

Пассивные стекла в системах наблюдения

Е. Ю. Михтеева¹, С. Ш. Михтеев²✉

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет,
Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ mikhtelev299@mail.ru

Аннотация. Проведен анализ возможностей определения спектра электромагнитного излучения от небесных объектов с помощью оптико-электронной системы телескопа с использованием приемников типа ПЗС. Показано, что при внедрении в фотометрию новых приемников типа ПЗС, эффективность наблюдения за небесными объектами значительно увеличилась, но, не смотря на положительный результат при проведении измерений необходимо нивелировать проблемы при регистрации объектов со слабым излучением. Цель статьи – на основе результатов экспериментальных исследований термомеханических и оптических свойств многокомпонентных стекол дать обоснование по внедрению новых материалов с более широкой областью пропускания излучения в различных спектрах в качестве элементов оптических систем телескопов. В ходе исследований новых оптических материалов с применением метода спектроскопии были найдены оптимальные составы многокомпонентных стекол, позволяющие воспринимать электромагнитное излучение от небесных светил в различных диапазонах инфракрасного спектра. В заключении приводятся результаты исследования, показывающие, что введение в состав многокомпонентного стекла фторидов индия и свинца существенно увеличивает диапазон пропускания, что позволит повысить эффективность работы оптической системы при использовании данных материалов для ее элементов.

Ключевые слова: многокомпонентные стекла, астрономические объекты, приборы с зарядовой связью, телескоп, матрица, фотометрия, пиксель

Для цитирования: Михтеева Е. Ю., Михтеев С. Ш. Пассивные стекла в системах наблюдения // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. Т. 16, № 5. С. 5–11. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-5-5-11.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Passive Glasses in Surveillance Systems

E. Yu. Mikhteeva¹, S. Sh. Mikhtelev²✉

¹ Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia

² Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉ mikhtelev299@mail.ru

Abstract. The analysis of the possibilities of determining the spectrum of electromagnetic radiation from celestial objects using the optical-electronic system of the telescope using CCD receivers is carried out. It is shown that with the introduction of new CCD-type receivers into photometry, the efficiency of observing celestial ob-

jects has significantly increased, but despite the positive result, it is necessary to eliminate problems when registering objects with weak radiation during measurements. The purpose of the article is based on the results of experimental studies of thermomechanical and optical properties of multicomponent glasses to provide a justification for the introduction of new materials with a wider transmission range of radiation in various spectra as elements of optical systems of telescopes. In the course of research of new optical materials using the spectroscopy method, optimal compositions of multicomponent glasses were found, allowing to perceive electromagnetic radiation from celestial bodies in various ranges of the infrared spectrum. In conclusion, the results of the study are presented, showing that the introduction of indium and lead fluorides into the composition of multicomponent glass significantly increases the transmission range, which will increase the efficiency of the optical system when using these materials for its elements.

Keywords: multicomponent glasses, astronomical objects, charge-coupled devices, telescope, matrix, photometry, pixel

For citation: Mikhteeva E. Yu., Mikhteev S. Sh. Passive Glasses in Surveillance Systems // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2023. Vol. 16, no. 5. P. 5–11. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-5-5-11.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. Исследование астрономических объектов с целью получения их физических характеристик осуществляется с помощью многоцветной фотометрии. Например, звезды, как небесные тела с постоянными внутренними термоядерными процессами, излучают огромное количество энергии, способной преодолевать астрономические расстояния, не теряя информации, которую она несет, и характеризовать свой источник.

Для классификации небесных тел и понимания физических процессов, происходящих в них, целесообразно исследовать весь спектр электромагнитного излучения. Тогда можно очень подробно классифицировать небесные тела по температуре, светимости, массе, размерам, химическому составу атмосферы, расстоянию, скорости вращения и даже, в последние два десятилетия, по размеру и составу атмосферы планет [1].

С появлением принципиально новых приемников типа ПЗС (приборы с зарядовой связью) потенциально увеличились возможности фотометрии. Практические фотометрические наблюдения звезд на телескопе АЗТ-8 (диаметр главного зеркала 70 см) позволили проводить измерения с высокой эффективностью. ПЗС-наблюдения ведутся в главном фокусе телескопа, что соответствует светосиле $1/4$.

