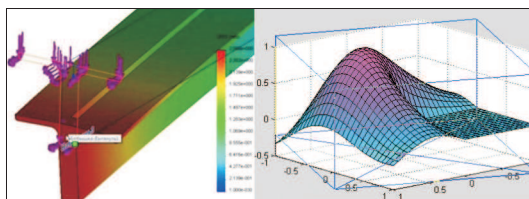


НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ



УДК 628.925:699.885

И.А. ОДЕНБАХ

АНАЛИЗ ХРОМОГЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СМАРТ-ОКОН С УГЛОВЫМ СЕЛЕКТИВНЫМ СВЕТОПРОПУСКАНИЕМ

Проведен сравнительный анализ хромогенных материалов и технологий для практического использования в смарт-окне с угловым селективным светопропусканием, имеющим решеточный оптический фильтр, с учетом специфического отличия от обычного смарт-окна, полностью покрытого хромогенным материалом. Показано, что в отличие от обычного смарт-окна решеточный фильтр ослабляет только прямое солнечное излучение, позволяя проходить рассеянному и отраженному излучению, тем самым улучшая условия естественного освещения и инсоляции в помещении. Такое смарт-окно имеет угловое селективное светопропускание за счет двух тонкопленочных поверхностных решеток с чередующимися параллельными пропускающими и хромогенными полосами. Помимо технологических особенностей изготовления и характеристик светопропускания и пропускания солнечной энергии при использовании различных хромогенных технологий, предварительно оценена возможная стоимость предлагаемой технологии.

Ключевые слова: смарт-окно, решеточный оптический фильтр, естественное освещение, солнечное излучение, хромогенные материалы, угловое селективное светопропускание.

DOI 10.32683/0536-1052-2021-745-1-80-90

Обычные смарт-окна, полностью покрытые слоями современных смарт-материалов, широко используются в последние десятилетия для обеспечения комфортного естественного освещения и инсоляции. Хромогенные материалы с наибольшим потенциалом при использовании в смарт-окнах в целях фильтрации солнечного излучения располагают множеством механизмов для управления светопропусканием. Фотохромные материалы [1, 2] имеют обратимое изменение цвета под действием ультрафиолетового и коротковолнового видимого света. Ионохромные [3] и ацидохромные [4] фотохромные материалы могут дополнительно изменять цвет из-за потока ионов через материал или воздействия газов HCl и NH₃ соответственно. Термохромные и термотропные материалы [5–8] изменяют цвет и светорассеивающие или отражающие свойства в ответ на изменения температуры окружающей среды. У газохромных материалов [9, 10], относящихся к классу хемохромных материалов с изменением цвета в ответ на химические изменения или реакции,

© Оденбах И.А., 2021

обратимо переключается оптическое пропускание при попеременном воздействии разбавленных газов – водорода и кислорода.

Галохромные вещества [11] изменяют цвет из-за изменения pH растворов, сольватохромы [12] демонстрируют изменение цвета при изменении механизма переноса заряда, гигрохромные вещества [13] изменяют цвет при инфильтрации или перемещении жидких соединений внутри пористой структуры, механохромы [14] реагируют изменением цвета на механическое возмущение, пьезохромы [15] имеют зависящий от давления сдвиг длины волны селективного отражения во всем видимом диапазоне, а трибохромные системы [16] изменяют цвет при воздействии фрикционной силы. Электрохромные материалы [17–19] изменяют свой цвет и оптические свойства при пропускании слабого электрического тока. Окно с нанокристаллическими композитами в стекле в настоящее время является наиболее перспективной электрохромной технологией [20–23]. Окно с электрокинетическими пикселями [23] управляет движением окрашенных частиц с помощью электрофо-реза, чтобы модулировать передачу и оттенок входящего света.

Хромогенный материал, полностью покрывающий площадь обычного смарт-окна, ослабляет не только прямое солнечное излучение, но и рассеянное. Такое окно не имеет углового селективного светопропускания, приспособленного к изменению положения солнца на небе. Смарт-окно с решеточным оптическим фильтром [24] лишено этих недостатков. Некоторые аспекты использования хромогенных материалов [1–23] в таких окнах обсуждались в [25]. Целью данной статьи является сравнительный анализ хромогенных материалов и технологий для выбора наиболее подходящих для практического использования в смарт-окнах с угловым селективным светопропусканием с учетом их специфических отличий от обычных смарт-окон.

