

Разработка оптического коммутирующего устройства на основе материала системы Ge-Sb-Te

Н. М. Толкач

ООО «Активная Фотоника»,
Зеленоград, Москва
n.tolkach@ntmdt-russia.ru

В. Г. Литвинов

Рязанский государственный
радиотехнический университет
им. В.Ф. Уткина
rcpm-rgrtu@yandex.ru

Н. В. Вишняков

Рязанский государственный
радиотехнический университет
им. В.Ф. Уткина
rcpm-rgrtu@yandex.ru

А. О. Якубов

Национальный
исследовательский университет
«МИЭТ»
alexsey007@mail.ru

Аннотация. В настоящее время активно развиваются системы интегральной оптики. Широкое применение этих систем ограничено характеристиками оптических коммутирующих устройств. Эти ограничения связаны с высоким энергопотреблением, низкой скоростью переключения, достаточно крупными размерами, большими сигнальными задержками из-за двойного преобразования информации из оптических сигналов в электронные и наоборот. Поэтому актуальным является решение перечисленных проблем, использование чисто оптических коммутирующих компонентов, соответствующих физических эффектов и материалов. Интересными материалами в этом отношении являются материалы с фазовыми переходами, в частности, халькогенидные стеклообразные полупроводники (ХСП) системы Ge-Sb-Te (GST). GST материалы обладают обратимым, быстрым и низкоэнергетичным фазовым переходом для аморфного и кристаллического состояний, имеющих существенно различающиеся оптические свойства. Кроме основных фазовых состояний существуют и дополнительные промежуточные состояния, обусловленные наличием частично кристаллических и аморфных наноразмерных фракций материала, что позволяет выполнять тонкую настройку его оптических свойств.

Ключевые слова: оптическое коммутирующее устройство, оптическая накачка, оптическое зондирование, Ge-Sb-Te, аморфное и кристаллическое состояние, фазовое переключение, многослойные структуры, интерференция

I. ВВЕДЕНИЕ

Материал $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, именуемый сокращенно GST, является уникальным по своим свойствам. При воздействии коротких низкоэнергетичных импульсных воздействиях материал способен обратимо изменять свое фазовое состояние, что приводит к достаточно значительным изменениям в оптических свойствах, в частности, изменяется показатель преломления и коэффициент экстинкции материала. Эти свойства GST крайне актуальны для активных оптических систем [1–3].

Например, таких как оптоволоконные системы передачи информации, миниатюрные сетевые устройства и так называемые сети на чипе [4–6]. Современные вычислительные системы развиваются по пути распараллеливания вычислений, например на ядрах процессора. При количестве ядер больше 8 в стандартных электронных системах появляются задержки, связанные с тем, что связь между ядрами возможна только через внутреннюю память и необходимо огромное количество электрических проводников. В сети на чипе нет внутренней памяти, обмен данными между ядрами и оперативной памятью осуществляется по оптическим проводникам, которые могут быть объединены в один и с помощью технологии спектрального уплотнения каналов (WDM) одновременно передавать огромный объем данных всего по одному оптическому проводнику (волноводу). Это позволяет избавиться от больших сигнальных задержек, увеличить количество ядер и общую скорость таких систем. Важным устройством в таких сетях являются оптические коммутаторы, перенаправляющие потоки данных на разные вычислительные узлы.

Существуют различные способы реализации оптических коммутаторов. Так, например, MEMS коммутаторы представляют собой массив подвижных микрзеркал. Такие устройства просты в реализации, достаточно миниатюрны, размер одного микрзеркала порядка 10 мкм, но обладают существенными недостатком, они медленные, скорость их переключения ~ 20 мкс.

Оптоволоконные переключатели на LiNbO_3 обладают отличной скоростью работы, время одного переключения ~ 25 пс. Однако также обладают и недостатком, для создания необходимого набег фазы световой волне необходимо пройти расстояние ~ 5 мм, также на протяжении всей этой области необходимо приложить достаточно большую интенсивность электромагнитного поля ~ нескольких ГВт/см².

