская. *Акустические кристаллы. Справочник* (Наука, М., 1982).
- [2] J. Xu, R. Stroud. *Acousto-Optic Devices: Principles, Design and Applications* (John Wiley and Sons, NY., 1992).
- [3] A.P. Goutzoulis, D.R. Pape. *Design and Fabrication of Acousto-Optic Devices* (Marcel Dekker, NY., 1994).
- [4] В.Я. Молчанов, Ю.И. Китаев, А.И. Колесников, В.Н. Нарвер, А.З. Розенштейн, Н.П. Солодовников, К.Г. Шаповаленко. *Теория и практика современной акустооптики* (МИСиС, М., 2015).
- [5] L.N. Magdich, V.Ya. Molchanov. *Acoustooptic devices and their applications* (Gordon and Breach Science Pub., NY., 1989).
- [6] А.А. Афонин, А.С. Гук, В.Н. Никитин, Н.В. Никитин, А.В. Шацкий, В.Б. Чемоданов. *Наведение лазерных пучков: Автоматические системы и устройства наведения*. Изд. 2 (URSS, М., 2023).
- [7] V.Ya. Molchanov, S.I. Chizhikov, O.Yu. Makarov, N.P. Solodovnikov, V.N. Ginzburg, E.V. Katkin, E.A. Khazanov, V.V. Lozhkarev, I.V. Yakovlev. *Acta Physica Polonica*, **116** (3), 335 (2009). DOI: 10.12693/APhysPolA.116.355
- [8] П.Г. Крюков. *Квант. электрон.*, **31** (2), 95 (2001). [P.G. Kryukov. *Quantum Electronics*, **31** (2), 95 (2001). DOI: 10.1070/QE2001v031n02ABEH001906].

- [9] О. Звелто. *Принципы лазеров* (Лань, СПб., 2008).
- [10] А.С. Гук, Ю.В. Гуляев, В.Л. Евстигнеев, М.А. Казарян, Ю.М. Мокрушин, М.А. Талалаев, О.В. Шакин. *Температурные эффекты в акустооптических дефлекторах на парателлурите* (Из-во РАН, 2017).
- [11] V.P. Zarubin, A.A. Karabutov, K.B. Yushkov, A.I. Chizhikov, O.Y. Makarov, V.Y. Molchanov, E.B. Cherepetskaya, S.A. Tretiakov, A.I. Kolesnikov. *NDT & E International*, **98** (2), 171 (2018). DOI: 10.1016/j.ndteint.2018.05.010
- [12] S. Tretiakov, A. Kolesnikov, I. Kaplunov, R. Grechishkin, E. Shmeleva, K. Yushkov. *Intern. J. Thermophysics*, **37** (1), 1 (2016). DOI: 10.1007/s10765-015-2017-x
- [13] S. Tretiakov, R. Grechishkin, A. Kolesnikov, I. Kaplunov, K. Yushkov, V. Molchanov, B.B.J. Linde. *Acta Physica Polonica A*, **127** (1), 72 (2015). DOI: 10.12693/APhysPolA.127.72
- [14] В.И. Балакший, В.Н. Парыгин, Л.Е. Чирков. *Физические основы акустооптики* (Радио и связь, М., 1985).
- [15] V.Ya. Molchanov, S.I. Shizhikov, O.Yu. Makarov. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **278**, 102 (2011). DOI: 10.1088/1742-6596/278/1/012016
- [16] V.Ya. Molchanov, S.I. Chizhikov, O.Yu. Makarov, N.P. Solodovnikov, V.N. Ginzburg, E.V. Katin, E.A. Khazanov, V.V. Lozhkarev, I.V. Yakovlev. *Appl. Optics*, **48** (7), 118 (2009). DOI: 10.12693/APhysPolA.116.355
- [17] В.Я. Молчанов, С.И. Чижиков, К.Б. Юшков. *Квант. Электрон.*, **41** (8), 675 (2011). [V.Ya. Molchanov, S.I. Chizhikov, K.B. Yushkov. *Quantum Electron.*, **41** (8), 675 (2011). DOI: 10.1070/QE2011v041n08ABEH014676].
- [18] Ю.В. Егоров, К.П. Наумов, В.Н. Ушаков. *Акустооптические процессы* (Радио и связь, М., 1991).
- [19] С.В. Кулаков. *Акустооптические устройства спектрального и корреляционного анализа сигналов* (Наука, Л., 1978).
- [20] Дж. Ли, Э. Вандерлют. *ТИИЭР*, **77** (10), 158 (1989).
- [21] Е.Ю. Воронцова, Р.М. Гречишкин, И.А. Каплунов, А.И. Колесников, В.Я. Молчанов, И.В. Талызин, С.А. Третьяков. *Опт. и спектр.*, **104** (6), 976 (2008). [E.Yu. Vorontsova, R.M. Grechishkin, I.A. Kaplunov, A.I. Kolesnikov, I.V. Talyzin, S.A. Tret'yakov, V.Ya. Molchanov. *Opt. Spectrosc.*, **104** (6), 886 (2008)].
