

РАЗШИРЯВАНЕ ХАРАКТЕРИСТИКИТЕ НА ОРАНЖЕРИЕН БЛОК ЗА ОСВЕТЛЕНИЕ НА RGB LEDs С ДОБАВЯНЕ НА UV И FR LEDs

Иван Дандолов¹, Илиана Илиева¹, Таня Иванова¹, Йордан Найденов¹, Детелин Стефанов²

¹Институт за космически и слънчево-земни изследвания – Българска академия на науките

²Институт по физиология на растенията и генетика – Българска академия на науките
e-mail: dandolov@space.bas.bg

Резюме: Разработката на Блок за осветление на светодиоди (БО-LED) за дългосрочни космически експерименти с растения стана възможна благодарение на развитието на високите технологии. Разработени са два модула на БО-LED за космически оранжерии на базата на мощни и маломощни червени, зелени и сини (RGB) светодиоди с възможности за регулиране на интензитета и спектралния състав на светлината. Провеждат се лабораторни експерименти с растения за биотехнологичните им изпитания и подбор на оптимални характеристики. Използвайки последните изследвания свързани с чувствителността на растенията към различните области на спектъра, предлагаме към RGB БО-LED да бъдат добавени светодиоди, излъчващи в ултравиолетовата (UV) и далечната червена (FR) спектрални области. Това ще позволи композирането на светлина със спектър близък до този на дневната светлина и в зависимост от специфичните нужди на растенията и целите на експеримента.

EXTENDING THE CHARACTERISTICS OF A GREENHOUSE LIGHT UNIT ON RGB LEDs BY ADDING UV AND FR LEDs

Ivan Dandolov¹, Iliana Ilieva¹, Tania Ivanova¹, Yordan Naydenov¹, Detelin Stefanov²

¹Space and Solar-Terrestrial Research Institute – Bulgarian Academy of Sciences

²Institute of Plant Physiology and Genetics – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: dandolov@space.bas.bg

Keywords: Space Greenhouse, Light Unit, Light-Emitting Diodes (LED)

Abstract: The development of Light Units on LEDs (LU-LED) for long-term space experiments with plants became feasible due to the progress of high technologies. Two LU-LEDs for space greenhouses with adjustable light intensity and spectral composition were developed. Laboratory experiments with plants for biotechnology testing and optimal parameters selection are carried out. Using the latest research results related to plant sensitivity in the different regions of the spectrum, we put forward the idea to add LEDs emitting in the ultraviolet (UV) and far-red (FR) spectral regions to the RGB LU-LED. This will allow the composition of light with a spectrum similar to that of daylight depending on the specific needs of the cultivated plants and the objectiveness of the experiment.

Въведение

Създаването на Биологична система за осигуряване живота (БСОЖ) на космическите екипажи, базирана на кръговрата на химичните елементи, както това става на Земята, се явява основна задача, която трябва да бъде решена преди стартирането на бъдещите дългосрочни космически полети до Луната и Марс и изграждането на постоянни бази там. Растенията са основно звено в бъдещите БСОЖ и отглеждането им би могло да допринесе за поддържането на живота на космическите екипажи по време на дългосрочни космически мисии. Посредством физиологичните процеси фотосинтеза и транспирация протичащи в растенията по естествен път могат да се пречистват въздуха и водата на космическите кораби и станции, както и на лунните и марсиански бази. Растенията са не само източник на хранителни и биологично активни вещества, но са и важен елемент за психологическия комфорт на космонавтите [1].

Отглеждането на растенията в контролирана среда зависи от избора на източници на светлинна енергия, които трябва да осигуряват стабилно ниво на фотосинтетичния фотонен поток и спектър близък до този на дневната светлина [2]. Досега като източник на светлина при дългосрочни експерименти с растения са използвани различни типове флуоресцентни лампи, както в Космическа оранжерия (КО) СВЕТ работила 10 години на Орбиталната станция МИР [3,4] така и в КО Лада [5] и Biomass Production Chamber [6] на Международната космическа станция. С усъвършенстването на светлинните технологии светодиодите намират все по-широко приложение както в бита, така и за отглеждане на растения в космически условия [7].

