

Исследование электрофизических параметров образцов селенида цинка

БУТЫРИН П.А., АБДУЛКЕРИМОВ С.А., АЛЕКСЕЙЧИК Л.В., СМИРНОВА Е.И., ТОВМАСЯН В.М., ШАКИРЗЯНОВ Ф.Н.

Приведены результаты исследования в сверхвысокочастотном (дециметровом), видимом и инфракрасном диапазонах электромагнитных волн параметров образцов селенида цинка, используемых, в частности, в многоканальных приборах технического зрения для систем обеспечения безопасности железнодорожного транспорта. Обнаружена значительная дисперсия диэлектрической проницаемости селенида цинка. В дециметровом диапазоне тангенс угла диэлектрических потерь больше, чем у материалов, используемых в этом диапазоне для изготовления диэлектрических резонаторов, однако селенид цинка имеет малые потери в оптическом (видимом и инфракрасном) диапазоне. Сочетание у селенида цинка свойств диэлектрика и полупроводника, а также нелинейность его характеристик представляют возможность взаимного управления процессами в оптической и сверхвысокочастотной областях частот.

Ключевые слова: селенид цинка, диэлектрический резонатор, оптические приборы, тепловизоры, объекты железнодорожного транспорта, безопасность

Достоверное измерение собственных параметров диэлектрических и полупроводниковых материалов в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ) – актуальная задача при создании нового поколения электротехнических материалов. В статье приведены результаты исследования материала оптического диапазона длины волн – селенида цинка (ZnSe) – в качестве диэлектрического резонатора (ДР) дециметрового диапазона длины волн.

Исследуемый образец цилиндрической формы (диаметр $D = 30$ мм, толщина $H = 12,5$ мм), состоящий из двух частей по 6,2 и 6,3 мм, был помещен в полость прямоугольного металлического волновода размерами $a \times b = 120 \times 57$ мм², установлен вблизи узкой стенки и возбуждался на низшем виде колебаний $H_{01\delta}$. Картина электромагнитного поля исследуемого образца, подобна полю магнитного диполя, при этом H_z -составляющая перпендикулярна плоскости диска образца селенида цинка.

На рис. 1 приведена нормализованная зависимость амплитуды H_z -составляющей электромагнитного поля в окрестности исследуемого образца ZnSe, что подтверждает правильный выбор рабочего вида колебаний $H_{01\delta}$. Зависимость представлена в относительных значениях амплитуды $F_z = H_z / H_{z\max}$, где координата z направлена вдоль широкой стенки волновода. Сплошные линии соответствуют полю внутри образца селенида цинка из двух его составных частей, а пунктирные – вне образца.

Измерительная секция обеспечила режим согласованной нагрузки в диапазоне 1,5 – 3 ГГц, как следует из частотной зависимости коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН), представленной на рис. 2.

Метод диэлектрического резонатора (ДР) [1] позволил провести экспериментальные измерения параметров ϵ и $\text{tg}\delta$ материала образца по значениям параметров матрицы рассеяния, представленных на рис. 3 и 4 (S_{11} , S_{21} и S_{22} , а также КСВН и Фазы). Экспериментальная методика измерения включала идентификацию рабочего вида колебаний образца в волноводе, определение его резонансной частоты f_p , нагруженной добротности Q_H и параметра связи образца с волноводом. Учитывалось дополнительное влияние нерезонансного вклада образца, смещение резонансной частоты и дополнительные потери за счет металлических стенок волновода.

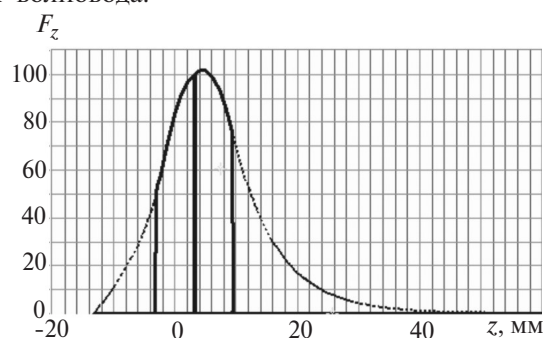


Рис. 1. Зависимость относительных значений амплитуды поля (H_z -составляющей) образца SnSe, установленного внутри волновода