- [22] G. Boivin, P. Bèlanger, R.J. Zednik. *Crystals*, **10**, 939 (2020). DOI: 10.3390/cryst10100939
- [23] C. Arnaboldi, C. Brofferio, A. Bryant, C. Bucci, L. Canonica, S. Capelli, M. Carrettoni, M. Clemenza, I. Dafinei, S. Di Domizio, F. Ferroni, E. Fiorini, Z. Ge, A. Giachero, L. Gironi, A. Giuliani, P. Gorla, E. Guardincerri, R. Kadel, K. Kazkaz, L. Kogler, Y. Kolomensky, J. Larsen, M. Laubenstein, Y. Li, C. Maiano, M. Martinez, R. Maruyama, S. Nisi, C. Nones, E.B. Norman, A. Nucciotti, F. Orio, L. Pattavina, M. Pavan, G. Pessina, S. Pirro, E. Previtali, C. Rusconi, N.D. Scielzo, M. Sisti, A.R. Smith, W. Tian, M. Vignati, H. Wang, Y. Zhu. *J. Crystal Growth*, **312** (20), 2999 (2010). DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2010.06.034
- [24] F. Bellinia, M. Biassonic, C. Buccie, N. Casalia, I. Dafinei, Z. Ge, P. Gorla, F. Ferroni, F. Orio, C. Tomei, M. Vignati, Y. Zhu. *J. Instrumentation*, **5** (12), 12005 (2010). DOI: 10.1088/1748-0221/5/12/P12005
- [25] F. Bellini, L. Cardani, N. Casali, I. Dafinei, M. Marafini, S. Morganti, F. Orio, D. Pinci, G. Piperno, D. Santone, C. Tomei, M. Vignati. *J. Instrumentation*, **9** (10), 10014 (2014). DOI: 10.1088/1748-0221/9/10/P10014
- [26] L. Cardani, L. Gironi, J.W. Beeman, I. Dafinei, Z. Ge, G. Pessina, S. Pirro, Y. Zhu. *J. Instrumentation*, **7** (01), 012020 (2012). DOI: 10.1088/1748-0221/7/01/P01020
- [27] В.Ю. Железнов, Т.В. Малинский, В.Е. Роголин, Ю.В. Хомич, В.А. Ямщиков, И.А. Каплунов, А.И. Иванова. *Изв. вузов. Материалы электронной техники*, **26** (2), 89 (2023). DOI: 10.17073/1609-3577-2023-2-89-100 [V.Yu. Zheleznov, T.V. Malinsky, V.E. Rogalin, Yu.V. Khomich, V.A. Yamshchikov, I.A. Kaplunov, A.I. Ivanova. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Materialy Elektronnoi Tekhniki = Materials of Electronics Engineering*, **26** (2), 89 (2023) (in Russ.). DOI: 10.17073/1609-3577-2023-2-89-100. EDN: KWMYIJ].
- [28] Gennadiy Komandin, Vadim Nozdrin, Sergey Chuchupal, Vladimir Lomonov, Yurii Pisarevskii, Oleg Porodinkov, Igor Spektor. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **53**, 495102 (2020). DOI: 10.1088/1361-6463/abafdc
- [29] M. Sotome, N. Kida, R. Takeda, H. Okamoto. *Phys. Rev. A*, **90**, 033842 (2014). DOI: 10.1103/PhysRevA.90.033842
- [30] M. Unferdorben, A. Buzády, J. Hebling, K. Kiss, I. Hajdara, L. Kovács, Á. Péter, L. Pálfalvi. *J. Infrared Milli Terahz Waves*, **37**, 703 (2016). DOI: 10.1007/s10762-016-0261-1
- [31] D.L. Porokhovnichenko, V.B. Voloshinov, E.A. Dyakonov, G.A. Komandin, I.E. Spektor, V.D. Travkin. *Phys. Wave Phenom.*, **25** (2), 114 (2017). DOI: 10.3103/S1541308X17020066
- [32] П.А. Никитин. *Светотехника*, **5**, 52 (2022).
- [33] И. Янски, А. Петер, А. Мечки. *Кристаллография*, **27** (1), 152 (1982).
- [34] И.А. Каплунов, А.И. Колесников, И.В. Талызин, С.Л. Шайович. *Оптический журнал*, **72** (3), 51 (2005). [I.A. Kaplunov, A. I. Kolesnikov, I.V. Talyzin, S.L. Shaïovich. *J. Opt. Technol.*, **72** (3), 271 (2005). DOI: 10.1364/JOT.72.000271].