Работа приемников типа ПЗС основана на внутреннем фотоэффекте. За счет падающего света небесных светил и действия внешнего электростатического поля возникают заряды в так называемых потенциальных ямах полупроводника. Каждая потенциальная яма представляет собой один пиксель (наименьший «квадрат» в изоб-

ражении) – прямоугольный светочувствительный элемент матрицы. Количество пикселей по горизонтали и вертикали, а также физические размеры одного пикселя составляют основные характеристики ПЗС. В пикселях может накапливаться заряд, поэтому ПЗС могут обнаруживать свет от очень тусклых источников, просто накапливая генерируемые светом электроны в течение длительного времени.

Для определения характеристик астрономических объектов используют ПЗС-матрицы с высокой чувствительностью и диапазоном приема излучения, включая ближнюю инфракрасную (ИК) область.

С целью повышения разрешающей способности приемников типа ПЗС и снижения влияния качества неба на фотометрию в них реализован вариант изменения разрешения матрицы, что позволяет повысить качество снимков, реализовать оптимальный вариант разрешения и получить более высокий коэффициент отношения сигнал/шум.

Стандартные ПЗС-матрицы формируют мгновенное поле зрения до $30'$, что позволяет совместить в ПЗС-матрице панорамность и линейность, т. е. преимущества фотографии и фотоэлектрической фотометрии. ПЗС, обладая положительными характеристиками, имеют и отрицательные свойства, присущие ПЗС-приемникам: изготовление матриц требует особых технологий и необходимости постоянно совершенствовать методику наблюдений и порядок обработки принимаемой информации с использованием современных цифровых программ ее обработки для повышения качества снимков небесных светил.

На эффективную работу приемников типа ПЗС при слабом излучении небесных объектов существенное влияние оказывает соотношение сигнал/шум. На снижение этого показателя влияет прежде всего темновой сигнал, который находится в зависимости от температуры матрицы и времени кадра. Нивелировать темновой сигнал удается за счет применения специальных охлаждающих устройств на жидком азоте, а качество регистрации потока излучения от небесных светил малой заметности можно определить выражением

$$K = n_* \frac{d \sqrt{t\eta}}{\gamma \sqrt{S}},$$

где K – отношение сигнал/шум; n_* – поток излучения от объекта, квант/(см² · с); d – диаметр телескопа, см; t – время кадра, с; η – квантовый выход приемника; γ – угловой размер изображения светила на приемнике, рад; S – яркость фона ночного неба, квант/(см² · стер).

Данное выражение показывает, что на качество изображения небесного объекта определенное влияние оказывают характеристики оптической системы телескопа, позволяющие обнаруживать светила, а также его диаметр и свойства приемников, используемых в телескопе [2], [3].

Применение в телескопе приемников типа ПЗС позволяет эффективно проводить астрономические исследования, обнаруживать свет от источников со слабым излучением, накапливая генерируемые светом электроны в течение длительного времени.

Постановка задачи. В связи с тем, что телескопы можно отнести к устройствам пассивного типа, в которых оптико-электронной блок определяет их работу, а следовательно, и качество изображения. К деталям оптико-электронного блока пассивных систем относятся: обтекатели, интерференционные фильтры, объективы, линзы, призмы, конденсоры и т. д. Требования к материалам этих деталей должны основываться на их особых физических и химических свойствах, с учетом их будущей эксплуатации в неблагоприятных климатических условиях. При этом нужно рассмотреть следующие их свойства: спектральное пропускание, показатель преломления и изменение их с изменением температуры; температуру размягчения и плавления; тепловое расширение; плотность (удельный вес); стойкость к воздействию жидкостей на поверхность материала; твердость; теплопроводность; удельную теплоемкость; модуль упругости.

Оптические материалы, используемые в телескопических устройствах, должны иметь улучшенные физические, оптические и технологические характеристики в сравнении с другими материалами, что позволит повысить эффективность получения более качественного изображения небесных тел.

