

Монокристаллы парателлуриита для применения в УФ и терагерцовом спектральных диапазонах

Третьяков С.А.¹, Кропотов Г.И.², Рогалин В.Е.³, Каплунов И.А.¹,
Шахмин А.А.², Степанов В.С.¹, Молчанов С.В.¹

¹Тверской государственный университет, Тверь, Россия

²ООО «Тидекс», Санкт-Петербург, Россия

³Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург, Россия

SPIN-коды: 4211-2322, 4594-0739, 1644-1244, 2542-1343, 7936-0484, —, 4852-9382

tasleo@inbox.ru

Измерено оптическое пропускание и рассчитаны коэффициенты ослабления для образцов разной кристаллографической ориентации из монокристаллов парателлуриита, полученных из сырья высокой чистоты. Результаты позволяют предполагать возможность использования парателлуриита как на краю фундаментального поглощения, так и в длинноволновом терагерцовом спектральном диапазоне. Обнаружена анизотропия оптического пропускания для разной кристаллографии образцов – максимальное пропускание наблюдается для образцов с ориентацией [001].

Ключевые слова: парателлуриит, спектры пропускания, спектры поглощения, рассеяние излучения, терагерцовый диапазон

Введение

Монокристаллы парателлуриита широко применяются для изготовления приборов и устройств акустооптического применения: акустооптические модуляторы, дефлекторы, электронно-перестраиваемые акустооптические фильтры, адаптивные акустооптические дисперсионные линии задержки, акустооптические процессоры, гироскопические датчики, детекторы [1-9]. Основным преимуществом, которое и определяет такое широкое применение монокристаллов, является наличие высоких значений коэффициента акустооптического качества M^2 [1-3]. Кроме того, кристаллы имеют относительно невысокую твердость и легко обрабатываются, а также парателлуриит практически нерастворим в воде. Среди всех известных стёкол и монокристаллов парателлуриит обладает в своём интервале прозрачности самой высокой акустооптической добротностью благодаря малой скорости звука и большим значениям коэффициентов преломления. Это позволяет создавать высокоэффективные акустооптические устройства на парателлуриите, не требующие большой управляющей акустической мощности.

Оптическое пропускание монокристаллов позволяет эффективно применять его в видимом и в части инфракрасного диапазонах; перспективным является использование парателлуриита в ультрафиолетовой (УФ) и терагерцовой (ТГц) части спектра [10, 11]. В настоящей работе представлены спектральные характеристики высококачественных монокристаллов парателлуриита в указанных спектральных диапазонах.

1. Оборудование и образцы монокристаллов

Подготовленные для измерений пропускания образцы имели толщину 5.21 мм (± 0.01 мм) и следующие характеристики полированных поверхностей: плоскостность: $N < 0.3$; $\Delta N < 0.1$; клиновидность: $\theta \sim 20''$; чистота: $P = III$. Кристаллографическая ориентация образцов – [110], [100] и [001]. Монокристаллы выращивали из особоочистого исходного сырья, концентрация примесей в котором не превышала 10^{-4} вес. %.

Спектральное пропускание образцов регистрировалось с помощью спектрофотометра Evolution Array и Фурье-спектрометра Vertex 70 (Bruker) в спектральных диапазонах 0.19–670 мкм. Для Evolution Array в диапазоне 0.19–1.1 мкм спектральное разрешение составляло <1 нм при точности измерения ± 0.2 нм. Для Vertex 70 точность определения волнового числа составляла 0.3–0.5 см^{-1} , а фотометрическая точность 0.1%. В диапазоне 150–3000 мкм измерения осуществлялись на приборе TeraK8 (MenloSystems); спектральное разрешение составляло 1 ГГц, погрешность в измерении коэффициента пропускания на приборе $\sim 0.5\%$. Расчет показателей поглощения (ослабления) α проводился по стандартной методике, учитывающей многократные отражения [12]. Значения коэффициентов отражения для исследуемых кристаллов принимали согласно [10].

2. Результаты и обсуждение

Парателлурит рассматривается как возможный материал для применения в терагерцовом диапазоне длин волн [13], в котором оптические свойства кристаллов изучены недостаточно или являются результатом расчетов. В УФ диапазоне для промышленных твердотельных лазеров на длине волны 355 нм может быть актуальным создание дефлекторов на парателлурите. Для оценки возможностей парателлурита в указанных спектральных диапазонах необходимо обеспечить высокое пропускание материала, что во многих отношениях зависит от качества выращиваемых кристаллов.

