11

Фотонно-кристаллические структуры с перестраиваемым резонансом

© А.А. Сыров, С.В. Томилин, А.Л. Кудряшов, С.Д. Ляшко, О.А. Томилина

Крымский Федеральный университет им. В.И. Вернадского,
Симферополь, Россия

e-mail: anatoly199824@rambler.ru

Поступила в редакцию 19.06.2025 г.
В окончательной редакции 20.08.2025 г.
Принята к публикации 30.10.2025 г.

Представлены экспериментальные результаты создания и исследования фотонно-кристаллических структур на основе брэгговских зеркал, содержащих оптические полуволновые слои-дефекты из диоксида ванадия, с возможностью параметрического и термического перестроения резонансных условий. Показано влияние толщины и оптических характеристик функционального слоя диоксида ванадия на особенности возбуждения оптических резонансных мод Фабри-Перо. Обнаружен температурный гистерезис оптических и резонансных характеристик фотонно-кристаллических структур, содержащих слой VO_2, в окрестности точки фазового перехода „полупроводник–металл".

Ключевые слова: фотонный кристалл, резонанс Фабри-Перо, диоксид ванадия, фазовый переход, спектральный сдвиг, температурный гистерезис.

DOI: 10.61011/OS.2026.01.62617.8283-25

1. Введение

В последние десятилетия исследование фотонно-кристаллических структур является одной из перспективных областей оптики и фотоники, позволяющих открыть новые горизонты для создания высокоэффективных оптических устройств [1–6]. Данные структуры с высокой точностью и эффективностью способны контролировать распространение световых волн, что находит применение в интегрированных оптических системах, лазерах и в устройствах передачи данных. Особое значение приобретают фотонно-кристаллические структуры с перестраиваемым резонансом, которые позволяют точно настраивать резонансные частоты и ширину резонанса, а также динамически изменять оптические свойства системы под действием внешних факторов (температуры, давления), для создания адаптивных оптических устройств, сенсоров, элементов квантовой информации и систем оптической обработки данных [7–13]. Диоксид ванадия (VO_2) представляет собой один из перспективных материалов, демонстрируя быстрое и обратимое изменение своих физических характеристик при фазовом переходе первого рода „полупроводник–металл" [14]. Фазовый переход сопровождается изменением симметрии кристаллической решетки и оказывает значительное влияние на электрические и оптические свойства материала. В полупроводниковой фазе VO_2 имеет моноклинную симметрию, а в металлической фазе он приобретает тетрагональную симметрию, данное изменение симметрии приводит к резкому изменению электронной структуры, что, в свою очередь, влияет на проводимость материала. В частности, VO_2 демонстрирует резкое изменение электропроводности и оптических свойств при температуре около 68 °C, что делает его идеальным кандидатом для создания перестраиваемых фотонных элементов [15, 16]. В частности, в работе [16] теоретически показано, что в структурах фотонных кристаллов с оптическим дефектом из VO_2 возможно термическое переключение характеристик всей резонансной структуры за счет изменения свойств термооптического активного слоя VO_2 в результате фазового перехода первого рода „полупроводник–металл". Таким образом, применение диоксида ванадия в резонансных фотонных структурах не только повысит уровень их эффективности, но и позволит создавать гибкие и компактные решения для современных оптических систем. Таким образом, интеграция диоксида ванадия в фотонно-кристаллические структуры с перестраиваемым резонансом способствует улучшению их функциональности и производительности, представляя собой перспективу к дальнейшему развитию оптоэлектронных технологий [17–24].

Соответственно настоящая работа посвящена экспериментальному синтезу и исследованию свойств функциональных слоев диоксида ванадия (VO_2) и фотонно-кристаллических структур на их основе и, в частности, особенностям динамической перестройки их резонансных свойств посредством термического управления, что позволяет управлять световыми режимами в реальном времени и создавать новые функциональные возможности для современных оптических систем.

2. Экспериментальные методики

В настоящей работе исследовались две фотонно-кристаллические резонансные структуры с разным спектральным диапазоном, состоящие из двух 4-парных зеркал Брэгга, между которыми располагается оптический полуволновой дефект из VO_2 ($h_{VO_2} \cdot n_{VO_2} = \lambda/2$).

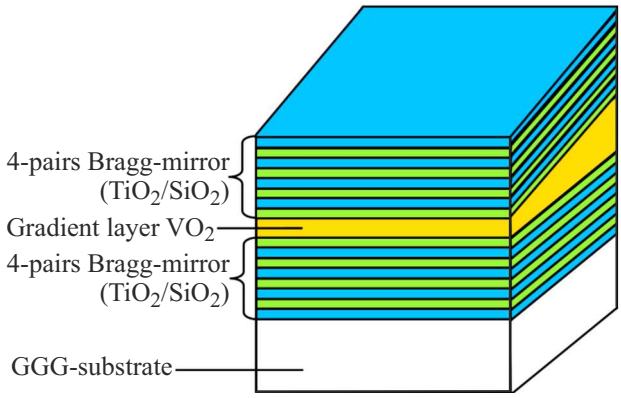

Рис. 1. Схема многослойной фотонно-кристаллической структуры GGG/$[SiO_2/TiO_2]^4/VO_2/[TiO_2/SiO_2]^4$ с градиентом толщины функционального слоя VO_2.