Оптические материалы, применяемые в настоящее время в пассивных системах наблюдения, – германий, плавленый кварц, синтетический сапфир – нетехнологичны при создании оптических элементов и, как следствие, обладают высокой стоимостью, а кварц и сапфир имеют ограничение по верхней границе пропускания в ИК-диапазоне, что отражено в табл. 1 [4].

С учетом этих положений целесообразно в оптических системах использовать материалы технологичные и менее затратные. Следовательно, актуален поиск материалов с улучшенными техническими и экономическими характеристиками для совершенствования возможностей пассивных систем наблюдения.

Среди многокомпонентных стекол, особыми характеристиками выделяются фторидные. Они имеют более высокие оптические характеристики (так как обладают вариабельностью), при введении в их состав ионов редкоземельных металлов в различных концентрациях появляется возможность создать оптические материалы с заданными характеристиками.

Используемые в телескопических устройствах в качестве объективов оптические материалы имеют ограничения по верхней границе спектрального диапазона пропускания в среднем инфракрасном диапазоне и значительное ослабление электромагнитного сигнала. Многокомпонентные стекла на основе фторидов обладают улучшенными оптическими свойствами, что позволяет использовать их при создании объективов оптических устройств телескопов, способствуя повышению качества оптики и, как следствие, получению более качественного изображения небесных светил.

Одно из основных условий для качественного наблюдения за небесными объектами – это возможность приема излучения одновременно в нескольких диапазонах электромагнитного спектра. Следовательно, оптическая система телескопа при внедрении новых материалов должна воспринимать информацию от небесных светил в

нескольких диапазонах: ультрафиолетовом, видимом, инфракрасном, что позволит принимать излучение и от объектов с малой заметностью.

Оптическая система телескопа должна включать в себя оптический блок формирования изображения (объектив), фотоприемник излучения, электронный тракт обработки сигналов в более широком спектре излучения и устройства воспроизведения и анализа изображения. Для получения качественного изображения такие системы должны иметь, прежде всего, приемники типа ПЗС и устройства обработки цифровой информации.

Эффективность оптико-электронной системы определяется возможностью приема электромагнитного излучения в широком диапазоне – от нижней ультрафиолетовой области (0.2...0.4 мкм) до среднего (3...5 мкм) и дальнего (8...14 мкм) инфракрасного диапазонов, причем работу такой системы целесообразно реализовать единым комплектом аппаратуры в реальном масштабе времени [5].

Параметры многокомпонентных стекол, которые могут быть использованы в оптических преобразующих устройствах телескопов, представлены в табл. 2.

Анализ электрических, термомеханических и оптических свойств стекол показывает, что важнейший параметр оптических материалов, применяемых для элементов оптических систем, – это диапазон пропускания электромагнитного излучения, а также коэффициент пропускания многокомпонентных стекол без применения просветляющей пленки, что значительно упрощает технологию их изготовления.

Для эффективной работы пассивной системы наблюдения диапазон пропускания используемых оптических материалов должен перекрывать в различных спектрах ИК-диапазона атмосферные окна прозрачности. К таким материалам можно отнести монокристаллы CaAl_2O_2 , Al_2O_3 , LiF , CaF_2 , MgF_2 , NaF , CdF_2 , BaF_2 , NaCl , KCl , AgCl , KBr , а также перспективный класс оптических материалов – фторидные стекла.

Табл. 1. Параметры оптических материалов инфракрасной области
Tab. 1. Parameters of IR optical materials used for parts of optoelectronic systems

