

УДК 628.94  
EDN: XMYYFRPACS: 42.79.Pw,  
85.60.Gz, 85.60.Jb.

## Оптимизация подсветки гиперспектральных камер на основе SWIR-светодиодов

Е. И. Кобзев, О. И. Рабинович, В. В. Боричок, А. А. Савчук, А. А. Чельный, В. О. Атюнин

*Работа посвящена изучению особенностей использования светодиодов для гиперспектральной подсветки в SWIR-диапазоне, определению оптимального количества, спектрального состава светодиодов и их расположения для оптимальной подсветки конвейерной ленты, а также их расположения для правильного освещения конвейерной ленты.*

*Ключевые слова:* SWIR; подсветка; гиперспектральная камера; светодиод; конвейерная лента.

DOI: 10.51368/2307-4469-2025-13-1-47-54

На текущей стадии развития науки и техники гиперспектральные SWIR (Short Wavelength Infrared) камеры применяются в широком спектре задач сортировки. Одним из важнейших факторов для корректного функционирования системы машинного зрения на основе гиперспектральных SWIR-камер является качественная подсветка рабочей области во всем спектральном диапазоне чувствительности камеры. Для этого необходимо тщательно согласовать систему машинного зрения с использованием подходящих камер и средства подсветки объектов [1].

Большинство современных систем машинного зрения на основе гиперспектральных

SWIR-камер используют в качестве подсветки галогеновые лампы. Такая конструкция подсветки имеет ряд существенных недостатков: большое энергопотребление и тепловыделение, большие габариты и отсутствие возможности корректировки спектра [2]. Одним из возможных путей оптимизации подсветки и системы машинного зрения в целом является применение светодиодов в качестве источника излучения. Однако, индустрия светодиодов SWIR-диапазона находится на раннем этапе развития, и для оптимизации режима работы светодиодов в качестве подсветки гиперспектральной камеры необходимо решить ряд задач. Во-первых, необходимо определить значения границ минимальной и максимальной оптической мощности, падающей на объекты исследования и необходимой для корректной работы гиперспектральной SWIR-камеры в рамках доступного динамического диапазона во всех спектральных линиях. Во-вторых, необходимо разработать методику моделирования распределения оптической мощности излучения светодиодов в пространстве необходимом для корректной работы гиперспектральной SWIR-камеры, с учетом разделения излучения светодиодов по спектральным линиям. Существующие программные решения не предназначены для работы в SWIR-диапазоне с такой точностью. Кроме того, существует определенный дефицит исходных данных для моделирования распределения излу-

Кобзев Евгений Ильич<sup>1</sup>, студент.

E-mail: kobzevve@mail.com

Рабинович Олег Игоревич<sup>1</sup>, доцент, к.ф.-м.н.

Савчук Александр Александрович<sup>2</sup>, нач. лаб., к.т.н.

Боричек Василий Васильевич<sup>2</sup>, инженер.

Чельный Александр Александрович<sup>2</sup>, зам. ген. директора, к.т.н.

Атюнин Владислав Олегович<sup>1</sup>, аспирант.

<sup>1</sup> НИТУ «МИСиС».

Россия, 119049, Москва, Ленинский пр-кт, 4, стр. 1.

<sup>2</sup> АО «Оptron».

Россия, 105187, Москва, ул. Щербаковская, 53.

Статья поступила в редакцию 8.10.2024

После доработки 3.02.2025

Принята к публикации 10.02.2025

Шифр научной специальности: 1.3.11

© Кобзев Е. И., Рабинович О. И., Савчук А. А.,  
Боричек В. В., Чельный А. А., Атюнин В. О., 2025

чения мощных светодиодов SWIR-диапазона. В-третьих, требуется оптимизация количества и режима работы светодиодов. Исходя из граничной оптической мощности для каждой спектральной линии и параметров доступных светодиодов, требуется разработать конструкцию подсветки.

