

Разработка зарядно-разрядного метода управления крупногабаритными электрохромными устройствами

С. О. Лебедев¹, Л. А. Русинов¹, В. В. Кравченко²,
Д. П. Княжев², Д. Д. Бернт²

УДК 62-50

Представлен новый подход к управлению крупногабаритными электрохромными устройствами, основанный на зарядно-разрядном методе. Разработанный метод устраняет проблему краевого эффекта и существенно выравнивает электрооптические характеристики данных изделий: в 47 раз по сравнению с гальваностатическим режимом управления и в 13,7 раза – по сравнению с импульсным методом. Это, вероятно, будет способствовать увеличению срока службы крупногабаритных электрохромных устройств.

Ключевые слова: электрохромные устройства, краевой эффект, зарядно-разрядный метод управления

Введение

На сегодняшний день в Российской Федерации ежегодно вводятся в эксплуатацию новостройки с жилой площадью от 35 до 40 млн м², а общий жилищный фонд страны составляет уже более 2,7 млрд м². Увеличиваются расходы энергетических ресурсов на нужды жилищно-коммунального хозяйства, которые с 2019 года достигают 20% от общего потребления в стране. Несмотря на развитие строительных технологий, основными источниками потерь тепловой энергии остаются светопрозрачные конструкции, через которые расходуется от 40 до 50% [1].

В последние десятилетия решение энергетической проблемы искали в области «умных» материалов. Устройства, изготовленные на их основе, способны изменять свои спектрально-оптические свойства при воздействии на них светом или электрическим током. Исходя из своих свойств они получили

названия фотохромные и электрохромные окна соответственно [2]. Наиболее перспективной и быстро развивающейся областью научных исследований являются электрохромные устройства (ЭХУ) из-за их широкого рабочего оптического диапазона, высокой тепловой эффективности, которая на 80% превышает стандартные стеклопакеты с эмиссионным покрытием, а также благодаря их способности точно регулировать оптическое пропускание, что делает их незаменимыми в системах «умный» дом [3, 4]. Устройства ЭХУ включают в себя подложки, изготовленные из стекла или прозрачной полимерной пленки, прозрачные проводящие слои, электрохромный материал и электролит (рис. 1).

Электрохромные материалы (ЭХМ), используемые в данных устройствах, как правило, неорганические благодаря их термической стабильности и устойчивости к ультрафиолетовому излучению. В качестве неорганических ЭХМ наиболее часто используются оксиды переходных металлов, такие как: WO₃, V₂O₅, TiO₂, Cr₃O₈, NiO, MoO₃ [5, 6]. Помимо неорганических электрохромных материалов, также распространены и электроинициируемые органические материалы, что связано с относительно простым

¹ ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)», Санкт-Петербург.

² АО «Октогласс», Москва.

и экономически доступным способом производства устройств на их основе [7].

В процессе эксплуатации ЭХУ под действием электрического тока происходит интеркаляция ионов электролита в структурную решетку ЭХМ, в результате чего образуется новое химическое соединение, смещаются границы запрещенной зоны (для электрохромных устройств на основе оксидов переходных металлов) и как следствие – изменяются оптические характеристики. Согласно законам электролиза Фарадея, интенсивность этих электрохимических процессов будет определяться величиной электрического заряда, протекающего через систему. Возвращение исходных оптических характеристик ЭХУ реализуется за счет обратной электрохимической реакции, то есть путем изменения полярности электропитания [8].

Главной проблемой в управлении параметрами ЭХУ является краевой эффект, то есть неравномерное распределение электрического заряда по их активной площади. Особенно остро эта проблема проявляется в крупногабаритных ЭХУ, что обусловлено относительно высоким удельным сопротивлением прозрачных проводящих слоев. Из-за неравномерного распределения электрического заряда интенсивность электрохимических процессов в области токоподводящей шины (с краю) будет выше, чем в центральной части ЭХУ, что, в свою очередь, негативно скажется не только на равномерности изменения оптических характеристик, но и на эксплуатационном ресурсе изделий.

