



Методика оценки преимуществ применения светодиодной фитоленты в промышленных тепличных комплексах

М. М. Дегтерева¹, Е. Левин¹, А. Э. Дегтерев¹, А. А. Богданов¹, И. А. Ламкин¹, С. А. Тарасов¹, П. А. Сергеев²

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

² ООО «Светоар», Санкт-Петербург, Россия

Выполнена оценка эффективности светодиодной фитоленты в области фотосинтетически активной радиации и проведено ее сравнение с альтернативными фитооблучателями, применяемыми в промышленных тепличных комплексах. Эффективность фитоленты в области фотосинтетически активной радиации составила 42%, что в 4,7 раза выше эффективности фитолампы полного спектра и в 4,4 раза выше эффективности люминесцентной лампы. Определены спектрально-энергетические характеристики светодиодной фитоленты. Среднее значение плотности фотосинтетического фотонного потока, применимое для выращивания растений (≈ 300 мкмоль / м² / с), достигается при снятии излучения с одного метра фитоленты на расстоянии ≈ 20 см от облучаемой области при пропускании через нее тока. Благодаря высокой эффективности, фитолента позволит улучшить рост различных классов сельскохозяйственных культур в автономных агропромышленных предприятиях, а также позволит снизить затраты на электроэнергию.

Ключевые слова: фитолента, спектральная характеристика, ватт-амперная характеристика, вольт-амперная характеристика,

Assessment Procedure for the Advantages of LED Phyto-Strip Application in the Industrial Greenhouse Complexes

M. M. Degtereva¹, Y. Levin¹, A. E. Degterev¹, A. A. Bogdanov¹, I. A. Lamkin¹, S. A. Tarasov¹, P. A. Sergeev²

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint-Petersburg, Russia

² Svetoyar LLC, Saint-Petersburg, Russia

The efficiency of LED phyto-strip in the field of photosynthetically active radiation has been assessed and compared with the alternative phyto-irradiators used in the industrial greenhouse complexes. The phyto-strip efficiency in the field of photosynthetically active radiation was equal to 42% that was 4.7 times higher than the efficiency of a full-spectrum grow lamp and 4.4 times higher than the efficiency of a fluorescent lamp. The spectral and energy characteristics of the LED phyto-strip have been determined. The average value of the photosynthetic photon flux density applicable for the plant growing process (≈ 300 $\mu\text{mol} / \text{m}^2 / \text{s}$) is achieved when radiation is obtained from one meter of phyto-strip at a distance of ≈ 20 cm from the irradiated area when current is passed through it. Due to its high efficiency, the phyto-strip will improve the growth results of various crops in the autonomous agro-industrial enterprises, and will also reduce the energy costs.

Keywords: phyto-strip, spectral characteristic, watt-ampere characteristic, current-voltage characteristic, efficiency, photosynthetically active radiation, photosynthetic photon flux density

Article received: October 24, 2023
Article accepted: November 07, 2023



эффективность, фотосинтетически активная радиация, плотность фотосинтетического фотонного потока

Статья получена: 24.10.2023

Статья принята: 07.11.2023

ВВЕДЕНИЕ

В условиях быстрого роста населения продовольственный кризис приобрел характер, влияющий на выживание и развитие человечества. Сопутствующие ему эрозия почв, суровые погодные условия, разрушение окружающей среды еще больше усугубляют его воздействие на устойчивость развития стран. Свет сильно влияет на биосинтез и накопление различных вторичных метаболитов растений, которые имеют решающее значение для качества урожая. Спектральный состав света оказывает большое влияние на процессы роста и регенерации и является одним из главных факторов биопродуктивности растений. Светодиоды обладают значительным потенциалом в качестве фитооблучателей, и в свете активного развития агропромышленного комплекса возникает необходимость исследования характеристик выпускаемых промышленностью светодиодных облучателей и оценки их эффективности для увеличения урожайности сельскохозяйственных культур и повышения качества продукции.

Фитооблучатели на основе светодиодов – это новая технология искусственного сельскохозяйственного освещения. Светодиоды имеют огромное количество преимуществ для применения в коммерческом выращивании растений. Их долговечность и прочность обеспечивают более легкую установку и манипуляции по сравнению с обычными осветительными приборами, такими как натриевые лампы высокого давления и люминесцентные лампы, которые имеют хрупкие стеклянные оболочки [1]. Еще одна особенность светодиодов заключается в том, что размер их чипа, как правило, намного меньше самих растений, что позволяет создавать разнообразные конструкции источников света как для культивирования тканей в пробирках с использованием нескольких светодиодов, так и для освещения тепличных культур с использованием больших массивов светодиодов в зависимости от масштабов выращивания [2]. Небольшой размер светодиодов также расширяет разнообразие доступных методов освещения растений, таких как облучение определенных органов и неограниченное направленное облучение [3]. Расположение

INTRODUCTION

In the rapid population growth conditions, the food crisis has taken a form affecting the mankind survival and development. The concurrent soil erosion, extreme weather conditions, and environmental destruction further exacerbate its impact on the developmental sustainability of countries. The light strongly influences the biosynthesis and accumulation of various plant secondary metabolites that are rather critical to the crop quality. The spectral light composition has a great influence on the growth and regeneration processes and is one of the main factors in the plant bioproductivity. The LEDs have substantial potential as the phyto-irradiators. Moreover, in the light of active development of the agroindustrial complex, there is a need to study the specifications of industrially produced LED irradiators and evaluate their efficiency for increasing the crop yields and improving the product quality.

The LED-based phyto-irradiators represent a new technology for artificial agricultural lighting. The LEDs have a huge number of advantages for commercial plant growing applications. Their durability and strength make them easier to install and handle than the conventional lighting fixtures such as the high-pressure sodium lamps and fluorescent lamps with the fragile glass envelopes [1]. Another feature of the LEDs is that their chip size is usually much smaller than the plants that allows for a variety of light source designs, both for tissue cultivation in vitro using multiple LEDs, and for illumination of the greenhouse cultures using the large arrays of LEDs depending on the growing scale [2]. Moreover, the small size of LEDs expands the variety of available plant lighting methods, such as irradiation of specific organs and unrestricted targeted irradiation [3]. The location of lighting sources in close proximity to the plants is also possible due to the use of visible LEDs that do not emit a large amount of heat [4]. Thus, in the light of the active agroindustrial complex development, there is a need to study the specifications of industrially produced LED irradiators and evaluate their efficiency for increasing the crop yields and improving the product quality. The purpose of this paper is to evaluate the efficiency of LED phyto-strip with a spectral composition of 15%B + 40%G + 45%R (B - blue, G - green, R - red radiation) in the field of photosynthetically active radiation for growing the high-quality agricultural products under conditions of artificial germination, to make a conclusion on feasible use of the LED phyto-strip under study, as well as to compare with the alternative phyto-irradiators applied in the industrial greenhouse complexes.

источников освещения в непосредственной близости к растениям также возможно благодаря использованию светодиодов видимого спектра, которые не выделяют большого количества тепла [4]. Таким образом, в свете активного развития агропромышленного комплекса возникает необходимость исследования характеристик выпускаемых промышленностью светодиодных облучателей и оценки их эффективности для увеличения урожайности сельскохозяйственных культур и повышения качества продукции. Целью работы является оценка эффективности светодиодной фитоленты со спектральным составом 15%С+40%З+45%К (С – синее, З – зеленое, К – красное излучение) в области фотосинтетически активной радиации для выращивания качественной сельскохозяйственной продукции в условиях искусственного проращивания, заключение о целесообразности использования исследуемой светодиодной фитоленты, а также сравнение с альтернативными фитооблучателями, применяемыми в промышленных тепличных комплексах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Помимо традиционных источников излучения, к которым относится люминесцентная лампа, для выращивания растений также применяют светодиодные лампы полного спектра или светодиодные фитоленты. Таким образом, в работе проведено сравнение характеристик фитоленты с конкурентами, присутствующими на рынке агрооблучателей.