### Методы

В эксперименте использовалась гиперспектральная камера Specim FX17e. Данная камера работает в спектральном диапазоне 900–1700 нм и может захватывать до 224 спектральных полос. Это линейная камера, которая использует метод высокоскоростного сканирования, при котором регистрируется линия спектральной информации на экспозицию (push-broom), для сбора спектральной информации с отдельных линий с разрешением 640 пикселей [2]. Основные технические

характеристики камеры Specim FX приведены в таблице 1. На рисунке 1 представлен график спектральной зависимости квантовой эффективности.

В качестве источников излучения использовались коммерческие мощные светодиоды с пиковой чувствительностью: 940 нм, 1070 нм, 1100 нм, 1150 нм, 1200 нм, 1300 нм, 1400 нм, 1550 нм, 1650 нм, и расходимостью 20 градусов по уровню интенсивности 0,5. Исследование спектра светодиодов проводилось с помощью спектрометра SHD IV Solar. Измерение максимальной мощности проводилось с помощью пироэлектрического измерителя мощности XLP12-3S-H2-D0. Исследуемые светодиоды были припаяны к алюминиевому теплоотводу. Максимальная оптическая мощность определялась из предельного значения на линейном участке Ватт-Амперной характеристики. Некоторые характеристики представлены в таблице 2.

Таблица 1

Характеристика гиперспектральной камеры Specim FX

Параметр	Значения
Рабочий спектральный диапазон	900–1700 нм
Спектральные полосы	224
Максимальное спектральное разрешение	8 нм
Пространственная дискретизация	640 пикс
Частота кадров	670 кадров/сек
Поле зрения	12°, 38° (по умолчанию), 53°, 69°, 75°, 92°
Диафрагменное число	F/1.7
Эффективный размер пикселя	18,7 мкм
Полная емкость	1,44 Мб
Отношение сигнал/шум	1000:1
Время экспозиции	1–466 мкс
Квантовая эффективность	77 % (для $\lambda = 1350$ нм)

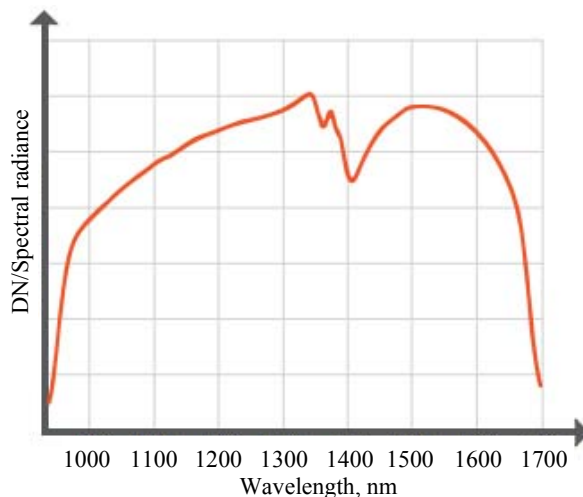


Рис. 1. Квантовая эффективность гиперспектральной камеры Specim FX

Таблица 2

## Значения длин волн и мощности используемых светодиодов

Пиковая длина волны, нм	Максимальная оптическая мощность в непрерывном режиме, мВт
940	753
1070	498
1100	808
1150	677
1200	565
1300	501
1370	191
1400	217
1550	144
1650	109

Для расчета параметров засветки высота камеры над исследуемой областью была принята равной 1 м и объектив с полем зрения  $38^\circ$  и диаметром 50 мм. Исходя из этих данных, была рассчитана площадь, равномерная засветка которой необходима для корректной работы камеры. Необходимая минимальная плотность мощности в области засветки была вычислена из условия, что объект с коэффициентом отражения 0,1 при полностью диффузном механизме отражения, должен обеспечить уровень сигнала, превышающий собственный шум камеры. Время экспозиции камеры было принято 11 мс, так как оно обеспечивает оптимальный баланс между чувствительностью и динамическим диапазоном [4]. Расчет максимальной плотности мощности в области подсветки проводился для аналогичных условий работы камеры, но, исходя из требования, что объект с коэффициентом отражения 1 должен обеспечить уровень сигнала, который лежит в пределах динамического диапазона камеры.

