

*В. С. Айрапетян<sup>1</sup>, А. В. Макеев<sup>1\*</sup>*

## **Расчет спектров пропускания нелинейных кристаллов среднего и дальнего инфракрасного диапазона**

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск,  
Российская Федерация  
\* e-mail: makeeffsan@yandex.ru

**Аннотация.** В работе представлена методика и результаты расчетно-экспериментальных исследований пропускания халькогенидных кристаллов в среднем и дальнем инфракрасном (ИК) диапазонах. Результаты исследований могут быть применены при проектировании перестраиваемых источников лазерного излучения.

**Ключевые слова:** нелинейный кристалл, перестраиваемый генератор света, оксидные кристаллы, халькогенидные кристаллы, селенидные кристаллы, кольцевой резонатор, спектр пропускания

*V. S. Ayrapetyan<sup>1</sup>, A. V. Makeev<sup>1\*</sup>*

## **Calculation of Transmission Spectra of Nonlinear Crystals in the Middle and Far Infrared Ranges**

<sup>1</sup> Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation  
\* e-mail: makeeffsan@yandex.ru

**Abstract.** The paper presents the methodology and results of computational and experimental studies of the transmission of chalcogenide crystals in the middle and far infrared (IR) ranges. The research results can be applied in the design of tunable laser radiation sources.

**Keywords:** nonlinear crystal, tunable light generator, oxide crystals, chalcogenide crystals, selenide crystals, ring resonator, transmission spectrum

### ***Введение***

Возникла новая волна интереса к халькогенидным кристаллам, которые обладают высокими нелинейно-оптическими свойствами и позволяют создавать на их основе перестраиваемые по частоте лазерные источники в широком ИК диапазоне [1,2]. Примером данных типов кристаллов являются сульфитные кристаллы тиагаллата серебра  $\text{AgGaS}_2$  (AGS). Это одноосный отрицательный кристалл, который имеет диапазон прозрачности от 0,53 до 12 мкм, обладает лучевой стойкостью 200 МВт/см<sup>2</sup> на  $\lambda_{\text{н}} = 1,064$  мкм,  $t = 10$  нс, теплопроводностью на уровне 1,5 Вт/(мК) в направлении, перпендикулярном оптической оси, и 1,4 Вт/(мК) в направлении, параллельном оптической оси, а также кристалл тиагаллата ртути  $\text{HgGa}_2\text{S}_4$  (HGS), который прозрачен в спектральном диапазоне от 0,5 до 13 мкм, но обладает более низкой лучевой стойкостью (на уровне 136 МВт/см<sup>2</sup>), чем AGS [3]. Важное место в фундаментальном исследовании физико-химических свойств халькогенидных кристаллов занимает расчет и измере-

ние интенсивности пропускания спектров кристаллов в среднем и дальнем ИК диапазонах [4,5].

### Методы и материалы

Методика исследования спектра пропускания нелинейно-оптических кристаллов выполняется по классической схеме (рис.1).