Светодиодная (СИД) фитолента «Arlight» FITOLUX-A144-10mm 24V Day4000-Red (14 Вт/м, IP20, 2835, 5м) состоит из двух типов светодиодов: первый тип представляет собой белый SMD-светодиод с люминофором (устройство, выполненное в небольшом корпусе с вмонтированным светоизлучающим кристаллом, которое поверхностно монтируется на печатную плату, см. рис. 1 а), содержащий в себе один кристалл. Образец имеет размеры 2,9×3,3×1,0 мм. Напряжение открытия составляет 2,54 В, рабочий диапазон 2,56–2,86 В. Второй тип представляет собой красный SMD светодиод (рис. 1б), содержащий в себе один кристалл. Образец имеет размеры 2,9×3,1×1,0 мм. Напряжение открытия составляет 1,66 В, рабочий диапазон 1,68–1,98 В.

Светодиодная фитолента (1 метр) состоит из 16 секций, содержащих в себе 9 светодиодов: 6 белых и 3 красных (рис. 1с). Соединение секций в ленте – последовательное.

Для проведения сравнения мы использовали светодиодную фитолампу полного спектра со спектральным составом 1%УФ+39%С+15%З+38%К+7%ДК (УФ – ультрафиолетовое излучение, ДК – дальнее

MATERIALS AND METHODS

In addition to the conventional radiation sources that include a fluorescent lamp, the full-spectrum LED lamps or LED phyto-strips are also used for the plant growing process. Thus, this paper provides the comparison of the phyto-strip characteristics with the competitors available on the agro-irradiator market.

The Arlight LED phyto-strip FITOLUX-A144-10mm 24V Day4000-Red (14 W/m, IP20, 2835, 5 m) consists of two types of LEDs: the first type is a white SMD LED with a luminophore (a device made in a small housing with a built-in light-emitting crystal that is superficially mounted on a printed circuit board, see Fig. 1a), containing one crystal. The sample has the dimensions of 2.9×3.3×1.0 mm. The opening voltage is 2.54 V, the operating range of values is 2.56–2.86 V. The second type is a red SMD LED (Fig. 1 b) containing one crystal. The sample has the dimensions of 2.9×3.1×1.0 mm. The opening voltage is 1.66 V, the operating range of values is 1.68–1.98 V.

The LED phyto-strip (1 meter) consists of 16 sections containing 9 LEDs: 6 white and 3 red ones (Fig. 1 c). The strip sections has serial connection.

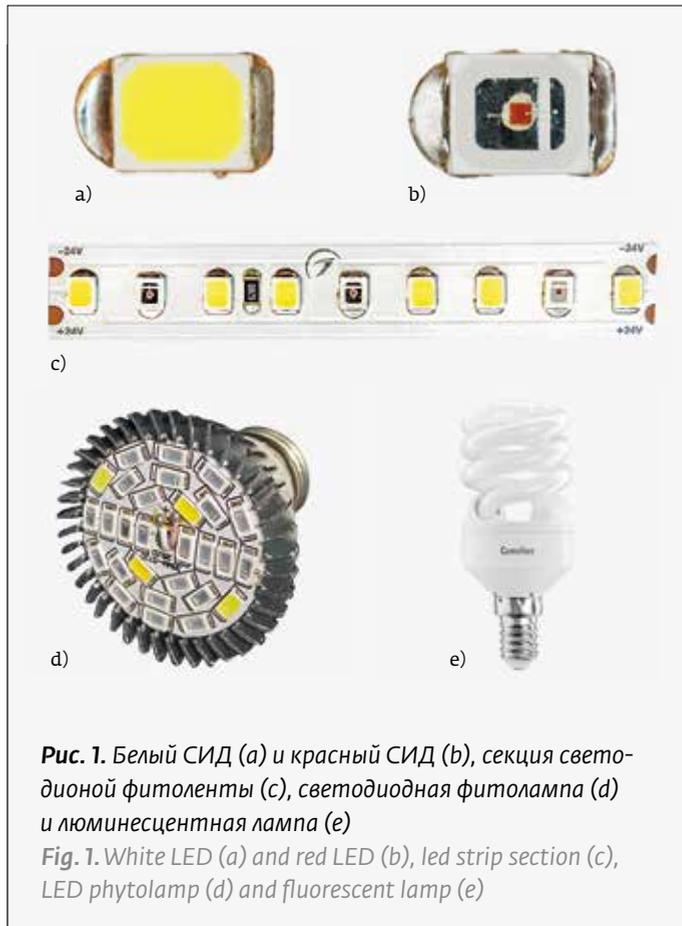


Рис. 1. Белый СИД (а) и красный СИД (б), секция светодиодной фитоленты (с), светодиодная фитолампа (д) и люминесцентная лампа (е)

Fig. 1. White LED (a) and red LED (b), led strip section (c), LED phytolamp (d) and fluorescent lamp (e)

красное излучение) для выращивания растений ALMGD и люминесцентную лампу Camelion 13 Вт 4200 К со спектральным составом 1%УФ + 23%С + 40%З + 33%К + 3%ДК (рис. 1d, f). Для этих ламп были измерены спектральные характеристики и плотности фотосинтетического фотонного потока на разных расстояниях при рабочем напряжении питания.

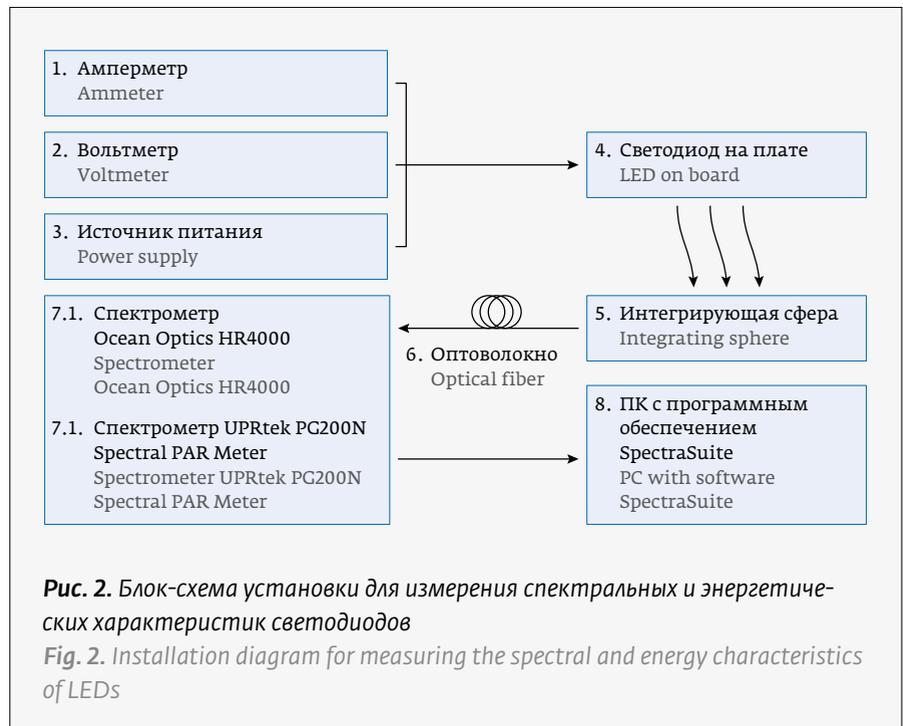
При проведении измерений применялось следующее оборудование: спектрометр Ocean Optics HR4000, обладающий спектральным диапазоном от 200 нм до 1050 нм, и спектрометр UPRtek PG200N Spectral PAR Meter со спектральным диапазоном от 350 нм до 800 нм. Спектрометр Ocean Optics HR4000 совместно с интегрирующей сферой использовался для измерения спектрально-энергетических характеристик фитоленты и отдельных светодиодов, входящих в ее состав, что схематично представлено на рис. 2. Спектрометр UPRtek PG200N Spectral PAR Meter использовался для измерения количества и качества света в области фотосинтетически активной радиации.

ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

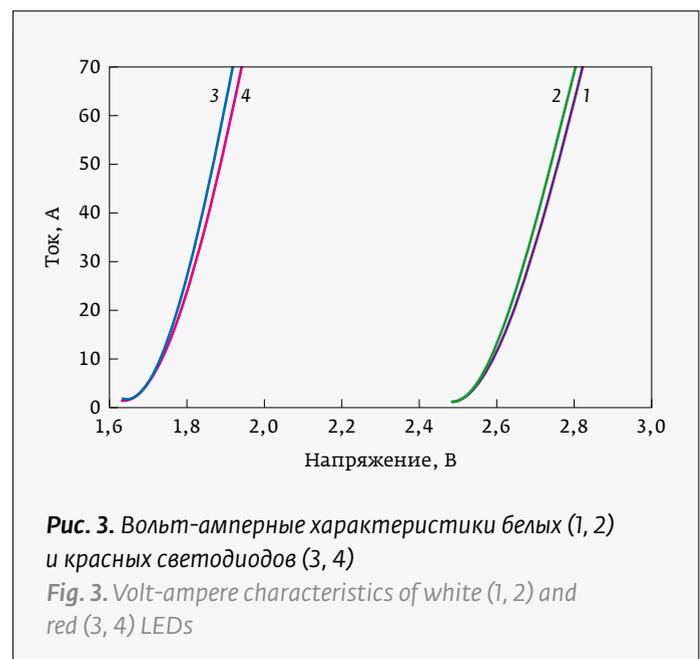
Исследование вольт-амперных характеристик разных СИД (рис. 3) одного типа показало незначительные отличия, являющиеся допустимыми и связанными с особенностями технологического процесса производства светодиодов.

Отличия же ВАХ красных светодиодов от белых вызваны различием материалов изготовления. Так для изготовления красных светодиодов обычно используется твердый раствор AlGaAs, что и обуславливает более низкое рабочее напряжение красных СИД [5]. Белые светодиоды представляют собой широко распространенные белые люминофорные светодиоды, состоящие из желтого люминофора, нанесенного на синий кристалл, изготовленный из твердого раствора на основе InGaN, с чем и связано большее напряжение питания.

Спектр излучения светодиода определяется спектром люминесценции полупроводника, который определяется его зонной структурой, в первую очередь шириной запрещенной зоны [6]. Присутствие квантовых ям, нитей или точек в активной области



For comparison, we used a full spectrum LED grow lamp with a spectral composition of 1%UV + 39%B + 15%G + 38%R + 7%FR (UV - ultraviolet radiation, DC - far red radiation) for growing the ALMGD plants and a fluorescent lamp Camelion 13 W 4200 K with a spectral composition of 1%UV + 23%B + 40%G + 33%R + 3%FR (Fig. 1d, f). For



приводит к тому, что спектр излучения определяется их параметрами, в частности положением уровней размерного квантования [7]. Базовым материалом для коротковолновых источников излучения (0,25–0,6 мкм) является нитрид галлия и его твердые растворы, для СИД на желтую, оранжевую, красную и ближнюю ИК-области спектра (0,58–0,9 мкм) – арсенид галлия и прямозонные твердые растворы в системах (Ga, In, Al)P и (Ga, Al)As. В активной области используются только прямозонные материалы [7]. Для разных диапазонов ширина спектра излучения разная, потому что она определяется распределением носителей заряда в запрещенной зоне.

Мы провели исследования в условиях комнатной температуры при различных токах накачки светоизлучающих структур. Белые люминофорные светодиоды имеют пики в синей (454 нм) и желтой (575 нм) областях спектра. Пиковая длина волны красного светодиода составляет 664 нм.

В совокупности спектры излучения белых и красных светодиодов формируют спектр излучения фитоленты (рис. 4). Спектр излучения люминесцентной лампы (рис. 4) характеризуется множественными пиками, наибольшая интенсивность излучения наблюдается на длинах волн 611 нм; 545 нм и 542 нм. Спектральная характеристика фитолампы (рис. 4) содержит 2 основных пика излучения, лежащих в синей (461 нм) и красной (638 нм) областях.

РЕЗУЛЬТАТЫ

При увеличении тока наблюдается изменение длины волны излучения белых и красных светодиодов. У белых светодиодов это изменение связано с квантоворазмерным эффектом Штарка (КРЭШ). Внутренние пьезоэлектрические поля создают эффект Штарка, снижающий внутреннюю квантовую эффективность. Этот эффект заключается в изменении энергетического спектра атомов, молекул и кристаллов в электрическом поле и проявляется в гетероструктурах с квантовыми ямами (КЯ) в синем сдвиге экситонной линии поглощения КЯ. Сдвиг спектра люминесценции при малых токах обусловлен влиянием упругих напряжений, вызывающих появление деформации решетки на гетеропереходе, и встроенного электрического поля [8]. Под воздействием встроенного электрического поля форма ямы сильно искажается, и появляется КРЭШ. Это приводит к увеличению расстояния между уровнями, что вызывает сдвиг спектра люминесценции в коротковолновую область (рис. 5а). При увеличении внешнего напряжения влияние встроенного

these lamps, the spectral characteristics and densities of the photosynthetic photon flux were measured at various distances at the operating supply voltage.

The following equipment was used for the measurements: Ocean Optics HR4000 spectrometer, with a spectral range from 200 nm to 1050 nm, and a UPRtek PG200N Spectral PAR Meter spectrometer with a spectral range from 350 nm to 800 nm. The Ocean Optics HR4000 spectrometer together with an integrating sphere was applied to measure the spectral and energy characteristics of the phyto-strip and individual LEDs included in its composition to be schematically outlined in Fig. 2. The UPRtek PG200N Spectral PAR Meter spectrometer was used to measure the light quantity and quality in the area of photosynthetically active radiation.

PERFORMANCE OF EXPERIMENTS

A study of the current-voltage characteristics of various LEDs (Fig. 3) of the same type has demonstrated minor differences that are acceptable and related to the peculiarities of the LED production process.

The differences in the current-voltage characteristics of red LEDs from white ones are caused by the differences in the manufacturing materials. Thus, an AlGaAs solid solution is usually applied for the production of red LEDs that determines the lower operating voltage of red LEDs [5]. The white LEDs are the common white luminiferous LEDs, consisting of a yellow luminophore deposited on a blue crystal made from an

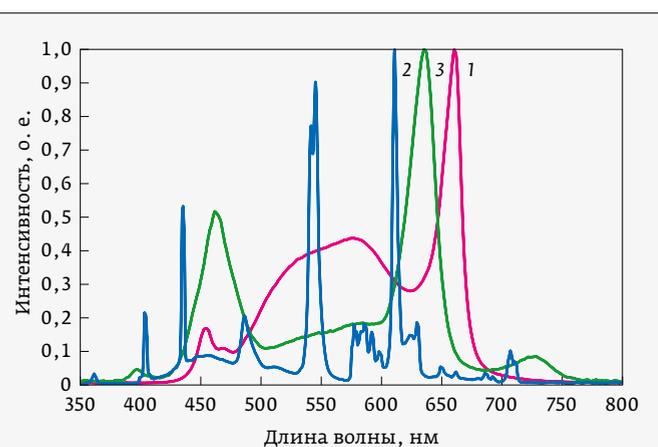


Рис. 4. Спектральные характеристики светодиодной фитоленты (1), люминесцентной лампы (2) и светодиодной фитолампы (3)

Fig. 4. Spectral characteristics of led strip section (1), fluorescent lamp (2) and phytolamp (3)

поля компенсируется, и сдвиг уменьшается. Эффект Штарка наиболее выражен в светодиодах на основе гетероструктур InGaN и AlGaN [9].

Известно, что у красных светодиодов наблюдается смещение пика длины волны излучения: увеличение тока приводит к разогреву активной области кристалла и сдвигу спектральной характеристики в длинноволновую область, что связано с температурным изменением ширины запрещенной зоны [10]. Мы также наблюдали этот эффект (рис. 5b).

Важнейшей характеристикой светодиодов является η – эффективность преобразования электрической энергии в световую. Эффективность светодиода представляет собой его коэффициент полезного действия (КПД) и связана с внешним квантовым выходом электролюминесценции η_e соотношением [7]:

$$\eta = \frac{P_{opt}}{IU} \approx \frac{\hbar\omega}{eU} \eta_e,$$

где $\hbar\omega$ – энергия фотона, соответствующая максимуму спектра излучения, U – приложенное внешнее напряжение.