При расчете параметров засветки, высота камеры над исследуемой областью была принята равной 1 м, и объектив с полем зрения  $38^\circ$  и диаметром 50 мм. Находим радиус засвеченной области:

$$r = tg(19^\circ) \times l \quad (1)$$

где  $l$  – высота камеры над исследуемой областью.

Далее, зная радиус ( $r$ ) засвечиваемой области, на которую попадает свет, рассчитывается площадь области засветки камеры:

$$S_{cam} = \pi \times r^2 \quad (2)$$

После чего, рассчитываем площадь полушферы в которой происходит отражение от засвечиваемого объекта:

$$S_{сф} = 2\pi \times r^2 \quad (3)$$

Зная площадь области засветки камеры из уравнения (2) рассчитывается площадь одного пикселя:

$$S_{pix} = \frac{S_{cam}}{640 \times 512} \quad (4)$$

где  $640 \times 512$  – разрешение пикселей.

Поскольку при диффузионном отражении мощность распространяется в полусфере, необходимо определить площадь, которая отражается в объектив камеры:

$$S_{зс} = \frac{\pi \times r^2}{640 \times 512} \quad (5)$$

Далее для определения оптимального режима были проведены расчеты максимальных и минимальных значений мощности для светодиодов в диапазоне длин волн от 900 до 1700 нм. Из имеющихся параметров SWIR-камеры, приведенных в таблице 1 определили количество фотонов по формуле, для примера считается для длины волны 1350 нм:

$$N = \frac{e^-}{\eta} \quad (6)$$

где  $\eta$  – квантовая эффективность камеры.

Считаем энергию одного фотона по формуле:

$$E_{эф} = \frac{h \times c}{\lambda} \quad (7)$$

Зная количество фотонов и энергию фотона на определенной длине волны считаем общую энергию от такого количества фотонов:

$$E_{эф} = \frac{h \times c}{\lambda} \quad (8)$$

Из общей энергии фотонов и времени экспозиции камеры рассчитываем оптическую мощность:

$$P = \frac{K}{t_{\text{эк}}} \quad (9)$$

Рассчитывается плотность мощности, которая попадает на линзу:

$$P_{\text{л}} = \frac{P \times S_{\text{pix}}}{S_{\text{зс}}} \quad (10)$$

После чего, считаем значение мощности, которая отражается в объектив камеры:

$$P_{\text{сф}} = \frac{P_{\text{л}} \times S_{\text{сф}}}{1 \text{ мм}^2} \quad (11)$$

Находим минимальное граничное значение плотности мощности:

$$P_{\text{м}} = \frac{P_{\text{сф}}}{S_{\text{px}}} \quad (12)$$

Для построения диаграммы освещенности была создана программа, моделирующая пространственное распределение плотности мощности светодиодного излучения для спектральных линий шириной 10 нм. Исходными данными для моделирования являются расстояние от светодиода до засвечиваемой поверхности, оптическая мощность, расходимость по ширине при интенсивности 0,5, относительная спектральная плотность мощности светодиодов, а также их положение в пространстве относительно засвечиваемой поверхности. Результатом моделирования является распределение плотности мощности на плоскости, нормальной к направлению излучения светодиодов, для каждой спектральной линии. Засвечиваемая поверхность была выбрана, исходя из поля зрения камеры. При помощи моделирования определялась конструк-

ция светильника, состоящего из минимального набора светодиодов различных длин волн, для создания на некоторой части засвечиваемой поверхности плотности мощности, которая удовлетворяла граничным условиям, то есть минимальная мощность, которая необходима для фиксации излучения гиперспектральной камерой. Светильник считался точечным источником при расположении всех необходимых светодиодов на площади не более 70×70 мм. Высота расположения светильника была 400 мм от засвечиваемой поверхности. С помощью реплицирования светильника разрабатывалось осветительное устройство, для которого достигалась требуемая засветка для всей области поля зрения камеры.

При выборе режима работы светодиодов учитывались непрерывный и импульсный режимы. Использование импульсного режима, при котором характеристики импульса согласованы с частотой съемки и временем экспозиции, значительно увеличивает световой поток светодиода. Это достигается благодаря тому, что короткие импульсы (менее 50 мс) существенно уменьшают квантовую эффективность, связанные с термическими процессами в кристаллах светодиодов [3, 4]. На рисунке 2 представлен результат моделирования распределения плотности оптической мощности в пространстве для светильника, состоящего из 71 светодиода, работающих в непрерывном режиме.