Материал	Формула	Практическая верхняя граница, спектральный диапазон пропускания, мкм	Коэффициент пропускания: с просветлением/без просветления	Показатель преломления	Температура размягчения/плавления, К	Коэффициент теплового расширения, $10^{-6} 1/...^\circ$	Плотность, г/см ²
Плавленый кварц	SiO_2	4.8	0.98/0.95	1.46	1940/1970	0.55	2.2
Алюминат кальция	CaAl_2O_2	1...5	(0.95...0.98)/ (0.7...0.9)	1.62	506/1050	9.3	3.0
Синтетический сапфир	Al_2O_3	6	0.94/0.5	1.76	-2030	по осям 6.66/5.0	3.98
Фтористый литий	LiF	6	(0.95...0.96)/ 0.9	1.5	-870	3.2...33.2	2.6
Фтористый кальций	CaF_2	8	0.96/ (0.93...0.95)	1.44	-1360	± 21	3.18
Фтористый магний	MgF_2	1...9	(0.94...0.98)/ (0.6...0.9)	1.38	-1396	10.7...11.9	3.2
Кремний	Si	1...6	(0.9...0.97)/ (0.55...0.45)	3.5	-1410	-0.06...+2.33	2.33
Германий	Ge	(1.6...6)/ (40...55)	(0.9...0.96)/ (0.5...0.4)	4.11	-936	-0.40...+5.75	5.3
Фтористый натрий	NaF	11	0.92	1.3	-1270	36	2.79
Фтористый кадмий	CdF_2	11	0.9	1.57	-1320	30	6.38
Фтористый барий	BaF_2	13.5	0.84	1.6	-1550	32	4.83
Хлористый натрий	NaCl	15	0.92	1.52	-1070	44	2.16
Хлористый калий	KCl	20	0.9	1.46	-1050	36	1.98
Хлористое серебро	AgCl	22	0.80	2	-730	30	5.56
Бромистый калий	KBr	27	0.92	1.53	-1000	41	2.75
Хлористобромистый таллий	(KRS-6)	30	0.80	2.18	-700	51	7.19

Табл. 2. Термомеханические параметры многокомпонентных стекол
 Tab. 2. Thermomechanical parameters of multicomponent glasses

Состав (молярные доли компонентов), %	Температура стеклования, $\theta_g, ^\circ\text{C}$	Температура кристаллизации, $\theta_c, ^\circ\text{C}$	Температура плавления, $\theta_f, ^\circ\text{C}$	Показатель преломления, n_D	Плотность, $\rho, \text{г/см}^3$	Коэффициент теплового расширения, $\alpha \cdot 10^{-6}, 1/...^\circ$
55ZrF ₄ – 34BaF ₂ – 3LaF ₃ – 5AlF ₃ – 3GaF ₃	308	368	585	1.519	4.71	18
57ZrF ₄ – 34BaF ₂ – 3GdF ₃ – 3AlF ₃ – 3LaF ₃	313	388	533	1.522	4.78	18
40PbF ₂ – 25MnF ₂ – 2AlF ₃ – 3YF ₃ – 30FeF ₃	249	317	524	1.639	5.9	18
40PbF ₂ – 24MnF ₂ – 30GaF ₃ – 4YF ₃ – 2ZrF ₄	263	341	515	1.577	5.2	18
36PbF ₂ – 20MnF ₂ – 37GaF ₃ – 3YF ₃ – 2CuF ₂ – 2SrF ₃	273	336	526	1.576	5.6	18
25BaF ₂ – 12InF ₃ – 18GaF ₃ – 25ZnF ₂ – 10YbF ₃ – 4ZrF ₄ – 6ThF ₄	332	460	576	1.505	5.44	17.1
30BaF ₂ – 22InF ₃ – 8GaF ₃ – 20ZnF ₂ – 20SrF ₃	304	411	579	1.506	5.12	17.0
18BaF ₂ – 32InF ₃ – 8GaF ₃ – 20ZnF ₂ – 20SrF ₃ – 2CaF ₂	306	431	582	1.509	5.2	17.0
32BaF ₂ – 17YF ₃ – 40InF ₃ – 11PbF ₂	304	372	562	1.549	5.5	17.1