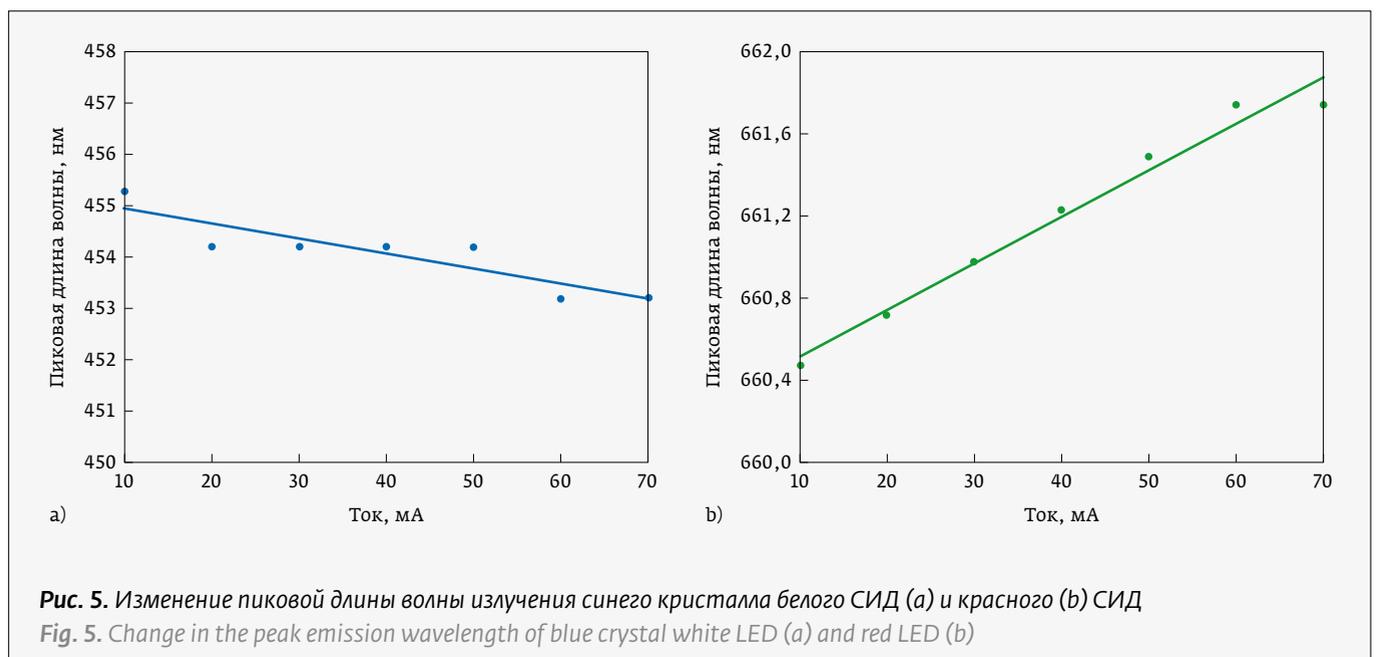
Нами были рассмотрены зависимости эффективности фитоленты от тока (рис. 6), на которых можно наблюдать снижение характеристики, которое связано с уменьшением квантового выхода люминесценции из-за разогрева структуры протекающим током, а также с насыщением излучательной рекомбинации и снижением ее эффективности из-за заполнения энергетических уровней в активной области.

InGaN-based solid solution leading to a higher supply voltage.

The LED radiation spectrum is determined by the semiconductor luminescence spectrum specified by its band structure, primarily the bandgap energy [6]. The availability of quantum wells, wires or dots in the active region leads to the fact that the radiation spectrum is determined by their parameters, in particular by the position of size quantization levels [7]. The base material for the short-wave radiation sources (0.25–0.6 μm) is gallium nitride and its solid solutions; for LEDs in the yellow, orange, red and near-IR spectral regions (0.58–0.9 μm) it is arsenide gallium and direct band gap solid solutions in the (Ga, In, Al)P and (Ga, Al)As systems. Only the direct band gap materials are used in the active region [7]. For different ranges, the radiation spectrum range is various since it is determined by the distribution of charge carriers in the band gap.

We conducted the studies at room temperature at various pump currents of light-emitting structures. The white luminiferous LEDs have peak values in the blue (454 nm) and yellow (575 nm) spectral regions. The peak wavelength of the red LED is 664 nm.

In the aggregate, the radiation spectra of white and red LEDs generate the radiation spectrum of the phyto-strip (Fig. 4). The radiation spectrum of a fluorescent lamp (Fig. 4) is specified by multiple peaks, the highest radiation intensity is observed at the wavelengths of 611 nm, 545 nm and 542 nm. The spectral characteristic of the grow lamp (Fig. 4) contains 2



Важнейшим показателем для использования осветительного прибора в области выращивания растений является то, какое количество света в области фотосинтетически активной радиации (PAR – photosynthetically active radiation) он создает. Поясним для справки, что фотосинтетически активная радиация (ФАР) – это часть электромагнитного излучения, которая может быть использована в качестве источника энергии для протекания процесса фотосинтеза в зеленых растениях.

ФАР измеряется как плотность фотосинтетического фотонного потока (PPFD – Photosynthetic Photon Flux Density), единица измерения $\text{мкмоль}/\text{м}^2/\text{с}$. Несмотря на то, что ФАР охватывает всю видимую часть спектра, наиболее эффективными являются синяя и красная части спектра с вторичными пиками в желтой и оранжевой частях. Ультрафиолетовое (УФ) и инфракрасное (ИК) излучение находятся за пределами видимого диапазона света и не входят в диапазон ФАР. PPFD – плотность фотосинтетического фотонного потока, $\text{мкмоль}/\text{м}^2/\text{с}$. PPFD измеряет количество света ФАР (фотонов), которое попадает на поверхность растения каждую секунду. Чтобы свет был эффективным для выращивания эфиромасличных, овощных и других культур, он должен иметь значения PPFD от 150 до 600 $\text{мкмоль}/\text{м}^2/\text{с}$. Для сравнения отметим, что PPFD естественного солнечного а имеет значение 900–1500 $\text{мкмоль}/\text{м}^2/\text{с}$ в момент, когда солнце находится в зените.

PPF – фотосинтетический поток фотонов (Photosynthetic photon flux), $\text{мкмоль}/\text{с}$. PPF измеряет общее количество ФАР, которое производится системой освещения каждую секунду.

Фотосинтетический поток фотонов рассчитывается по формуле [11]:

$$F_{\text{PAR}} = \int_{400}^{700} \varphi_{\lambda} \frac{\lambda}{hcN_A} d\lambda = K \cdot \int_{400}^{700} \varphi_{\lambda} d\lambda,$$

где F_{PAR} – фотосинтетический поток фотонов, $\text{мкмоль}/\text{с}$; φ_{λ} – спектральная плотность распределения мощности излучения прибора (в области ФАР), $\text{Вт}/\text{нм}$; λ – длина волны, нм ; h – постоянная Планка; c – скорость света; N_A – число Авогадро; K – коэффициент пропорциональности.

Эффективность излучательного прибора в области ФАР рассчитывается по формуле [11]:

$$\eta_{\text{PAR}} = \frac{F_{\text{PAR}}}{P},$$

где η_{PAR} – эффективность в области ФАР, $\text{мкмоль}/\text{Вт}/\text{с}$; P – потребляемая мощность, Вт . С увеличением расстояния PPFD убывает согласно закону обратных квадратов. Общее значение PPFD свето-

main emission peaks in the blue (461 nm) and red (638 nm) regions.

