



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2019-125-7-88-94>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 535.326

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ УЛЬТРАТОНКИХ ПЛЕНОЧНЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ ДЛЯ СЕЛЕКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ

ХОРОШКО Л.С., БАГЛОВ А.В., ГНИТЬКО А.А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 11 ноября 2019

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2019

Аннотация. Целью работы являлось исследование оптических свойств одномерных фотонных кристаллов из ультратонких чередующихся слоев оксидов титана и кремния с различным порядком чередования слоев для формирования дефектных полуволновых слоев в объеме фотонного кристалла. Проведена оптимизация толщин слоев с учетом дисперсии коэффициента преломления и показано, что для формирования 16-слойной структуры фотонного кристалла без полуволнового слоя с фотонной запрещенной зоной в ультрафиолетовой области необходимо использовать слои диоксида титана и оксида кремния толщиной 28,3 и 53,2 нм соответственно. Предложена структура 26-слойного фотонного кристалла толщиной 2130 нм с двумя неэквидистантными полуволновыми слоями, формирующими резонансные полосы пропускания в фотонной запрещенной зоне с максимумами на 550 и 601 нм. Из-за дисперсии коэффициента преломления отношение толщин слоев $\text{TiO}_2:\text{SiO}_2$ изменяется с 1:1,88 в случае 16-слойной структуры с фотонной запрещенной зоной в УФ области до 1:1,5 в случае 26-слойной структуры с фотонной запрещенной зоной в видимом диапазоне. Продемонстрировано влияние фотонно-кристаллической структуры без полуволновых слоев на спектр излучения жидкокристаллического дисплея, изготовленного по технологии *IPS*, с целью снижения интенсивности синей компоненты для повышения безопасности зрения пользователя. Использование фотонного кристалла с двумя полуволновыми дефектными слоями позволяет добиться полного разделения компонент спектра, что возможно применять для модификации спектров крупных жидкокристаллических панелей, так как их изготовление по технологии *AMOLED* является крайне сложной технологической задачей даже для лидеров в данной области.

Ключевые слова: фотонный кристалл, оксидные пленки, диоксид титана, оксид кремния.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Хорошко Л.С., Баглов А.В., Гнитько А.А. Моделирование многослойных ультратонких пленочных фотонных кристаллов для селективных фильтров. Доклады БГУИР. 2019; 7(125):88-94.

MODELING OF MULTILAYER ULTRATHIN-FILM PHOTONIC CRYSTALS FOR SELECTIVE FILTERS

LIUDMILA S. KHOROSHKO, ALEKSEY V. BAGLOV, ANDREY A. HNITSKO

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Submitted 11 November 2019

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2019

Abstract. The aim of the work was to study the optical properties of the one-dimensional photonic crystals from ultrathin alternating layers of titanium and silicon oxides with different order of alternating layers to form defective half-wave layers in the bulk of the photonic crystal. The layer thicknesses were optimized by the dispersion of the refractive index and it was shown that for the formation of 16-layer photonic crystal structure without a half-wave layer with a photonic band gap in the UV region, it is necessary to use layers of titanium dioxide and silicon oxide with a thickness of 28.3 and 53.2 nm, respectively. The structure of the 26-layer photonic crystal with a thickness of 2130 nm with two non-equidistant half-wave layers forming resonant transmission bands in the photonic band gap with peaks at 550 and 601 nm is proposed. Due to the dispersion of the refractive index, the ratio of the thicknesses of TiO₂:SiO₂ layers varies from 1:1.88 in the case of a 16-layer structure with a photonic band gap in the UV region to 1:1.5 in the case of a 26-layer structure with a photonic band gap in the visible range. The effect of a photonic crystal structure without half-wave layers on the emission spectrum of a liquid crystal display manufactured using IPS technology has been demonstrated in order to reduce the intensity of the blue component to increase the safety of the user's vision. The using of the photonic crystals with two half-wave defective layers allows to achieve complete separation of the spectrum components, which can be used to modify the spectra of large liquid crystal panels, their manufacture using AMOLED technology is a very difficult technological task even for leaders in this field.