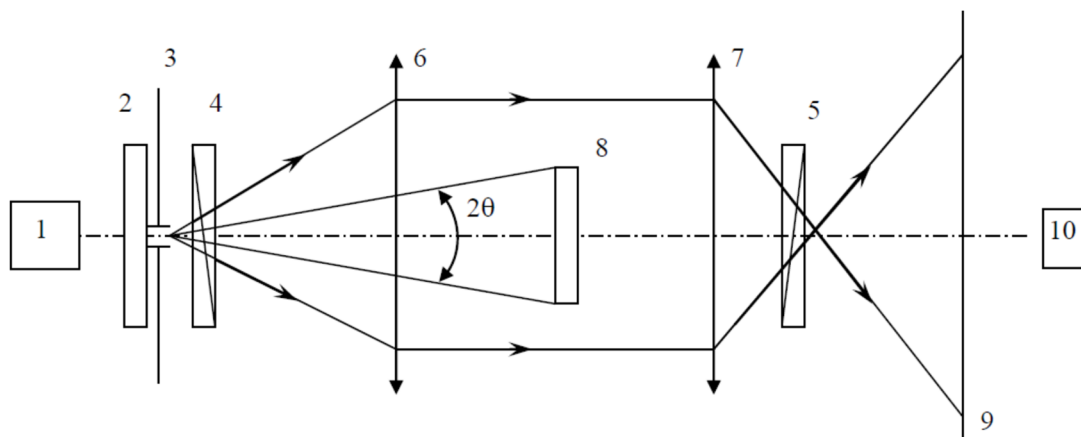


Рис. 1. Оптическая схема регистрации спектра пропускания кристалла: 1 – источник света, 2 – матовое стекло (рассеиватель), 3 – диафрагма, 4,5 – поляризатор и анализатор, 6, 7 – линзы, 8 – образец (нелинейный кристалл), 9 – экран, 10 – фотодетектор

Излучение естественного источника света после прохождения поляризатора становится плоскополяризованным в плоскости поляризатора. Линейнополяризованная световая волна в кристалле из-за двулучепреломления разделяется на обыкновенную и необыкновенную волны с ортогональной поляризацией, модули световых векторов которых определяются по формулам:

$$E_e = E_0 \cos \alpha; \quad E_o = E_0 \sin \alpha,$$

где  $E_0$  – амплитудное значение вектора напряженности электрических колебаний;  $E_e$  и  $E_o$  – амплитудные значения необыкновенной и обыкновенной волн, соответственно;  $\alpha$  – угол между оптической осью кристалла и вектором  $E_0$ .

После прохождения света через нелинейный кристалл у обыкновенной и необыкновенной волн возникают изменения фаз ( $\delta_1$  и  $\delta_2$ ):

$$E_1 = E_e \cos(\omega t + \delta_1); \quad E_2 = E_e \cos(\omega t + \delta_2).$$

Принимая как разность фаз  $\delta = \delta_2 - \delta_1$ , после преобразования уравнений, можно получить зависимость интенсивностей обыкновенной и необыкновенной волн от интенсивности падающей волны:

$$E_1 = E_e \cos \omega t = E_0 \cos \alpha \cos \omega t;$$

$$E_2 = E_o \cos(\omega t + \delta) = E_0 \sin \alpha \cos(\omega t + \delta).$$

Расчет интенсивности прошедшего излучения на строго определенной длине волны вычисляется принимая, что интенсивность волны  $I \sim E^2$  с учетом приобретенной фазы обыкновенной и необыкновенной волн.

### *Результаты и обсуждение*

Расчет пропускания кристалла AGS производился с помощью разработанного алгоритма в среде MATLAB. Результаты расчетов во всем спектральном диапазоне регистрируются в виде массива данных с накоплением и последующей визуализацией. Интерфейс программы представлен на рис. 2