Существует два подхода к решению этой проблемы: технологический и технический. Технологический подход основывается на модификации прозрачных проводящих слоев путем разделения их на отдельные зоны управления [9]. К недостаткам подхода можно отнести сложность изготовления таких ЭХУ. В настоящий момент промышленно не выпускаются необходимые стекла с вышеописанными проводящими слоями.

Технический подход состоит в разработке способов управления ЭХУ, позволяющих уменьшить проявление краевого эффекта. Например, постоянным стабилизированным током в гальваностатическом режиме в безопасных диапазонах окислительно-восстановительного потенциала. Важным условием данного метода управления является стабилизация постоянного тока на уровне до 500 мкА/см^2 [10, 11]. Это решение позволяет увеличить эксплуатационный ресурс ЭХУ за счет уменьшения полного тока цепи, однако, существенно не влияет на распределение электрического заряда по их активной площади.

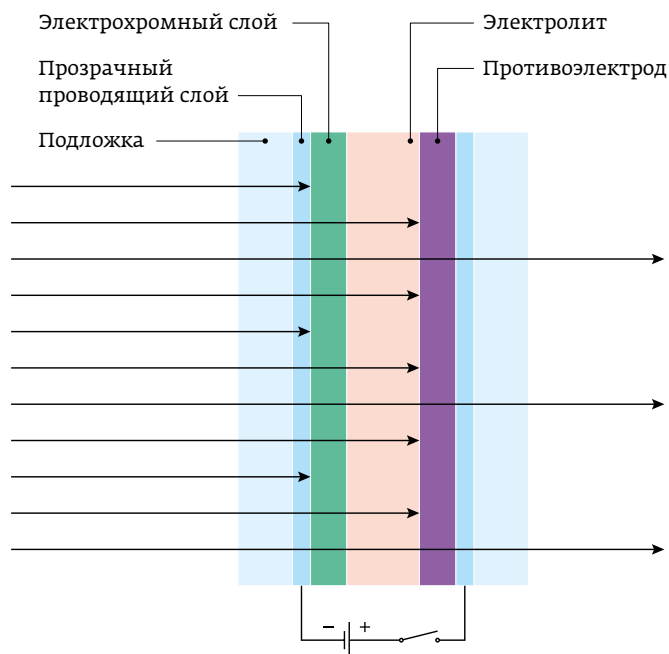


Рис. 1. Структура ЭХУ

Наиболее эффективным на сегодняшний день подходом к управлению ЭХУ является импульсный метод [12, 13], который основывается на определении амплитуды и скважности управляющего напряжения, при которых влияние краевого эффекта на оптические характеристики будет минимальным. Однако у этого решения есть существенный недостаток: он эффективен только для ЭХУ с небольшой внутренней электрической емкостью, которая не может сгладить импульсы управляющего электрического воздействия. По мере увеличения площади устройства и, соответственно, его электрической емкости положительный эффект от этого метода снижается.

Таким образом, существующие подходы к уменьшению влияния краевого эффекта имеют значительные ограничения и не могут в полном объеме решить проблему. Цель работы состояла в разработке метода эффективного управления крупногабаритными ЭХУ под контролем распределения электрического заряда по поверхности прозрачных проводящих слоев. Как следствие, это приведет к выравниванию электрооптических характеристик ЭХУ и увеличит их эксплуатационный ресурс.

Объекты и методы исследования

Для решения задачи минимизации краевого эффекта был разработан зарядно-разрядный метод управления ЭХУ. Суть его заключается в следующем:

электрохромный материал заряжается импульсами с регулируемой скважностью от источника стабилизированного тока. Затем происходит его разряд на стабилизированную токовую нагрузку, то есть осуществляется попеременный заряд и разряд приэлектродных областей. При этом изначально необходимо подобрать частоту заряда-разряда, при которой электрический заряд будет распределяться равномерно по всей площади ЭХУ. Это, в свою очередь, обеспечит одинаковый рабочий оптический диапазон в любой точке измерения.

Реализацию предложенного метода и определение рабочей частоты проводили с помощью специально разработанного программно-технического комплекса [14]. В процессе исследований изучены спектрально-оптические характеристики, измеренные в двух точках: в центре архитектурного электрохромного окна и с краю – рядом с токоподводящей шиной. Регистрацию проводили в максимуме оптического поглощения для конкретного электрохромного материала. Калибровку оптических датчиков осуществляли относительно исходного пропускания образцов.