Первая структура рассчитана на видимый диапазон длин волн как для фотонной запрещенной зоны, так и для оптического резонанса Фабри-Перо. Вторая структура аналогична первой, но рассчитана на ближний инфракрасный (ИК) диапазон длин волн. Синтез функциональных оптических слоев фотонно-кристаллических структур с перестраиваемым резонансом осуществлялся с применением вакуумной установки для нанесения покрытий методом магнетронного распыления „МВУ ТМ Магна 09“ (НИИ ТМ, Зеленоград) [25]. Процесс распыления мишеней из исходных материалов VO_2, SiO_2 и TiO_2 (диаметр 76 mm, чистота 99.95%) осуществлялся при помощи ВЧ-магнетронов с частотой 13.6 MHz и мощностью 150 W в аргоновой плазме Ar^+ при давлении $6.6 \cdot 10^{-1}$ Pa. Синтез многослойных структур типа фотонных кристаллов (ФК) осуществлялся путем напыления на полированную подложку из монокристаллического гадолиний галлиевого граната $Gd_3Ga_5O_{12}$ (GGG) четырех пар слоев SiO_2 и TiO_2, формируя нижнее зеркало Брэгга. Толщины структурных слоев для SiO_2 и TiO_2 составляли 110 nm и 71 nm для фотонного кристалла видимого диапазона и 143 nm и 83 nm для фотонного кристалла ИК диапазона соответственно, что соответствует оптической толщине слоя в четверть длины волны ($h_{SiO_2,TiO_2} \cdot n_{SiO_2,TiO_2} = \lambda/4$). После формирования нижнего брэгговского зеркала на его поверхность напылялся слой VO_2 толщиной в половину длины волны света, что нарушает четвертьволновую периодичность фотонного кристалла. Для синтеза функционального слоя VO_2 использовалась методика формирования покрытия с градиентом толщины вдоль выбранного направления, что позволяло получить различные толщины слоя на разных участках образца. Градиент толщины формировался в результате осаждения материала в неоднородном потоке, образуемом при обтекании механических препятствий [26]. На длине образца 10 mm толщина VO_2 варьировалась от 120 до 130 nm для фотонного кристалла видимого диапазона и от 160 до 170 nm фотонного кристалла ИК диапазона, что соответствует градиенту толщины grad $h = 1$ nm/mm. Чтобы добиться оптимальных однородных кристаллических структур VO_2 и улучшить электрофизические и оптические характеристики, а также обеспечить релаксацию внутренних напряжений пленки [27], после процесса осаждения проводился термический отжиг образца. Отжиг выполнялся в атмосфере кислорода ($P = 6 \cdot 10^{-3}$ Pa) в течение 120 min при температуре 550 °C. Далее поверх функционального слоя диоксида ванадия напылялось верхнее зеркало Брэгга, состоящее из 4 пар слоев TiO_2/SiO_2. Итоговая многослойная структура может быть описана структурной формулой GGG/$[SiO_2/TiO_2]^4/VO_2/[TiO_2/SiO_2]^4$ и схематически представлена на рис. 1.

Оптические резонансные свойства фотонно-кристаллических структур на основе функциональных слоев VO_2 исследовались на спектрофотометре Holmarc HO-A216FR/KR-ORMSC2 с оптической схемой Черни–Тернера в диапазоне 400–950 nm и спектральным разрешением 2 nm (ширина выходной щели монохроматора 0.2 mm). Спектр пропускания образца определялся как отношение интенсивности света известной длины волны, прошедшего через образец, к интенсивности света, падающего на образец (т. е. зарегистрированного фотоприемником при отсутствии образца):

$$T(\lambda) = \frac{I_s(\lambda) - I_D(\lambda)}{I_0(\lambda) - I_D(\lambda)}, \quad (1)$$

где $I_S(\lambda)$ — спектральная зависимость интенсивности света, прошедшего через образец, $I_0(\lambda)$ — спектральная зависимость интенсивности света, падающего на образец, $I_D(\lambda)$ — величина темнового тока фотодетектора, полученного при условии, что свет от источника на него не попадает.

Температурные зависимости пропускания фотонных кристаллов измерялись при помощи модифицированного держателя образца, содержащего в себе резистивный нагреватель и терморезистивный датчик температуры. Управление нагревателем реализовано на базе микроконтроллера AtXMega32A4U, регулировка температуры осуществлялась посредством широтно-импульсной модуляции тока нагревателя, для стабилизации температуры применялся метод PID-стабилизации [28]. Измерения производились при нагреве образца от комнатной до температуры выше точки фазового перехода полупроводник–металл, а затем температура понижалась обратно до комнатной для регистрации температурного гистерезиса оптического пропускания.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Фотонный кристалл видимого диапазона

Фотонный кристалл видимого диапазона со структурой GGG/$[SiO_2/TiO_2]^4/VO_2/[TiO_2/SiO_2]^4$ и толщина-