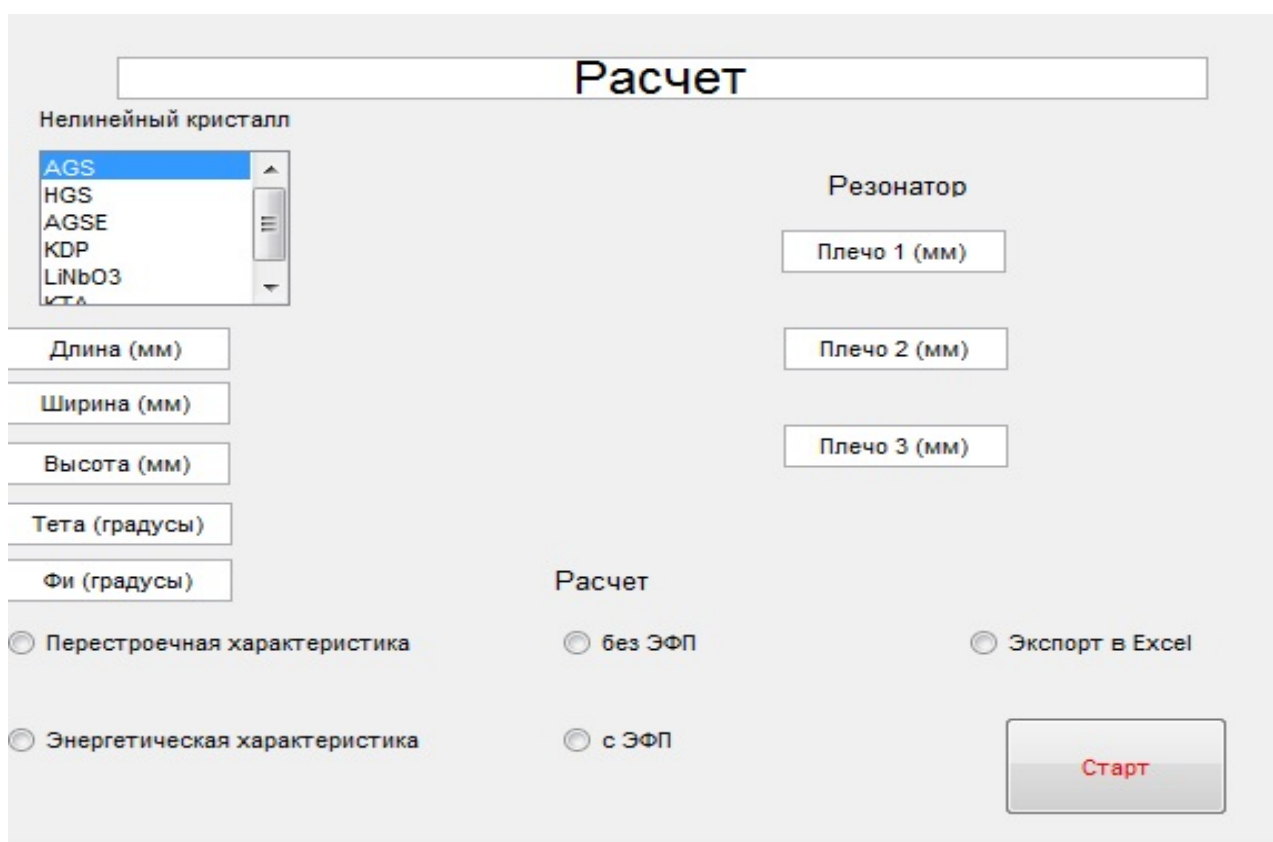


Рис. 2. Интерфейс программного обеспечения для расчета параметров нелинейных кристаллов (НК)

Расчетная зависимость энергии излучения от длины волны излучения приведена на рис. 3.

Из данного графика видно, что кристалл AGS имеет относительно малое пропускание в диапазоне 4,5–4,9 мкм, также пропускание кристалла имеет тенденцию к снижению начиная с уровня 6,9–7 мкм.