RESULTS

As the current increases, a change in the emission wavelength of white and red LEDs is observed. For white LEDs, this change is related to the quantum-dimensional Stark effect (QDSE). The internal piezoelectric fields develop the Stark effect that reduces the internal quantum efficiency. This effect provides for a change in the energy spectrum of atoms, molecules and crystals in an electric field and takes the form of heterostructures with the quantum wells (QWs) in the blue shift of the QW excitonic absorption line. The shift in the luminescence spectrum at low currents is due to the influence of elastic stresses that cause lattice deformation at the heterojunction, and the built-in electric field [8]. Under the built-in electric field influence, the well shape is greatly distorted and a QDSE is occurred. This phenomenon leads to an increase in the distance between the levels resulting in a shift of the luminescence spectrum to the short-wave region (Fig. 5a). As the external voltage increases, influence of the built-in field is compensated and the shift is decreased. The Stark effect is most pronounced in the LEDs based on the InGaN and AlGaIn heterostructures [9].

It is well-known that red LEDs show a shift in the peak radiation wavelength: an increase in the current level leads to heating of the active crystal region and a shift of the spectral characteristic to

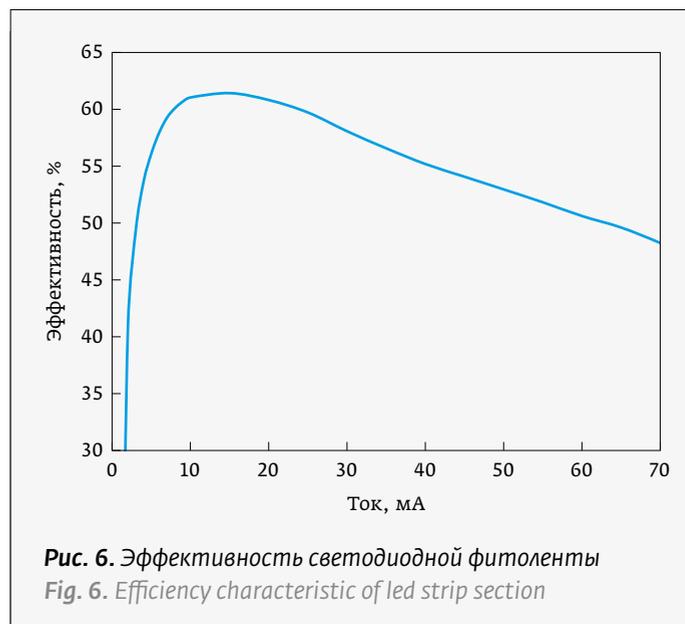


Рис. 6. Эффективность светодиодной фитоленты
Fig. 6. Efficiency characteristic of led strip section



диодной фитоленты (рис. 7 а) возросло, так как возросло количество светодиодов: 6 белых и 3 красных. Среднее значение ФАР, применимое для выращивания растений (≈ 300 мкмоль/м²/с) и достигаемое при рабочем токе, снято с одного метра фитоленты на расстоянии ≈ 20 см (максимально достижимое значение PPFД на данном расстоянии) от облучаемой области.

Мы измерили фотосинтетический поток фотонов осветительного прибора (рис. 7b) при помощи интегрирующей сферы. Внутренняя часть полой сферы имеет белое (фторопласт), обладающее высокой отражающей и рассеивающей способностью. В соответствии со светотехническими требованиями ГОСТ Р 57671-2017 эффективность приборов в области ФАР должна быть не менее 2,0 мкмоль/Дж для приборов, предназначенных для освещения растений сверху. Как видно из рис. 7с, эффективность исследуемой фитоленты в области ФАР при рабочем токе составляет 2,62 мкмоль/Дж, что на 31% выше нормы.

the long-wave region that is related to a temperature change in the band gap [10]. Moreover, we have observed this effect (Fig. 5b).

The most important specification of LEDs is η , namely the efficiency of converting electrical energy into the light energy. The LED efficiency is its coefficient of performance (COP). It is related to the external quantum yield of electroluminescence η_e by the following ratio [7]:

$$\eta = \frac{P_{opt}}{IU} \approx \frac{\hbar\omega}{eU} \eta_e,$$

where $\hbar\omega$ is the photon energy corresponding to the maximum value of the radiation spectrum, U is the applied external voltage.

We have studied dependence of the phyto-strip efficiency on the current (Fig. 6) that show a decrease in the characteristics related to a decrease in the quantum luminescence yield due to the structure heating by the flowing current, as well as to the saturation

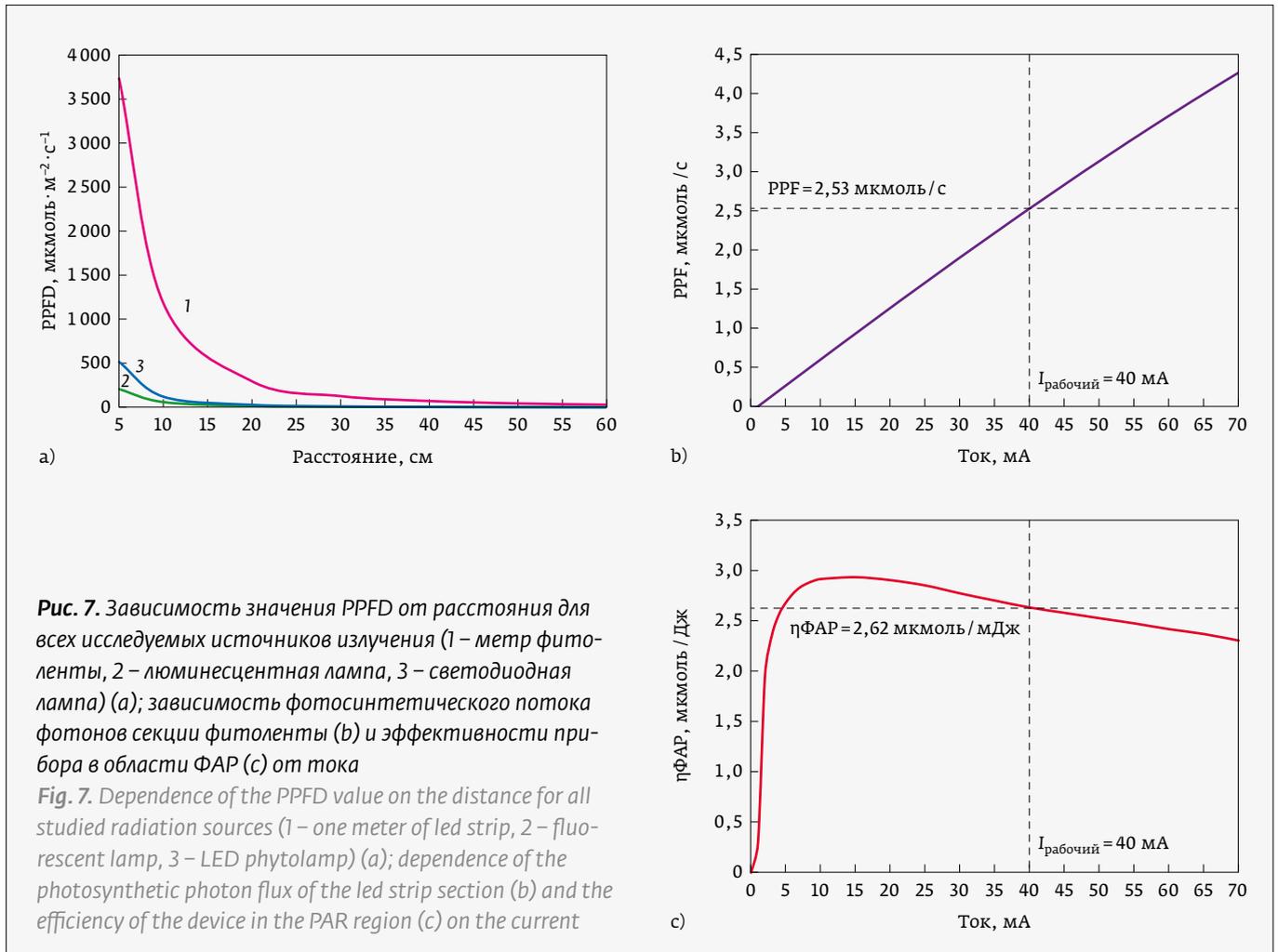


Рис. 7. Зависимость значения PPFД от расстояния для всех исследуемых источников излучения (1 – метр фитоленты, 2 – люминесцентная лампа, 3 – светодиодная лампа) (а); зависимость фотосинтетического потока фотонов секции фитоленты (b) и эффективности прибора в области ФАР (с) от тока

Fig. 7. Dependence of the PPFД value on the distance for all studied radiation sources (1 – one meter of led strip, 2 – fluorescent lamp, 3 – LED phytolamp) (a); dependence of the photosynthetic photon flux of the led strip section (b) and the efficiency of the device in the PAR region (c) on the current

Поглощению света фотосистемами способствуют фотосинтетические пигменты. Кислородные фотосинтезаторы, к ним относятся такие растения, как водоросли и цианобактерии, используют пигменты хлорофилла. Существует несколько различных типов хлорофилла, причем хлорофилл а и хлорофилл б являются наиболее распространенными типами в наземной растительности [12]. Оба пигмента обладают пиками поглощения в красной и синей областях спектра, причем хлорофилл а имеет пики при 430 и 662 нм, а хлорофилл б – при 453 и 642 нм (расположение этих пиков смещается в зависимости от свойств клетки, в которой они находятся).