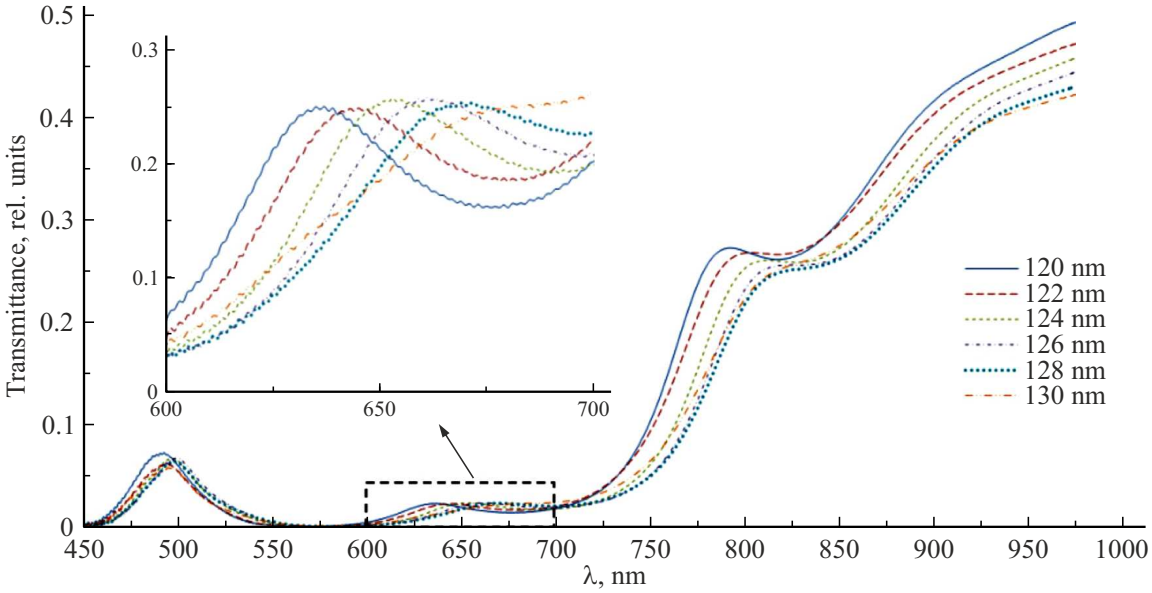

Рис. 2. Спектры пропускания фотонно-кристаллической структуры видимого диапазона GGG/$[SiO_2/TiO_2]^4/VO_2/[TiO_2/SiO_2]^4$ вдоль градиента толщины VO_2 (указана в легенде), на вставке показан участок возбуждения резонансных мод в увеличенном масштабе.

ми функциональных слоев, указанными в разд. 2, представляет собой оптический резонатор типа Фабри-Перо с перестраиваемым резонансом за счет изменения толщины оптического полуволнового дефекта в виде слоя VO_2. На рис. 2 представлены спектры пропускания данного фотонного кристалла в диапазоне 450–950 nm при комнатной температуре. Видно, что внутри фотонной запрещенной зоны (ФЗЗ) формируются разрешенные оптические состояния, которые проявляются как локальные пики пропускания и обусловлены возбуждением резонансных мод типа Фабри-Перо, на длинах волн от 634 до 670 nm. Спектральное положение максимумов пропускания соответствует условиям возбуждения микрорезонаторных мод и определяется толщиной оптического слоя диоксида ванадия при условии формирования в нем одной пучности стоячей волны [25]. При этом увеличение толщины VO_2 приводит к спектральному смещению соответствующего резонансного пика моды Фабри-Перо в сторону более длинноволновой области („красный“ сдвиг).

На рис. 3 показаны спектры пропускания фотонного кристалла видимого диапазона GGG/$[SiO_2/TiO_2]^4/VO_2/[TiO_2/SiO_2]^4$, регистрируемые при разных температурах в диапазоне от 19 до 90 °C на участке с толщиной слоя VO_2 порядка $h_{VO_2} = 123$ nm. При нагреве образца и соответствующем увеличении температуры (рис. 3, *a*) резонансный пик на $\lambda_{res} = 648$ nm претерпевает два типа изменений, связанных с изменением комплексного показателя преломления слоя VO_2. Так, уменьшение действительной части показателя преломления VO_2 с ростом температуры приводит к спектральному смещению положения максимума пропускания в сторону более коротких длин волн, а увеличение мнимой части показателя преломления приводит к росту оптического поглощения в слое VO_2 и, как следствие, к уменьшению амплитуды пика пропускания [29,30]. Так, при достижении 90 °C резонансная длина волны составляет $\lambda_{res} = 614$ nm, а максимальное пропускание снижается в три раза по сравнению с исходным значением.

При остывании образца (рис. 3, *b*) наблюдается обратный процесс смещения резонансного пика Фабри-Перо и увеличения пропускания в точке резонанса. Однако стоит отметить, что при одних и тех же температурах спектры пропускания при нагреве и остывании образца отличаются, демонстрируя явный температурный гистерезис, притом что спектры в крайних температурных режимах (19 и 90 °C) полностью совпадают.

Результаты исследования температурного гистерезиса пропускания (на различных длинах волн) и резонансной длины волны при фазовом переходе в оптическом слое VO_2 показаны на рис. 4. Видно, что изменение оптических констант функционального слоя VO_2 приводит к изменению пропускания структуры в четыре раза на длине волны $\lambda = 647$ nm в окрестности резонанса Фабри-Перо (рис. 4, *a*) и в два раза при $\lambda = 930$ nm за пределами ФЗЗ (рис. 4, *b*). Ширина петли температурного гистерезиса пропускания остается неизменной, примерно от 6 до 8 °C, и практически не зависит от длины волны. При этом абсолютные значения пропускания определяются как сложной дисперсией оптических констант самого слоя VO_2, связанной с электронными переходами [31], так и оптической параметрикой самого фотонного кристалла, обусловленной формированием стоячих волн в периодической структур брэгговских зеркал.