- [35] И.А. Каплунов, А.И. Колесников, К.П. Скоков, Р.М. Гречишкин, Л.В. Седова, С.А. Третьяков. *Оптический журнал*, **72** (7), 85 (2005). [I.A. Kaplunov, A.I. Kolesnikov, K.P. Skokov, R.M. Grechishkin, L.V. Sedova, S.A. Tret'yakov. *J. Opt. Technol.*, **72** (7), 572 (2005). DOI: 10.1364/JOT.72.000572].
- [36] А.В. Виноградов, В.А. Ломонов, Ю.А. Першин, Н.П. Сизова. *Кристаллография*, **47** (6), 1105 (2002). [A.V. Vinogradov, V.A. Lomonov, Yu.A. Pershin, N.L. Sizova. *Crystallography Reports*, **47** (6), 1036 (2002). DOI: 10.1134/1.1523523].
- [37] А.И. Колесников, И.А. Каплунов, И.А. Терентьев. *Кристаллография*, **49** (2), 229 (2004). [A.I. Kolesnikov, I.A. Kaplunov, I.A. Terent'ev. *Crystallography Reports*, **49** (2), 180 (2004)].
- [38] А.Е. Кокх, В.С. Шевченко, В.А. Влезко, К.А. Кокх. *J. Crystal Growth*, **384**, 1 (2013). DOI: 10.1016/J.JCRYSGRO.2013.08.027
- [39] P. Veber, J. Mangin, P. Strimer, P. Delarue, C. Josse, L. Saviot. *J. Crystal Growth*, **270** (1), 77 (2004). DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2004.06.029
- [40] А.И. Колесников, А.В. Шелопаев, И.А. Каплунов, И.В. Талызин, Е.Ю. Воронцова. *Изв. вузов. Материалы электронной техники*, **4**, 27 (2009).
- [41] А.И. Колесников, И.А. Каплунов, С.Е. Пыашенко, В.Я. Молчанов, Р.М. Гречишкин, М.А. Архипова, С.А. Третьяков. *Crystallography Reports*, **57**, 909 (2012). DOI: 10.1134/S1063774512070115

- [42] S. Kumaragurubaran, D. Krishnamurthy, C. Subramanian, P. Ramasamy. *J. Crystal Growth*, **197** (1–2), 210 (1999). DOI: 10.1016/S0022-0248(98)00788-X
- [43] S. Kumaragurubaran, D. Krishnamurthy, C. Subramanian, P. Ramasamy. *J. Crystal Growth*, **211** (1–4), 276 (2000). DOI: 10.1016/S0022-0248(99)00834-9
- [44] Ya. Chu, Ya. Li, Z. Ge, G. Wu, H. Wang. *J. Crystal Growth*, **295** (2), 158 (2006). DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2006.08.009
- [45] J. Liebertz. *Kristall und Technik*, **4** (2), 221 (1969). DOI: 10.1002/crat.19690040205
- [46] N. Uchida. *Phys. Rev. B*, **4** (10), 3746 (1971).
- [47] P.A. Thomas. *J. Phys. C: Solid State Phys.*, **21** (25), 4611 (1988). DOI: 10.1088/0022-3719/21/25/009
- [48] D.M. Korn, A.S. Pine, G. Dresselhaus, T.B. Reed. *Phys. Rev. B*, **8** (2), 768 (1973). DOI: 10.1103/PhysRevB.8.768
- [49] G. Komandin, V. Nozdrin, S. Chuchupal, V. Lomonov, Yu. Pisarevskii, O. Porodinkov, I. Spektor. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **53**, 495102 (2020). DOI: 10.1088/1361-6463/abafdc
- [50] М.А. Окатов. *Справочник технолога-оптика* (Политехника, СПб., 2004).
- [51] М.В. Курик. *Журн. прикл. спектр.*, **4** (3), 275 (1966). [M.V. Kurik. *J. Appl. Spectrosc.*, **4** (3), 199 (1966). DOI: 10.1007/BF00612152].
- [52] И.А. Каплунов, А.И. Колесников, И.В. Талызин, Л.В. Седова, С.Л. Шайович. *Оптический журнал*, **72** (7), 76 (2005). [I.A. Kaplunov, A.I. Kolesnikov, I.V. Talyzin, L.V. Sedova, S.L. Shaïovich. *J. Opt. Technol.*, **72** (7), 564 (2005). DOI: 10.1364/JOT.72.000564].
- [53] Refractive Index. INFO [электронный ресурс]. Режим доступа: <https://refractiveindex.info>
- [54] И.А. Каплунов, Г.И. Кропотов, В.Е. Рогалин, А.А. Шахмин. *Опт. и спектр.*, **128** (10), 1473 (2020). DOI: 10.21883/OS.2020.10.50017.128-20 [I.A. Kaplunov, G.I. Kropotov, V.E. Rogalin, A.A. Shahmin. *Opt. Spectrosc.*, **128** (10), 1583 (2020). DOI: 10.1134/S0030400X20100136].