

АКУСТООПТИКА

УДК 534.29; 535.525.

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОЛЯ В СВЕТОЗВУКОПРОВОДАХ АКУСТООПТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ ПАРАТЕЛЛУРИТА

**К. А. Морозова, Е. И. Каплунова, С. С. Рыбина, Е. В. Шмелева,
А. В. Костюк, Н. Е. Самохвалов**
Тверской государственный университет

С помощью цифровой тепловизионной камеры исследованы температурные поля в крупногабаритных светозвукопроводах при включении и работе акустооптических устройств на основе кристаллов парателлуриата. С учетом измеренных зависимостей коэффициента стоячей волны (КСВ) от частоты и диаграмм Смита проведен анализ динамики выделения тепла и его отвода в светозвукопроводах акустооптического дефлектора и фильтра на различных частотах и при различных электрических мощностях, подаваемых на пьезопреобразователи.

Ключевые слова: акустооптический дефлектор, акустооптический фильтр, тепловизионная инфракрасная камера, коэффициент стоячей волны, частота ультразвука, температурное поле, пьезопреобразователь, диаграмма Смита, кристаллы парателлуриата.

1. Введение. Выделение тепла в светозвукопроводах работающих акустооптических устройств в определенной степени изменяет все физические свойства материала и, следовательно, влияет на характеристики акустооптического взаимодействия. Кристаллы парателлуриата (α -TeO₂) являются одним из самых эффективных и востребованных акустооптических материалов для видимого и среднего ИК диапазонов длин волн. Поэтому явления, связанные с выделением тепла в этих кристаллах, изучались в различных работах, например, [1-7]. Наиболее важные для акустооптики константы парателлуриата имеют следующие температурные зависимости:

Для показателей преломления обыкновенного n_o и необыкновенного n_e лучей эти зависимости (для длины волны $\lambda=1.06$ мкм) имеют вид [3]:

$$n_o(T) = 2.20386 + 7.2 \cdot 10^{-6} T; \quad n_e(T) = 2,34792 + 3.9 \cdot 10^{-6} T. \quad (1)$$

- Коэффициент объемного расширения, согласно [8], имеет значение $\alpha = 4 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.
- Температурная зависимость скорости звука V в направлении [110] изменяется в соответствии с формулой [9]
$$V(T) = 6,555 \cdot 10^4 + 7,67 T \text{ (см} \cdot \text{с}^{-1}\text{)}, \quad (2)$$
где $V = 6,571 \cdot 10^4 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$ при $T = 20^\circ\text{C}$.
- Согласно [8], константы упругой жесткости c_{jk} с повышением температуры уменьшаются, но эффективная константа $(c_{11} - c_{12})/2$ увеличивается.
- Коэффициент акустооптического качества M_2 в диапазоне $(20-60)^\circ\text{C}$ с повышением температуры уменьшается примерно на $4 \cdot 10^{-17} \cdot \text{с}^3 \cdot \text{г}^{-1}$ (для направления V_s [110]).

Нужно заметить, что экспериментальные измерения акустооптического качества при различных температурах могут не соответствовать результатам, предсказываемым формулой $M_2 = n^6 p^2 / \rho V^3$, где p – фотоупругая константа, ρ – плотность, даже если температурные зависимости всех четырех величин известны с высокой точностью. Во-первых, повышение температуры должно сказываться на физических свойствах контакта пьезопреобразователь – кристалл. С ростом температуры изменяется состояние дефектов структуры: примесей, дислокацией, остаточных механических напряжений, – оказывающих влияние на распространение световых и акустических волн. Расчет температурного поля в светозвукопроводе, с учетом высокой анизотропии теплопроводности парателлурита и геометрии окружающих кристалл разнородных конструктивных элементов, также является сложной задачей. Динамика температурных полей в парателлурите обладает особенностями, связанными с необычно малой теплопроводностью $\lambda \sim 10^5 \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{С}^{-1}$ [10] по сравнению с большинством акустооптических материалов, приводящей к медленному сглаживанию температурного профиля при изменениях акустической мощности. Таким образом, непосредственные измерения температурных полей в светозвукопроводах представляются наиболее эффективным способом изучения влияния многофакторного процесса выделения тепла на характеристики работающих в различных режимах акустооптических устройств.