В кристаллах парателлурита, выращиваемых в настоящее время, часто наблюдается нежелательные структурные и оптические дефекты. Эти дефекты резко снижают полезный объём кристаллов, пригодный для изготовления светозвукопроводов, и зачастую не позволяют реализовать требуемые для акустооптических устройств высокие, теоретически достижимые характеристики: спектральное разрешение, число световых позиций, качество изображений, угловую и линейную апертуру, лазерную стойкость и т.д.

Одним из дефектов являются примеси, концентрация которых в парателлурите может достигать значений 10^{-5} – 10^{-7} вес.%. При высоких концентрациях наблюдается повышенное поглощение и рассеяние света. В кристаллах парателлурита присутствуют дислокации, средняя плотность которых может составлять $3 \cdot 10^3$ – 10^6 см^{-2} . Кристаллы хорошего оптического качества имеют плотность дислокаций менее 10^4 см^{-2} ; при высоких плотностях дислокаций (более 10^5 см^{-2}) в несколько раз увеличивается затухание ультразвука в парателлурите.

Опыт показывает, что максимальным оптическим пропусканием и низким содержанием дефектов разного рода в монокристаллах парателлурита обладают монокристаллы, полученные из сырья высокой степени чистоты. Наличие ряда дефектов напрямую не зависит от наличия примеси и ее концентрации (дислокации, оптические аномалии разного рода), однако возможно создание их комплексов, которые могут существенным образом поглощать и рассеивать свет, ослаблять прохождение ультразвука.

На рис. 1 представлены спектральные зависимости пропускания образцов монокристаллов, выращенных из сырья марки ОСЧ для образцов с разной кристаллографической ориентацией.

Коротковолновый край оптического пропускания (рис. 1а) характеризуется резким ростом пропускания начиная с длины волны 0.327 мкм; на длине волны 355 мкм (длина волны излучения УФ лазера) пропускание достигает ~ 62 – 64% , и рассчитанный коэффициент ослабления составляет 0.090–0.098 см^{-1} .

Разница для отличающихся по ориентации образцов в величине пропускания в УФ диапазоне (1.5–2%) существенно меньше, чем для терагерцового диапазона (рис. 1б). Для длин волн в интервале от 500 до 2500 мкм эта разница находится в диапазоне от 3 до 8.5%. Максимальное значение пропускания имеет место для кристаллографической ориентации [001] - $\sim 31\%$.

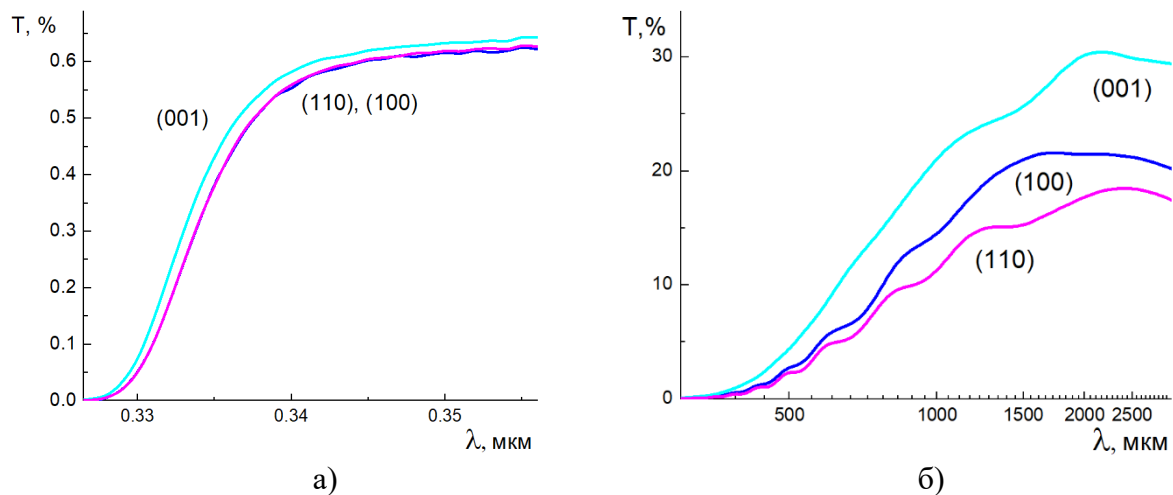


Рис. 1. Спектры пропускания монокристаллов парателлурита в УФ (а) и терагерцовой (б) частях спектра.

Отличия в пропускании характерны для всех направлений, но выделяется ориентация [001], как в УФ, так и в терагерцовом диапазоне. Причинами такого различия могут быть как анизотропия в отражении плоскостей, так и возможная анизотропия в подготовке самой оптической поверхности.