Водоросли и цианобактерии содержат дополнительные типы пигментов хлорофилла, такие как хлорофиллы с, d и f [13]. Аноксигенные фотосинтезаторы, такие как пурпурные бактерии, зеленые серные бактерии, гелиобактерии и нитчатые аноксигенные фототрофы, используют альтернативные, но родственные пигменты, называемые бактериохлорофиллами [14]. В дополнение к пигментам, улавливающим первичный свет, фотосинтезаторы используют «антенные пигменты», например, каротиноиды, для захвата фотонов с более высокой энергией и передачи их в фотосистему. На рис. 8 показаны спектры поглощения различных хлорофиллов и других светоулавливающих пигментов,

of radiative recombination and decrease in its efficiency due to the energy level filling in the active region.

The most important indicator for use of a lighting device in the field of plant growing is the quantity of light in the area of photosynthetically active radiation (PAR) provided by it. Let us explain that the photosynthetically active radiation (PAR) is a part of electromagnetic radiation that can be used as an energy source for the photosynthesis process in green plants.

PAR is measured as a photosynthetic photon flux density (PPFD), the unit of measurement is $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Although PAR covers the entire visible part of the spectrum, the most efficient are the blue and red spectrum portions with the secondary peaks in the yellow and orange parts. The ultraviolet (UV) and infrared (IR) radiation are outside the visible range of light and are not included in the PAR range. PPFD is a photosynthetic photon flux density, measured by $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. PPFD measures the quantity of PAR light (photons) that hits the plant surface every second. For light to be effective for growing essential oil-containing cultures, vegetables and other crops, it must have the PPFD values from 150 to 600 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. For comparison, it should be noted that the PPFD of natural solar radiation has a value of 900–1500 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ when the sun is high.

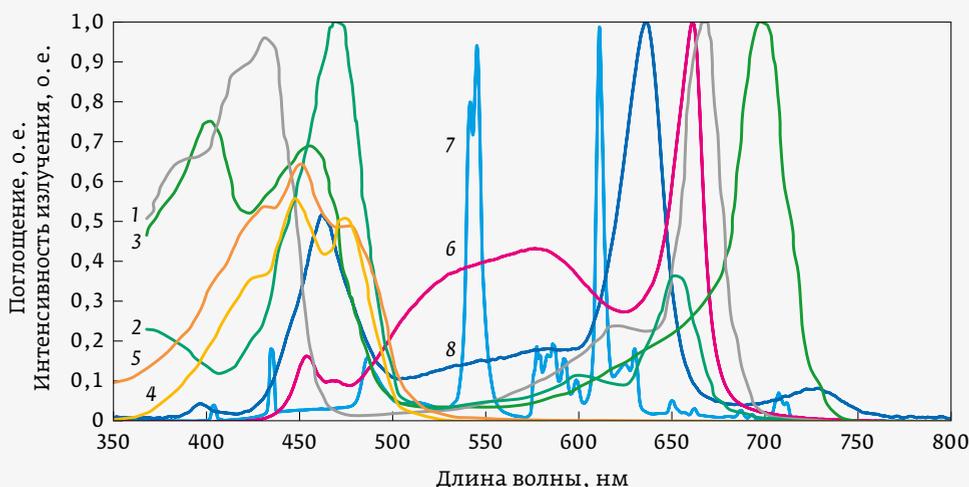


Рис. 8. Спектры поглощения основных фотохимических пигментов растений и спектр излучения светодиодной фитоленты (1 – хлорофилл а, 2 – хлорофилл б, 3 – хлорофилл d, 4 – лютеин, 5 – бета-каротин, 6 – фитолента, 7 – люминесцентная лампа, 8 – светодиодная лампа)

Fig. 8. Absorption spectra of the main photochemical plant pigments and the emission spectrum of the led strip (1 – chlorophyll a, 2 – chlorophyll b, 3 – chlorophyll d, 4 – lutein, 5 – beta-carotene, 6 – led strip, 7 – fluorescent lamp, 8 – LED lamp)



а также спектр излучения фитоленты, люминесцентной и светодиодной ламп. Основная доля ФАР приходится на красный и зеленый диапазоны: светодиодная фитолента имеет соотношение по значению PPFД: 15% синего (400–500 нм) + 40% зеленого (500–600 нм) + 45% красного (600–700 нм).

Оценка влияния формы спектра на эффективность облучательного прибора в области ФАР осуществлялась путем наложения на спектр поглощения пигментов растений, таких как хлорофилл а, хлорофилл b и каротиноиды (рис. 8). Наилучшее перекрытие спектров излучения приборов и поглощения фотохимических пигментов с учетом КПД преобразования электрической мощности в оптическую наблюдается у светодиодных излучателей и составляет 42,2% в отличие от 8,9% у фитолампы и 9,6% у люминесцентной лампы.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Флуоресцентное освещение в сочетании с лампами накаливания поддерживает вегетативный рост растений, окраску, внешний вид и качество продукции, аналогично тому, что происходит при солнечном излучении. Однако наблюдается снижение скорости роста и накопления биомассы. Белые светодиоды в сочетании с красными СИД способствуют накоплению углеводов и повышению эффективности использования энергии по сравнению с люминесцентными лампами на стадии прорастания и последующих стадиях культивирования [15].

Нами было установлено, что среднее значение плотности фотосинтетического фотонного потока, требуемое для эффективного выращивания растений ($\approx 300 \text{ мкмоль/м}^2/\text{с}$), достигается при рабочем токе одного метра фитоленты на расстоянии $\approx 20 \text{ см}$ от облучаемой области. Спектральный состав светодиодной фитоленты с соотношением в области ФАР 15% синего, 40% зеленого и 45% красного света, не считается оптимальным для стимуляции роста зеленых сельскохозяйственных культур. Это согласуется с результатами работ [16, 17], авторы которых показали, что специальным подбором светодиодов, излучающих на определенных длинах волн, можно обеспечить достаточную энергию для стимуляции фотосинтетических пигментов, большее накопление сухой массы. Для максимальной стимуляции роста таких растений более предпочтительным является спектр с более высоким содержанием синего и красного света, которые составляют до 80% от общего PPFД.

Известно, что использование светодиодов по сравнению с такими традиционными устройствами, как натриевые лампы высокого давления

PPF is a photosynthetic photon flux, measured by $\mu\text{mol/s}$. PPF measures the total amount of PAR that is produced by a lighting system every second.

The photosynthetic photon flux is calculated by the following formula [11]:

$$F_{\text{PAR}} = \int_{400}^{700} \varphi_{\lambda} \frac{\lambda}{hcN_A} d\lambda = K \cdot \int_{400}^{700} \varphi_{\lambda} d\lambda,$$

where F_{PAR} is the photosynthetic photon flux, $\mu\text{mol/s}$; φ_{λ} - spectral density of the radiation power distribution of the device (in the PAR region), W/nm ; λ - wavelength, nm ; h - Planck's constant; c - velocity of light; N_A - Avogadro's number; K - proportionality coefficient.