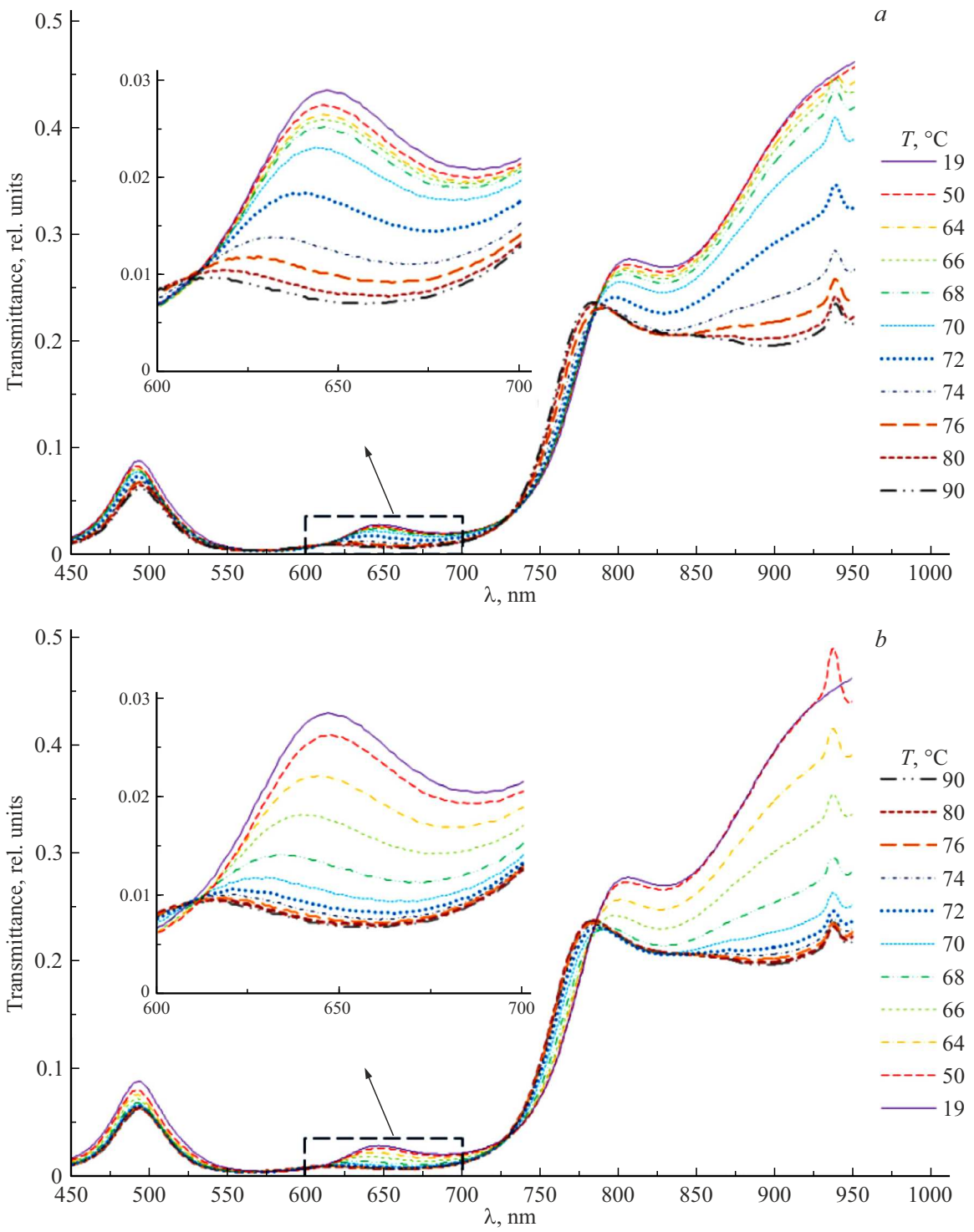

Рис. 3. Спектры пропускания фотонно-кристаллической структуры видимого диапазона GGG/$[SiO_2/TiO_2]^4/VO_2/[TiO_2/SiO_2]^4$ (толщина $h_{VO_2} = 123$ nm) при изменении температуры: (*a*) нагрев; (*b*) остывание (на вставках показаны участки в увеличенном масштабе).

На рис. 4, *c* показана петля температурного гистерезиса для резонансной длины волны моды Фабри-Перо. Видно, что температура перехода и ширина петли гистерезиса аналогичны петлям температурного гистерезиса пропускания на фиксированной длине волны (рис. 4, *a,b*), при этом сама резонансная длина волны λ_{res}, как было показано выше, меняется на 34 nm, что соответствует изменению оптической толщины полуволнового слоя VO_2 на 17 nm.

