

К. т. н. В. В. ДАНИЛОВ

Украина, г. Донецк, НИИ комплексной автоматизации
E-mail: danilov@dongu.donetsk.uaДата поступления в редакцию
15.04 2002 г.Оппонент д. ф.-м. н. О. И. ШПОТЮК
(НПП "Карат", г. Львов)

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ МОНОКРИСТАЛЛОВ ДЛЯ СВЕТОЗВУКОПРОВОДОВ АКУСТООПТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Исследованы физико-технические параметры монокристаллов бромид-йодида (КРС-5) и бромид-хлорида (КРС-6) таллия, а также монокристаллов каломели (Hg_2Cl_2).

Акустооптические устройства предназначены для управления лазерным пучком и находят применение в лазерных технологиях, например обработки информации [1]. Принцип действия любого акустооптического устройства (АОУ) основан на фотоупругом эффекте, проявляющемся при акустооптическом взаимодействии (АОВ) световой и акустических волн, распространяющихся в изотропной или анизотропной среде. Основными материалами, применяемыми в качестве светозвукопроводов (СЗП) акустооптических устройств, являются монокристаллы. Знание физико-технических параметров монокристаллов, в частности, акустооптических, необходимо в процессе моделирования и проектирования АОУ [1—4].

Основываясь на работах [1, 4], выделяют следующие требования к акустооптическим параметрам монокристаллов:

- акустооптическая добротность, $M_2 \geq 10 \cdot 10^{-18} \text{ с}^3/\text{Г}$;
- скорость акустической волны, $V \leq 2000 \text{ м/с}$;
- затухание акустической волны, $\alpha \leq 20 \text{ дБ}/(\text{м} \cdot \text{ГГц}^2)$;
- светопропускание в диапазоне длин волн 0,28...20 мкм, не менее 50%.

Так как светозвукопровод АОУ в составе прибора подвержен влиянию эксплуатационных, климатических и транспортных факторов, дополнительными требованиями являются:

- устойчивость к воздействию лазерного излучения;
- температурная устойчивость электрических и магнитных свойств монокристаллов в области $-20 \dots +40^\circ\text{C}$;
- отсутствие химической активности по отношению к контактирующим материалам;
- химическая устойчивость при химико-механической обработке;
- наличие адгезии к материалам переходных слоев;
- наличие адгезии к материалам просветляющих и защитных покрытий.

Исследования монокристаллов каломели (Hg_2Cl_2)

Внешний вид образца монокристалла каломели показан на **рис. 1**. Кристаллы каломели тетрагональной сингонии, имеют соотношение параметров решетки $c/a=2,437$ [3, с. 38]. Для всех измерений физико-технических параметров монокристаллов, в т. ч. и акустооптических, методами химико-механической обработки изготавливались образцы размерами $10 \times 10 \times 10 \text{ мм}$, вырезанные вдоль главных кристаллографических осей.

Минимальная скорость акустической волны в Hg_2Cl_2 соответствует сдвиговой моде колебаний вдоль кристаллографического направления [110] и составляет $345 \pm 10 \text{ м/с}$. Результаты измерений затухания акустической волны на частотах 60—300 МГц, приведенные к общепринятой единице измерения $\text{дБ}/(\text{м} \cdot \text{ГГц}^2)$, показаны на **рис. 2**. Анализ частотной зависимости затухания акустической волны показывает, что она описывается кривой, близкой к квадратичной функции, которая ограничивает частотный диапазон использования устройств на Hg_2Cl_2 величиной порядка 100 МГц.

Оптимальным режимом акустооптического взаимодействия в каломели является анизотропный, с возбуждением сдвиговой волны в направлении [110]. Центральная частота полосы пропускания для этого режима подчиняется известной зависимости для анизотропного АОВ [4]:

$$f_0 = (V/\lambda)(n_i^2 - n_d^2)^{0,5},$$

где λ — длина оптической волны;
 n_i и n_d — показатели преломления для падающего и дифрагировавшего света, соответственно.