Разработването на блокове за осветление за космически оранжерии базирани на светодиоди (BO-LED) започва в САЩ през 90-те години във връзка с мисиите на космическата совака. BO-LED с 90% червени (R) и 10% сини (B) светодиоди бе успешно използван в американската оранжерия ASTROCULTURE™, която летя в космоса по време на три двуседмични мисии на космическите соваки STS-57, STS-63 и STS-73. Доказано бе, че комбинирането на червени и сини светодиоди създава условия за нормално развитие на растенията [8]. Но комбинацията само от червена и синя светлина дава видима за човешкото око виолетова светлина, на чийто фон зелените растения придобиват непривлекателен пурпурно-сив цвят. Добавянето на зелена (G) светлина към синята и червената възвръща естествения цвят на растенията. Въпреки, че зелената светлина не активира процеса фотосинтеза, тя оказва влияние върху редица процеси като: регулирането на вегетативното развитие, нарастването на стъблото, височината на растението, фотопериодичния цъфтеж, отварянето на устицата и експресията на гените от хлоропластите [9,10].

BO-LED на мощни RGB светодиоди бе разработен от Института за космически изследвания - БАН по проект „Оранжерия-Марс“ (договор за сътрудничество с Института по медико-биологични проблеми - РАН за периода 2006-2010 г.) [11]. Изпълнява се програма за биотехнологични изследвания с цел подобряване на характеристиките и приложение в космическите оранжерии за бъдещите дългосрочни мисии на човека към Марс.

Комбинацията от RGB светодиоди покрива голяма част от спектъра необходим за нормално протичане на фотосинтезата, но се оказва, че растенията са адаптирани да използват по-широк спектър, за да управляват фототропичните и фото-морфогеничните реакции във всички етапи на развитието си – от поникването, до цъфтежа и узряването на плодовете. Чувствителността на фоторецепторите значително надхвърля обхвата на човешкото зрение – влияние на светлината върху физиологията на растенията се наблюдава от енергии започващи от ултравиолетовата област и достигащи до инфрачервената област на спектъра [12].

В резултат на проучване на последните резултати в областта на спектралната чувствителност на растителните пигменти към светлината, възникна идеята за разширяване на спектралните характеристики на BO-LED чрез добавянето на светодиоди излъчващи светлина в ултравиолетовата (UV) и далечната инфрачервена (FR) области на спектъра, което би създавало нови възможности за изследвания на влиянието на спектралния състав върху развитието на растенията.

Влияние на UV и FR светлината върху растенията

Растенията използват светлината не само като източник на енергия, но и като източник на външна информация, на която реагират по различен начин. Осветлението се характеризира със следните три параметъра: спектър, интензитет и продължителност. Идентификацията на тези параметри се осъществява основно от три класа фоторецептори: фитохроми, криптохроми и фототропини. Фитохромите поглъщат енергия в червената (600–700 nm) и далечната червена (700–750 nm) области на видимия спектър [13], а криптохромите – светлината от UV и синята области на спектъра [14].

В естествени условия (слънчева светлина) съотношението на червената към близката червена светлина е единица ($R:FR=1$) което е и най-благоприятното съотношение за развитие на растенията и цъфтеж. В естествени условия, среда с понижен дял на FR светлина се наблюдава само под вода, тъй като водните молекули абсорбират светлината в инфрачервената област на спектъра и съотношението е $R:FR>1$, а увеличаване на дела на FR светлината се наблюдава при засенчване ($R:FR<1$). Увеличаването на дела на FR светлината предизвиква в растенията метаболитни и растежни изменения изразяващи се в увеличаване на ефективността на фотосинтетичния апарат, ускоряване на нарастването на височина на стъблото и дължината на листните дръжки, както и по-бързото встъпване в цъфтеж и плододаване [15].

До момента, повечето от използваните БО в растителните камери имат съотношение $R:FR>2$, а с конструирането на БО на светодиоди с тесни монохроматични спектри дела на FR

светлината е много малък или въобще отсъства. Отглеждането на растения при $R:FR > 1$ и нагоре води до подтискане на механизма за пространствено ориентиране спрямо другите растения, при което растения отгледани в контролирана среда са със силно изразена йерархия във височината, неравномерно разпределение на биомасата и добива спрямо посевната площ и забавен цъфтеж [16].