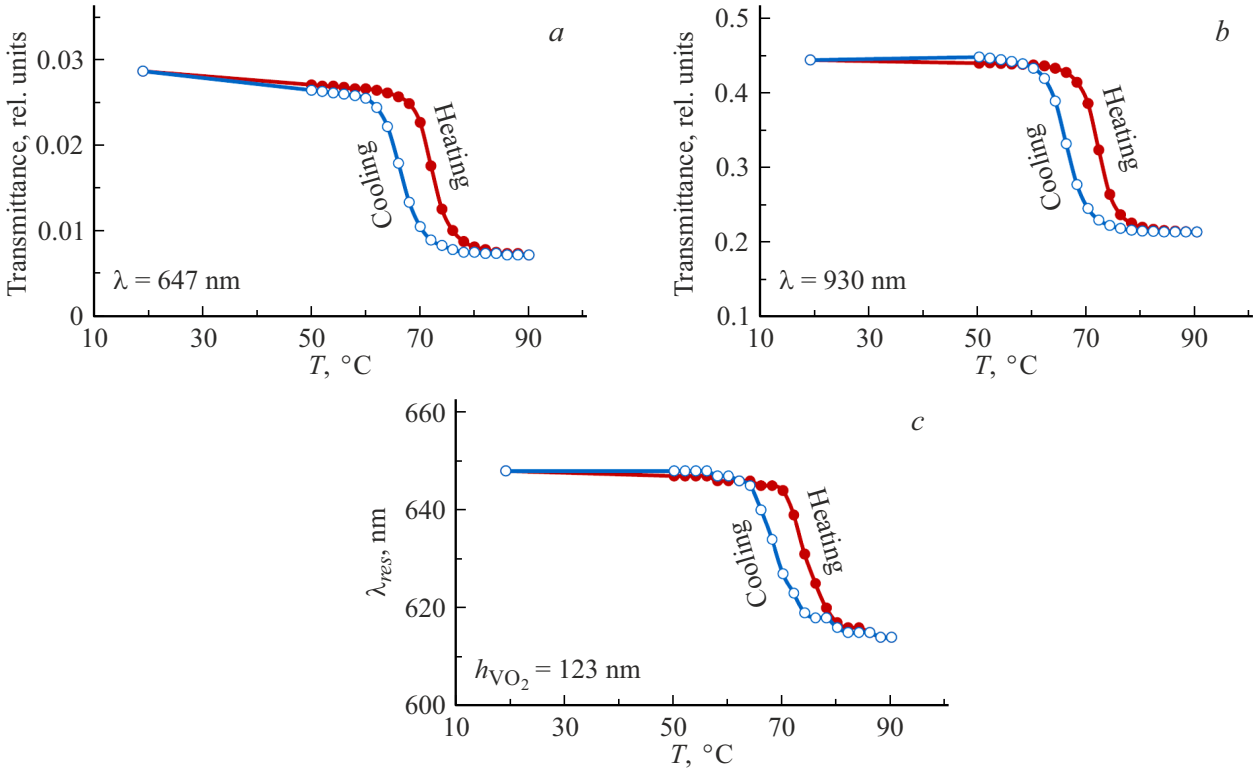

Рис. 4. Петли температурного гистерезиса пропускания для фотонно-кристаллической структуры видимого диапазона на различных длинах волн $\lambda = 647$ nm (*a*) и $\lambda = 930$ nm (*b*); петля температурного гистерезиса для резонансной длины волны моды Фабри-Перо (*c*).

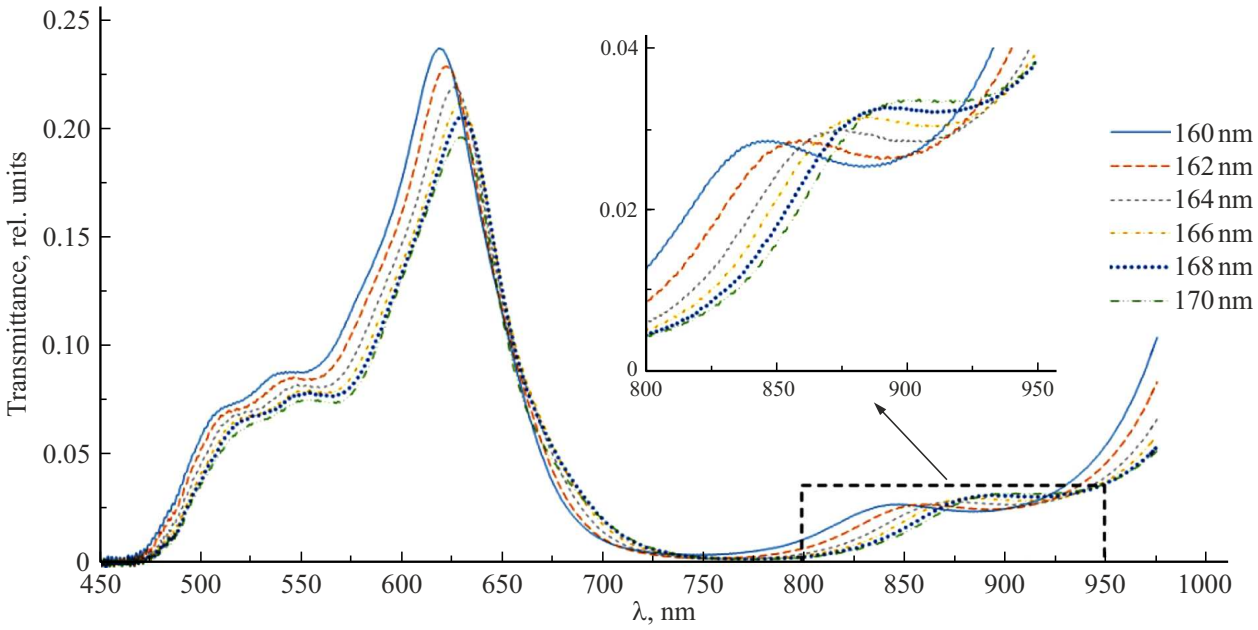

Рис. 5. Спектры пропускания фотонно-кристаллической структуры ИК диапазона GGG/$[SiO_2/TiO_2]^4/VO_2/[TiO_2/SiO_2]^4$ вдоль градиента толщины VO_2 (указана в легенде), на вставке показан участок возбуждения резонансных мод в увеличенном масштабе.

Таким образом, видно, что в фотонном кристалле, содержащем оптический полуволной слой VO_2 с градиентом толщины, возможно перестраивать оптический резонанс Фабри-Перо как параметрически за счет изменения рабочей области вдоль градиента толщины функционального слоя VO_2, так и термически за счет