Целью настоящей работы было изучение особенностей динамики температурных полей в крупногабаритном $(36 \times 25 \times 22 \text{ мм})$ светозвукопроводе, изготовленном из монокристалла парателлурита, входящем в состав перестраиваемого

акустооптического фильтра, в широких диапазонах ультразвуковых частот (50-250) МГц и электрических мощностей, подаваемых на пьезопреобразователь (0,5-3,5) Вт.

Фильтр, предназначенный для астрофизических спектральных исследований эмиссионных линий звезд и активных ядер галактик, конструктивно по своим параметрам был близок к фильтру, подробно описанному в работе [11]. Большие размеры светозвукопроводов, необходимые для достижения высокого спектрального разрешения, требуют особых мер по компенсации температурного дрейфа характеристик фильтра в климатических условиях эксплуатации на наземных телескопах, а тем более, в еще более жестких условиях на космических аппаратах, где также применяются акустооптические фильтры на основе крупногабаритных кристаллов парателлуриата [12].

Для иллюстрации существенных отличий в динамике температурных полей в крупных по современным представлениям и средних по размерам светозвукопроводах, изготовленных из кристаллов парателлуриата, представлены данные о температурных полях в акустооптическом дефлекторе и фильтре. Внешний вид исследованных экспериментальных устройств представлен на рис. 1.

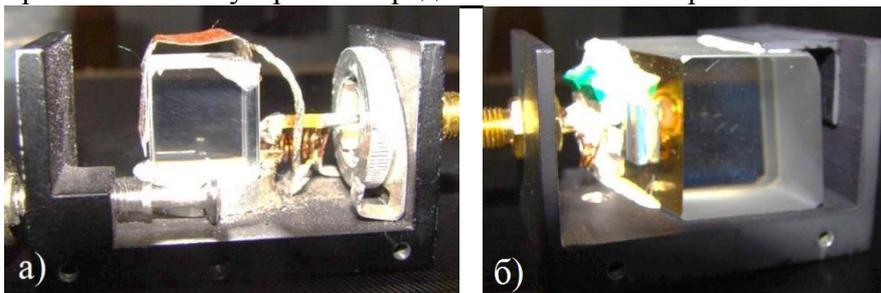


Рис. 1. Фотографии акустооптического дефлектора (а) и акустооптического фильтра (б) со светозвукопроводами, изготовленными из кристаллов парателлуриата

2. Измерение температурных полей в акустическом дефлекторе. Температурные поля как в дефлекторе, так и в фильтре, исследовались с помощью тепловизионной камеры FLIR 250T, работающей в температурном диапазоне – (20-120) °С. Камера устанавливалась напротив центра выходной грани устройства и фокусировалась на ней. Таким образом, наблюдалось температурное поле в плоскости проекции звукового столба на выходную грань. Помимо цветовой индикации температуры по

всему полю зрения, на проекции светозвукопровода выделены 5 точек (1, 2, ..., 5), температуры в которых в цифровом виде отображались на экране, также на нем фиксировалась частота ультразвука, излучаемого пьезопреобразователем (рис. 2).

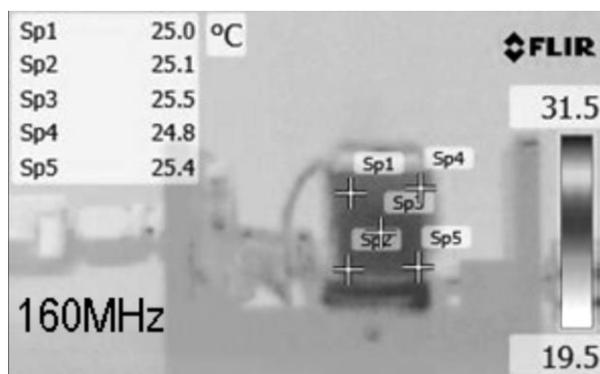


Рис. 2. Полученное тепловизионной камерой FLIR изображение температурного поля в светозвукопроводе работающего акустооптического дефлектора с информацией о температурах в точках 1-5 и частоте ультразвука

На рис. 3 представлены временные зависимости температуры в точках (1-5) светозвукопровода дефлектора, полученные с интервалом 1/25 с при ступенчатом увеличении мощности на 0,5 Вт до 3,5 Вт. Частота f , подаваемого напряжения на пьезопреобразователь дефлектора с генератора, равнялась 80 МГц.