## Результаты и обсуждение

В соответствии с данными, полученными при помощи моделирования и рассчитанного минимального граничного значения плотности мощности в области засветки, было рассчитано количество светодиодов, необходимых при непрерывном режиме и импульсном режиме работы (11 мс, 100 Гц). Результаты представлены в таблице 3 и на рисунке 3.

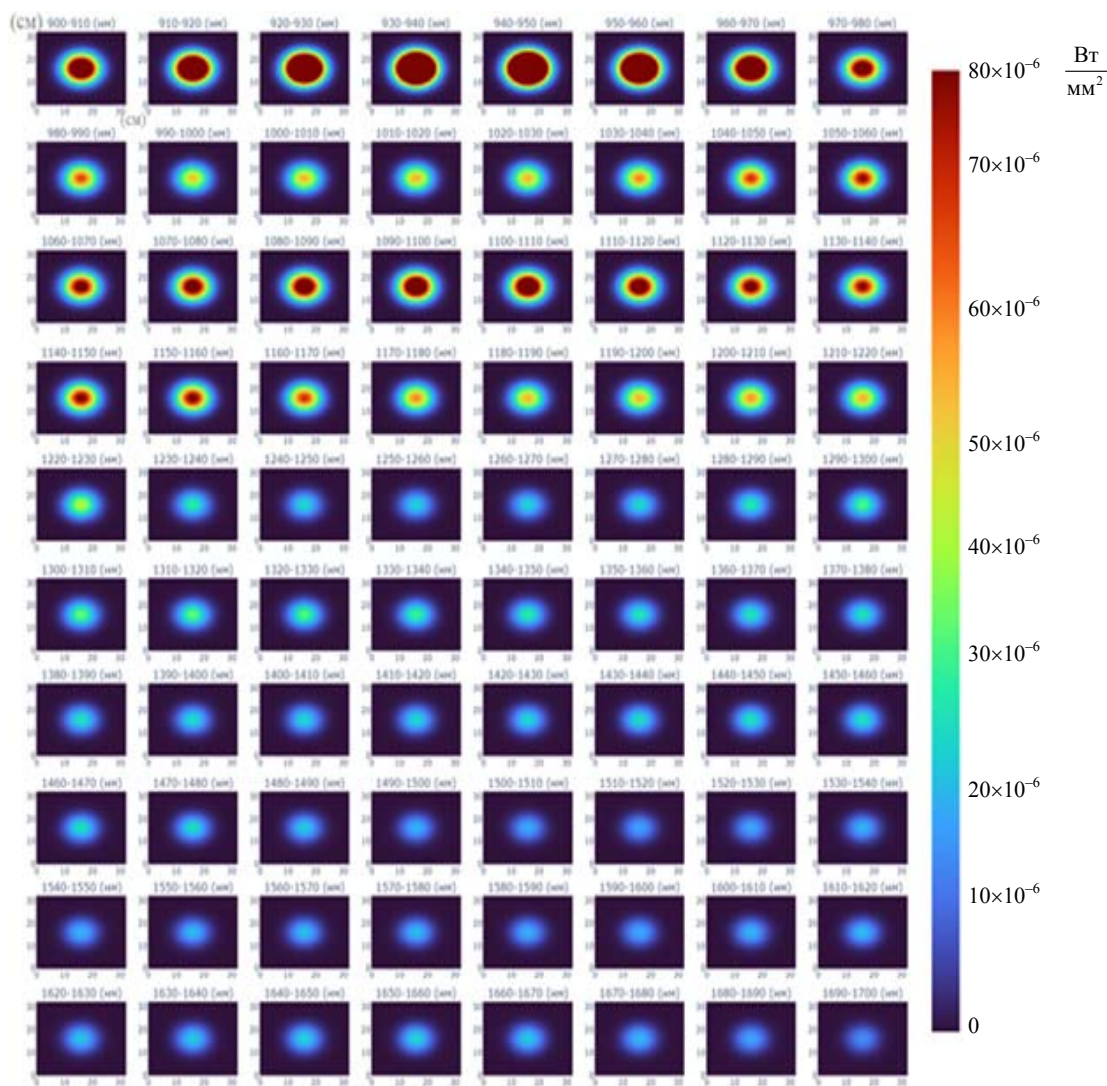


Рис. 2. Моделирование пространственного распределения оптической плотности мощности светильника, состоящего из 71 светоизлучающего диода, работающего в непрерывном режиме