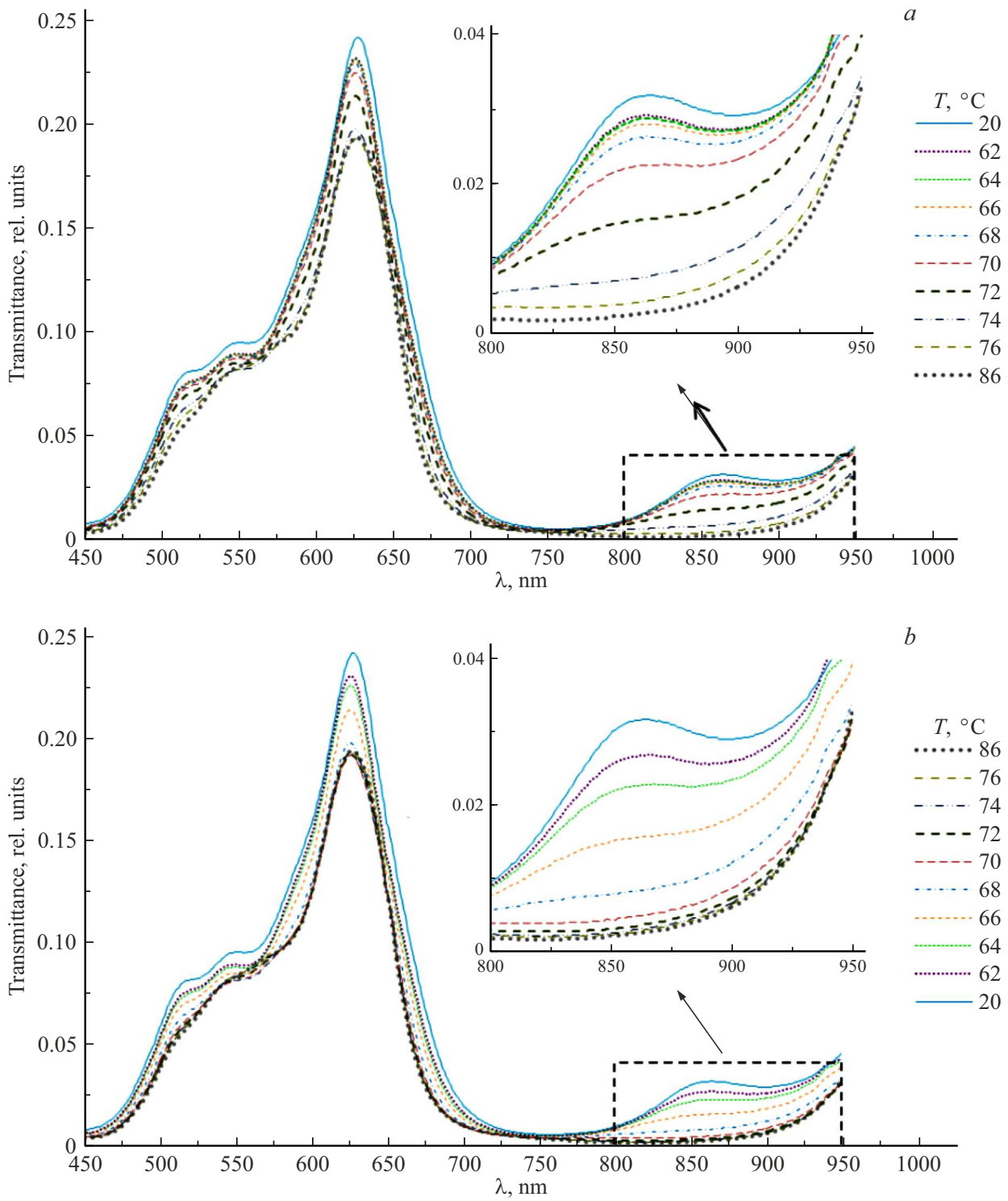

Рис. 6. Спектры пропускания фотонно-кристаллической структуры ИК диапазона GGG/$[SiO_2/TiO_2]^4$/VO_2/$[TiO_2/SiO_2]^4$ (толщина $h_{VO_2} = 163$ nm) при изменении температуры: (*a*) нагрев; (*b*) остывание (на вставках показаны участки в увеличенном масштабе).

изменения его оптических констант. При этом в случае параметрического управления резонансными свойствами изменяется геометрическая разность хода лучей, отраженных от противоположных поверхностей функционального полуволнового слоя, а в случае термического управления меняется оптическая разность хода этих же лучей, приводя к спектральному сдвигу условия интерференции, приводящей к формированию узлов и пучностей стоячей волны внутри слоя VO_2 (мода Фабри-Перо).

3.2. Фотонный кристалл ИК диапазона

Проводились аналогичные измерения для фотонного кристалла ИК диапазона со структурой GGG/$[SiO_2/TiO_2]^4/VO_2/[TiO_2/SiO_2]^4$, толщина функциональных слоев указана в разд. 2. На рис. 5 представлены спектры пропускания данного фотонного кристалла в диапазоне от 450 до 950 nm при комнатной температуре, полученные в различных участках градиента толщины оптического полуволнового слоя VO_2. Внутри ФЗЗ в диапазоне длин волн 840–995 nm возникают разрешенные оптические состояния, проявляющиеся в виде локальных максимумов пропускания, связанных с возбуждением резонансных мод Фабри-Перо. В данном случае увеличение толщины слоя VO_2 приводит к изменению условия формирования оптической стоячей волны и спектральному смещению резонансного пика моды Фабри-Перо в более длинноволновую область спектра.

На рис. 6 показаны спектры пропускания фотонного кристалла ИК диапазона GGG/$[SiO_2/TiO_2]^4/VO_2/[TiO_2/SiO_2]^4$, измеренные при различных температурах, варьирующихся от 20 до 90 °C, для участка градиента толщины слоя VO_2 с $h_{VO_2} = 163$ nm. Нагрев образца и соответствующее увеличение температуры (рис. 6, *a*) приводят к изменению оптических констант слоя VO_2, что оказывает влияние на условия возбуждения резонанса Фабри-Перо, находящегося на длине волны $\lambda_{res} = 862$ nm. Так, уменьшение действительного члена комплексного показателя преломления VO_2 аналогично ведет к смещению максимума пропускания в область более коротких длин волн примерно на 15 nm, а увеличение мнимой компоненты показателя преломления ведет к сильному поглощению света в полуволновом слое VO_2 вплоть до полной деградации резонансного пика при достижении температуры 74 °C и более. Так, при температуре 90 °C максимальное пропускание структуры для $\lambda = 862$ nm уменьшается более чем в 10 раз по сравнению с начальным состоянием. При остывании образца (рис. 6, *b*) наблюдается обратный процесс: смещения резонансного пика Фабри-Перо и возрастание пропускания в области резонанса. Важно отметить, что аналогично фотонному кристаллу видимого диапазона при одинаковых температурах спектры пропускания при нагреве и остывании образца демонстрируют явный температурный гистерезис с идентичным состоянием в крайних температурных точках 20 и 90 °C.