Keywords: photonic crystal, oxide films, titanium dioxide, silicon oxide.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Baglov A.V., Khoroshko L.S., Hnitsko A.A. Modeling of multilayer ultrathin-film photonic crystals for selective filters. Doklady BGUIR. 2019; 7(125): 88-94.

Введение

Одним из направлений развития технологий для оптических приложений является разработка методик формирования многослойных пленочных структур с показателем преломления, меняющимся с периодом, сравнимым с длиной волны оптического излучения – фотонных кристаллов. Фотонные кристаллы характеризуются наличием так называемой фотонной запрещенной зоны – полосы непрозрачности в определенном диапазоне длин волн, обусловленной брэгговской дифракцией света в таких структурах. Возможность модификации структур с фотонной запрещенной зоной путем легирования одного или нескольких слоев, в том числе люминесцентными ионами лантаноидов, расширяет перечень перспективных областей применения фотонных кристаллов, в частности, для создания оптических резонаторов для усиления света. Технология одномерных фотонных кристаллов интересна также для создания интерференционных фильтров, светоизлучающих диодов, излучающих структур и т. д. Активно изучаются свойства материалов, методы легирования люминесцентными примесями, методы формирования многослойных структур для нанофотоники, в перспективе позволяющие получить управляемые значения ширины фотонной запрещенной зоны в заданном диапазоне длин волн спектра оптического излучения.

Формирование фотонных кристаллов, микрорезонаторов и интерференционных фильтров предполагает чередование слоев с различным показателем преломления в совокупности с точным контролем толщины этих слоев. Множество широко используемых

технологий, таких как вакуумное напыление, молекулярно-лучевая эпитаксия и др., позволяют достаточно точно контролировать толщину получаемых пленочных покрытий. С увеличением разницы в показателе преломления отражение в запрещенной зоне возрастает, что делает комбинацию материалов TiO_2 и SiO_2 перспективными ввиду разницы в значениях их показателей преломления [1]. Моделирование многослойных структур с использованием специального программного обеспечения широко используется для оптимизации толщины пленок, их последовательности и установления результирующих оптических характеристик готовых фотонных кристаллов.

В данной работе исследованы оптические свойства фотонных кристаллов, состоящих из различного числа чередующихся слоев TiO_2 и SiO_2 , с применением модуля геометрической оптики пакета *COMSOL Multiphysics*[®].

Методики проведения исследования

Рассмотрим простейшую структуру фотонного кристалла, включающую два диэлектрических материала А и В, удовлетворяющих четвертьволновому условию:

$$n_A \cdot q_A = n_B \cdot q_B = \frac{1}{4}, \quad (1)$$

где n_A , n_B – коэффициенты преломления, а q_A , q_B – толщины пленок для различных материалов, соответственно.

С увеличением количества чередующихся слоев АВ можно наблюдать эффект образования фотонной запрещенной зоны в спектре пропускания пленочной структуры вида $(AB)_n$ (рис. 1). Повторив два раза подряд один слой в такой структуре, мы формируем так называемый «полуволновой дефект», означающий наличие пика резонансного пропускания на определенной длине волны, т. е. образования энергетического уровня в фотонной запрещенной зоне (рис. 2). Это позволяет использовать такой фотонный кристалл в качестве селективного фильтра, так как изменение толщин четвертьволновых слоев влияет на положение резонансного пика. Полная ширина на половине амплитуды для резонансного пика зависит от количества четвертьволновых слоев рядом с полуволновым дефектом. Если число четвертьволновых слоев с одной стороны полуволнового дефекта не равно числу слоев с другой стороны, то положение резонансного пика смещается в сторону меньшего числа слоев с одновременным уширением профиля, что позволяет управлять его положением в запрещенной зоне. Для получения нескольких резонансных пиков в фотонной запрещенной зоне необходимо соответствующее количество дефектных слоев.