Угловую селективную фильтрацию солнечного излучения без использования жалюзи и других устройств перераспределения светового потока обеспечивают параллельные полосы хромогенных материалов на двух поверхностях окна, образующие решеточный оптический фильтр с угловым селективным светопропусканием (рис. 1). Оптимальный угол наклона решеток для

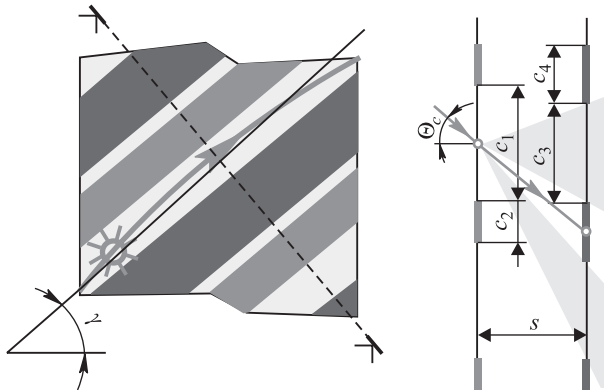


Рис. 1. Оптический фильтр с наклонными решетками, адаптированными к траектории солнца

Θ_c – характеристический угол фильтра; s – расстояние между решетками; γ – угол наклона решеток фильтра; c_1, c_3 – ширины пропускающих полос входной и выходной решеток; c_2, c_4 – ширины хромогенных полос входной и выходной решеток

адаптации к траектории движения солнца относительно окна рассчитывается с учетом сезонных и суточных изменений солнечной радиации, географических координат здания и азимута окна [24]. Такое смарт-окно блокирует прямые солнечные лучи в заданном угловом диапазоне и пропускает рассеянные и отраженные лучи в других диапазонах (два таких диапазона выделены на рис. 1).

Уровень техники по использованию хромогенных технологий в смарт-окнах (включая окна с решеточными фильтрами) показывает, что фотохромные [1, 2], термохромные и термотропные [5–8], газохромные [9, 10] и электрохромные [17–19] материалы являются наиболее перспективными по сравнению с другими хромогениками, такими как ионохромные [3], ацидохромные [4], галохромные [11], сольватохромные [12], гигрохромные [13], механохромные [14], пьезохромные [15], трибохромные [16] и т.п. материалы. Существуют и другие перспективные хромогенные смарт-технологии с электрическим управлением: нанокристаллические композиты в стекле [20–23] и электрокинетические пиксели [23]. Коэффициенты светопропускания и пропускания солнечной энергии для различных хромогенных материалов и технологий в окрашенном и обесцвеченном состояниях представлены в таблице.

Коэффициенты светопропускания и пропускания солнечной энергии хромогенных материалов

| Технология и ссылка | Материал и структура | Светопропускание | | Пропускание солнечной энергии | |
|---------------------|---|--|-------------------------|---|-------------------------|
| | | Окрашенное состояние | Обесцвеченное состояние | Окрашенное состояние | Обесцвеченное состояние |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Фотохромная [1] | Золь-гелевый слой TiO_2 | – | – | 0,075 | 0,57 |
| Фотохромная [2] | Органические красители в мезопористой матрице | 0,246 | 0,65 | 0,115 | 0,251 |
| Термохромная [5] | Пленка VO_2 в серебро-содержащем покрытии | – | 0,582 | 0,071 (разность между обесцвеченным и окрашенным состояниями) | |
| Термохромная [6] | Наночастицы VO_2 , легированные редкоземельными элементами и вольфрамом | 0,63 (разность между обесцвеченным и окрашенным состояниями) | | 0,036 (разность между обесцвеченным и окрашенным состояниями) | |
| Термохромная [7] | Лигандообменная система в тонкой пленке | 0,045 | 0,54 | 0,045 | 0,225 |
| Термохромная [7] | Композиты в полиолефиновой матрице | 0,34 | 0,61 | 0,62 | 0,68 |
| Термотропная [7] | Смесь с разделением фазы | 0,3 | 0,92 | – | – |
| Термотропная [7] | Гель с разделением фазы | 0,06 | 0,92 | – | – |