Проверку эффективности разработанного метода проводили на серии промышленных архитектурных ЭХУ, изготовленных АО «Октоглас» на основе органических электроинициируемых материалов. Активная площадь изделий составляла 0,25 м². Безопасный диапазон окислительно-восстановительных потенциалов для данных систем составлял от -1,2 до +1,2 В. Максимум оптического поглощения в измененном оптическом состоянии приходился на длину волны 680 нм.

В качестве контрольных использовали гальваностатический и импульсный методы управления. Для гальваностатического метода плотность тока поддерживали на уровне 100 мкА/см². При зарядно-разрядном воздействии плотность тока при заряде также составляла 100 мкА/см², а при разряде – 10 мкА/см². Для импульсного режима управления ток не ограничивался.

Эффективность методов оценивалась по разнице оптических контрастов, измеренных в двух точках. Данный параметр рассчитывался по следующей формуле:

$$\Delta K_{\lambda} = K_1 - K_2 = \frac{I_{0(2)} \cdot I_{1(1)} - I_{0(1)} \cdot I_{1(2)}}{I_{0(2)} \cdot I_{0(2)}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $\Delta K_{\lambda}(\%)$ – разность оптического контраста между центральной и краевой областью на длине волны λ ; $K_1(\%)$ и $K_2(\%)$ – оптические контрасты краевой и центральной области ЭХУ соответственно; $I_{0(1)}$ (люкс)

и $I_{0(2)}$ (люкс) – исходные калибровочные значения светопропускания краевой и центральной области ЭХУ соответственно; $I_{1(1)}$ (люкс) и $I_{1(2)}$ (люкс) – значения светопропускания краевой и центральной области ЭХУ в окрашенном состоянии соответственно.

Результаты и их обсуждение

Отсутствие краевых эффектов подразумевает равномерное распределение электрического заряда на активной площади рабочих электродов ЭХУ и, как следствие, одинаковый диапазон изменения спектрально-оптических характеристик в любой точке их измерения. Таким образом, характеристикой отсутствия краевых эффектов будет достижение параметра ΔK_{λ} значения, близкого к нулю.

На рис. 2 представлена гистограмма, которая демонстрирует оптический контраст ЭХУ при различных методах управления: гальваностатическом (ГСТ); импульсном (ИМ); зарядно-разрядном (обозначается цифрами, которые указывают на частоту воздействия в Гц).

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что при использовании гальваностатического метода управления разница оптических контрастов составляет 4,72%. Импульсный метод управления позволяет уменьшить данный параметр до 1,37%. При использовании разработанного зарядно-разрядного метода управления в диапазоне до 1,0 Гц, разница оптических контрастов снижается до 1,17%.

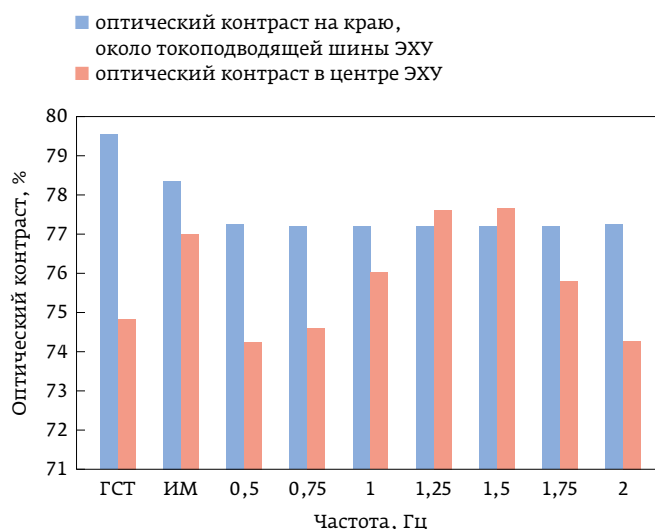


Рис. 2. Гистограмма определения рабочей частоты ЭХУ по оптическому контрасту ($\lambda = 680$ нм) в широком диапазоне частот

С дальнейшим увеличением частоты в диапазоне от 1,0 Гц до 1,75 Гц происходит инверсия данного параметра, то есть значения становятся отрицательными и достигают уровня 0,44%, что характеризует данную область как рабочую. При дальнейшем увеличении частоты происходит повторная инверсия ΔK_λ , и значения снова становятся положительными. Таким образом, в диапазоне от 1,0 до 1,7 Гц значение разницы оптических контрастов минимально.