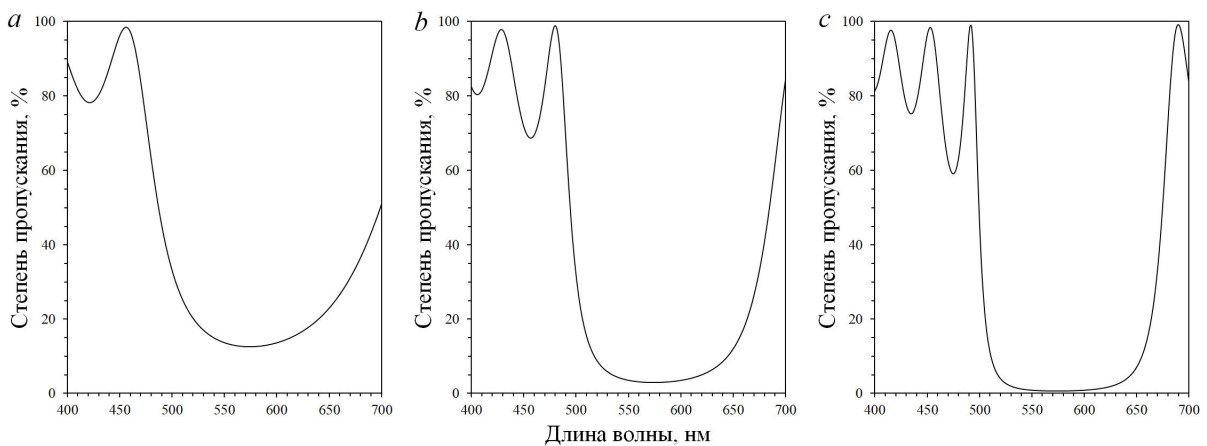


Рис. 1. Образование фотонной запрещенной зоны для структуры $(AB)_n$ с различным значением n :

$a - n = 2$; $b - n = 3$; $c - n = 4$

Fig. 1. The photonic band gap formation for the structure $(AB)_n$ with different values of n :

$a - n = 2$; $b - n = 3$; $c - n = 4$

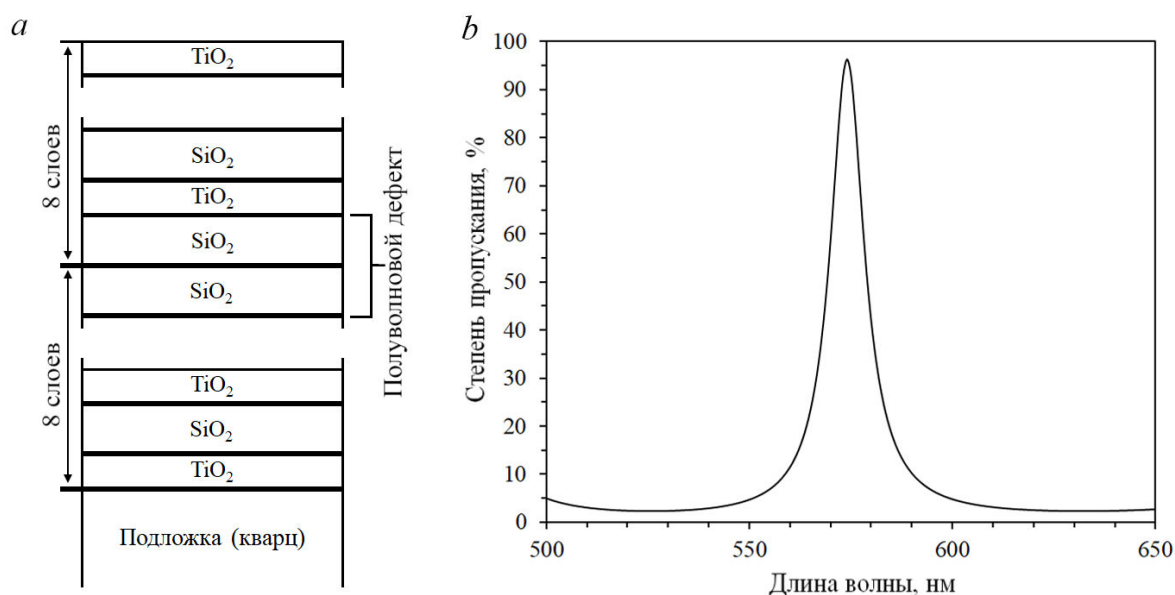


Рис. 2. Типичная структура $(AB)_4(BA)_4$ фотонного кристалла с полуволновым дефектом (a) и связанный с дефектом резонансный пик в фотонной запрещенной зоне (b)