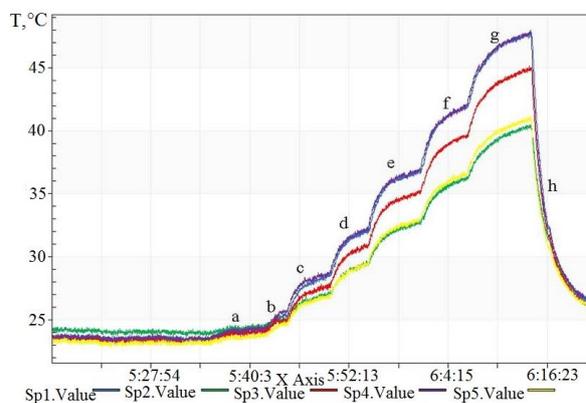


Рис. 3. Временные зависимости температуры в пяти точках (1-5) светозвукопровода дефлектора при ступенчатом увеличении мощности W каждые 300 с на 0,5 Вт ($a-g$); $W(a) = 0,5$ Вт, и отключении мощности (h)

Далее измерялись температуры в тех же точках уже при постоянной мощности $W = 3$ Вт, но при ступенчатом увеличении частоты f каждые 300 с от 50 МГц до 160 МГц ($a-g$) (рис. 4).

На рис. 5 приведены временные зависимости температуры в точках (1-5) светозвукопровода дефлектора при очень медленном увеличении частоты f (1 МГц за 1 мин) и постоянной мощности $W = 3$ Вт.

С целью изучения связи между интенсивностью выделения тепла в светозвукопроводе дефлектора и частотой при постоянной мощности управляющего сигнала, получены диаграмма полных импедансов Смита и зависимость КСВ от частоты (рис. 6, 7).

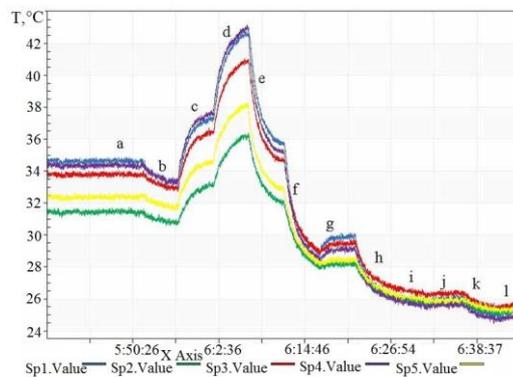


Рис. 4. Временные зависимости температуры в пяти точках(1-5) светозвукопровода дефлектора при постоянной мощности $W = 3$ Вт и ступенчатом увеличении частоты f на 10 МГц ($a-l$), $f(a) = 60$ МГц

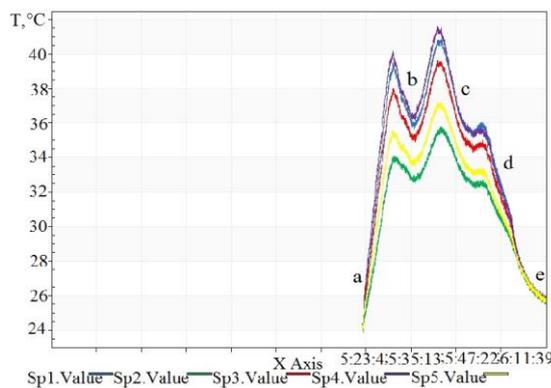
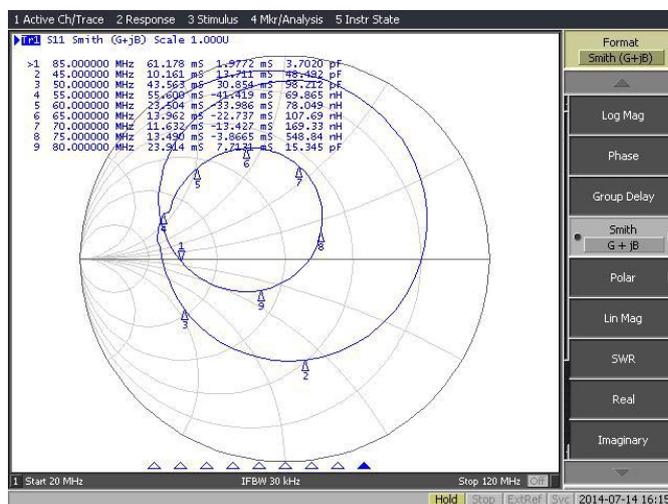
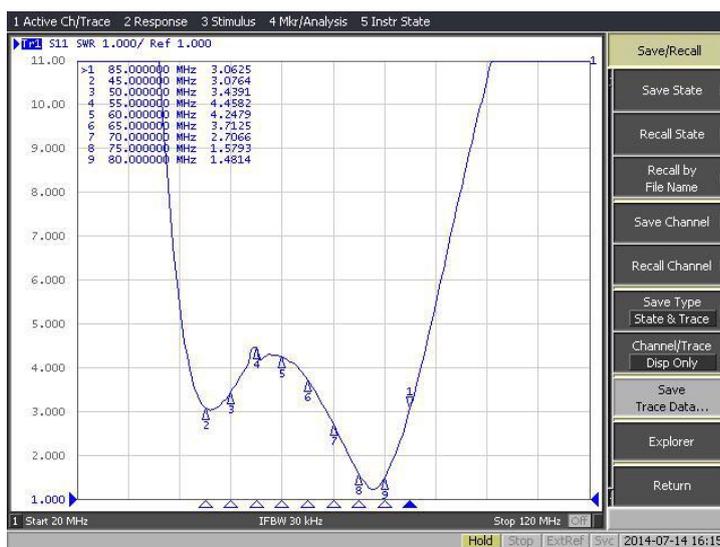