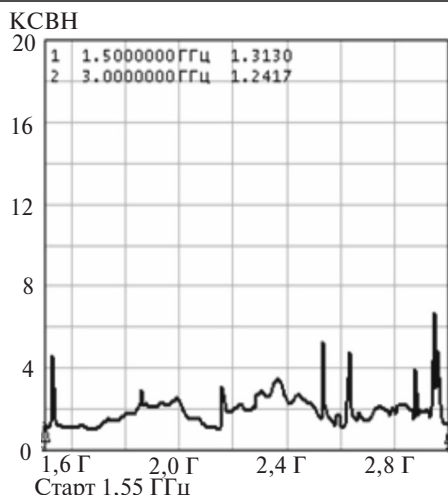


Рис. 2. Коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) тракта волноводной секции в полосе частот от 1,5 до 3,0 ГГц

Предварительно в соответствии с методикой [2] были измерены электрофизические параметры дискового диэлектрического резонатора ($D=30$ мм, $H=15$ мм, $\epsilon=43$, $\text{tg}\delta=1,8\cdot 10^{-4}$), имеющего одинаковый диаметр с исследуемым образцом ZnSe и изготовленного из термостабильной керамики титаната бария (BaTiO). На рис. 3 приведены частотные характеристики ДР, установленного в волноводе подобно исследуемому образцу.

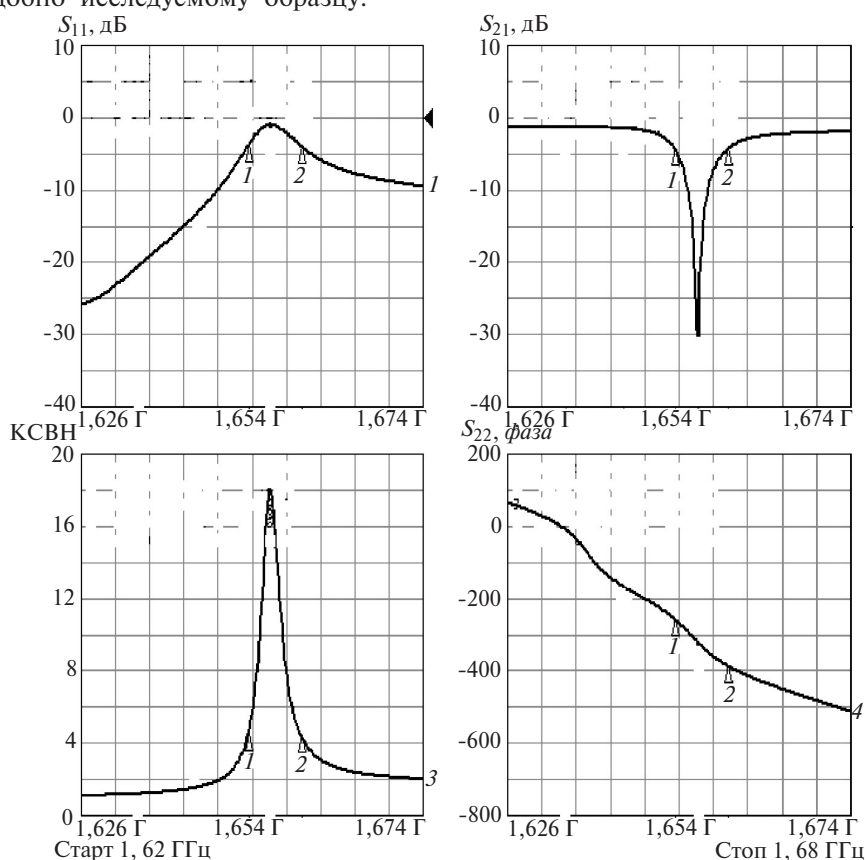


Рис. 3. Частотные характеристики волноводной секции с ДР в полосе частот от 1,62 до 1,68 ГГц: S_{11} – коэффициент отражения на входе секции, дБ; S_{21} – коэффициент передачи со входа на выход секции, дБ; КСВН на входе секции, отн. ед.; фаза коэффициента отражения на выходе секции, град.; маркеры 1 и 2 ограничивают полосу пропускания волноводной секции с ДР

На рис. 4 приведены экспериментальные кривые параметров матрицы рассеяния, по которым рассчитывались значения относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь образца селенида цинка в диапазоне 2,44–2,67 ГГц, последние составили значения для $\epsilon=17,1$ и $\text{tg}\delta=(1-2)\cdot 10^{-3}$.