Результаты исследования температурного гистерезиса пропускания на различных длинах волн при фазовом переходе в функциональном слое VO_2 показаны на рис. 7. Видно, что изменение оптических констант функционального слоя VO_2 приводит к значительному изменению пропускания структуры в 12 раз на длине волны $\lambda = 865$ nm в окрестности резонанса Фабри-Перо (рис. 7, *a*) и в 1.25 раза при $\lambda = 628$ nm, расположенной за пределами фотонной запрещенной зоны (рис. 7, *b*). Ширина петли температурного гистерезиса пропускания остается неизменной и составляет 6 °C вне зависимости от длины волны.

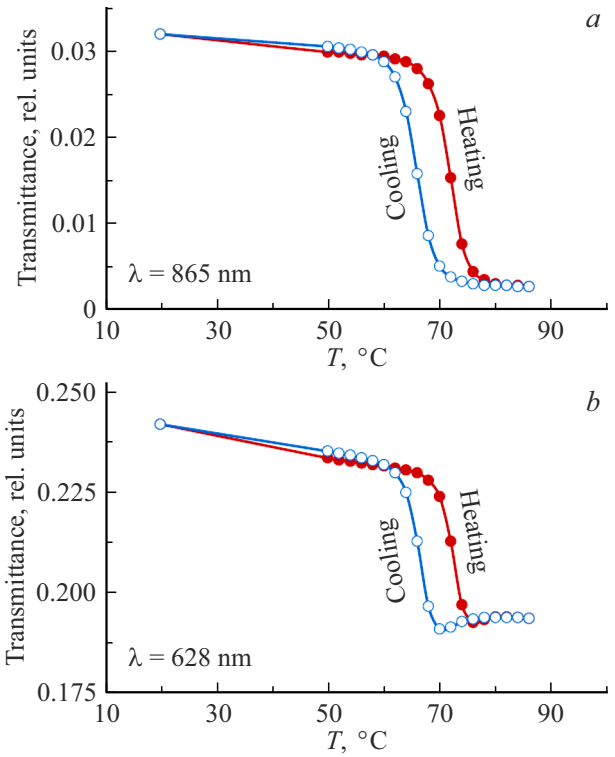

Рис. 7. Петли температурного гистерезиса пропускания для фотонно-кристаллической структуры ИК диапазона на различных длинах волн $\lambda = 865$ nm (*a*) и $\lambda = 628$ nm (*b*).

Таким образом, видно, что в фотонном кристалле ИК диапазона, содержащем оптический полуволной слой VO_2 с градиентом толщины, также возможно перестраивать оптический резонанс Фабри-Перо как параметрически за счет изменения рабочей области вдоль градиента толщины функционального слоя VO_2, так и термически за счет изменения действительной и мнимой компонент его комплексного показателя преломления.

4. Заключение

Таким образом, возможно создание перестраиваемых фотонно-кристаллических структур для микро- и нанофотоники на основе функциональных полуволновых слоев VO_2, заключенных между двумя оптическими зеркалами Брэгга. При этом варьирование толщины функциональных и оптических слоев позволяет создавать структуры с изменяемым оптическим спектральным диапазоном как в видимой, так и ближней ИК областях.

Формирование оптических полуволновых функциональных слоев с градиентом толщины вдоль выбранного направления позволяет реализовать параметрическое перестроение и управление резонансными свойствами фотонно-кристаллических структур за счет изменения

области засветки в различных точках градиента, что приводит к изменению геометрической разности хода лучей, интерферирующих в слое диоксида ванадия. Изменение оптических характеристик функционального слоя VO_2 в результате фазового перехода „полупроводник–металл“ при изменении температуры позволяет реализовать термическое перестроение и управление резонансными свойствами фотонно-кристаллических структур за счет изменения оптической разности хода интерферирующих лучей в функциональном слое.