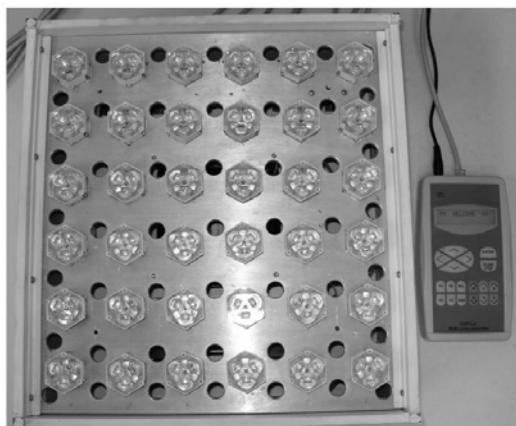
Изследванията на King и Bagnall [17] показват, че FR светлината е съществено важна за растежа и цъфтежа на растения отгледани в контролирана среда. Въпреки че, за растения на късия ден увеличаването съотношението на $R:FR$ води до ускоряване на цъфтежа, а при растенията на дългия ден увеличаване на дела на FR води да ускоряване на цъфтежа.

Изследванията на Smith [15] показват, че растенията проявяват реакции на избягване на засенчването при възприемането на спектрални изменения отговарящи на понижаване на FR светлината ($R:FR < 1$), дори когато не са реално засенчени, т.е. индуциране на нарастване на стъблото и по-ранен цъфтеж и плододаване могат да възникнат и при растения отгледани на светлина със силен интензитет, но със променен спектрален състав и съотношение $R:FR < 1$. Този факт позволява вариране на съотношението $R:FR$ при отглеждането на растения в контролирана среда и пряк контрол на темпа на развитие и скоростта на растеж на отделните растения.

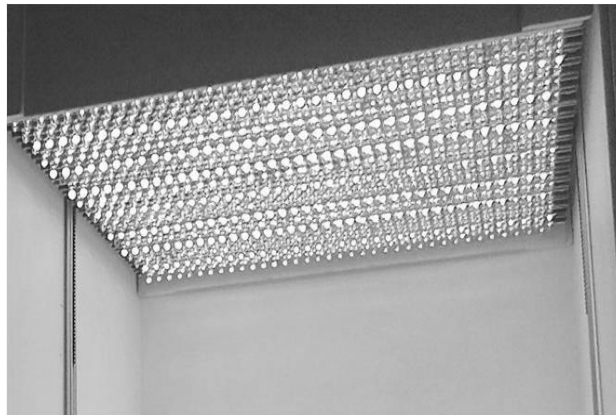
Допълването на спектъра с UV светлина максимално ще доближи изкуствено композираната светлина в контролираната среда до слънчевата. Действието на UV светлината се свързва основно с вредни ефекти върху растенията, но изследванията на Hashimoto [18], отнасящи се до влиянието на UV светлината върху растенията отгледани в контролирани условия, показват ролята на UV светлината при синтеза на ценни за човека биологично активни вещества като антоциани и флавоноиди. Тези вещества имат защитна функция за растенията, те неутрализират вредното влияние на UV светлината и предпазват фотосинтетичният апарат от увреждане. Притежават и ценни свойства за човека поради силно изразеното им антиоксидантно действие.

Блокове за осветление на RGB светодиоди

Първата разработка на БО-LED е с размери 33 x 33 cm и съдържа 108 мощни светодиоди разположени в 36 спота (по 3 броя светодиоди на спот) с максимум на излъчване в следните области на спектъра: R - 632 nm, G - 525 nm и B - 468 nm (фиг. 1). Управлението на блока се извършва чрез специализиран DMX програматор, позволяващ индивидуален контрол на всеки цвят светодиоди, задаване на спектрален състав и интензитет на светлината (плътност на фотосинтетичния фотонен поток - PPF) в диапазон $0-400 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, както и на фотопериода в диапазон 0-24 часа.



Фиг. 1. БО-LED на мощни светодиоди



Фиг. 2. БО-LED-M на маломощни светодиоди

В прототип на КО СВЕТ бяха проведени два едномесечни експеримента със салатени култури с осветление от БО-LED вместо от БО с флуорисцентни лампи. При спектрален състав R-70%, G-20% и B-10% бе изследвано влиянието на две нива на интензитет на светлината (220 и $400 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) върху физиологичните показатели на растенията. Биохимичните и биофизичните анализи на образци показаха, че при по-високия интензитет възниква фотоинхибиране [19,20].

Този резултат доведе до проектирането и изработването на втори блок за осветление на маломощни светодиоди (БО-LED-M) с много по-ниска цена, енергопотребление и по-малко тегло (фиг. 2). БО-LED-M е с размери 40 x 40 cm и съдържа общо 1332 светодиода

разположени в 37 реда (по 36 на ред) - 20 червени (630 nm), 8 зелени (525 nm), 7 сини (468 nm) и 2 бели. Последните са добавени за да се улесни наблюдението и фотографирането на растенията, а също така и за по-добро възприемане от човека от психологическа гледна точка. Предвидено е управление на всеки цвят светодиоди, задаване на спектрален състав и интензитет на светлината в диапазон $0-125 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, както и съответната цифрова индикация за улеснение при провеждане на изпитания с растения.