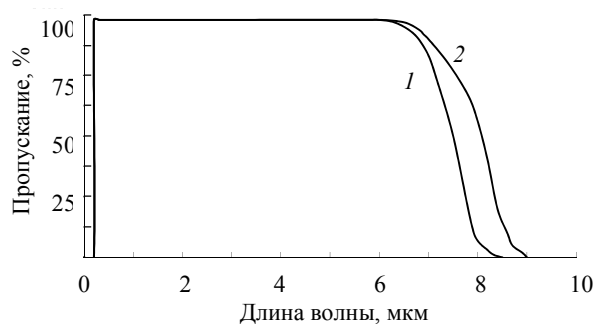


Рис. 1. Диапазоны пропускания стекол с составами:
 1 – 55.2ZrF₄ – 34.8BaF₂ – 3.2GdF₃ – 3.9AlF₃ – 2.9LaF₃;
 2 – 57ZrF₄ – 34BaF₂ – 3GdF₃ – 3AlF₃ – 3LaF₃

Fig. 1. The transmission ranges of glass compositions:
 1 – 55.2ZrF₄ – 34.8BaF₂ – 3.2GdF₃ – 3.9AlF₃ – 2.9LaF₃;
 2 – 57ZrF₄ – 34BaF₂ – 3GdF₃ – 3AlF₃ – 3LaF₃

Метод и результаты. Оптические характеристики многокомпонентных стекол исследовались в институте химии ДВО РАН на спектрофотометре Specord M-80 при 20 °С, при этом погрешность измерений не превышала $\pm 1\%$.

Сравнивая спектры пропускания электромагнитного излучения в системах ZrF₄-BaF₂ фтороцирконатных стекол: 1 – 55.2ZrF₄ – 34.8BaF₂ – 3.2GdF₃ – 3.9AlF₃ – 2.9LaF₃; 2 – 57ZrF₄ – 34BaF₂ – 3GdF₃ – 3AlF₃ – 3LaF₃ (рис. 1), следует указать, что данные многокомпонентные стекла близки по сво-

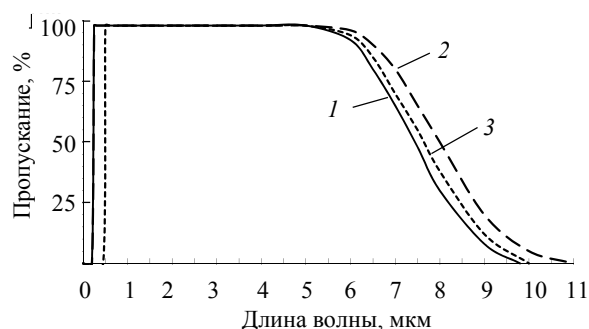


Рис. 2. Диапазоны пропускания стекол с составами:
 1 – 40PbF₂ – 25MnF₂ – 2AlF₃ – 3YF₃ – 30FeF₃;
 2 – 40PbF₂ – 24MnF₂ – 30GaF₃ – 4YF₃ – 2ZrF₄;
 3 – 36PbF₂ – 20MnF₂ – 37GaF₃ – 3YF₃ – 2CuF₂ – 2SrF₃

Fig. 2. The transmission ranges of glass compositions:
 1 – 40PbF₂ – 25MnF₂ – 2AlF₃ – 3YF₃ – 30FeF₃;
 2 – 40PbF₂ – 24MnF₂ – 30GaF₃ – 4YF₃ – 2ZrF₄;
 3 – 36PbF₂ – 20MnF₂ – 37GaF₃ – 3YF₃ – 2CuF₂ – 2SrF₃

ему составу, а спектр пропускания в пределах 50 % лежит от 0.15...0.20 до 7.5 мкм, что объясняется особенностями взаимодействия между компонентами данных стекол и технологией, которая используется при их производстве.

Стекла с составами: 1 – 40PbF₂ – 25MnF₂ – 2AlF₃ – 3YF₃ – 30FeF₃, 2 – 40PbF₂ – 24MnF₂ – 30GaF₃ – 4YF₃ – 2ZrF₄ и 3 – 36PbF₂ – 20MnF₂ – 37GaF₃ – 3YF₃ – 2CuF₂ – 2SrF₃, имеют область

пропускания в инфракрасном диапазоне, незначительно сдвинутую вправо (рис. 2), однако термомеханические свойства этих материалов достаточно низки и отливка объемных образцов из этих стекол проблематична [5].