Рис. 5. Временные зависимости температуры светозвукопровода дефлектора в точках (1-5) при медленном (1 МГц за 1 мин) увеличении частоты f в диапазоне (60-100)

МГц ($a-e$) и постоянной мощности, подаваемой на пьезопреобразователь $W = 3$ Вт



Р и с . 6 . Диаграмма полных импедансов Смита для исследованного акустооптического дефлектора



Р и с . 7 . Зависимость КСВ от частоты для исследованного акустооптического дефлектора

3. Измерение температурных полей в акустооптическом фильтре. На рис. 8 представлен акустооптический фильтр с точками (1-5), в которых измерялась температура тепловизионной камерой.

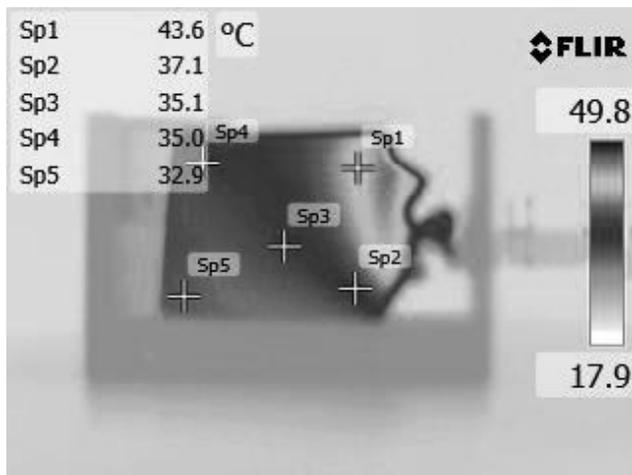


Рис. 8. Полученное тепловизионной камерой FLIR изображение температурного поля в крупногабаритном светозвукопроводе, изготовленном из кристалла парателлурита, работающего акустооптического фильтра. Частота $f = 140$ МГц; мощность $W = 3,5$ Вт

На рис. 9, 10 представлены временные зависимости температуры в пяти точках светозвукопровода акустооптического фильтра, полученные аналогично зависимостям для дефлектора, представленным на рис. 3, 4. Частотный диапазон измерений составлял (50-250) МГц. Изменения частот на 10 МГц производились каждые 300 с. Мощность изменялась от 0,5 Вт до 3,5 Вт каждые 300 с на 0,5 Вт.