Окончание таблицы

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|------------------------------------|---|--|------|------|------|
| Термотропная [7] | Полимерный гидрогель с наночастицами | 0,1 | 0,58 | – | – |
| Термотропная [7] | Смесь с фазовым переходом | – | – | 0,57 | 0,82 |
| Термотропная [7] | Полиолефин с термотропными добавками | 0,22 | 0,58 | – | – |
| Газохромная [9] | Пленка WO ₃ | 0,1 | 0,59 | 0,12 | 0,46 |
| Газохромная [10] | Пленка Pt-WO ₃ | 0,1 | 0,8 | – | – |
| Электрохромная [17] | Монолитный твердотельный органо-неорганический гибридный материал | 0,49 (разность между обесцвеченным и окрашенным состояниями) | | – | – |
| Электрохромная [18] | Полимерный гелевый электролит в смеси | 0,82 (разность между обесцвеченным и окрашенным состояниями) | | – | – |
| Электрохромная [19] | Серебро, осажденное в растворе электролита | 0,11 | 0,78 | – | – |
| Нанокристаллические композиты [21] | Наночастицы, взвешенные в диэлектрической матрице | – | >0,5 | 0,1 | 0,2 |
| Нанокристаллические композиты [22] | Плазмонные нанокристаллы, взвешенные в электролите | – | 0,9 | 0,2 | 0,8 |
| Электрокинетические пиксели [23] | Движение частиц под действием электрофореза | 0,22 | 0,75 | – | – |

Фотохромное устройство с золь-гелевым слоем TiO₂ [1] имеет одну из лучших разностей между обесцвеченным и окрашенным состояниями 0,495 по пропусканию солнечной энергии, а также самое низкое светопропускание в окрашенном состоянии (таблица). Другой фотохромный слой, полученный путем встраивания органических красителей, 1,2-*b*-нафтопирана, в золь-гелевую органо-неорганическую мезопористую матрицу [2], имеет низкий коэффициент пропускания солнечной энергии как в обесцвеченном, так и в окрашенном состоянии и средний коэффициент светопропускания. По сравнению с другими хромогенными материалами, фотохромики имеют такое важное преимущество для использования в смарт-окнах, как возможность нанесения тонкопленочных покрытий на оконное стекло. Эта технология также хорошо подходит для решеточных фильтров с шириной хромогенных полос от миллиметров до десятков миллиметров. Однако для широкого использования необходимо повысить цикличность фотопереходов материалов, стабильность их фотоиндуцированных форм, экономичность, прочность и долговечность.

Неорганические термохромные материалы на основе VO_2 [5, 6] имеют высокий коэффициент светопропускания в обесцвеченном состоянии и большую разницу между обесцвеченным и окрашенным состояниями. Органические термохромики с такими же значениями светопропускания демонстрируют различные диапазоны пропускания солнечной энергии [7]. Типичные термохромные материалы имеют коэффициент светопропускания 0,55–0,6 в обесцвеченном состоянии и 0,05–0,13 в окрашенном состоянии, коэффициент пропускания солнечной энергии составляет 0,36–0,37 и 0,12–0,17 соответственно [8]. Термотропики [7] демонстрируют самый высокий коэффициент светопропускания в обесцвеченном состоянии и наибольшую разницу между обесцвеченным и окрашенным состояниями (таблица). Термохромные и термотропные окна, несмотря на их увеличенную стоимость по сравнению с обычными окнами и необходимость повышения долговременной стабильности и потенциала энергосбережения, быстро распространяются во всем мире, поскольку это передовая и в то же время простая и доступная смарт-технология.

Газохромные окна на основе пленок WO_3 [9, 10] показывают наибольшую разницу между обесцвеченным и окрашенным состояниями как по видимому свету, так и по коэффициенту пропускания солнечной энергии (таблица). Газохромная пленка позволяет контролировать глубину и скорость окрашивания в зависимости от выбранной толщины пленки и от концентрации водорода. Однако для такого окна требуется система генерации водорода и кислорода, что увеличивает его стоимость и неудобства в использовании.