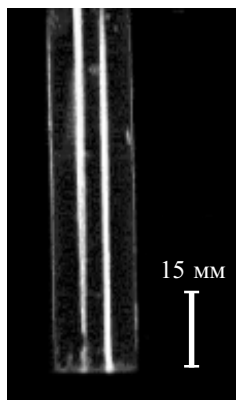


Рис. 1. Монокристалл Hg_2Cl_2

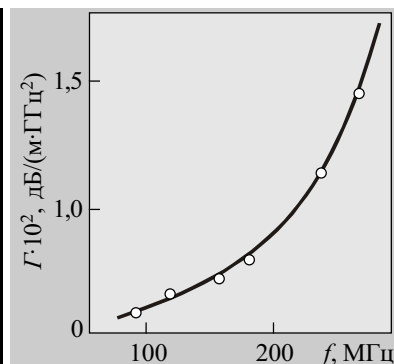


Рис. 2. Частотная зависимость затухания акустической волны в Hg_2Cl_2

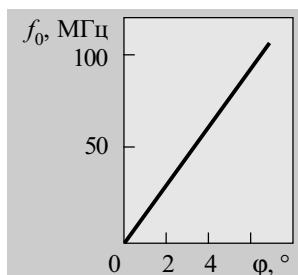


Рис. 3. Зависимость центральной частоты АОЯ от угла наклона оптической оси среды АОВ

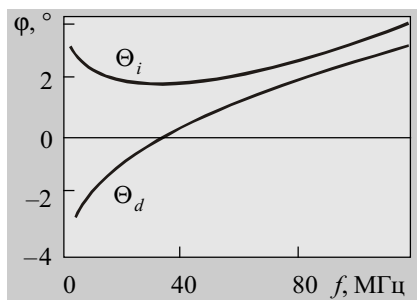


Рис. 4. Зависимость углов падения и дифракции оптических лучей в анизотропной АОЯ от частоты

Полное двойное лучепреломление наступает на частоте радиосигнала порядка 600 МГц, на $\lambda=0,85$ мкм (где пренебречь затуханием нельзя). Более низкую центральную частоту, ~ 100 МГц, можно реализовать путем наклона оптической оси кристалла на угол ϕ в плоскости падения лазерного луча. Зависимость центральной частоты акустооптической ячейки (АОЯ) устройства от ϕ показана на рис. 3.

Измерение углов падения (Θ_i) и дифракции (Θ_d) света анизотропной акустооптической ячейки на Hg_2Cl_2 осуществлялись на оптической скамье с применением гелий-неонового лазера. Так как обе оптические грани ячейки срезаны параллельно направлению распространения акустической волны, внутренние углы были вычислены исходя из измерения внешних углов.

Диапазон оптической прозрачности Hg_2Cl_2 определялся с помощью спектрофотометров СФ-26 и ИКС-29 и лежит в области длин волн 0,3—25 мкм. Кристалл является одноосным с ярко выраженным двулучепреломлением на длине оптической волны 0,63 мкм. Показатели преломления для обыкновенной и необыкновенной волн собственно равны $n_o=2,62$ и $n_e=1,96$ ($\lambda=0,63$ мкм) и измерялись методом призмы.

Результаты измерения углов падения и дифракции света показаны на рис. 4. Как следует из графика, центральная частота АОЯ равна 38 МГц. При оптической апертуре 0,03 м (время задержки 86 мкс) величина произведения ширины спектра на длительность сигнала для акустооптического устройства с такой АОЯ может составлять рекордную величину — порядка 3000.

Исследования монокристаллов бромид-йодида (КРС-5) и бромид-хлорида (КРС-6) таллия

Анализ перспективности использования монокристаллов КРС-5 и КРС-6 в акустооптических применениях показан в [1]. Монокристаллы кубической сингонии КРС-5 и КРС-6 с постоянной решетки 4,125 и 3,905 Å, соответственно, относятся к так называемым твердым растворам [5, с.127, 132]. Согласно [6], в этой системе возможно кристаллообразование, по крайней мере, 10—12 соединений с разным процентным соотношением галогенидов таллия. Исследованные КРС-5 и КРС-6 имели состав соответ-

ственно 42 мас.% ТlI и 58 мас.% ТlBr, 30 мас.% ТlCl и 70 мас.% ТlBr.

Плотность КРС-5 и КРС-6. Измерения производились методом гидростатического взвешивания в толуоле (в области комнатных температур) и визуальное — политермическим методом (в области 100—700 К). В области комнатных температур (18—22°C) плотность КРС-5 составляет 7,37 кг/м³, КРС-6 — 7,19 кг/м³.

Затухание продольных и поперечных акустических волн, а также их скорости измерялись на установке и по методу, описанном в [2].