Существуют также различные варианты реализации оптоволоконных переключателей на РСМ (phase change material – материал с переменным фазовым состоянием) материале GST ($\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$), который используется в нашей работе и о котором пойдет речь [7–11]. Такие переключатели могут быть интегрированы в каналы оптических волноводов или кольцевых резонаторов в виде тонкопленочных структур, напыляемых поверх волноводов. Такие переключатели имеют достоинства, время переключения ~ 20 нс, размеры активной области ~ 1 мкм и поля, необходимые для переключения ~ 100 мВт/мкм². Но имеются и недостатки, связанные с большими оптическими потерями при пропуске оптических сигналов и при их отражении. Поэтому цель работы – уменьшение оптических потерь в оптических структурах на основе РСМ (англ. phase change material) материалов и GST. Потери связаны с конструктивными особенностями этих устройств, а также с интерференцией света в них.

Для достижения цели возможны следующие варианты решений [12–15]:

- использование РСМ материалов и материалов системы Ge-Sb-Te различного состава, находящихся на линии квазибинарного разреза $\text{GeTe-Sb}_2\text{Te}_3$;
- модификация РСМ материалов примесными добавками;
- оптическое управление дополнительными промежуточными состояниями РСМ материала, обусловленными частично кристаллическими и аморфными наноразмерными фракциями материала (тонкая подстройка оптических параметров);
- применение дополнительных чередующихся слоев с разными показателями преломления и многослойных структур, перераспределяющих поле электромагнитной волны необходимым образом в зависимости от фазового состояния активного РСМ слоя.

II. МАТЕРИАЛЫ, МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Для реализации оптически управляемого коммутатора на основе материала GST используется следующий принцип. Тонкопленочная структура – представляет собой пленку GST на стеклянной или кварцевой подложке. Сверху на пленку падает управляющее излучение 633 нм, снизу вверх распространяется информационное излучение 1550 нм. При соответствующих импульсах управляющего излучения пленка приобретает аморфное или кристаллическое состояние, при которых в результате интерференции информационное излучение проходит сквозь или отражается. Таким образом, пленка используется как затвор, управляемое зеркало или коммутатор. Необходимо отметить, что управляющее излучение подбирается в области, с большими коэффициентами экстинкции GST, информационное в области, где показатель преломления отличается почти в 2 раза при сравнении аморфного и кристаллического состояния материала. Пленка размещается в положении лазерных перетяжек для достижения прямого волнового фронта и равномерной интерференции в пленке по диаметру пучка.

Для расчета многослойных структур, их оптимизации, определения необходимого количества слоев, их расположения и состава выполнялось следующее моделирование на основе выражений Френеля–Эйри для отражательной и пропускательной способностей [16, 17]:

$$\mathfrak{R} = |r_{m-1,N+1}|^2, \mathfrak{T} = |\tau_{m-1,N+1}|^2/n_{N+1}/n_{m-1}, \beta_m = 4\pi\bar{n}_m h_m/\lambda, \quad (1)$$

$$r_{m-1,N+1} = (r_{m-1,m} + \exp(i\beta_m)r_{m,N+1})/(1 + \exp(i\beta_m)r_{m-1,m}r_{m,N+1}), \quad (2)$$

$$r_{m-1,N+1} = (r_{m-1,m} + \exp(i\beta_m)r_{m,N+1})/(1 + \exp(i\beta_m)r_{m-1,m}r_{m,N+1}), \quad (3)$$

$$\tau_{m-1,N+1} = (\tau_{m-1,m} + \exp(i\beta_m)\tau_{m,N+1})/(1 + \exp(i\beta_m/2)r_{m-1,m}r_{m,N+1}) \quad (4)$$

где слои от m до N являются предпоследними слоями, а слои $m-1$ и $N+1$ являются крайними бесконечными по толщине слоями; $r_{m-1,N+1}$ и $\tau_{m-1,N+1}$, – коэффициенты отражения и пропускания, начиная со слоя $m-1$ и заканчивая слоем $N+1$; \bar{n}_m – комплексный показатель преломления ($\bar{n} = n + ik$) материала слоя m ; n – показатель преломления; i – мнимая единица; k – коэффициент экстинкции; h_m – толщина слоя m ; λ – длина волны; $r_{m-1,m}, r_{m,m+1} \dots r_{N-1,N}, r_{N,N+1}$ и $\tau_{m-1,m}, \tau_{m,m+1} \dots \tau_{N-1,N}, \tau_{N,N+1}$ – коэффициенты френелевского отражения и пропускания соответственно для любых смежных слоев:

$$r_{m-1,m} = (\bar{n}_m - \bar{n}_{m-1})/(\bar{n}_m + \bar{n}_{m-1}), \quad (5)$$

$$\tau_{m-1,m} = 2\bar{n}_{m-1}/(\bar{n}_m + \bar{n}_{m-1}). \quad (6)$$

Для характеристики многослойной структуры максимально пропускать лазерное излучение в случае аморфного слоя GST и отражать его, когда слой кристаллический использовалась следующая целевая функция:

$$F(h_m, \dots, h_N) = (\mathfrak{R}_a + (1 - \mathfrak{T}_a + (1 - \mathfrak{R}_c) + \mathfrak{T}_c)/4, \quad (7)$$