Электрохромное устройство состоит из пятислояного покрытия (прозрачный проводящий – электрохромный донорный – слой с ионопроводящим электролитом – электрохромный противэлектродный хозяин – прозрачный проводящий), расположенного между двумя стеклами. Недорогое и гибкое однослойное цельное электрохромное устройство с полимер-гелевым электролитом, включенным в электрохромные смеси, состоящие из гидроксикалквиологенов и гидрохиноновых или ферроценовых электронных медиаторов [18], показывает очень большую разницу между обесцвеченным и окрашенным состояниями 0,82 по светопропусканию (таблица). Светопропускание типичных электрохромных окон колеблется от 0,02 до 0,8, пропускание солнечной энергии колеблется от 0,1 до 0,5. Несмотря на необходимость электрического управления, сложность и высокую стоимость, электрохромные технологии имеют отличные перспективы для использования в смарт-окнах, в том числе окнах с решеточными фильтрами, из-за возможности постепенного изменения пропускания и переключения между обесцвеченным и окрашенным состояниями в любой момент, широкого выбора органических и неорганических (чаще всего оксидов вольфрама и других переходных металлов) материалов с различным диапазоном пропускания и постепенного снижения их стоимости.

Нанокристаллические композиты в стекле имеют тройную конфигурацию переключения: «светлый режим», когда видимый свет и ближний ИК-диапазон входят без помех; «холодный режим», блокирующий ближний ИК-диапазон, но пропускающий видимый свет; «темный режим», ограничивающий попадание ближнего ИК-диапазона и света в комнату (рис. 2). При напряжении холостого хода (4 В) нанокристаллы оксидов индия и олова (ITO) и стеклянная матрица NbO_x находятся в прозрачном состоянии. Однако снижение напряжения до 2,3 В сначала увеличивает количество носителей

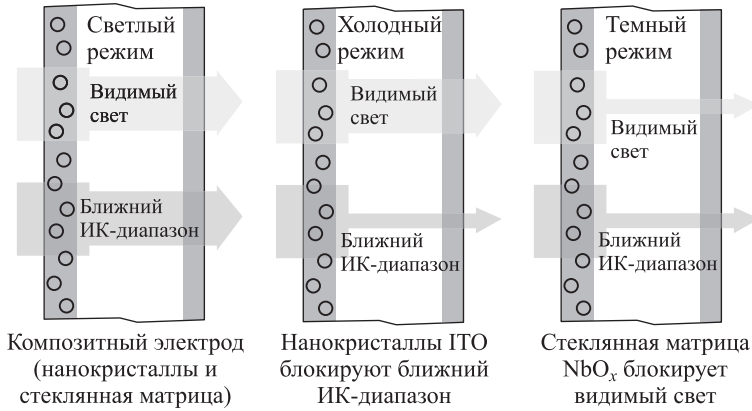


Рис. 2. Окно с нанокристаллическими композитами в стекле

ионов только в плазмонных нанокристаллах, которые несут ответственность за блокировку ближнего ИК-излучения. Затем снижение напряжения до 1,5 В дополнительно вызывает ослабление стеклянной матрицы, которая, в свою очередь, также блокирует видимый свет [23]. Наночастицы VO_2 , взвешенные в диэлектрической матрице, демонстрируют значительно улучшенный коэффициент светопропускания и модуляцию пропускания солнечной энергии [21]. Для дальнейшего улучшения использовались плазмонные нанокристаллы, которые проявляют сдвиг в плазмонном резонансе при приложении заряда к частицам, взвешенным в электролите [20]. Изменения плазмонного резонанса этих частиц оказывают минимальное влияние на пропускание видимого света, но вызывают резкие изменения пропускания в ближнем ИК-диапазоне [22] (лучшие значения в таблице).

В электрокинетическом пиксельном окне используются два плоских электрода, управляющих электрофоретической дисперсией частиц двух бипервичных цветов, характеризующихся противоположными электрическими зарядами, а также третий электрод в форме шестигранной сетки, который создает ячейки со стороной 500 нм [23]. Один из плоских электродов имеет полимерные микролунки, которые при необходимости улавливают цветные частицы и препятствуют их хроматическому распространению (рис. 3). Каждый из электродов может быть заряжен отдельно, притягивая частицы определенного цвета в зависимости от их положительного или отрицательного заряда.