Из сопоставления данных рис. 3 и 4 следует, что материал образца ZnSe уступает в несколько раз по добротности и относительной диэлектрической проницаемости материалу ДР, изготовленного на основе титаната бария (BaTiO). Однако селенид цинка имеет малые потери в оптическом (видимом и инфракрасном) диапазоне.

Согласно полученным данным для оптического диапазона показатель преломления селенида цинка составляет от 2,33 до 2,68 в диапазоне волн от 18 до 0,54 мкм. Для относительной диэлектрической проницаемости в дециметровом диапазоне волн показатель преломления составит значение 4,1, что свидетельствует о заметной дисперсии показателя преломления селенида цинка в широком диапазоне частот.

Коэффициент поглощения образцов ZnSe измерялся методом лазерной интерферометрической калориметрии. Метод основан на эффекте тепловыделения в результате нагревания материала при прохождении через него интенсивного лазерного излучения [3]. Возникающие при этом повышение температуры и тепловое расширение вызывают изменение длины оптического пути, которое с высокой точностью измеряют интерферометром с использованием другого лазера, определяя поглощенную энергию излучения.

Значение коэффициента поглощения определялось на установке ТСУ 295.00.000 по методике № 1.325.39-86.

Коэффициент поглощения может быть рассчитан по формуле:

$$\beta = \ln \left\{ \frac{(1-R)^2}{2T} + \left[R^2 + \frac{(1-R)^4}{4T^2} \right]^{1/2} \right\},$$

где R – коэффициент отражения; n – коэффициент преломления.

Расчетное значение коэффициента поглощения при $\lambda=10,6$ мкм для ZnSe составляет $\beta=2\cdot 10^{-4}$ см $^{-1}$, для

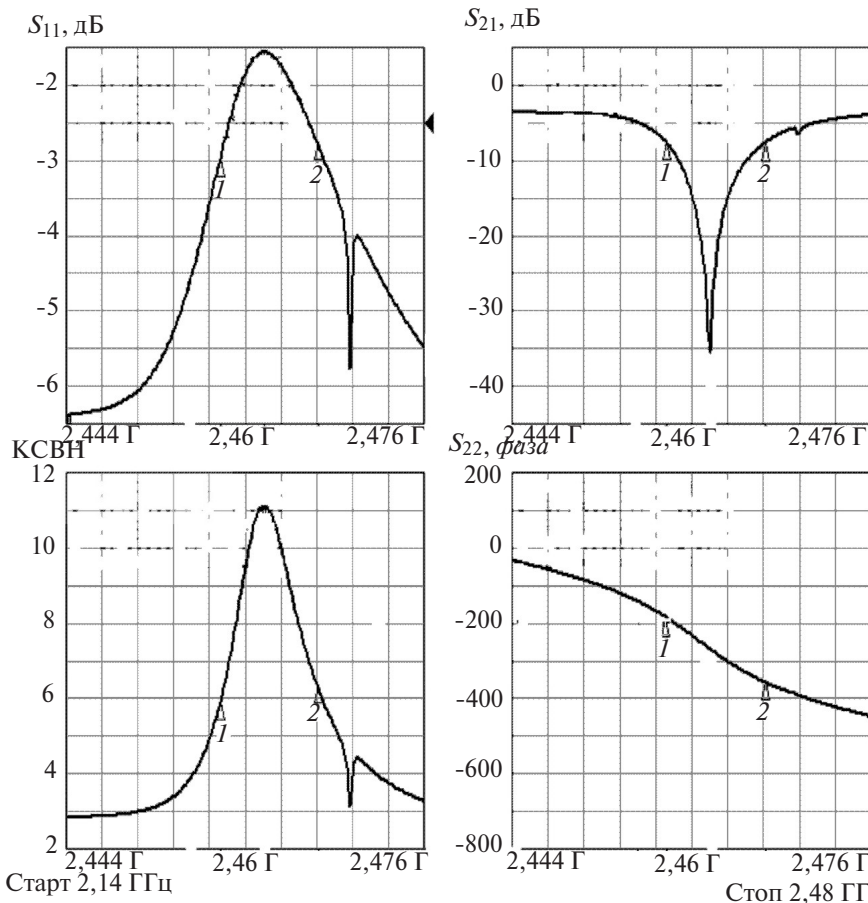


Рис. 4. Частотные характеристики волноводной секции с дисковым образцом селенида цинка (обозначения соответствуют принятым для рис. 3)