где \mathfrak{R}_a , \mathfrak{R}_c и \mathfrak{T}_a , \mathfrak{T}_c являются отражательными способностями и пропускательными способностями многослойной структуры с аморфным и кристаллическим фазовыми состояниями слоя GST.

Минимальным значением целевой функции является ее ближайшее к 0 решение, а желаемым решением является значение 0. Возможен и обратный вариант, когда целевая функция принимает максимальное значение, которое определяется максимальным отражением и минимальным пропусканием излучения у структуры с аморфным слоем GST и максимальным пропусканием и минимальным отражением у структуры с кристаллическим слоем GST.

Значения целевой функции рассчитывались для различных толщин $h_m \dots h_N$ конечных слоев $m \dots N$ многослойной структуры. Расчет проводился для разных диапазонов толщин $v_0 \dots v_{N-m}$. Для толщин слоев от h_m (0) до h_m (v_0), ..., h_N (0) до h_N (v_{N-m}), где v_0, \dots, v_{N-m} – индексы диапазонов толщин. Например, толщины $h_m(v_0)$ имеют диапазон толщин от 0 до 300 нм с шагом 2 нм. Тогда индексы v_0 принимают значения от 0 до 150. Полученные таким образом значения целевой функции были собраны в крупномасштабный массив $F_{array} = \{F(h_m(0), \dots, h_N(0)), \dots, F(h_m(v_0), \dots, h_N(v_{N-m}))\}$.

Далее выполнялся поиск минимального или максимального значения целевой функции: $F_{min}(h_m, \dots, h_N)$

$= \min(F_{array}), F_{max}(h_m, \dots, h_N) = \max(F_{array})$. В качестве оптимальных были определены значения толщин конечных слоев, соответствующие найденному минимальному или максимальному значению целевой функции $\{h_m, \dots, h_N\} \leftarrow F_{min}(h_m, \dots, h_N)$ или $F_{max}(h_m, \dots, h_N)$.

Для характеристики интенсивности лазерного излучения на длине волны 1550 нм, теряемого при взаимодействии с многослойной структурой, используется параметр оптических потерь L . Оптические потери L определяются как наибольшее значение из выражений для минимального значения целевой функции F , близкого к 0: $L = \max\{100 - \mathfrak{Z}_a + \mathcal{R}_a, 100 + \mathfrak{Z}_c - \mathcal{R}_c\}$ если $F < 0.5$, и выражений для максимального значения целевой функции F , близкого к 1: $L = \max\{100 + \mathfrak{Z}_a - \mathcal{R}_a, 100 - \mathfrak{Z}_c + \mathcal{R}_c\}$ если $F > 0.5$.

При описанном моделировании использовались модельные параметры активного слоя на основе РСМ материалов. В результате моделирования были установлены значения оптимальных толщин слоев, отражательной и пропускательной способностей, целевой функции оптические потери.

Принцип оценки по данной функции основан на сведении к минимуму или максимуму соответствующих значений отражательной и пропускательной способностей при всех возможных вариантах работы структуры для комбинаций слоев с разной толщиной $h_{m-1} \dots h_{N+1}$. Например, в результате сложения значений \mathcal{R}_a и \mathfrak{Z}_c стремящихся к минимуму, \mathcal{R}_c и \mathfrak{Z}_a стремящихся к максимуму целевая функция F должна стремиться к минимуму. Тогда при принятии целевой функцией F минимального значения комбинация значений толщины слоев $h_{m-1} \dots h_{N+1}$ считается оптимальной.