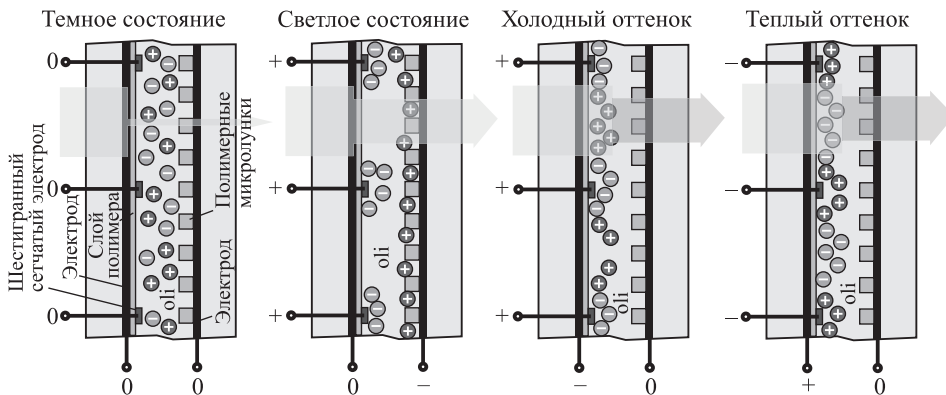


Рис. 3. Электрокинетическое пиксельное окно

Эта технология обеспечивает четыре конфигурации переключения: нейтральное «темное состояние», когда электроды не заряжены и частицы обоих цветов смешиваются в однородной дисперсии; нейтральное «светлое состояние», когда цветные частицы уплотняются по направлению к шестигранному электроду и в микролунках отсутствует цветовая дисперсия; «холодный оттенок», когда синие частицы (положительно заряженные) диспергированы, а желтые частицы (отрицательно заряженные) уплотнены вокруг шестигранного электрода; «теплый оттенок», когда желтые частицы диспергированы, а синие частицы уплотняются вокруг шестигранного электрода. В таблице показаны хорошие значения светопропускания для красно-голубой коллоидной дисперсии [23]. Наряду с нанокристаллическими композитами в стекле, технология электрокинетических пикселей очень сложна и дорога, кроме того, она неприменима для смарт-окон с решеточными фильтрами из-за необходимости использования шестигранного электрода.

Выводы. Фотохромные, термохромные, термотропные, газохромные и электрохромные технологии, а также нанокристаллические композиты в стекле и электрокинетические пиксельные устройства, наиболее подходящие для практического использования в обычных смарт-окнах, полностью покрытых активными слоями, также применимы к решеточным оптическим фильтрам для смарт-окон, кроме электрокинетических пиксельных устройств. Возможность использования хромогенной технологии в решеточном фильтре зависит от сложности нанесения тонкопленочных поверхностных полос (с использованием масок и т.д.) или многослойных полос, помещаемых между двумя листами стекла, однако принципиального отличия от изготовления обычного смарт-окна нет. По результатам предыдущих исследований ширины полос решеток для одинарного остекления составляют миллиметры, а для двойного – десятки миллиметров. Следовательно, использование решеточных фильтров при двойном остеклении будет более технологичным в производстве.

Основным препятствием к широкому распространению решеточных смарт-окон, как и обычных смарт-окон, является их повышенная стоимость по сравнению с обычной оконной системой с жалюзи или другими устройствами перенаправления света. Квадратный метр смарт-стекла стоит от 500 до 1000 долл. США и может достигать до 2000 долл. и более, в то время как квадратный метр обычного флоат-стекла стоит 38 долл., а стекло с низким содержанием железа – 145 долл. Переключаемая смарт-пленка для стекла стоит от 40 долл. США за квадратный метр. Использование масок для формирования полос решеточного смарт-окна увеличит его стоимость по сравнению с обычным смарт-окном. Однако для такого окна требуется меньше хромогенных материалов, поскольку общая площадь всех хромогенных полос обеих решеток будет меньше площади окна, полностью покрытого одним хромогенным слоем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hocevar M., Bogati S., Georg A., Opara Krasovec U. A photoactive layer in photochromic glazing // Sol. Energ. Mater. Sol. C. 2017. Vol. 171. P. 85–90.