Таблица 3

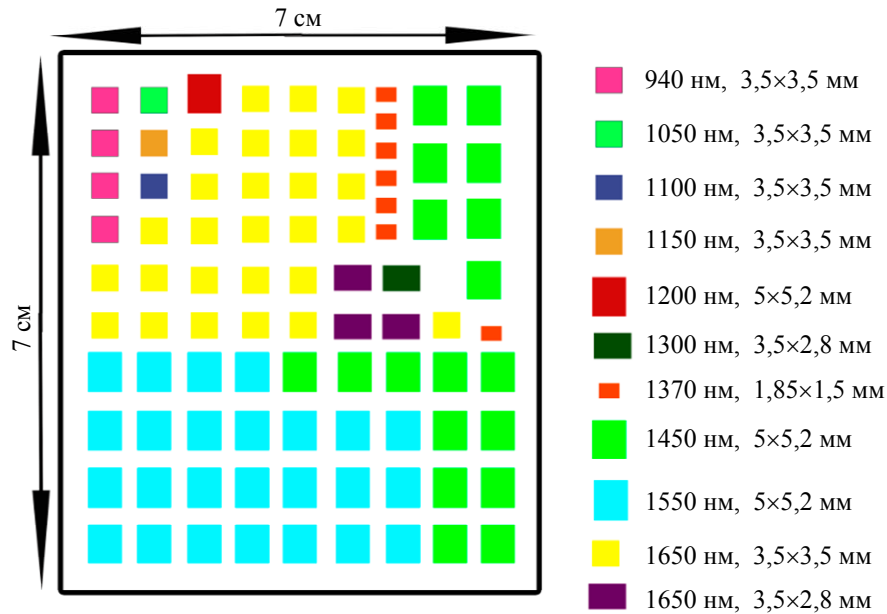
Сравнение мощности и количество светодиодов в непрерывном и импульсном режимах для одного светильника

Длина волны, нм	Непрерывный режим		Импульсный режим	
	$P$ , Вт	кол-во светодиодов	$P$ , Вт	кол-во светодиодов
940	0,75	40	7,5	4
1050	0,5	10	5	1
1100	0,8	4	8	1
1150	0,68	4	6,8	1
1200	0,56	10	5,6	1
1300	0,5	10	5	1
1370	0,19	70	1,9	7
1450	0,12	180	1,2	18
1550	0,07	250	0,7	25
1650	0,11	300	1,1	30