Анализируя стекла с составами $BThZnYb$ и $BInZnGa$: 1 – $25BaF_2 - 12InF_3 - 18GaF_3 - 25ZnF_2 - 10YbF_3 - 4ZrF_4 - 6ThF_4$; 2 – $30BaF_2 - 22InF_3 - 8GaF_3 - 20ZnF_2 - 20SrF_3$ (рис. 3), можно указать, что 50 % электромагнитного пропускания излучения приходится на длину волны порядка 10 мкм, однако данные материалы не перекрывают атмосферное окно прозрачности в дальней зоне.

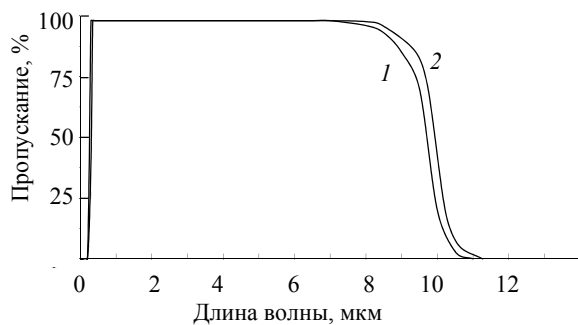


Рис. 3. Диапазоны пропускания стекол с составами: 1 – $25BaF_2 - 12InF_3 - 18GaF_3 - 25ZnF_2 - 10YbF_3 - 4ZrF_4 - 6ThF_4$; 2 – $30BaF_2 - 22InF_3 - 8GaF_3 - 20ZnF_2 - 20SrF_3$
Fig. 3. The transmission ranges of glass compositions: 1 – $25BaF_2 - 12InF_3 - 18GaF_3 - 25ZnF_2 - 10YbF_3 - 4ZrF_4 - 6ThF_4$; 2 – $30BaF_2 - 22InF_3 - 8GaF_3 - 20ZnF_2 - 20SrF_3$

Многокомпонентные стекла с высоким содержанием фторида индия, которые получили название фториндатных стекол, по своим термомеханическим и оптическим свойствам выделяются в лучшую сторону. Во-первых, данные стекла обладают повышенной термической устойчивостью, более технологичны (требуются меньшие скорости охлаждения стеклообразующих расплавов) по сравнению с оптическими материалами. Во-вторых, получение объемных образцов из данных стекол возможно без применения специальных технологий и материалов. Практически можно использовать стекло в системе $BaF_2 - YF_3 - InF_3 - PbF_2$. Для более высокой стабильности и расширения диапазона пропускания в дальнем инфракрас-

ном диапазоне 12...14 мкм (рис. 4) увеличили число компонентов системы. Это стекла с составами: 1 – $18BaF_2 - 32InF_3 - 8GaF_3 - 20ZnF_2 - 20SrF_3 - 2CaF_2$; 2 – $32BaF_2 - 17YF_3 - 40InF_3 - 11PbF_2$.

Многокомпонентные материалы, полученные в системах, содержащих фторид свинца, имеют верхнюю границу пропускания в дальней инфракрасной области 12...14 мкм, это позволит их применять в качестве деталей для оптических систем среднего и дальнего ИК-диапазонов.

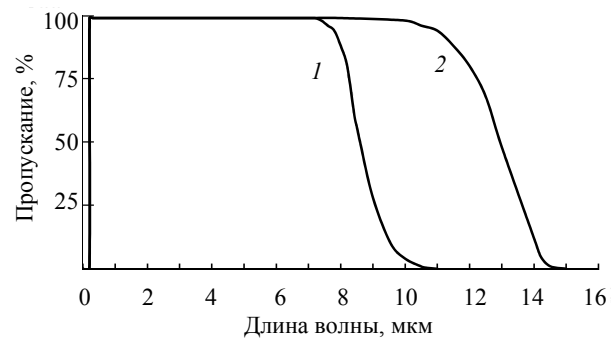


Рис. 4. Диапазоны пропускания стекол с составами: 1 – $18BaF_2 - 32InF_3 - 8GaF_3 - 20ZnF_2 - 20SrF_3 - 2CaF_2$; 2 – $32BaF_2 - 17YF_3 - 40InF_3 - 11PbF_2$
Fig. 4. The transmission ranges of glass compositions: 1 – $18BaF_2 - 32InF_3 - 8GaF_3 - 20ZnF_2 - 20SrF_3 - 2CaF_2$; 2 – $32BaF_2 - 17YF_3 - 40InF_3 - 11PbF_2$