Для КРС-5 (в м/с): $V_{L[100]}=2146\pm 5$, $V_{L[111]}=1930\pm 3$, $V_{L[010]}=1979\pm 8$, $V_{L[001]}=1941\pm 5$, $V_{S[100]}=890\pm 10$, $V_{S[010]}=1215\pm 10$, $V_{S[001]}=115\pm 10$.

Для КРС-6 (в м/с): $V_{L[100]}=2300\pm 10$, $V_{L[111]}=2150\pm 10$, $V_{L[010]}=2200\pm 10$, $V_{L[001]}=2160\pm 10$, $V_{S[100]}=1,02\pm 10$, $V_{S[010]}=1250\pm 10$, $V_{S[001]}=1238\pm 10$.

Здесь V — скорость акустической волны; в квадратных скобках указано кристаллографическое направление, вдоль которого распространялась акустическая волна продольной (L) или поперечной (S) моды. Минимальное затухание акустической волны для КРС-5 соответствует кристаллографическим направлениям [100] и [111] на продольной моде колебаний и составляет 9 и 25 дБ/(ГГц²·м), соответственно. Для монокристалла КРС-6 минимальное затухание акустической волны соответствует кристаллографическим направлениям [100] и [111] на поперечной моде колебаний и составляет 40 и 10 дБ/(ГГц²·м), соответственно.

Акустооптическая добротность (M_2) монокристаллов измерялась на установке и по методу, приведенным в [2]. Для КРС-5 максимальное значение $M_2=(n^6 p^2)/(\rho V^3)$ соответствует продольной акустической волне, распространяющейся вдоль кристаллографического направления [111], и равно $1200 \cdot 10^{13}$ с³/кг. (Здесь p — фотоупругая постоянная, ρ — плотность монокристалла.) Для кристалла КРС-6 максимальная акустооптическая добротность равна $800 \cdot 10^{13}$ с³/кг и соответствует поперечной акустической волне, распространяющейся вдоль кристаллографического направления [100].

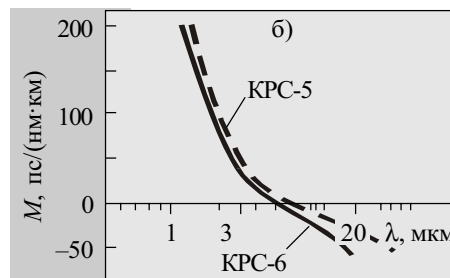
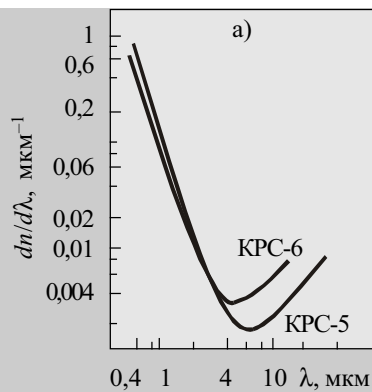


Рис. 5. Дисперсия показателя преломления (а) и спектральная зависимость материальной дисперсии (б) для кристаллов КРС-5 и КРС-6

Коэффициент спектрального пропускания (%) монокристаллов КРС-5 и КРС-6

Кристалл	L, мм	Длина волны, мкм											
		0,41	0,45	0,6	1,0	1,5	10	20	25	30	40	45	50
КРС-5	25	—	—	48	62	71	71	75	72	65	10	8	—
	10	—	—	52	67	71	71	75	72	70	22	12	—
	1	—	—	64	68	72	72	75	74	72	22	12	—
КРС-6	25	10	50	64	72	72	75	71	42	12	—	—	—
	10	14	54	67	74	74	75	73	45	12	—	—	—
	1	43	59	70	75	74	75	74	56	18	—	—	—

Показатель преломления КРС-5 и КРС-6 измерялся методом призмы [7]. На длине волны лазерного излучения 0,63 мкм он равняется 2,57 и 2,33, соответственно.

Дисперсия ($dn/d\lambda$) и спектральная зависимость материальной дисперсии ($d^2n/d\lambda^2 \cdot \lambda$) кристаллов измерялись на установке и по методике, приведенным в [7]. Результаты измерений представлены на рис. 5.

Коэффициенты спектрального пропускания монокристаллов в зависимости от толщины образца исследовались на приборе IFS-110. Результаты измерений приведены в таблице. Зависимость спектрального пропускания монокристаллов КРС-5 и КРС-6 от температуры приведена в работе [6].