Fig. 2. Typical structure $(AB)_4(BA)_4$ of a photonic crystal with a half-wave defect (a) and a resonant peak associated with the defect in the photonic band gap (b)

Так как формирование таких прецизионных многослойных структур является высокотехнологичной операцией, необходимо заранее проводить оптимизацию параметров фотонного кристалла или фильтра для решения поставленных задач. Для этих целей применяются методы численного моделирования, основанные на различных математических моделях распространения электромагнитного излучения в диэлектрических материалах [2]. В данной работе исследование свойств фотонных кристаллов проводили с помощью метода трассировки лучей, реализованного в модуле «Геометрическая оптика» программного пакета *COMSOL Multiphysics*[®]. В этом методе распространяющиеся электромагнитные волны рассматриваются как лучи, которые могут быть отражены, преломлены или поглощены на границах исследуемой геометрической модели.

В качестве материалов для слоев фотонного кристалла были выбраны оксиды титана и кремния, имеющие хорошие перспективы применения на практике ввиду большого количества литературных данных, описывающих свойства данных материалов, и высокого уровня развития технологии их получения. Учитывалась дисперсия коэффициента преломления в зависимости от длины волны, численные значения были взяты из [3, 4]. Моделируемые фотонные кристаллы представляли собой многослойную структуру чередующихся четвертьволновых слоев TiO_2 и SiO_2 на кварцевых подложках. Интенсивность излучения источника с полихроматическим спектром составляла 1000 Вт/м^2 , число вторичных лучей составляло 5, электромагнитное излучение предполагается неполяризованным.

Результаты и их обсуждение

Комбинация четвертьволновых слоев TiO_2 и SiO_2 демонстрирует фотонно-кристаллические свойства с фотонной запрещенной зоной, конфигурация и положение которой регулируются изменением толщины слоев структуры. Для селективной фильтрации УФ излучения необходимая толщина четвертьволновых слоев составляет 25 нм для TiO_2 и 50 нм для SiO_2 , т. е. соотношение толщин составляет приблизительно 1:2. Для смещения фотонной запрещенной зоны в область больших длин волн необходимо увеличивать толщину

слоев, однако следует учитывать, что дисперсия коэффициента преломления у диоксида титана более выраженная, нежели у оксида кремния, поэтому соотношение толщин в этом случае стремится к 1:1,5. Для 16-слойной пленки $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ толщиной 640 нм пропускание в области длин волн менее 380 нм составляет сотые доли процента (рис 3, *a*). Такая структура может быть использована не только для удаления УФ, но и для снижения интенсивности синей компоненты в дисплеях современных мобильных устройств. На рис. 3, *b* продемонстрирован спектр излучения матрицы дисплея мобильного телефона *realme 3 Pro* (источник – <https://www.ixbt.com/mobile/realme-3-pro-review.html>) с ярко выраженной областью синей люминесценции, изготовленного по технологии *IPS* (от англ. «*In-Plane Switching*»). Применение фотонных кристаллов $(\text{TiO}_2/\text{SiO}_2)_8$ толщиной 640 и 652 нм (толщина слоев 28,3 и 53,2 нм для оксида титана и оксида кремния соответственно, соотношение толщин в этом случае 1:1,88) приводит к, примерно, двукратному ослаблению синей компоненты, практически не влияет на зеленую компоненту и несколько снижает интенсивность красной компоненты.