ZnS — $0,1 \text{ см}^{-1}$. В основе расчетов — формула $\beta = mc / Pt$, где β — коэффициент поглощения, см^{-1} , P — мощность лазерного излучения, которая выражается через измеряемую мощность $P_{\text{изм}}$ и пока-

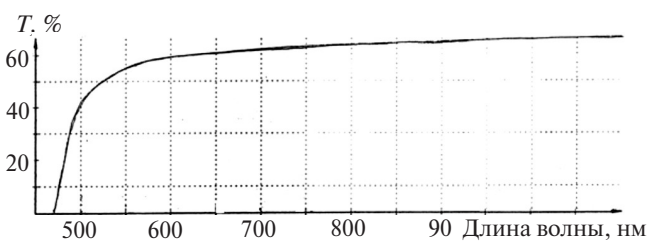


Рис. 5. Спектральное пропускание ZnSe в видимой области спектра

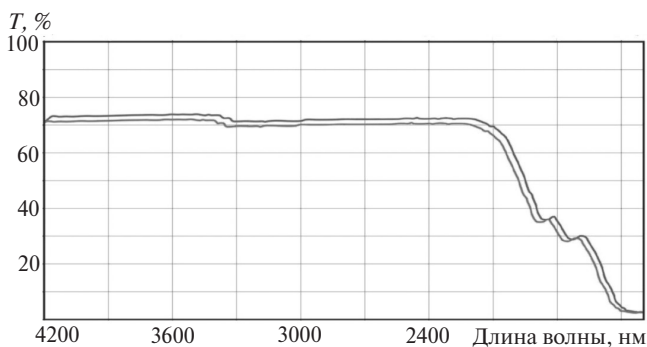


Рис. 6. Спектральное пропускание ZnSe в ИК диапазоне

затель преломления материала n на длине волны $10,6 \text{ мкм}$: $P = 0,5 P_{\text{изм}} (n+1/n)$, где m — масса образца; c — удельная теплоемкость материала. Измеренное значение коэффициента поглощения составило для образца ZnSe $\beta = 8 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$.

Исследование спектров пропускания образцов ZnSe проводилось по стандартным методикам с использованием: спектрофотометра «Specord 50» в области длин волн $340 \div 1050 \text{ нм}$ ($0,34 \div 1,05 \text{ мкм}$) с погрешностью $\pm 1\%$; ИК Фурье спектрометра Spectrum One (Perkin Elmer) в диапазоне длин волн $400 \div 7800 \text{ см}^{-1}$ ($1,28 \div 25 \text{ мкм}$); погрешность прибора $\pm 1\%$ в области спектра, начиная с 12 мкм , погрешность прибора до 12 мкм $\pm 3\%$.

Спектральные характеристики образцов ZnSe представлены на рис. 5 и 6.

Сочетание у селенида цинка свойств диэлектрика и полупроводника, а также нелинейность его характеристик представляют возможность взаимного управления процессами в оптической и сверхвысокочастотной областях частот.

Работа проводилась при поддержке РФФИ для реализации проекта № 17-20-03151-офи-м-РЖД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексейчик Л.В., Бродуленко И.И., Гаврилюк Н.Г. и др. Параметры и методы расчета диэлектрических резонаторов и колебательных систем на их основе. Обзоры по ЭТ, сер. 1. Электроника СВЧ. — М.: ЦНИИ «Электроника», 1990, 64 с.
2. Алексейчик Л.В. Моделирование собственных характеристик диэлектрических резонаторов на основе технологии виртуальных инструментов. — Труды IX Международной конференции по гиромагнитной электронике (ICCSE-2001). — М.: Московский энергетический институт, 2001, 206–217 с.
3. Secundo L., Lubianiker Y., Arganat A.I. Uncooled. FPA with optical reading: reaching the theoretical limit. — SPIE Proc., vol. 5783 (2005), pp. 483–495.

[04.10.1017]

Авторы: **Бутырин Павел Анфимович** окончил Челябинский политехнический институт в 1974 г. В 1994 г. защитил докторскую диссертацию «Разработка аналитических и численно-аналитических методов решения уравнений состояния электрических цепей» в Московском энергетическом институте (МЭИ). Заведующий кафедрой теоретических основ электротехники (ТОЭ) Национального исследовательского университета «МЭИ» (НИУ «МЭИ»), член-корреспондент РАН.