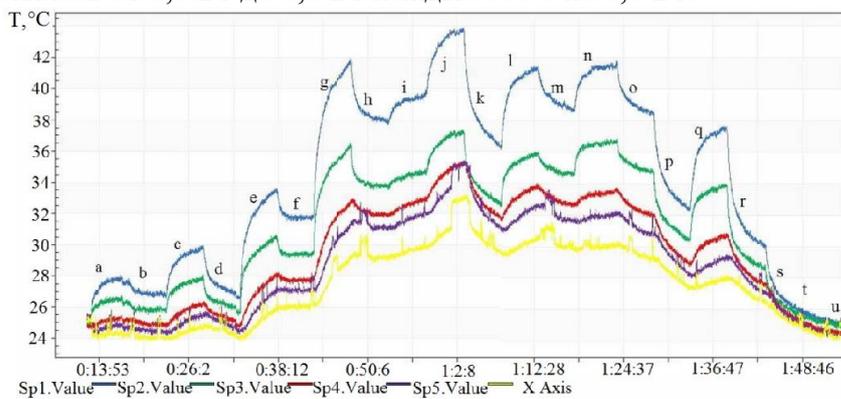
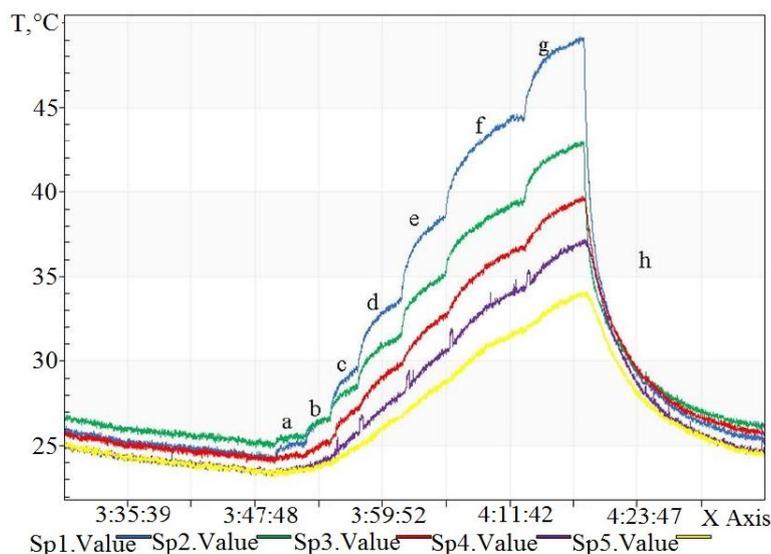
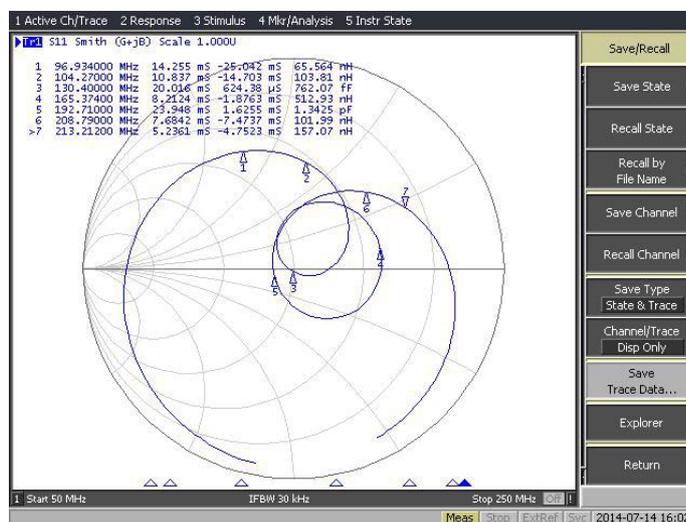


Рис. 9. Временные зависимости температуры в пяти точках (1-5), полученные для светозвукопровода акустооптического фильтра при ступенчатом увеличении частоты f на 10 МГц каждые 300 с в диапазоне (50-250) МГц (a-u) при постоянной мощности $W = 3$ Вт



Р и с . 10. Временные зависимости температуры в пяти точках (1-5), полученные для светозвукопровода акустооптического фильтра при ступенчатом увеличении мощности W от 0,5 Вт до 3,5 Вт ($a-h$) на 0,5 Вт каждые 300 с и постоянной частоте $f = 140$ МГц

Диаграмма полных импедансов Смита и зависимость КСВ от частоты акустооптического фильтра, в котором измерялись температурные поля, представлены на рис. 11, 12.