The efficiency of the emitting device in the PAR region is calculated by the following formula [11]:

$$\eta_{\text{PAR}} = \frac{F_{\text{PAR}}}{P},$$

where η_{PAR} is efficiency in the PAR region, $\mu\text{mol/W/s}$; P - power consumption, W . As the distance increases, PPFД is decreased according to the inverse square law. General PPFД value of the LED phyto-strip (Fig. 7a) is increased as the number of LEDs raised: 6 white and 3 red ones. The average PAR value applicable for the plant growing process ($\approx 300 \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$) and achieved at the operating current was obtained from one meter of phyto-strip at a distance of $\approx 20 \text{ cm}$ (the maximum achievable PPFД value at a given distance) from the irradiated area.

We measured the photosynthetic photon flux of the lighting device (Fig.7b) using an integrating sphere. The internal part of the hollow sphere is white (fluoroplastic) that provides high reflective and scattering properties. In accordance with the lighting requirements of GOST R 57671-2017, the efficiency of devices in the PAR region must be at least $2.0 \mu\text{mol/J}$ for the devices intended to illuminate the plants from above. As it is shown by Fig. 7c, the efficiency of phyto-strip under study in the PAR region at an operating current is $2.62 \mu\text{mol/J}$ that is 31% higher than the normal value.

The light absorption by the photosystems is promoted by the photosynthetic pigments. The oxygen photosynthesizers including the plants such as algae and cyanobacteria, use the chlorophyll pigments. There are several different types of chlorophyll, while chlorophyll a and chlorophyll b being the most common types for the ground vegetation [12]. Both pigments have absorption peaks in the red and blue spectral regions, while chlorophyll a having the peaks at 430 and 662 nm, and chlorophyll b having the peaks at 453 and 642 nm (the location of these peaks is dis-



или люминесцентные лампы, дает более высокую энергетическую эффективность. Эффективность воздействия излучения фитоленты на растения, оцененная в работе, существенно превосходит эффективность воздействия альтернативных источников излучения и составляет 42%, что в 4,7 раза выше эффективности фитолампы полного спектра в области ФАР и в 4,4 раза выше эффективности люминесцентной лампы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Светодиодная фитолента со спектральным составом: 15% синего, 40% зеленого и 45% красного света, обладая высокой эффективностью, возможностью диммирования (регулировка яркости освещения) и спектром излучения, соответствующим спектрам поглощения пигментов растений, делают устройство наиболее предпочтительным для использования в агропромышленных предприятиях для увеличения продуктивности сельского хозяйства. При этом следует учитывать также простоту и безопасность монтажа осветительного прибора. Высокая эффективность фитоленты позволит повысить качество роста разнообразных классов сельскохозяйственных культур в автономных агропромышленных предприятиях. В дальнейших исследованиях планируются исследования методов сокращения энергозатрат при использовании светодиодной фитоленты в тепличных промышленных комплексах.

REFERENCES

1. **Chang M.-H., Das D., Varde P.V., Pecht M.** Light emitting diodes reliability review. *Microelectronics Reliability*. 2012; 52(5): 762–782. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2011.07.063>
2. **Yang Z.-C., Kubota C., Chia P.-L., Kacira M.** Effect of end-of-day far-red light from a movable LED fixture on squash rootstock hypocotyl elongation. *Scientia Horticulturae*. 2012; 136: 81–86. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scientia.2011.12.023>
3. **Tennessen D. J., Singsaas E. L., Sharkey T. D.** Light-emitting diodes as a light source for photosynthesis research. *Photosynthesis Research*. 1994; 39: 85–92. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00027146>
4. **Fujiwara K., Sawada T., Kimura Y., Kurata K.** Application of an automatic control system of photosynthetic photon flux density for LED–low light irradiation storage of green plants. *HortTechnology*. 2005; 15: 781–786. DOI: <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.15.4.0781>
5. **Gong Z., Jin Sh., Chen Y.** Size-dependent light output, spectral shift, and self-heating of 400 nm InGaN light-emitting diodes. *Journal of Applied Physics*. 2010; 107(1): 013103–013103–6. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3276156>
6. **Bochkareva N. I., Gorbunov R. I., Klochkov A. V., Lelikov Yu. S., Martynov I. A., Rebane Yu. T., Belov A. S., Shreter Yu. G.** Optical properties of blue light-emitting diodes in the InGaN/GaN system at high current densities. *Physics of Semiconductor Devices*. 2008; 42: 1384–1390. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063782608110225>
7. **Pikhtin A. N.** Quantum and Optical Electronics / Textbook. – M.: Abris. 2012. 656 p. (In Russ.).
Пикhtин А. Н. Квантовая и оптическая электроника / Учебник. – М.: Абрис, 2012. 656 с.
8. **Romanovich M. M., Lamkin I. A., Tarasov S. A.** Accounting the quantum-confined Stark effect on the determination of the active LED region temperature. *Journal of Physics Conference Series*. 2019; 1400: 066046. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1400/6/066046>
9. **Menkovich E. A., Tarasov S. A., Lamkin I. A., Suihkonen S., Svensk O., Lipsanen H.**

placed depending on the cell properties where they are located).

Algae and cyanobacteria contain additional types of chlorophyll pigments such as chlorophylls c, d and f [13]. Anoxygenic photosynthesizers such as purple bacteria, green sulfur bacteria, heliobacteria and filamentous anoxygenic phototrophs, used the alternative but related pigments called “bacteriochlorophylls” [14]. In addition to the pigments that capture primary light, the photosynthesizers apply “the antenna pigments”, such as carotenoids, to capture higher energy photons and transmit them to the photosystem. Figure 8 shows the absorption spectra of various chlorophylls and other light-catching pigments, as well as the radiation spectrum of phyto-strip, fluorescent lamps and LED lamps. The main PAR share falls on the red and green ranges: LED phyto-strip has a following PPF ratio: 15% blue (400–500 nm) + 40% green (500–600 nm) + 45% red (600–700 nm).

The spectrum shape influence on the efficiency of irradiation device in the PAR region was assessed by superimposing the plant pigments such as chlorophyll a, chlorophyll b and carotenoids, on the absorption spectrum (Fig. 8). The best overlap between the radiation spectra of devices and the absorption spectra of photochemical pigments, with due regard to the efficiency of converting electrical power into the optical power, is observed for the LED emitters and is equal to 42.2%, in contrast to 8.9% for a grow lamp and 9.6% for a fluorescent lamp.

DISCUSSION OF RESULTS

The fluorescent lighting, combined with the incandescent lamps, promotes the vegetative plant growth, color, appearance and product quality, similar to the results obtained with the solar radiation. However, there is a decrease in the growth rate and biomass accumulation. The white LEDs combined with the red LEDs promote carbohydrate storage and improve the energy efficiency level compared to the fluorescent lamps during the germination stage and subsequent cultivation stages [15].

We have found that the average value of the photosynthetic photon flux density required for the efficient plant growth ($\approx 300 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) is achieved with an operating current of one meter of phyto-strip at a distance of ≈ 20 cm from the irradiated area. The spectral composition of LED phyto-strip with a ratio in the PAR region of 15% blue, 40% green and 45% red light is not considered optimal for growth stimulation of green agricultural crops. This phenomenon is consistent with the results presented in the papers [16, 17], the

Investigation of physical processes occurring at low temperatures and currents in light-emitting nanoheterostructures based on semiconductor nitrides. *Nanophysics and nanotechnologies MIPT Proceedings*. 2014; 6(1): 12–19. (In Russ.).

Менькович Е.А., Тарасов С.А., Ламкин И.А., Suihkonen S., Svensk O., Lipsanen H. Исследование физических процессов, возникающих в условиях низких температур и токов в светоизлучающих наногетероструктурах на основе полупроводниковых нитридов. *Нанофизика и нанотехнологии. Труды МФТИ*. 2014; 6(1): 12–19.