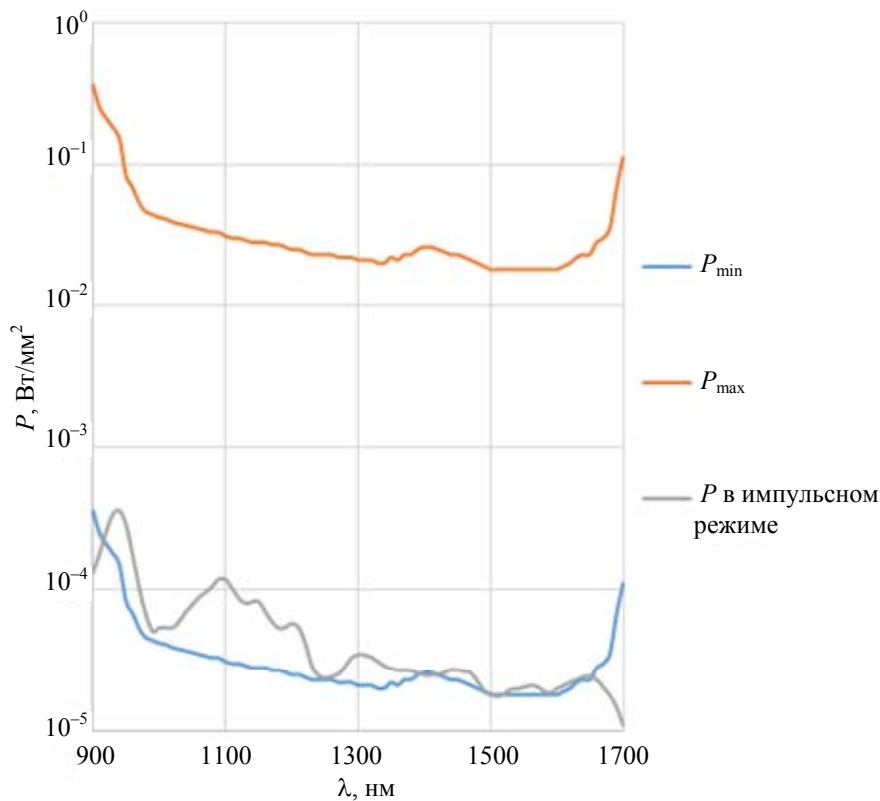
Исходя из размеров оптической мощности и расходимости светодиодов невозможно скомпоновать в светильник, эквивалентный точечному источнику, для работы в непрерывном режиме.

Конфигурация светильника, предназначенного для работы в импульсном режиме,

представлена на рисунке 3. Такое расположение светодиодов позволяет превысить минимальное граничное значение плотности мощности на засвечиваемой поверхности для всех спектральных линий. На рисунке 4 изображен прототип светильника.



а)



б)

Рис. 3. а) – конфигурация светодиодов в светильнике; б) – распределение плотности мощности излучения по спектральным линиям на засвечиваемой поверхности

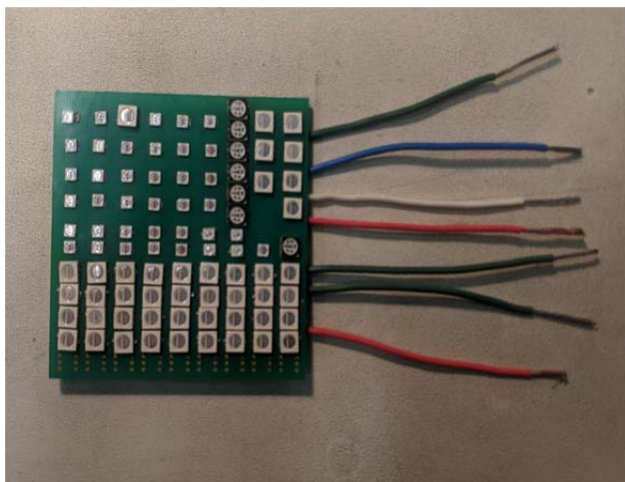


Рис. 4. Прототип светильника

На основании полученной конфигурации светильника было разработано осветительное устройство, позволяющее засветить поле зрения камеры. На рисунке 5 представлено расположение светильников в осветительном устройстве и поле зрения камеры.

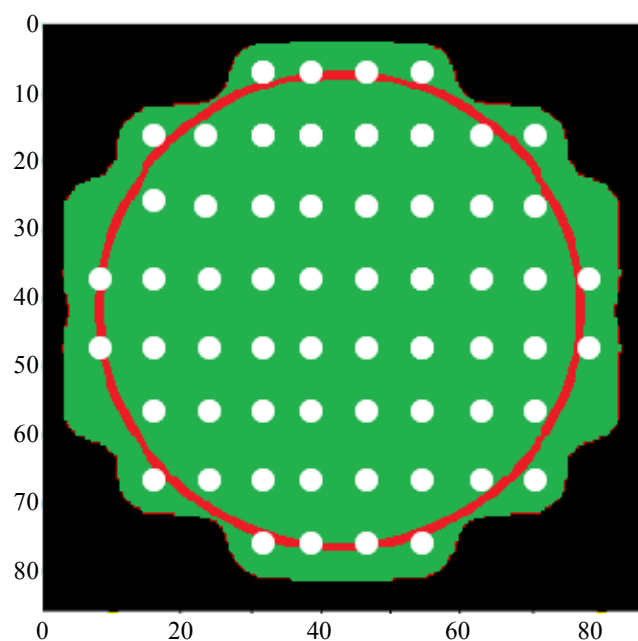


Рис. 5. Моделирование распределения оптической мощности в поле зрения гиперспектральной камеры