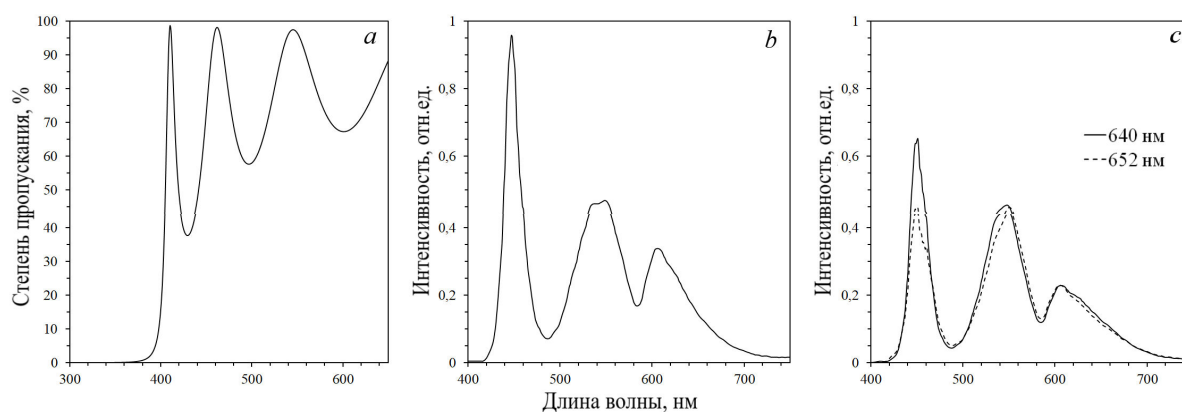


Рис. 3. Спектр пропускания фотонно-кристаллического УФ фильтра толщиной 640 нм (*a*) и спектры излучения дисплея мобильного телефона: исходный (*b*) и с наложением спектров фотонных кристаллов различной толщины (*c*)

Fig. 3. Transmission spectrum of a photonic crystal UV filter with a thickness of 640 nm (*a*) and emission spectra of a mobile phone display: initial (*b*) and superimposed spectra of photonic crystals with various thicknesses (*c*)

Использование материалов с фотонной запрещенной зоной в качестве фильтра позволяет эффективно отсекают заданную область спектра, однако для различных оптических приборов, технологий биоимиджинга, детектирования молекул и биологических клеток необходимо использовать селективные фильтры, содержащие резонансные пики в фотонной запрещенной зоне. Фотонный кристалл, состоящий из 26 слоев TiO_2 и SiO_2 , расположенных по схеме $(\text{AB})_5(\text{BA})_3(\text{AB})_5$, общей толщиной 2130 нм с 2 дефектными полуволновыми слоями обладает спектром пропускания с резонансными пиками в фотонной запрещенной зоне на 550 и 601 нм (рис. 4, *a*). Использование такого фильтра с вышерассмотренным дисплеем позволяет получить спектр с полностью разделенными компонентами (рис. 4, *b*). Отметим, что при этом получается спектр, схожий со спектром *AMOLED* (от англ. «*Active Matrix Organic Light-Emitting Diode*») дисплеев, но с положением пиков, соответствующих применяемым традиционно светодиодам (рис. 4, *c*). Такой подход можно использовать для модификации крупных жидкокристаллических панелей, так как их изготовление по технологии *AMOLED* является крайне сложной технологической задачей даже для лидеров в этой области.