10. **Pikhtin A. N., Tarasov S. A., Menkovich E. A.** Patent No. 2473149 Cl of the Russian Federation, IPC H01L 21/66. *Method for determining the temperature of the active area of the LED*: No. 2011147653/04: application 23.11.2011: publ. 20.01.2013.
Пиктин А. Н., Тарасов С. А., Менькович Е. А. Патент № 2473149 Cl РФ, МПК H01L 21/66. *Способ определения температуры активной области светодиода*: № 2011147653/04: заявл. 23.11.2011: опубл. 20.01.2013.
11. **GOST R 57671-2017.** *Irradiation devices with LED light sources for greenhouses. General technical conditions*. – М.: Standartinform. 2017. (In Russ.).
ГОСТ Р 57671-2017. *Приборы облучательные со светодиодными источниками света для теплиц. Общие технические условия*. – М.: Стандартинформ. 2017.
12. **GOST 34819-2021.** *Lighting devices. Lighting requirements and test methods*. – М.: Russian Institute for Standardization. 2022. (In Russ.).
ГОСТ 34819-2021. *Приборы осветительные. Светотехнические требования и методы испытаний*. – М.: Российский институт стандартизации. 2022.
13. **Kiang N. Y., Siefert J., Govindjee G., Blankenship R. E.** Spectral Signatures of Photosynthesis. I. Review of Earth Organisms. *Astrobiology*. 7: 222–251. DOI: <https://doi.org/10.1089/ast.2006.0105>
14. **Robert B., Cogdell R., Grondelle R.** The Light-Harvesting System of Purple Bacteria. *Light-Harvesting Antennas in Photosynthesis*. 2003; DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-017-2087-8_5
15. **Yan Z. N., He D. X., Niu G. H., Zhou Q., Qu Y. H.** Growth, nutritional quality, and energy use efficiency in two lettuce cultivars as influenced by white plus red versus red plus blue LEDs. *Int. J. Agric. & Biol. Eng.* 2020; 13(2): 33–40. DOI: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14236-19>
16. **Avendaño-Abarca V. H., González-Sandoval D. C., Munguía-López J. P., Hernández-**

authors of which have shown that special selection of LEDs emitting the light at certain wavelengths makes it possible to provide sufficient energy to stimulate the photosynthetic pigments and greater accumulation of dry mass. To maximize the growth stimulation of such plants, a spectrum with a higher content of blue and red light that constitutes up to 80% of the total PPFD, is more preferable.

It is well-known that the application of LEDs, compared to the conventional devices such as the high-pressure sodium lamps or fluorescent lamps, provides higher energy efficiency. The impact effectiveness of the phyto-strip radiation on plants evaluated in this paper, significantly exceeds the impact effectiveness of alternative radiation sources and is equal to 42% being 4.7 times higher than the efficiency of a full-spectrum grow lamp in the PAR region and 4.4 times higher than the efficiency of a fluorescent lamp.

CONCLUSION

The LED phyto-strip with a spectral composition of 15% blue, 40% green and 45% red light has high efficiency, dimming possibility (adjustment of the light brightness) and a radiation spectrum corresponding to the absorption spectra of plant pigments. Such



Металлообработка. Сварка – Урал

международная выставка технологий,
оборудования, материалов для машиностроения,
металлообрабатывающей промышленности
и сварочного производства



12–15 марта 2024
Екатеринбург

крупнейший
специализированный
региональный проект в России

(342) 264-64-27
egorova@expoperm.ru
metal-ekb.expoperm.ru





- Cuevas R., Luna-Maldonado A. I., Vidales-Contreras J. A., Niño-Medina G., Rodríguez-Fuentes H. Growth and total nutrimental absorption of baby romaine lettuce cultivated with led lighting under plant factory system. *Informacion Tecnica Economica Agraria*. 2020; 116(4): 280–293. DOI: <https://doi.org/10.12706/itea.2020.011>
17. Armada D. T., Guinée J. B., Tukker A. The second green revolution: Innovative urban agriculture's contribution to food security and sustainability – A review. *Global Food Security*. 2019; 22: 13–24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.08.002>

АВТОРЫ

- Дегтерева Мария Михайловна – аспирант, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия.
ORCID: 0000-0001-6797-0595
- Левин Евгений – аспирант, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия.
ORCID: 0009-0000-3811-487X
- Дегтерев Александр Эдуардович – аспирант, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия.
ORCID: 0000-0002-6151-6567
- Богданов Александр Александрович – студент магистратуры, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия.
ORCID: 0009-0004-2540-4228
- Ламкин Иван Анатольевич – к. т. н., доцент кафедры фотоники, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия.
ORCID: 0000-0002-3680-7725
- Тарасов Сергей Анатольевич – доктор технических наук, заведующий кафедрой фотоники, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия.
ORCID: 0000-0002-6321-0019
- Сергеев Павел Андреевич – инженер, генеральный директор ООО «Светоар», Санкт-Петербург, Россия.

ВКЛАД АВТОРОВ

Дегтерева Мария Михайловна – измерение параметров фитоленты в области фотосинтетически активной радиации, редактирование статьи, анализ литературы; Левин Евгений – измерение спектрально-энергетических характеристик фитоленты, редактирование статьи, анализ литературы; Дегтерев Александр Эдуардович – измерение электрических характеристик светодиодов, редактирование статьи; Богданов Александр Александрович – измерение электрических и колориметрических характеристик фитоленты, редактирование статьи; Ламкин Иван Анатольевич – руководство научной работой, планирование работ, редактирование статьи; Тарасов Сергей Анатольевич – постановка задачи и руководство научными исследованиями; Сергеев Павел Андреевич – постановка задачи, предоставление образцов для исследования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них отсутствует конфликт интересов. Результаты исследований были обсуждены и отражены в рукописи, которая является совместной работой.

properties make the device most preferable for use in the agroindustrial enterprises to increase the agricultural productivity. In this case, the installation simplicity and safety of the lighting device should also be considered. The high efficiency of phyto-strip will improve the growth quality of various agricultural crops in the autonomous agroindustrial enterprises. During the further research, it is planned to study the energy cost reduction methods when using the LED phyto-strips in the industrial greenhouse complexes.

AUTHORS

- Mariya M. Degtereva – postgraduate student of St. Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, Russia.
ORCID: 0000-0001-6797-0595
- Yevgeniy Levin – postgraduate student of St. Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, Russia.
ORCID: 0009-0000-3811-487X
- Alexander E. Degterev – postgraduate student of St. Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, Russia.
ORCID: 0000-0002-6151-6567
- Alexander A. Bogdanov – master student of St. Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, Russia.
ORCID: 0009-0004-2540-4228
- Ivan A. Lamkin – Cand. of Tech. Sciences, Associate Professor of the Department of Photonics, St. Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, Russia.
ORCID: 0000-0002-3680-7725
- Sergey A. Tarasov – Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Photonics, St. Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, Russia.
ORCID: 0000-0002-6321-0019
- Pavel A. Sergeev – Engineer, General Director of OOO Svetoyar, St. Petersburg, Russia.

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Degtereva Mariya Mikhailovna – measurement of phytotape parameters in the field of photosynthetically active radiation, editing of the article, analysis of literature; Levin Yevgeniy – measurement of spectral and energy characteristics of phytolent, editing of the article, analysis of literature; Degterev Alexander Eduardovich – measurement of the electrical characteristics of LEDs, editing the article; Bogdanov Alexander Alexandrovich – electrical and colorimetric characteristics of the phytotape, editing the article; Lamkin Ivan Anatolyevich – scientific work management, work planning, article editing; Tarasov Sergey Anatolyevich – problem setting and scientific research management; Sergeev Pavel Andreevich – setting the task of providing samples for research.

CONFLICT OF INTEREST

The authors state that they have no conflict of interest. The results of the research were discussed and reflected in the manuscript, which is a joint work.

9–11 апреля 2024

Москва, ЦВК «Экспоцентр»



Представьте
свою продукцию
потенциальным
заказчикам



Вакуумное
оборудование

Криогенное
оборудование

Оборудование
для нанесения
функциональных
покрытий



Забронируйте
стенд
vacuumtechexpo.com

Организатор



Международная
Выставочная
Компания

+ 7 (495) 252 11 07
vacuumtechexpo@mvk.ru

При поддержке





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.technosphere.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