В результате моделирования было установлено, что при использовании 9 слоев (крайние слои не засчитываются т.к. имеют бесконечную толщину) структура $\text{SiO}_2 // 111 \text{ нм Si} / 277 \text{ нм SiO}_2 / 111 \text{ нм Si} / 258 \text{ нм SiO}_2 / 3 \text{ нм GST} / 274 \text{ нм SiO}_2 / 111 \text{ нм Si} / 277 \text{ нм SiO}_2 / 111 \text{ нм Si} // \text{SiO}_2$ имеет оптимальные значения толщины и минимальное значение целевой функции $F=0.066$, и имеет следующие значения отражательной и

пропускательной способности, что соответствует 86 % пропускания сигнала при аморфном фазовом состоянии слоя GST и 89 % отражения при кристаллическом.

При моделировании другой многослойной структуры, состоящей из 9 слоев, с активным слоем $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$ (GSST2241) был получен лучший результат и установлено, что структура $\text{SiO}_2 // 111 \text{ нм Si} / 277 \text{ нм SiO}_2 / 111 \text{ нм Si} / 251 \text{ нм SiO}_2 / 10 \text{ нм GSST2241} / 241 \text{ нм SiO}_2 / 110 \text{ нм Si} / 276 \text{ нм SiO}_2 / 112 \text{ нм Si} // \text{SiO}_2$ оптимальные значения толщины и минимальное значение целевой функции $F=0.066$ и имеет следующие значения отражательной и пропускательной способности, что соответствует 100 % пропусканию сигнала при аморфном фазовом состоянии слоя GST и 92 % отражению при кристаллическом. Таким образом, применение материала системы Ge-Sb-Te, модифицированного примесью Se позволяет добиться лучших модельных результатов.

Для исследования подобных структур на базе многофункциональной исследовательской системы Ntegra Spectra™, совмещенной со спектрометром LS RamBo 620™ (приборами производства ООО «Активная фотоника» (входит в группу компаний НТ-МДТ), Россия, Зеленоград), в конфигурации с верхней засветкой был разработан измерительный макет (рис. 1). Макет состоит из следующих компонентов: 1 – непрерывный лазер с длиной волны 532 нм, 2 – фотодетектор NewPort 818-BB-21, 3 – импульсные лазерные диоды с длиной волны 405 нм и 638 нм, 4 – лазерный драйвер iC-Haus iC-HG, 5 – генератор наносекундных импульсов iC-Haus iC149, 6 – оптические линзы, 7 – фотодетектор на диапазон 800 – 1800 нм, 8 – осциллограф, 9 – спектрометр комбинационного рассеяния света (КРС), 10 – дихроичные зеркала, 11 и 12 – фотодетектор на диапазон длин волн 400 – 1100 нм, 13 – атомно-силовой микроскоп, 14 – сканер (система позиционирования образца), 15 – видеокамера, 16 – непрерывный лазер с длиной волны 1550 нм, 17 – образец с пленкой из РСМ материала. Макет также содержит юстировочные держатели, предназначенные для регулировки оптических путей распространения излучений лазеров 1, 3, 16.