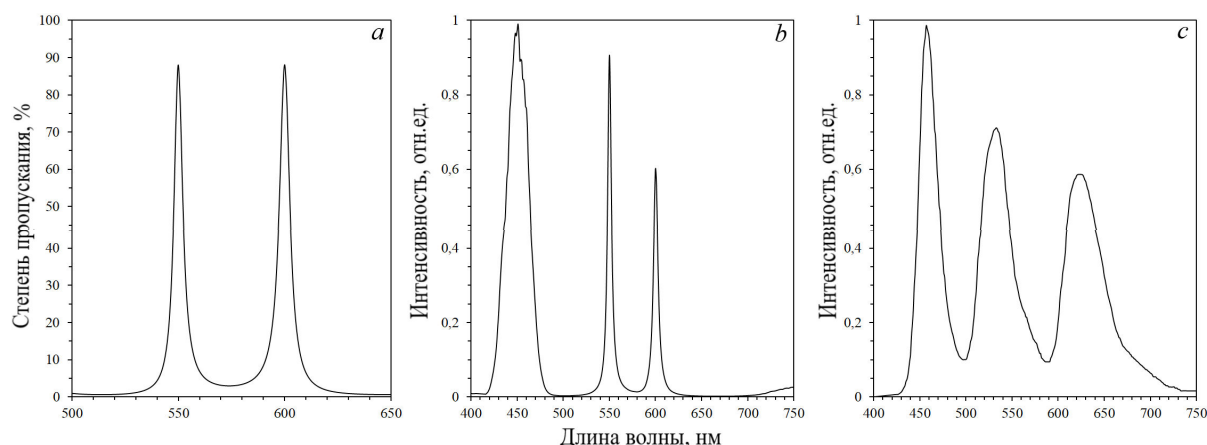


Рис. 4. Спектр пропускания фотонного кристалла с двумя полуволновыми дефектными слоями (a); нормированный спектр излучения IPS дисплея мобильного телефона с применением фотонного кристалла (b); нормированный спектр излучения AMOLED дисплея мобильного телефона (c)
Рис. 4. Transmission spectrum of the photonic crystal with two half-wave defective layers (a); normalized emission spectrum of the IPS display of mobile phone using a photonic crystal (b); normalized emission spectrum of AMOLED display of mobile phone (c)

Заключение

Бездефектные одномерные фотонные кристаллы $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ могут найти применение для ослабления ультрафиолетовой и голубой компоненты излучения дисплеев, в том числе мобильных устройств. Фотонные кристаллы, содержащие дефектный полуволновой слой, демонстрируют свойства полосовых фильтров и могут быть использованы для селекции полезного сигнала, соответствующего максимуму люминесценции изучаемого объекта для различных применений фотоники и квантовой оптики, включая визуализацию и обнаружение объектов, чья люминесценция совпадает с резонансной компонентой спектра селективного фильтра, а также изучение люминесценции в условиях переаспределения плотности фотонных состояний.

Список литературы / References

1. Clara M., Griol A. Photonic Bandgap Glass-Based Structures. *Overall Aspects of Non-Traditional Glasses: Synthesis, Properties and Applications*. Sharjah: Bentham Sci. Publ. 2016; 107-130. DOI 10.2174/9781681082073116010009.
2. Waterman P.C. Symmetry, Unitarity, and Geometry in Electromagnetic Scattering. *Physical Review D*. 1971; 3: 825-829. DOI: 10.1103/PhysRevD.3.825.
3. Sarkar S., Gupta V., Kumar M., Schubert J., Probst P.T., Joseph J., König T.A.F. Hybridized Guided-Mode Resonances via Colloidal Plasmonic Self-Assembled Grating. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2019; 11(14): 13752-13760. DOI: 10.1021/acsami.8b20535.
4. Gao L., Lemarchand F., Lequime M. Refractive index determination of SiO_2 layer in the UV/Vis/NIR range: spectrophotometric reverse engineering on single and bi-layer designs. *J. of the European Optical Society: Rapid publications*. 2013; 8: 13010-1–13010-8. DOI: 10.2971/jeos.2013.13010.

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли вклад в разработку концепции и планирование представленной научной работы, получение данных, их анализ и интерпретацию.

Authors contribution

All authors have equally contributed to the development of the concept and planning provided by research, data acquisition, analysis and interpretation.

Сведения об авторах

Хорошко Л.С., к.ф.-м.н., старший научный сотрудник НИЛ «Нанофотоника» НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Баглов А.В., научный сотрудник Центра 4.11 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Гнисько А.А., магистрант кафедры микро- и нанoeлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел.+375-17-293-88-69;
e-mail: l_khoroshko@bsuir.by
Хорошко Людмила Сергеевна

Information about the authors

Khoroshko L.S., PhD, senior researcher of SRL «Nanophotonics» of R&D Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Baglov A.V., researcher of Center 4.11 of R&D Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Hnitsko A.A., master student of Micro- and Nanoelectronics Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Address for correspondence

220013. Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki st., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-17-293-88-69;
e-mail: l_khoroshko@bsuir.by
Khoroshko Liudmila Sergeevna