2. Wu L.Y.L., Zhao Q., Huang H., Lim R.J. Sol-gel based photochromic coating for solar responsive smart window // *Surf. Coat. Tech.* 2017. Vol. 320. P. 601–607.
3. Chernyshev A.V., Voloshin N.A., Rostovtseva I.A., Demidov O.P., Shepelenko K.E., Solov'eva E.V., Gaeva E.B., Metelitsa A.V. Benzothiazolyl substituted spiropyrans with ion-driven photochromic transformation // *Dyes Pigm.* 2020. Vol. 178. 108337.
4. Zheng C., Fan C., Pu S., Chen B., Chen B. A novel Br-substituted diarylethene: Synthesis, crystal structure, and solvent dependent acidichromism // *J. Mol. Struct.* 2016. Vol. 1123. P. 355–359.
5. Baloukas B., Loquai S., Martinu L. Low emissivity coatings incorporating thermochromic VO₂: Performance enhancement and new opportunities // *Optical Interference Coatings*. 2016. MD-5.
6. Wang N., Goh Q.S., Lee P.L., Magdassi S., Long Y. One-step hydrothermal synthesis of rare earth/W-codoped VO₂ nanoparticles: Reduced phase transition temperature and improved thermochromic properties // *J. Alloys Compd.* 2017. Vol. 711. P. 222–228.
7. Seeboth A., Ruhmann R., Mühling O. Thermotropic and thermochromic polymer based materials for adaptive solar control // *Materials*. 2010. Vol. 3. P. 5143–5168.
8. Casini M. Smart windows for energy efficiency of buildings // *International Journal of Civil and Structural Engineering*. 2014. Vol. 2. P. 230–238.
9. Georg A., Graf W., Schweiger D., Wittwer V., Nitz P., Wilson H.R. Switchable glazing with a large dynamic range in total solar energy transmittance (TSET) // *Sol. Energy*. 1998. Vol. 62. P. 215–228.
10. Nishizawa K., Yamada Y., Yoshimura K. Low-temperature chemical fabrication of Pt-WO₃ gasochromic switchable films using UV irradiation // *Energ. Mater. Sol. C*. 2017. Vol. 170. P. 21–26.
11. De Meyer T., Steyaert I., Hemelsoet K., Hoogenboom R., Van Speybroeck V., De Clerck K. Halochromic properties of sulfonphthaleine dyes in a textile environment: The influence of substituents // *Dyes Pigm.* 2016. Vol. 124. P. 249–257.
12. House J.E. *Molecular spectroscopy, Fundamentals of Quantum Mechanics*, 3 Eds. Academic Press, 2018.
13. Deparis O., Ghazzal M.N., Simonis P., Mouchet S., Kebaili H., De Coninck J., Gaigneaux E.M., Vigneron J.P. Theoretical condition for transparency in mesoporous layered optical media: Application to switching of hygrochromic coatings // *Appl. Phys. Lett.* 2014. Vol. 104. 023704.
14. Wang Y., Cheng D., Zhou H., Liu J., Liu X., Cao J., Han A., Zhang C. Mechanochromic luminescence of AIEE-active tetraphenylethene-containing cruciform luminophores // *Dyes Pigm.* 2019. Vol. 171. 107739.
15. Seeboth A., Loetzsch D., Ruhmann R. Piezochromic polymer materials displaying pressure changes in bar-ranges // *Am. J. Mater. Sci.* 2011. Vol. 1. P. 139–142.
16. Asiri A.M., Heller H.G., Hughes D.S., Hursthouse M.B., Kendrick J., Leusen F.J.J., Montis R. A mechanophysical phase transition provides a dramatic example of colour polymorphism: the tribochromism of a substituted tri(methylene)tetrahydrofuran-2-one // *Chem. Cent. J.* 2014. Vol. 8. 70.
17. Cannavale A., Martellotta F., Cossari P., Gigli G., Ayr U. Energy savings due to building integration of innovative solid-state electrochromic devices // *Appl. Energ.* 2018. Vol. 225. P. 975–985.
18. Pan M., Ke Y., Ma L., Zhao S., Wu N., Xiao D. Single-layer electrochromic device based on hydroxylalkyl viologens with large contrast and high coloration efficiency // *Electrochim. Acta*. 2018. Vol. 266. P. 395–403.
19. Kimura R., Tsuboi A., Nakamura K., Kobayashi N. Effects of silver halide complexes on optical and electrochemical properties of silver deposition-based electrochromic device // *Sol. Energ. Mater. Sol. C*. 2018. Vol. 177. P. 128–133.