Закключение. Вследствие малой заметности астрономических объектов пассивные системы наблюдения представляют наибольший интерес, однако оптические устройства современных систем наблюдения воспринимают информацию, как правило, в ближнем и среднем инфракрасных диапазонах, что явно недостаточно для приема электромагнитного излучения в других спектрах. Одним из вариантов решения этой задачи может стать внедрение новых материалов в оптико-электронную систему – такими материалами могут быть многокомпонентные стекла. Это позволит создавать оптические системы наблюдения и распознавания небесных объектов в различных диапазонах инфракрасного спектра, причем информация об объектах будет восприниматься в реальном масштабе времени, даже с учетом того, что контрастность целей и фона будет близка.

Список литературы

1. Спектры и светимости звезд / Кафедра астрономии и космической геодезии ТГУ. URL: https://astro.tsu.ru/Astronomy/text/10_3.htm (дата обращения 02.02.2023).

2. Щеглов П. В. Проблемы оптической астрономии. М.: Наука, 1980. 272 с.
3. Дроздовский И. Фотометрия звезд в тесных полях. URL: <http://www.astro.spbu.ru/www/staff/dio/StPhoto/StPhoto.html> (дата обращения 02.02.2023).

4. Оптические материалы для инфракрасной техники / Е. М. Воронкова, Б. Н. Гречушников, Г. И. Дистлер, И. П. Петров. М.: Наука, 1965. 336 с.

5. Михтеев С. Ш., Михтеева Е. Ю. Оптические материалы для пассивных систем наблюдения // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2021, № 3. С. 15–19.

Информация об авторах

Михтеева Елена Юрьевна – канд. хим. наук, доцент кафедры физики РГГМУ. Российский государственный гидрометеорологический университет, ул. Воронежская, д. 79, Санкт-Петербург, 192007, Россия.
E-mail: mikhteeva.elena@mail.ru

Михтеев Сергей Шамильевич – канд. техн. наук, доцент, начальник цикла-старший преподаватель Военного учебного центра СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: mikhteev299@mail.ru

References

1. Spektry i svetimosti zvezd / Kafedra astronomii i kosmicheskoy geodezii TGU. URL: https://astro.tsu.ru/Astronomy/text/10_3.htm (data obrashhenija 02.02.2023). (In Russ.).

2. Shhegl'ov P. V. Problemy opticheskoy astronomii. M.: Nauka, 1980. 272 s. (In Russ.).

3. Drozdovskij I. Fotometrija zvezd v tesnyh poljah. URL: <http://www.astro.spbu.ru/www/staff/dio/StPhoto/StPhoto.html> (data obrashhenija 02.02.2023). (In Russ.).

4. Opticheskie materialy dlja infrakrasnoj tekhniki / E. M. Voronkova, B. N. Grechushnikov, G. I. Distler, I. P. Petrov M.: Nauka, 1965. 336 s. (In Russ.).

5. Mihteev S. Sh., Mihteeva E. Yu. Opticheskie materialy dlja passivnyh sistem nabljudenija // Izv. SPbGETU «LETI». 2021, № 3. S. 15–19. (In Russ.).

Information about the authors

Elena Yu. Mikhteeva – Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor of the Department of Physics of RSHU. Russian State Hydrometeorological University, 79 Voronezhskaya st., Saint Petersburg, 192007, Russia.
E-mail: mikhteeva.elena@mail.ru

Sergey Sh. Mikhteev – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Senior Lecturer and Head of Sector of Military Department, Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: mikhteev299@mail.ru

Статья поступила в редакцию 30.03.2023; принята к публикации после рецензирования 03.04.2023; опубликована онлайн 25.05.2023.

Submitted 30.03.2023; accepted 03.04.2023; published online 25.05.2023.