После этого поиск рабочей частоты для предлагаемого метода управления проводился в более узком диапазоне, с шагом изменения 0,1 Гц (рис. 3). В результате было установлено, что для данной серии ЭХУ рабочая частота составляет 1,1 Гц. При этой частоте разница оптических контрастов не превышает 0,1%.

Механизм минимизации краевых эффектов методом зарядно-разрядного управления еще до конца не изучен, однако предполагается, что он основан на разности резистивно-емкостных характеристик областей ЭХУ, расположенных на краю около токоподводящей шины и в центре. Области ЭХУ, расположенные рядом с токоподводящей шиной, в отличие от центральных, имеют меньшую постоянную времени заряда и разряда. Варьируя частоту зарядно-разрядного управления, а также токи заряда и разряда, можно определить такие параметры воздействия, при которых происходит равномерное распределение электрического потенциала на границе фаз электрохромный материал – электролит.

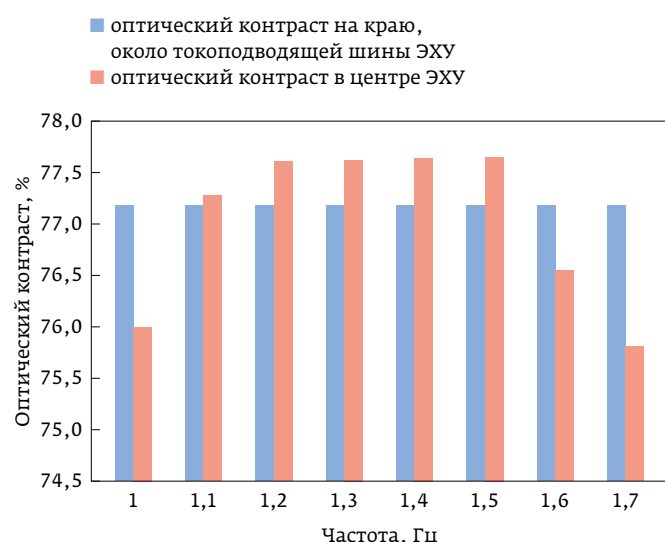


Рис. 3. Гистограмма определения рабочей частоты ЭХУ по оптическому контрасту ($\lambda = 680$ нм) в узком диапазоне частот

Помимо этого, данный механизм может быть связан и с полупроводниковой природой функциональных слоев ЭХУ.

Выводы

Электрохромные устройства представляют собой сложные электрохимические системы, способные обратимо изменять свои спектрально-оптические свойства под действием электрического тока за счет протекания электрохимических окислительно-восстановительных реакций. С увеличением габаритов электрохромных устройств, электрический заряд, необходимый для их электропитания, распределяется неравномерно по поверхности прозрачных проводящих слоев вследствие высокого удельного сопротивления. В результате в ЭХУ образуются области с разной интенсивностью протекания окислительно-восстановительных реакций. Это приводит к неравномерному изменению спектрально-оптических характеристик и более ранней деградации электрохромного материала – так называемому краевому эффекту.

Для решения проблемы авторы разработали зарядно-разрядный метод управления крупногабаритными электрохромными устройствами. В ходе проведенных исследований установлено, что, по сравнению с гальваностатическим методом управления, разработанный метод позволяет уменьшить краевой эффект: с 4,72% до 0,1%, то есть примерно в 47 раз, а по сравнению с управлением электрохромными устройствами с помощью импульсного метода – в 13,7 раз, при этом рабочий оптический диапазон ЭХУ практически не изменился. Разработанный метод управления крупногабаритными электрохромными устройствами был успешно внедрен в производственную эксплуатацию АО «Октогласс».