Абдулкеримов Сагид Абдурахманович окончил Дагестанский политехнический институт в 1981 г. Защитил кандидатскую диссертацию «Разработка методов и алгоритмов прогнозирования качественных ситуаций в задачах обработки разнотипных данных» в 1991 г. Директор Филиала МЭИ в Душанбе (Республика Таджикистан).

Алексейчик Леонард Валентинович окончил Таганрогский радиотехнический институт в 1964 г. Защитил докторскую диссертацию «Основы применения диэлектрических резонаторов в СВЧ цепях» в 1986 г. Профессор «НИУ «Московский энергетический институт».

Смирнова Елена Ивановна окончила Московский химико-технологический институт (МХТИ) им. Д.И. Менделеева в 1975 г. Генеральный директор ООО «НПКФ «Пратеко».

Товмасын Владимир Михайлович окончил МХТИ им. Д.И. Менделеева в 1972 г. Ведущий конструктор ООО «НПКФ «Пратеко».

Шакирзянов Феликс Нигматзянович окончил Уральский политехнический институт в 1963 г. Защитил кандидатскую диссертацию «Исследование ферритового преобразователя в режиме нелинейного ферромагнитного резонанса». Профессор кафедры «Теоретические основы электротехники» «НИУ «МЭИ».

Elektrichestvo (Electricity), 2017, No. 12, pp. 47–50

DOI:10.24160/0013-5380-2017-12-47-50

Studying the Electrophysical Parameters of Zinc Selenide Samples

BUTYRIN Pavel A. (National Research University «Moscow Power Engineering Institute» – «NRU «MPEI», Moscow, Russia) – Head of the Department, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences

ALEKSEICHIK Leonard V. («NRU «MPEI», Moscow, Russia) – Professor, Dr. Sci. (Eng.)

ABDULKERIMOV Sagid A. («MPEI» Branch in Dushanbe, Tajikistan) – Director, Cand. Sci. (Eng.)

SMIRNOVA Elena I. (LLC «Research and Production Commercial Firm «Prateko», Moscow, Russia) – General Director

TOVMASYAN Vladimir M. (LLC «Research and Production Commercial Firm «Prateko», Moscow, Russia) – Leading Designer

SHAKIRZYANOV Feliks N. (NRU «MPEI», Moscow, Russia) – Professor, Cand. Sci. (Eng.)

The article presents the results from studying the parameters of zinc selenide samples in the microwave (ultra-high frequency), visible, and infrared bands of electromagnetic waves, which are used, in particular, in multichannel vision instruments for railway transport safety assurance systems. Considerable dispersion of the zinc selenide dielectric constant is revealed. The dielectric loss angle tangent of zinc selenide in the ultra-high frequency band is higher than it is in the materials used in this band for making dielectric resonators; on the other hand, zinc selenide features low losses in the optic (visible and infrared) band. Owing to its having the properties of both dielectric and semiconductor, and owing to the nonlinearity of its characteristics, zinc selenide can be used to construct devices for mutually controlling the processes in the optic and microwave frequency bands.

Key words: zinc selenide, dielectric resonator, optic instruments, infrared imagers, railway transport facilities, safety

REFERENCES

1. **Alekseichik L.V., Brodulenko I.I., Gavrilyuk N.G. i dr.** *Parametry i metody rascheta dielektricheskikh rezonatorov i kolebatel'nykh sistem na ikh osnove. Obzory po ET, ser. 1. Elektronika SVCh* (Parameters and methods for calculating dielectric resonators and vibrational systems based on them. Reviews on ET, ser. 1. Electronics of high-frequency). Moscow, Publ. TsNII «Elektronika», 1990, 64 p.

2. **Alekseichik L.V.** *Trudy IX Mezhdunarodnoi konf. po giromagnitnoi elektronike* (Proceedings of the IX International conf. on gyromagnetic electronics ICCSE-2001). Moscow, Moscow Power Engineering Institute, 2001, 206–217 pp.

3. **Secundo L., Lubianiker Y., Arganat A.I.** Uncooled. FPA with optical reading: reaching the theoretical limit. – *SPIE Proc.*, vol. 5783 (2005), pp. 483–495.

[04.10.1017]