20. *Otanicar T.P., De Jarnette D., Hewakuruppu Y.L., Taylor R.A.* Filtering light with nanoparticles: a review of optically selective particles and applications // *Adv. Opt. Photonics*. 2016. Vol. 8. P. 541–585.
21. *Li S.-Y., Niklasson G.A., Granqvist C.G.* Nanothermochromics: Calculations for VO₂ nanoparticles in dielectric hosts show much improved luminous transmittance and solar energy transmittance modulation // *J. Appl. Phys.* 2010. Vol. 108. 063525.
22. *Runnerstrom E.L., Llordüs A., Lounis S.D., Milliron D.J.* Nanostructured electrochromic smart windows: traditional materials and NIR-selective plasmonic nanocrystals // *Chem. Commun.* 2014. Vol. 50. P. 10555–10572.
23. *Casini M.* Active dynamic windows for buildings: A review // *Renewable Energy*. 2018. Vol. 119. P. 923–934.
24. *Закируллин Р.С., Оденбах И.А.* Оптимизированная угловая селективная фильтрация прямого солнечного излучения // *Изв. вузов. Строительство*. 2018. № 10. С. 91–97.
25. *Zakirullin R.S., Odenbakh I.A.* Chromogenic materials in optical filters for smart windows // *OSA Advanced Photonics Congress (AP)*. 2020. JTU4C.19.

Оденбах Ирина Александровна, канд. пед. наук
Оренбургский государственный университет

Получено 17.12.2020

Odenbakh Irina Aleksandrovna, PhD
Orenburg State University, Russia

ANALYSIS OF CHROMOGENIC MATERIALS FOR SMART WINDOWS WITH ANGULAR-SELECTIVE LIGHT TRANSMISSION

A comparative analysis of chromogenic materials and technologies for practical use in a smart window with angular-selective light transmission, having grating optical filter, has been carried out. The specific difference from a conventional smart window fully covered with chromogenic material has been considered. Unlike conventional smart windows, the grating filter attenuates only direct sunlight, allowing diffused and reflected radiation to pass through, thereby improving the daylight and insolation conditions indoors. Such a smart window has an angular selective light transmission due to two thin-film surface gratings with alternating parallel transmissive and chromogenic strips. In addition to the technological features of manufacturing and the characteristics of light and solar transmission when using various chromogenic technologies, the possible cost of the proposed technology has been preliminary estimated.

Key words: smart window, grating optical filter, daylight, solar radiation, chromogenic materials, angular-selective light transmission.

REFERENCES

1. *Hocevar M., Bogati S., Georg A., Opava Krasovec U.* A photoactive layer in photochromic glazing. *Sol. Energ. Mater. Sol. C*. 2017. Vol. 171. Pp. 85–90.
2. *Wu L.Y.L., Zhao Q., Huang H., Lim R.J.* Sol-gel based photochromic coating for solar responsive smart window. *Surf. Coat. Tech.* 2017. Vol. 320. Pp. 601–607.
3. *Chernyshev A.V., Voloshin N.A., Rostovtseva I.A., Demidov O.P., Shepelenko K.E., Solov'eva E.V., Gaeva E.B., Metelitsa A.V.* Benzothiazolyl substituted spiropyrans with ion-driven photochromic transformation. *Dyes Pigm.* 2020. Vol. 178. 108337.
4. *Zheng C., Fan C., Pu S., Chen B., Chen B.* A novel Br-substituted diarylethene: Synthesis, crystal structure, and solvent dependent acidochromism. *J. Mol. Struct.* 2016. Vol. 1123. Pp. 355–359.