Фотохимическое окрашивание монокристаллов зарегистрировано не было, что, в соответствии с работой [6] («...фоторазложение галогенидов таллия практически не наблюдается при длительной засветке, если исходное сырье тщательно очищено от примеси двухвалентных металлов»), подтверждает правильность выбранных режимов очистки исходных веществ при синтезе соединений.

Лазерная (лучевая) прочность. Исследования образцов-заготовок КРС-5 и КРС-6 обозначенных выше составов проводились на установке и по методике, изложенным в работе [8], при этом длительность светового импульса составляла 1 мс, длительность паузы — 1,5 мс, частота следования импульсов — 400 Гц. При мощности СО- и СО₂-лазеров на основных линиях генерации 2 и 20 Вт, соответственно, и диаметре лазерного пучка 6 мм смоделированы плотности мощности 0,18 и 1,8 кВт/см². При времени экспозиции 20 мин, т. е. когда устанавливалось динамическое равновесие температуры образца с температурой окружающей среды, измерялось светопропускание кристаллов (при этом разница температур по образцу не превышала 0,1—0,5°С). Контроль светопропускания осуществлялся на спектрометре IFS-110; значение его отличалось от приведенных в таблице не более чем на доли процента. В результате сделано заключение о лучевой прочности кристаллов при таких уровнях излучения.

Оптические потери КРС-5 и КРС-6 измерялись на установке и по методу, приведенным в [8]. Измерения позволили сделать заключение, что минимум потерь кристаллов КРС-6 приходится на длину волны 7,9 мкм и составляет величину $10 \cdot 10^{-4}$ дБ/км. Для кристаллов типа КРС-5 оптимальная длина волны равна 12—13 мкм, при этом поглощение равно $(6 \dots 7) \cdot 10^{-4}$ дБ/км.

Заключение

Исследованиями физико-технических параметров монокристаллов КРС-5 (42 мас.% ТlI и 58 мас.% TlBr) и КРС-6 (30 мас.% TlCl и 70 мас.% TlBr), используемых в качестве световодов акустооптических устройств, установлены: плотность; скорости и затухание поперечных и продольных акустических волн; акустооптическая добротность; показатели преломления, их дисперсия и зависимость материальной дисперсии; спектральное пропускание; отсутствие фотохимического окрашивания кристаллов; лазерная прочность монокристаллов; оптические потери.

Исследованиями монокристаллов Hg₂Cl₂ (каломе-ли), предлагаемых для использования в качестве световодов АОУ, установлены: диапазон оптической прозрачности; наличие ярко выраженного двулучепреломления; показатели преломления; минимальная скорость акустической волны; частотная зависимость затухания; оптимальный режим дифракции; частота радиосигнала, на которой наступает полное двулучепреломление кристалла; зависимость центральной частоты акустооптического взаимодействия от угла наклона оптической оси кристалла в плоскости падения лазерного пучка.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Данилов В. В. Материалы и технология реализации акустооптических устройств // Мат-лы VI междунар. Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». — Севастополь. — 1996. — С. 452—455.
2. Данилов В. В. Основы метрологического контроля технических характеристик акустооптических устройств // Радиотехника (Всеукр. науч.-техн. сб.). — 2002. — № 124. — С. 148—157.
3. Винчелл А. Н., Винчелл Г. Н. Оптические свойства искусственных минералов. — М.: Мир, 1967.
4. Данилов В. В. Акустооптические дефлекторы систем оптической памяти с побитовым представлением информации // Радиотехника (Всеукр. науч.-техн. сб.). — 2000. — № 116. — С. 125—132.
5. Воронкова Е. М., Гречушников Б. А., Дистлер Г. И., Петров И. П. Оптические материалы инфракрасной техники. — М.: Наука, 1965.
6. Дарвойд Т. Н., Бочкарев Э. П., Лебедева В. Н. и др. Корреляция объемной лучевой прочности монокристаллов КРС-6 с другими оптическими характеристиками // Оптико-механическая промышленность. — 1981. — № 1. — С. 26—28.
7. Васильев А. В., Войцеховский В. В., Плотниченко В. Г. Измерение спектральной зависимости показателя преломления твердотельных материалов в области их высокой прозрачности // Высококачественные вещества. — 1991. — № 3. — С. 39—49.
8. Данилов В. В. Экспериментальное исследование поликристаллических световодов среднего инфракрасного диапазона // Реестрація, зберігання і обробка даних. — 2001. — Т. 3, № 3. — С. 23—31.