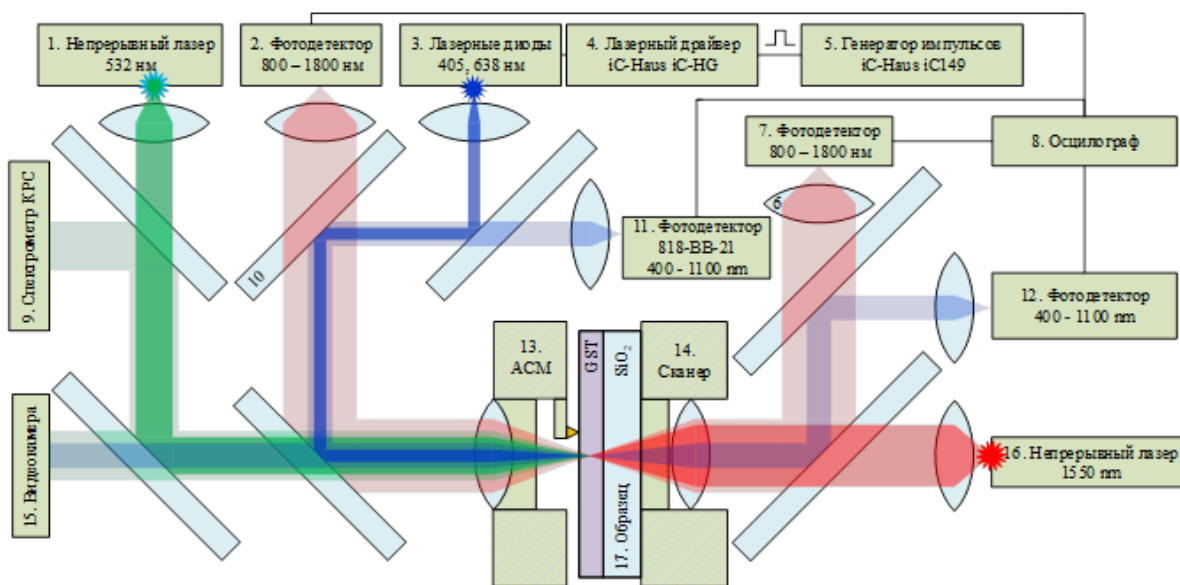


Рис. 1. Структурная схема измерительного макета

Одним из вариантов уменьшения оптических потерь является оптическое управление дополнительными промежуточными состояниями РСМ материала, обусловленными частично кристаллическими и аморфными наноразмерными фракциями материала (тонкая подстройка оптических параметров). Для количественной оценки частично кристаллических и аморфных наноразмерными фракций в объеме пленки было введено понятие степени кристалличности. Оценка степени кристалличности выполнялось с помощью приближение эффективной среды типа Брюггемана (Bruggeman-type effective medium approximation (EMA)).

$$C = (\bar{n}^2 - \bar{n}_a^2)(2\bar{n}^2 + \bar{n}_c^2) / (3\bar{n}(\bar{n}_c^2 - \bar{n}_a^2)), \quad (8)$$

\bar{n} , \bar{n}_a и \bar{n}_c – комплексный показатель преломления среды в текущем состоянии, аморфном и кристаллическом соответственно.

Такое приближение представляет среду в виде аморфной матрицы с растущими сферическими кристаллитами. В соответствии с приближением доля кристаллов в матрице (степень кристалличности) может быть определена из следующего соотношения.

Для экспериментальных исследований с помощью магнетронного распыления мишени из GST225 на подложку SiO₂ была нанесена 24 нм пленка GST225. В результате была получен образец – структура Воздух//GST225//SiO₂. В результате лазерной литографии, путем сканирования данного образца и освещения сфокусированными импульсами 633 нм лазера с $\tau = 10$ нс и $H = 1.5 \pm 0.03$ нДж/мкм² сначала была аморфизована область 150x150 мкм кристаллической пленки, затем кристаллизующими импульсами с $\tau = 30$ нс и $H =$ от 1.189 до 0.526 мкДж/мкм² были получены квадратные области 10x10 мкм с разной степенью кристалличности.

Далее путем сканирования образца и освещения непрерывным сфокусированным лазером 1550 нм с помощью регистрации сигнала фотодетекторами для отраженного и прошедшего излучения 1550 нм были получены карты интенсивности излучения.

Далее полученные квадратные области были исследованы с помощью АСМ. По профилю данных областей были обнаружены сильные перепады высоты, что связано с абляцией (термическим разрушением) пленки и образованием мелких аморфных неоднородностей. Обнаружены области, соответствующие аморфной и кристаллической пленке. По профилю также установлено незначительное изменение толщины пленки, что связано с перестройкой атомной структуры из аморфной в более плотную кристаллическую.

Далее данные области были исследованы с помощью метода рамановской спектроскопии. Установлены спектры областей, соответствующие разной энергетической экспозиции лазеров.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в результате проведенных исследований выполнено моделирование многослойных структур для осуществления функции коммутации оптических сигналов, проведены исследования методами АСМ, КРС, лазерного сканирования, установлены значения энергетической экспозиции необходимой для обратимого фазового перехода из аморфного состояния в