Зеленым на рисунке отмечена часть поверхности, для которой выполняется условие минимальной плотности мощности для всех спектральных линий. Согласно полученным результатам, осветительное устройство может применяться для подсветки в системах машинного зрения на основе гиперспектральных камер SWIR-диапазона.

## Выводы

В ходе работы были рассчитаны граничные значения плотности мощности, необходимые для корректной работы гиперспектральной камеры SWIR-диапазона. Исходя из минимальных значений, было проведено моделирование светодиодного светильника, обеспечивающего требуемую плотность мощности для каждой спектральной линии в некоторой области засвечиваемого пространства и осветительного устройства, обеспечивающего засветку всего поля зрения гиперспектральной SWIR-камеры. По результатам оптимизации осветительного устройства было рассчитано требуемое количество и их расположение в нем, а также была показана целесообразность применения импульсного режима работы светодиодов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Yunze He. *et al.* / Infrared Physics and Technology. 2021. Vol. 116.
2. Shaikh M. S., Jaferzadeh K., Thörnberg B., Caselgren J. / Sensors. 2021. Vol. 21. № 11.
3. Stasicki B., Schröder A., Boden F., Ludwikowski K. / SPIE Optical Metrology, 25th – 29th of June 2017, Munich, Germany, 2017.
4. Данилова Т. Н., Журтанов Б. Е., Закгейм А. Л., Ильинская Н. Д., Именков А. Н., Сараев О. Н., Сиповская М. А., Шерстнев В. В., Яковлев Ю. П. / Физика и техника полупроводников. 1999. № 33 (2). С. 239–243.
5. Shaikh M. S., Jaferzadeh K., Thörnberg B. / Sensors (Basel). 2022. doi:10.3390/s22051817. PMID: 35270968; PMCID: PMC8915087.

## LED lighting optimization in the hyper spectral SWIR cameras

*E. I. Kobzev*<sup>1</sup>, *O. I. Rabinovich*<sup>1</sup>, *V. V. Borichok*<sup>2</sup>, *A. A. Savchuk*<sup>2</sup>, *A. A. Chelnyy*<sup>2</sup>  
and *V. O. Atyunin*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National University of Science and Technology MISiS  
Bd. 1, 4 Leninsky Ave., Moscow, 119049, Russia

Optron JSC  
53 Shcherbakovskaya st., Moscow, 105187, Russia

*Received 8.10.2024; revised 3.02.2025; accepted 10.02.2025*

***The work is focused on the peculiarities of LEDs usage for hyperspectral illumination in the SWIR range, determination the optimal quantity and spectral LEDs composition and their position for proper conveyor belt lighting.***

***Keywords:*** SWIR; illumination; hyperspectral camera; LED; conveyor belt lighting.

### REFERENCES

1. Yunze He. et al., Infrared Physics and Technology **116** (2021).
2. Shaikh M. S., Jaferzadeh K., Thörnberg B. and Casselgren J., Sensors **21** (11), (2021).
3. Stasicki B., Schröder A., Boden F. and Ludwikowski K., EOM17 SPIE Optical Metrology, 25th – 29th of June 2017, Munich, Germany (2017).
4. Saraev M. A., Sipovskaya V. V., Sherstnev Y. P. Yakovlev Yu. P. et al., Semiconductors, № 33 (2), 239–243 (1999) [in Russian].
5. Shaikh M. S., Jaferzadeh K. and Thörnberg B., Sensors (Basel). **25**, 22 (5), 1817 (2022). doi: 10.3390/s22051817. PMID: 35270968; PMCID: PMC8915087.