Литература

1. Попова А. С. Влияние остекления зданий на микроклимат и энергоэффективность. *Вестник магистратуры*. 2020;1-3(100):102-104.
2. Колобкова Е. В., Сохович Е. В., Земко В. С. Влияние условий синтеза электрохромных пленок WO_3 на структуру и термические характеристики. *Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)*. 2013;19(45):3-7.
3. Майоров В. А. Электрохромные стекла с разделенным регулированием пропускания видимого света и ближнего инфракрасного излучения (обзор). *Оптика и спектроскопия*. 2019;126(4):495-514.
4. Макарян И. А., Грачев В. П., Алдошин С. М. О перспективах разработки новых энергосберегающих устройств на основе «умного» стекла. *Нанотехнологии для альтернативной энергетики*. 2012;11(79):98-112.

5. Макарян И. А., Ефимов О. Н., Гусев А. Л. На Мировом рынке «умных» электрохромных устройств. *Альтернативная энергетика и экология*. 2014;3:81–93.
6. Белоусов А. Л., Патрушева Т. Н. Электрохромные оксидные материалы. *Журнал Сибирского федерального университета*. 2014;7:698–710.
7. Княжев Д. П., Московец А. П., Бернт Д. Д., Кравченко В. В. Способ стабилизированного управления высокоскоростным оптическим переключением электрохромного модуля и устройство для его осуществления. Патент России № 2743655. 2020.
8. Рукавина Т. Д., Лин Ч. Переключаемые электрохромные устройства с равномерным переключением и затенением предпочтительных зон. Патент России № 2262729. 2002.
9. Bryan D. G. Control system for electrochromic devices. Патент США № 727215. 2004.
10. Джереми М. Способ и устройство для переключения электрохромных устройств большой площади. Патент России № 2492516. 2009.
11. Ванныков А. В., Грибкова О. Л., Иванов В. Ф., Некрасов А. А., Некрасова Н. В., Савельев В. В. Способ и контроллер управления электрохромными светомодуляторами с тонкопленочными электрохромными и/или заряд-буферными слоями. Патент России № 2655657. 2018.
12. Браун С. К. Контроллер для оптически переключаемых окон. Патент России № 2656013. 2013.
13. Duarte N. B., Valdisera K. M. Pulsed control of an electrochromic panel. Патент США № 2019082093. 2018.
14. Лебедев С. О., Бороздзюля В. Ф., Трухман Г. П. Способ и программно-технический комплекс для управления электрохромными устройствами. Патент России № 22758579. 2020.

References

1. Popova A. S. The influence of building glazing on the microclimate and energy efficiency. *Byulleten' magistratury = Bulletin of the Magistracy*. 2020;1–3(100):102–104.
2. Kolobkova E. V., Sokhovich E. V., Zemko V. S. Effect of synthesis conditions of electrochromic WO₃ films on the structure and thermal characteristics. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta) = News of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University)*. 2013;19(45):3–7.
3. Mayorov V. A. Electrochromic glasses with separate regulation of visible light and near infrared radiation transmission (review). *Optika i spektroskopiya = Optics and Spectroscopy*. 2019;126(4):495–514.
4. Makaryan I. A., Grachev V. P., Aldoshin S. M. On the prospects for developing new energy-saving devices based on “smart” glass. *Nanotekhnologii dlya al'ternativnoy energetiki = Nanotechnology for alternative energy*. 2012;11(79):98–112.
5. Makaryan I. A., Efimov O. N., Gusev A. L. On the World Market of “Smart” Electrochromic Devices. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya = Alternative Energy and Ecology*. 2014;3:81–93.
6. Belousov A. L., Patrusheva T. N. Electrochromic oxide materials. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta = Journal of the Siberian Federal University*. 2014;7:698–710.
7. Knyazhev D. P., Moskovets A. P., Bernt D. D., Kravchenko V. V. Method for stabilized control of high-speed optical switching of an electrochromic module and device for its implementation. Russian Patent No. 2743655. 2020.
8. Rukavina T. D., Lin C. Switchable electrochromic devices with uniform switching and shading of preferred zones. Russian Patent No. 2262729. 2002.
9. Bryan D. G. Control system for electrochromic devices. USA Patent No. 727215. 2004.
10. Jeremy M. Method and apparatus for switching large-area electrochromic devices. Russian Patent No. 2492516. 2009.
11. Vannikov A. V., Gribkova O. L., Ivanov V. F., Nekrasov A. A., Nekrasova N. V., Savelyev V. V. Method and controller for controlling electrochromic light modulators with thin-film

electrochromic and/or charge-buffer layers. Russian Patent No. 2655657. 2018.