кристаллическое и наоборот, а также установлено соответствие модельных расчетов с экспериментальными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Козодаев Д.А., Муратова Е.Н., Мошников В.А. От нанотехнологии к наноархитектонике // Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио. 2024. № 1(79). С. 350-352.
- [2] От нанотехнологии к наноархитектонике: сборник научных трудов. Выпуск 1 / редактор Д.А. Козодаев. Уфа: ООО "Аэтерна", 2024. 168 с.
- [3] От нанотехнологии к наноархитектонике / редактор Д.А. Козодаев. Уфа: Аэтерна, 2025. 126 с.
- [4] Sharma K., Sehgal V.K. Modern architecture for photonic networks-on-chip // J. Supercomput. 2020. V. 76. P. 9901. <https://www.doi.org/10.1007/s11227-020-03220-2>
- [5] Bogaerts W., Perez D., Capmany J., Miller D.A.B., Poon J., Englund D., Morichetti F., Melloni A. Programmable photonic circuits // Nature. 2020. V. 586. P. 207. <https://www.doi.org/10.1038/s41586-020-2764-0>
- [6] Qi H., Wang X., Hu X., Du Z., Yang J., Yu Z., Ding S., Chu S., Gong Q. All-optical switch based on novel physics effects // J. Appl. Phys. 2021. V. 129. P. 210906. <https://www.doi.org/10.1063/5.0048878>
- [7] Tolkach N.M., Lazarenko P.I., Sherchenkov A.A., Vishnyakov N.V., Sudakova A.U., Nazimov D.R. Optical switching in multilayer structures based on Ge₂Sb₂Te₅ // Journal of Physics: Conference Series. Saint Petersburg, 2020. P. 012075. DOI 10.1088/1742-6596/1695/1/012075.
- [8] Вишняков Н.В., Толкач Н.М., Провоторов П.С. Оптимизация параметров тонкопленочной структуры на основе Ge₂Sb₂Te₅ для оптических переключателей // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2018. № 66-2. С.2-8. DOI 10.21667/1995-4565-2018-66-4-2-2-8
- [9] Глухенькая В.Б., Толкач Н.М., Лазаренко П.И., Шерченков А.А., Козюхин С.А. Формирование перестраиваемых энергонезависимых оптически контрастных изображений на поверхности тонких пленок Ge₂Sb₂Te₅ для отражающих дисплейных технологий и создания голографических изображений // HOLOEXPO 2022: Тезисы докладов. XIX международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям, Барнаул. 2022. С. 181-185.
- [10] Вишняков Н.В., Вихров С.П., Толкач Н.М. Комплексная локальная диагностика тонкопленочной GST-структуры с фазовыми переходами // Радиотехника. 2019. Т. 83, № 11(18). С. 80-87. DOI 10.18127/j00338486-201911(18)-11.
- [11] Tolkach N., Vishnyakov N., Vorobyov Y., Avachev A., Rybina N. Optical computing device architecture based on Ge₂Sb₂Te₅ // 2017 6th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO 2017 - Including ECYPS 2017, Proceedings. Bar, 2017. P. 7977161. DOI 10.1109/MECO.2017.7977161.
- [12] Kozyukhin S.A., Lazarenko P.I., Vorobyov Y.V., Savelyev M.S., Polokhin A.A., Glukhenkaya V.B., Sherchenkov A.A., Gerasimenko A.Y. Laser-induced modification of amorphous GST225 phase change materials // Matériaux & Techniques. 2018. V. 180070. № 3. P. 1. <https://www.doi.org/10.1051/matech/2019008>
- [13] Fuxi G., Yang W. Data Storage at the Nanoscale: Advances and Applications // Taylor & Francis Group. 2015. P. 190. <https://www.doi.org/10.1201/b18094>
- [14] Kozyukhin S.A., Lazarenko P.I., Popov A.I., Eremenko I.L. Phase change memory materials and their applications // Rus. Chem. Rev. 2022. V. 91. № 9. RCR5033. <https://www.doi.org/10.1070/RCR5033>
- [15] Zhang Y., Chou J.B., Li J., Li H., Du Q., Yadav A., Zhou S., Shalaginov M.Y., Fang Z., Zhong H., Roberts C., Robinson P., Bohlin B., Rios C., Lin H., Kang M., Gu T., Warner J., Liberman V., Richardson K., Hu Ju. Broadband transparent optical phase change materials for high-performance nonvolatile photonics // Nature Commun. 2019. V. 10. №1. P. 4279. <https://www.doi.org/10.1038/s41467-019-12196-4>
- [16] Ford W. Numerical Linear Algebra with Applications: Using MATLAB // Academic Press, 2015. 629 p. <https://doi.org/10.1016/C2011-0-07533-6>
- [17] Born M., Wolf E., Bhatia A.B., Clemmow P.C., Gabor D., Stokes A.R., Taylor A.M., Wayman P.A., Wilcock W.L. Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light // 7th ed. Cambridge University Press, 1999. 952 p. <https://www.doi.org/10.1017/CBO978113964>