Выводы

Исследования оптического пропускания монокристаллов парателлурита показывают, что возможно использование монокристаллов хорошего оптического качества как вблизи края оптического поглощения в УФ области, так и в области длин волн 800-2500 мкм (ТГц диапазон).

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».

Список литературы

- Goutzoulis A.P., Pape D.R. Design and Fabrication of Acousto-Optic Devices. Chapter 2, Design of Acousto-Optic Deflectors. New York: Marcel Dekker, 1994. P. 69-122.
- Молчанов В.Я., Китаев Ю.И., Колесников А.И., Нарвер В.Н., Розенштейн А.З., Солодовников Н.П., Шаповаленко К.Г. Теория и практика современной акустооптики. М.: МИСиС, 2015. 459 с.
- Magdich L.N., Molchanov V.Ya. Acoustooptic devices and their applications. New York: Gordon and Breach Science Pub., 1989. 238 p.
- Molchanov V.Ya., Chizhikov S.I., Makarov O.Yu., Solodovnikov N.P., Ginzburg V.N., Katkin E.V., Khazanov E.A., Lozhkarev V.V., Yakovlev I.V., Eratko I.V., Serov R.V. Adaptive Optical Delay Lines for Femtosecond Laser Pulses Shaping // Acta Physica Polonica. 2009. V. 116. № 3. P. 335-358.
- Molchanov V.Ya., Shizhikov S.I., Makarov O.Yu. Interaction between femtosecond radiation and sound in a light dispersive delay lines using effect of strong elastic anisotropy // J. Phys.: Conf. Ser. 2011. V. 278. P. 012016.
- Molchanov V.Ya., Chizhikov S.I., Makarov O.Yu., Solodovnikov N.P., Ginzburg V.N., Katin E.V., Khazanov E.A., Lozhkarev V.V., Yakovlev I.V. Adaptive Optical Delay Lines for Femtosecond Laser Pulses Shaping // Appl. Optics. 2009. V. 48. № 7. P. 118-124.

7. Егоров Ю.В., Наумов К.П., Ушаков В.Н. Акустооптические процессы. М.: Радио и связь, 1991. 160 с.
8. Boivin G., Bélanger P., Zednik R.J. Characterization of Pure Face-Shear Strain in Piezoelectric α -Tellurium Dioxide (α -TeO₂) // Crystals. 2020. V. 10. P. 939.
9. Bellini F., Cardani L., Casali N., Dafinei I., Marafini M., Morganti S., Orio F., Pinci D., Piperno G., Santone D., Tomei C., Vignati M. Measurements and optimization of the light yield of a TeO₂ crystal // J. Instrumentation. 2014. V. 9(10). P. 10014.
10. Кропотов Г.И., Рогалин Е.В., Каплунов И.А., Шахмин А.А., Третьяков С.А., Гук А.С. Применение и оптические характеристики монокристаллического парателлуриата для акустооптики диапазонов 0.355–5 μm и ТГц // Оптика и спектроскопия. 2024. Т. 132. № 4. С. 454-464.
11. Каплунов И.А., Кропотов Г.И., Рогалин В.Е., Шахмин А.А., Третьяков С.А., Степанов В.С. Отражение и поглощение излучения в УФ диапазоне монокристаллического парателлуриата // В книге: XXIII Всероссийская конференция по физике сегнетоэлектриков. Тезисы. Тверь, 2023. С. 241.
12. Каплунов И.А., Колесников А.И., Талызин И.В., Седова Л.В., Шайович С.Л. Измерение коэффициентов ослабления света кристаллами германия и парателлуриата // Оптический журнал. 2005. Т. 72. № 7. С. 76-84.

Single crystals of paratellurite for use in the UV and terahertz spectral ranges

Tretiakov S.A.¹, Kropotov G.I.², Rogalin V.E.³, Kaplunov I.A.¹,
Shakhmin A.A.², Stepanov V.S.¹, Molchanov S.V.¹

¹Tver State University, Tver, Russia

²Tydex LLC, Saint Petersburg, Russia

³Institute of Electrophysics and Electric Power, RAS, Saint Petersburg, Russia

SPIN-codes: 34211-2322, 4594-0739, 1644-1244, 2542-1343, 7936-0484, —, 4852-9382

tasleo@inbox.ru

Optical transmission was measured and absorption coefficients were calculated for samples of single crystals of paratellurite high purity for different crystallographic orientations. The results propose the possibility of using paratellurite at the edge of fundamental absorption and in the long-wavelength terahertz spectral range. Anisotropy of optical transmission was found for different crystallography orientations of samples – the maximum transmission is observed for samples with orientation [001].

Keywords: paratellurite, transmission spectra, absorption spectra, radiation scattering, terahertz range