5. Baloukas B., Loquai S., Martinu L. Low emissivity coatings incorporating thermochromic VO₂: Performance enhancement and new opportunities. *Optical Interference Coatings*. 2016. MD-5.
6. Wang N., Goh Q.S., Lee P.L., Magdassi S., Long Y. One-step hydrothermal synthesis of rare earth/W-codoped VO₂ nanoparticles: Reduced phase transition temperature and improved thermochromic properties. *J. Alloys Compd.* 2017. Vol. 711. Pp. 222–228.
7. Seeboth A., Ruhmann R., Mühling O. Thermotropic and thermochromic polymer based materials for adaptive solar control. *Materials*. 2010. Vol. 3. Pp. 5143–5168.
8. Casini M. Smart windows for energy efficiency of buildings // *International Journal of Civil and Structural Engineering*. 2014. Vol. 2. Pp. 230–238.
9. Georg A., Graf W., Schweiger D., Wittwer V., Nitz P., Wilson H.R. Switchable glazing with a large dynamic range in total solar energy transmittance (TSET). *Sol. Energy*. 1998. Vol. 62. Pp. 215–228.
10. Nishizawa K., Yamada Y., Yoshimura K. Low-temperature chemical fabrication of Pt-WO₃ gasochromic switchable films using UV irradiation. *Energ. Mater. Sol. C*. 2017. Vol. 170. Pp. 21–26.
11. De Meyer T., Steyaert I., Hemelsoet K., Hoogenboom R., Van Speybroeck V., De Clerck K. Halochromic properties of sulfonphthaleine dyes in a textile environment: The influence of substituents. *Dyes Pigm.* 2016. Vol. 124. Pp. 249–257.
12. House J.E. *Molecular spectroscopy, Fundamentals of Quantum Mechanics*, 3 Eds. Academic Press, 2018.
13. Deparis O., Ghazzal M.N., Simonis P., Mouchet S., Kebaili H., De Coninck J., Gaigneaux E.M., Vigneron J.P. Theoretical condition for transparency in mesoporous layered optical media: Application to switching of hygrochromic coatings. *Appl. Phys. Lett.* 2014. Vol. 104. 023704.
14. Wang Y., Cheng D., Zhou H., Liu J., Liu X., Cao J., Han A., Zhang C. Mechanochromic luminescence of AIEE-active tetraphenylethene-containing cruciform luminophores. *Dyes Pigm.* 2019. Vol. 171. 107739.
15. Seeboth A., Loetzsch D., Ruhmann R. Piezochromic polymer materials displaying pressure changes in bar-ranges. *Am. J. Mater. Sci.* 2011. Vol. 1. Pp. 139–142.
16. Asiri A.M., Heller H.G., Hughes D.S., Hursthouse M.B., Kendrick J., Leusen F.J.J., Montis R. A mechanophysical phase transition provides a dramatic example of colour polymorphism: the tribochromism of a substituted tri(methylene) tetrahydrofuran-2-one. *Chem. Cent. J.* 2014 Vol. 8. 70.
17. Cannavale A., Martellotta F., Cossari P., Gigli G., Ayr U. Energy savings due to building integration of innovative solid-state electrochromic devices. *Appl. Energ.* 2018. Vol. 225. Pp. 975–985.
18. Pan M., Ke Y., Ma L., Zhao S., Wu N., Xiao D. Single-layer electrochromic device based on hydroxylalkyl viologens with large contrast and high coloration efficiency. *Electrochim. Acta*. 2018. Vol. 266. Pp. 395–403.
19. Kimura R., Tsuboi A., Nakamura K., Kobayashi N. Effects of silver halide complexes on optical and electrochemical properties of silver deposition-based electrochromic device. *Sol. Energ. Mater. Sol. C*. 2018. Vol. 177. Pp. 128–133.
20. Otanicar T.P., De Jarnette D., Hewakuruppu Y.L., Taylor R.A. Filtering light with nanoparticles: a review of optically selective particles and applications. *Adv. Opt. Photonics*. 2016. Vol. 8. Pp. 541–585.
21. Li S.-Y., Niklasson G.A., Granqvist C.G. Nanothermochromics: Calculations for VO₂ nanoparticles in dielectric hosts show much improved luminous transmittance and solar energy transmittance modulation. *J. Appl. Phys.* 2010. Vol. 108. 063525.

22. *Runnerstrom E.L., Lordés A., Lounis S.D., Milliron D.J.* Nanostructured electrochromic smart windows: traditional materials and NIR-selective plasmonic nanocrystals. *Chem. Commun.* 2014. Vol. 50. Pp. 10555–10572.
 23. *Casini M.* Active dynamic windows for buildings: A review. *Renewable Energy.* 2018. Vol. 119. Pp. 923–934.
 24. *Zakirullin R.S., Odenbakh I.A.* Optimizirovannaya uglovaya selektivnaya fil'tratsiya pryamogo solnechnogo izlucheniya [Optimized angular selective filtering direct solar radiation]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2018. No. 10. Pp. 91–97. (in Russian)
 25. *Zakirullin R.S., Odenbakh I.A.* Chromogenic materials in optical filters for smart windows. *OSA Advanced Photonics Congress (AP)*. 2020. JTU4C.19.
-