Указанные эффекты изменения резонансных условий в фотонных кристаллах могут быть также использованы для создания различных температурных датчиков, датчиков перемещения и др.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке ФГАОУ ВО „КФУ им. В.И. Вернадского“ в рамках проекта МОЛ/2024/2.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] Н.В. Морозов, К.П. Галстян. Техника. Технологии. Инженерия, **3** (9), 1 (2018).
[2] С.Е. Свяховский, Н.И. Пышко. ВМУ. Серия 3. Физика. Астрономия, **78** (4), 2340401 (2023) DOI: 10.55959/MSU0579-9392.78.2340401
[3] М.В. Рыбин, М.Ф. Лимонов. УФН, **189** (8), 881 (2019). DOI: 10.3367/UFNr.2019.03.038543
[4] Д.Н. Совык, В.Г. Ральченко, Д.А. Курдюков, С.А. Грудинкин, В.А. Казаков, С.С. Савин, В.Г. Голубев, В.С. Седов. Естественные и математические науки в современном мире, **12**, 113 (2013).
[5] P.D. Garcia, J.F. Galisteo-Lopez, C. Lopez. Appl. Phys. Lett., **87**, 201109 (2005). DOI: 10.1063/1.2132068
[6] В.Г. Голубев, В.А. Кособукин, Д.А. Курдюков, А.В. Медведев, А.Б. Певцов. ФТП, **35** (6), 710 (2001). [V.G. Golubev, V.A. Kosobukin, D.A. Kurdyukov, A.V. Medvedev, A.B. Pevtsov. Semiconductors, **35** (6), 680 (2001)].
[7] А.В. Скрипаль, Д.В. Пономарев, О.М. Рузанов, И.О. Тимофеев. Известия Саратовского университета. Новая серия. Сер. Физика, **20** (1), 29 (2020). DOI: 10.18500/1817-3020-2020-20-1-29-41
[8] Ю.В. Гуляев, А.Н. Лагарьков, С.А. Никитов. Вестник РАН, **78** (5), 438 (2008).
[9] M. Soljacic, J. Joannopoulos. Nature Materials, **3** (4), 211 (2004). DOI: 10.1038/nmat1097
[10] А.С. Абрамов, Д.А. Коробко, В.А. Лапин, П.П. Миронов. Квант. Электрон., **53** (9), 677 (2023). [A.S. Abramov, D.A. Korobko, V.A. Lapin, P.P. Mironov. Bull. Lebedev Physics Institute, **51** (1), S1 (2024). DOI: 10.3103/S1068335624600219].
[11] I. Chremmos, O. Schwelb, N. Uzunoglu. *Photonic microresonator research and applications* (Springer Science + Business Media, N.Y., 2010). DOI: 10.1007/978-1-4419-1744-7
[12] J. Heebner, R. Grover, T. Ibrahim. *Optical microresonators: theory, fabrication, and applications* (Springer Science+Business Media, N.Y., 2008). DOI: 10.1007/978-0-387-73068-4
[13] Е.А. Кадомина, Е.А. Безус, Л.Л. Досколович. Компьютерная оптика, **2** (40), 164 (2016). DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-164-172
[14] L. Sangwook, H. Kedar; Y. Fan, H. Jiawang, K. Changhyun, S. Joonki, L. Kai, W. Kevin, U.J. Jeffrey. Science, **355** (6323), 371 (2017). DOI: 10.1126/science.aag0410
[15] А.Б. Певцов, С.А. Грудинкин, А.Н. Поддубный, С.Ф. Каплан, Д.А. Курдюков, В.Г. Голубев. ФТП, **44** (12), 1585 (2010).
[16] F. Scotognella. Front. Photonics, **4**, 1081521 (2023). DOI: 10.3389/fphot.2023.1081521
[17] A. Rashidi, A. Hatef, A. Namdar. Appl. Phys. Lett., **113**, 101103 (2018). DOI: 10.1063/1.5040365
[18] J. Liang, P. Li, X. Song, L. Zhou. Appl. Phys. A, **123** (12), 794 (2017). DOI: 10.1007/s00339-017-1420-5
[19] M. Sun, M. Taha, S. Walia, M. Bhaskaran, S. Sriram, W. Shieh, R.R. Unnithan. Sci. Rep., **8**, 11106 (2018). DOI: 10.1038/s41598-018-29476-6
[20] A.A. Akhmadeev, E.V. Sarandaev, M.Kh. Salakhov. J. Physics: Conference Series, **461** (1), 012022 (2013). DOI: 10.1088/1742-6596/461/1/012022
[21] J. Sun, G.K. Pribil. Appl. Surface Sci., **421**, 819 (2017). DOI: 10.1016/j.apsusc.2016.09.125
[22] C. Lopez. Advanced Materials, **15** (20), 1679 (2003). DOI: 10.1002/adma.200300386
[23] H. Miguez, C. Lopez, F. Meseguer, A. Blanco, L. Vazquez, R. Mayoral, M. Ocana, Y. Fornes, A. Mifsud. Appl. Phys. Lett., **71** (9), 1148 (1997). DOI: 10.1063/1.119849
[24] A. Blanco, E. Chomski, S. Grabtcak, M. Ibisate, S. John, S.W. Leonard, C. Lopez, F. Meseguer, H. Miguez, J.P. Mondia, G.A. Ozin, O. Toader, H.M. Driel. Nature, **405** (25), 437 (2000). DOI: 10.1038/35013024
[25] A.A. Syrov, S.D. Lyashko, A.L. Kudryashov, I.A. Nauhatsky, V.N. Berzhansky, S.V. Tomilin. Physics of Metals and Metallography, **125** (12), 1325 (2024). DOI: 10.31857/S0015323024120049
[26] S.V. Tomilin, V.N. Berzhansky, A.S. Yanovsky, O.A. Tomilina. J. Surf. Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, **10** (4), 868 (2016). DOI: 10.1134/S1027451016040376
[27] В.А. Климов, И.О. Тимофеева, С.Д. Ханин, Е.Б. Шадрин, А.В. Ильинский, Ф. Сильва-Андраде. ФТП, **37** (4), 388 (2003).
[28] P.C. Boboc, O.E. Hutanu, A.M. Bragadireanu. Romanian J. Physics, **69**, 906 (2024). DOI: 10.59277/RomJPhys.2024.69.906
[29] А. Ильинский, В. Климов, С. Ханин, Е. Шадрин. Известия Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена, **15**, 100 (2006).
[30] R. Beaini, B. Baloukas, S. Loquai, J.E. Klemberg-Sapieha, L. Martinu. Sol. Energy Mater. Sol. Cells, **205**, 110260 (2020). DOI: 10.1364/OIC.2019.MC.5
[31] M.M. Qazilbash, A.A. Schafgans, K.S. Burch, S.J. Yun, B.G. Chae, B.J. Kim, H.T. Kim, D.N. Basov. Phys. Rev. B, **77**, 115121 (2008). DOI: 10.1103/PhysRevB.77.115121