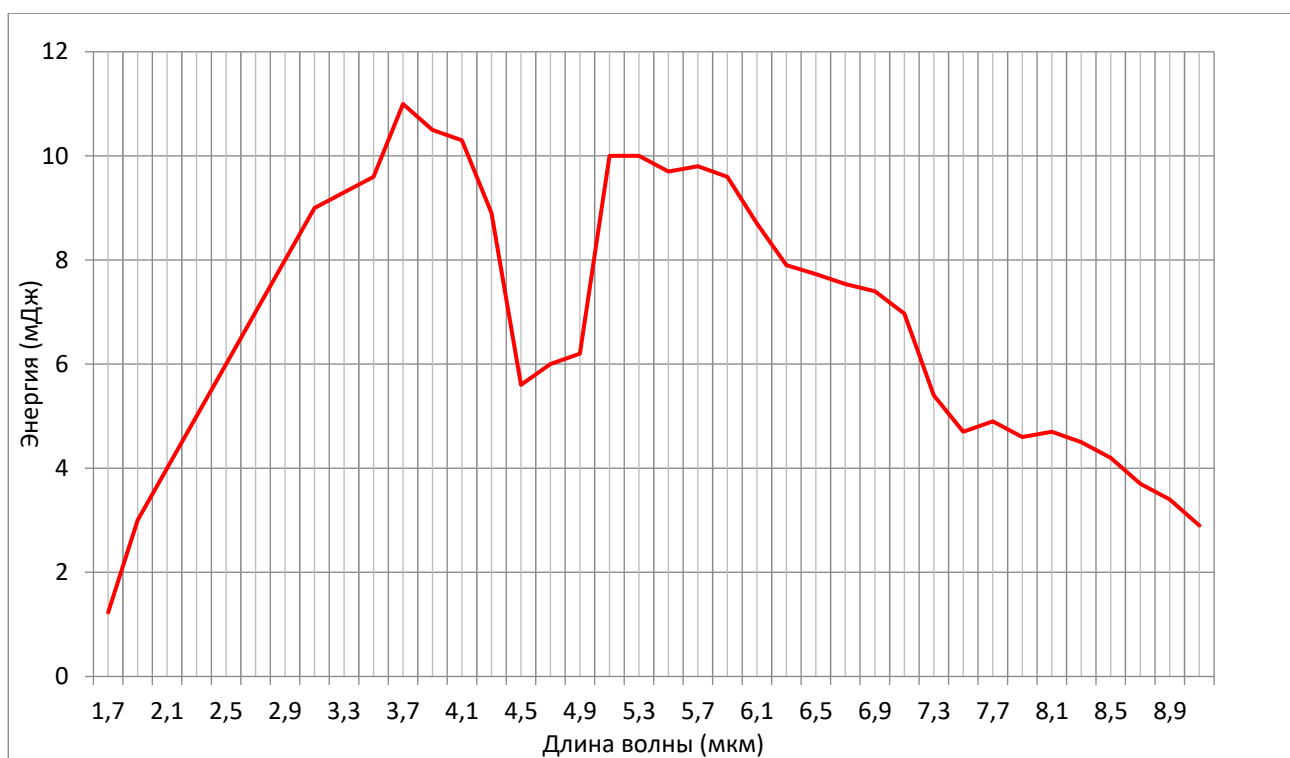


Рис. 3. Расчетная зависимость энергии излучения от длины волны

### Заключение

В данной работе представлены методика, программное обеспечение и результаты расчета параметров НК среднего и дальнего ИК диапазонов. Результаты этой работы могут обеспечить оптимальный выбор активного элемента, при проектировании параметрических лазеров для сканирующих систем в области ИК диапазона.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Айрапетян В. С., Маганакова Т. В. Расчет концентрации наркотических веществ методом дифференциального поглощения и рассеяния / Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. «СибОптика-2015»: сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск: СГУГиТ, 2015. – Т. 1. – С. 141–147.
2. Айрапетян В. С., Макеев А. В. Параметрический генератор света на кристалле HGS с плавной перестройкой длины волны в диапазоне 4,75–9,07 мкм // Оптика атмосферы и океана. – 2021. – Т. 34. № 01. – С. 57–60. DOI: 10.15372/AOO20210107.
3. Mackanos M. A., Simanovskii D., Joos K. M., Schwettman H. A., Jansen E. D. Mid infrared optical parametric oscillator (OPO) as a viable alternative to tissue ablation with the free electron laser (FEL) // Lasers Surg. Med. – 2007. – Vol. 39. – P. 230–236.
4. Bigotta S., Stoppler G., Schoner J., Schellhorn M., Eichhorn M. Novel non-planar ring cavity for enhanced beam quality in high-pulse-energy optical parametric oscillators // Opt. Materials Express. – 2014. – Vol. 4, No. 3. – P. 411–423.
5. Gerhards M. High energy and narrow bandwidth mid IR nanosecond laser system // Opt. Commun. – 2004. – Vol. 241. – P. 493–497.

© В. С. Айрапетян, А. В. Макеев, 2023