12. Brown S. K. Controller for optically switchable windows. Russian Patent No. 2656013. 2013.
13. Duarte N. B., Valdisera K. M. Pulsed control of an electrochromic panel. USA Patent No. 2019082093. 2018.
14. Lebedev S. O., Borodzyulya V. F., Trukhman G. P. Method and software and hardware complex for controlling electrochromic devices. Russian Patent No. 22758579. 2020.

Авторы / Authors

Лебедев Сергей Олегович, ассистент кафедры автоматизации процессов химической промышленности, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет). 190013, Россия, Санкт-Петербург, Московский проспект, дом 24–26/49 литера А. Область научных интересов: методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды.
Lebedev Sergei Olegovich, assistant, Department of Automation of Chemical Industry Processes, Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University). 26, Moskovski ave., St. Petersburg, Russia, 190013. Research interests: methods and devices for monitoring and diagnosing materials, products, substances and the natural environment.
ya.lebedas@yandex.ru
ORCID: 0009-0000-6555-8054

Русинов Леон Абрамович, заведующий кафедрой автоматизации процессов химической промышленности, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет). 190013, Россия, Санкт-Петербург, Московский проспект, дом 24–26/49 литера А. Область научных интересов: автоматизация процессов химической промышленности.
Rusinov Leon Abramovich, Head of the Department of Automation of Chemical Industry Processes, Doctor of Technical Sciences, Professor, Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University). 26, Moskovski ave., St. Petersburg, Russia, 190013. Research interests: automation of chemical industry processes.

Кравченко Владислав Валерьевич, генеральный директор АО «Октогласс», Москва.
Kravchenko Vladislav Valerievich, General Director of JSC Octoglass, Moscow.

Княжев Дмитрий Павлович, технический директор АО «Октогласс», Москва.
Knyazhev Dmitry Pavlovich, technical director of JSC Octoglass, Moscow.

Бернт Дмитрий Дмитриевич, консультант АО «Октогласс», Москва.
Bernt Dmitry Dmitrievich, consultant at JSC Octoglass, Moscow.

Конфликт интересов / Conflict of Interest

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 20.04.2025
Принята к публикации 29.05.2025

7-10 октября 2025

XIV Петербургский международный ГАЗОВЫЙ ФОРУМ



САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

КОНГРЕССНО-ВЫСТАВОЧНЫЙ ЦЕНТР
ЭКСПОФОРУМ

РЕКЛАМА 18+

ОФИЦИАЛЬНАЯ ПОДДЕРЖКА



ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ПАРТНЕР



ГЕНЕРАЛЬНЫЙ СПОНСОР



ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ ПАРТНЕР



ПАРТНЕРЫ



ТЕЛЕКОМУНИКАЦИОННЫЙ
ПАРТНЕР



ОФИЦИАЛЬНЫЙ
СТРАХОВОЙ ПАРТНЕР



ОРГАНИЗАТОР



GAS-FORUM.RU



САМАЯ АКТУАЛЬНАЯ
ИНФОРМАЦИЯ О ПМГФ -
В TELEGRAM-КАНАЛЕ
@GASFORUMSPB





ТЕХНОСФЕРА
РЕКЛАМНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР

100% ГАРАНТИЯ
ПОЛУЧЕНИЯ ВСЕХ НОМЕРОВ



Стоимость 2200 р. за номер
Периодичность: 10 номеров в год
www.electronics.ru



Стоимость 1450 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.photonics.ru



Стоимость 1450 р. за номер
Периодичность: 6 номеров в год
www.j-analytics.ru

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛЫ

www.technosfera.ru



Стоимость 1300 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.lastmile.ru



Стоимость 1300 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.nanoindustry.ru



Стоимость 1800 р. за номер
Периодичность: 4 номера в год
www.stankoinstrument.ru