Р и с . 11. Диаграмма полных импедансов Смита для исследованного акустооптического фильтра

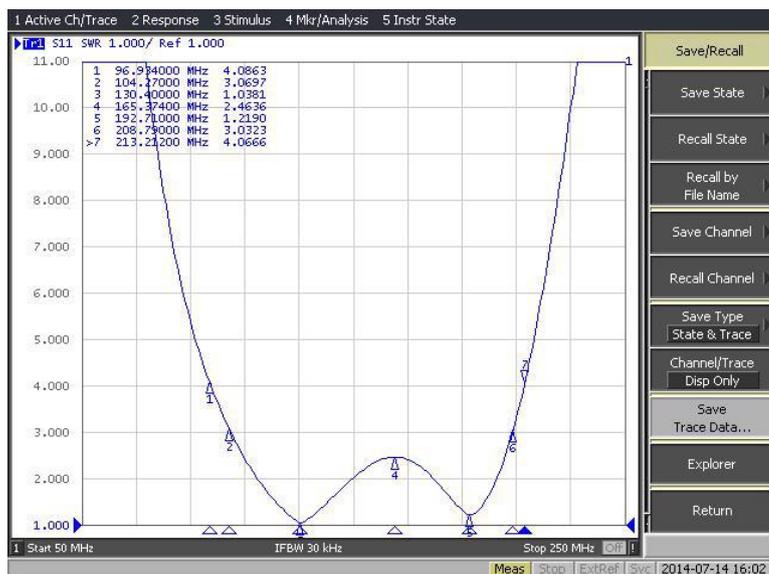


Рис. 12. Зависимость КСВ от частоты для исследованного акустооптического фильтра

4. Обсуждение результатов. Анализ временных зависимостей нагрева и охлаждения светозвукопроводов исследованных акустооптических устройств: дефлектора и фильтра, - приводит к следующим выводам:

- В светозвукопроводе фильтра, имеющем размеры $36 \times 25 \times 22$ мм и объем $19,8 \text{ см}^3$, наблюдается в несколько раз менее интенсивная динамика нагрева и охлаждения материала, чем в светозвукопроводе дефлектора, имеющего размеры $17 \times 15 \times 12$ мм и объем $3,06 \text{ см}^3$.
- В точке 1 светозвукопровода фильтра, как наиболее близкой к пьезопреобразователю, при увеличении мощности на $0,5 \text{ Вт}$ нагрев происходит со скоростью $0,8 \text{ }^\circ\text{C/мин}$, в точке 5, как наиболее удаленной от пьезопреобразователя, - с меньшей скоростью $0,4 \text{ }^\circ\text{C/мин}$. При выключении устройства скорость охлаждения в точке 1 составляет $6 \text{ }^\circ\text{C/мин}$, в точке 5 - $2,5 \text{ }^\circ\text{C/мин}$.
- В точке 1 светозвукопровода дефлектора при увеличении мощности на $0,5 \text{ Вт}$ нагрев происходит со скоростью $2,4 \text{ }^\circ\text{C/мин}$, в точке 5 - со скоростью $1,4 \text{ }^\circ\text{C/мин}$. При выключении устройства скорость охлаждения в точке 1 составляет $25 \text{ }^\circ\text{C/мин}$, в точке 5-10 $^\circ\text{C/мин}$.

- Максимальные температурные градиенты в светозвукопроводах фильтра и дефлектора наблюдаются при максимальных температурах нагрева, и для обоих типов устройств близки по значениям (4,2 К/см для фильтра и 4,7 К/см для дефлектора).
- Из физических представлений следует, что максимальный нагрев светозвукопровода должен наблюдаться при максимальной отдаче энергии пьезопреобразователем, т.е. теоретически при КСВ = 1 или, по крайней мере, при минимальных для данного устройства значениях КСВ. Полученные в настоящей работе данные хорошо подтверждают такую корреляцию.
- Из рис. 9 следует, что максимальные температуры в светозвукопроводе фильтра достигаются при постоянной мощности на частотах 110, 140 и 190 МГц. В то же время, КСВ для этих частот, согласно рис. 12, равны соответственно: 2,1; 1,25 и 1,2. При этом указанные частоты очень близки к абсолютным минимумам КСВ для фильтра, имеющим место в точке 3, частота 130,4 МГц, КСВ = 1,03, и в точке 5, частота 192,7 МГц, КСВ = 1,22. Все указанные точки находятся в центральной области диаграммы полных импедансов Смита (рис. 11).
- Максимальные температуры в светозвукопроводе дефлектора достигаются при постоянной мощности на частотах 75 и 80 МГц. Эти частоты близки к абсолютному минимуму КСВ, лежащему между точками 8 и 9 на рис. 4, 5, соответствующими частотам 75 и 80 МГц, КСВ для которых имеет значения 1,58 и 1,48. Эти точки находятся в центральной области диаграммы полных импедансов Смита (рис. 6, 7).

Таким образом, несмотря на большие объемы светозвукопроводов акустооптических фильтров, вследствие низкой теплопроводности кристаллов парателлурита, при изменении мощности или частоты в них возникают значительные температурные градиенты, максимальные на частотах, соответствующих минимумам КСВ устройств. Достаточно высокие значения температурных градиентов (4-5) К/см могут приводить к искажениям акустических и световых волновых фронтов, и как следствие, - дополнительным искажениям функции пропускания фильтра в моменты перестройки частоты в пределах исследуемого спектрального диапазона.

Список литературы

1. Магдич Л. Н., Шницер П. И., Сасов В. Н. Влияние тепловых потерь на работу акустооптического дефлектора // Электронная техника. Сер. 10. "Квантовая электроника". 1975. Вып.1. С. 44.
2. Rice R.R., Jackson J. E. and G. H. Burkhart. Thermal detuning effects in a standing wave acoustooptic modulator // Appl. Optics 1978. №17(11). P. 1824-1829.
3. Balakshy V., Voloshinov V., Karasev V., Molchanov V., Semenkov V. Compensation of thermal effects in acousto-optic deflector // Proc. SPIE 1996. 2713. P. 164-171.
4. Maák P., Takács T., Barócsi A., Kollár E., Szekely V., Richter P. Refractive index non uniformities in acousto-optic devices due to heat production by ultrasound // Optics Communications 2006. №266. P. 419-425.
5. Mihajlik G., Maak P., Barocsi A., Richter P. Novel accurate computer algorithm for modeling light propagation and diffraction in inhomogeneous, anisotropic medium - Applied to the acousto-optic interaction // Optics Communications. 2009. P. 1961-1968.
6. Maák P., Takács T., Barócsi A., Kollár E., Richter P. Thermal behavior of acousto-optic devices: Effects of ultrasound absorption and transducer losses // Ultrasonics. 2011. №51. P. 441-451.
7. Jiang R., Zhou Z., Ly X., Shogun Z., Zhifeng H., Zhou H. Spatial and temporal thermal analysis of acousto-optic deflectors using finite element analysis model // Ultrasonics 2012. №52. P. 643-649.
8. Uchida N., Ohmachi Y. Elastic and Photoelastic Properties of TeO₂ Single Crystal//Journal of Applied Pysics. 1969. V. 40. P.4692-4695.
9. Ohmachi Y., Uchida N. Acoustic and acousto-optical properties of TeO₂ Single Crystal// Revive of Electrical Communication Laboratories.1972. V. 20. P 529-541.
10. Винокуров В.А., Люмкис Е.Д., Мартузан Б.Я. Расчет гидродинамических потоков в расплаве и распределение температуры для прозрачных материалов, выращиваемых способом Чохральского // Математическое моделирование. Получение монокристаллов и полупроводниковых структур. М.: Наука, 1986. С. 279-280.

**TEMPERATURE FIELDS IN LIGHT AND SOUND DUCTS OF
ACOUSTOOPTIC DEVICES ON THE BASE OF PARATELLURITE**

**К.А. Morozova, E.I. Kaplunova, S.S. Rybina, E.V. Shmeleva, V. Kostyuk, N.E.
Samokhvalov**

Tver State University, 170100 Tver, Russia

Temperature fields arising due to switching and working regimes of large-sized light and sound ducts of paratellurite acoustooptic devices were studied with the aid of thermal vision camera. The measured dependence of the standing wave coefficient (SWC) on frequency and Smith diagrams were taken into account in the analysis of heat release dynamics and its takeoff in acoustooptic deflector and filter at different frequencies and piezoelectric transducer exciting electric power. **Keywords:** *acoustooptic deflector, acoustooptic filter, thermal vision infrared camera, standing wave coefficient, ultrasound frequency, Smith diagram, paratellurite crystal*

Об авторах:

МОРОЗОВА Кристина Александровна – магистрант физико-технического факультета ТвГУ.

КАПЛУНОВА Елена Ивановна – магистрант физико-технического факультета ТвГУ.

РЫБИНА София Сергеевна – магистрант физико-технического факультета ТвГУ.

ШМЕЛЕВА Екатерина Валерьевна – магистрант физико-технического факультета ТвГУ.

КОСТЮК Андрей Викторович – магистрант физико-технического факультета ТвГУ.

САМОХВАЛОВ Никита Евгеньевич – магистрант физико-технического факультета ТвГУ.