Разширяване възможностите на БО-LED

Възможността да се комбинират различни светлинни режими е особено привлекателна при извършването на подбор на видове/сортове растения, които ще бъдат предложени за отглеждане при дългосрочни мисии в космоса. Предлагаме следваща стъпка в изследователската работа за оптимизиране параметрите на осветлението да бъде конструирането на БО-LED-5, осигуряващ по-широко спектрално покритие чрез добавяне на светодиоди излъчващи в ултравиолетовата и далечната червена области. При този подход ще стане възможно, комбинирайки спектрите на пет типа монохроматични светодиоди, да се разработят осветителни системи, осигуряващи спектър близък до този на дневната светлина.

За анализ на разпределението на цветовете при многоцветни LED матрици ще се използва аналитичният метод на Moreno и Contreras [21], който позволява да бъде изчислено цветовото разпределение като функция на основните параметрите на БО-LED, а именно:

- спектрални характеристики на използваните светодиоди;
- пространственото разпределение на излъчваната светлина;
- разстоянието до осветяваната повърхност;
- разстоянието между LED и техния брой и разпределение в светодиодната матрица.

Методът позволява на базата на математическо моделиране да се изберат оптималните стойности на параметрите описани по-горе. В Таблица 1 са представени наличните към момента на пазара светодиоди отговарящи на изискванията на растенията и подходящи за разширяване на спектралните характеристики на LED блоковете за осветление.

Таблица 1. Фирми производители и типове светодиоди

Производител	UV- В и UV-A LED (280–400 nm)	LED излъчващи във видимата област (400 – 700 nm)			FAR-RED LED (700–850 nm)
		Сини (400–500 nm)	Зелени и оранжеви (500–600 nm)	Червени (600–700 nm)	
A-BRIGHT http://www.a-bright.com.tw/		AL-508B5WC	AL-508UG5WC	AL-508R5WC	AL-513IR-780-40C
AOT, Inc. http://www.aot.com.tw/	AOT C06DC	AOT – 9218A-RGB-018G			
China Semiconductor Corporation http://www.csctw.com.tw/		CSHV-xL60xxG4-A0 Специално разработени за отглеждане на растения			
Cree, Inc. http://www.cree.com/		Cree® XLamp® XP-E LEDs			
Everlight Electronics Co., Ltd. http://www.everlight.com/		34-01/B4C-AKNB	34-01/G4C-ARTB	34-01/R5C-AQSC	HIR5393C/L223
Excellence Optoelectronics http://www.eoi.com.tw/		EOH-KUBUCB0-GG	EOH-KUFUCB0-GG	EOH-KURUCB0-KG	
Hui Yuan Electronic Factory http://www.hyledchina.com/		LB-P200B2C-H5	LB-P200Y1C-H5	LB-P200R1C-H5	
LedEngin, Inc. http://www.ledengin.com/	LZ1-00xx05	LZ4-00xx10			LZ1-00xx05
LEDTRONICS, Inc. www.ledtronics.com/	UV395, UV405, UV750	UB425, PB4KB	AG10K, PG5, PG350, Y3KH	O3KF, E3K, R3KF	IR851, IR881, IR941

Предлаганата нова схема на БО-LED-5 с пет вида светодиоди - RGB и добавяне на светодиоди, излъчващи в ултравиолетовата и далечната червена спектрални области, ще позволи композирането на светлина със спектър близък до този на дневната светлина. Така при отглеждането на растения на изкуствено осветление в космически условия ще може да се осигурят оптимални условия за растеж и развитие на различните видове култури, необходими за изграждането на БСОЖ, в зависимост от специфичните им нужди и целите на експеримента.

Литература:

1. Freeman, M. Challenges of human space exploration. *Springer-praxis publishing*, Chichester, UK, p. 76, 2000.
2. Salisbury, F. B., B. Bugbee. Plant productivity in controlled environments. *HortScience*, 23, pp. 293-299, 1988.
3. Kostov, P. T., T. N. Ivanova, S. M. Sapunova. Adequate substrate moistening system and artificial lighting for the growth of higher plants in the SVET Space Greenhouse. *Acta Veterinaria Brno*, Vol. 65, pp.19-25, 1996.
4. Gramatichov, P., T. Ivanova. SVET-2 Space Greenhouse Light Unit. *Aerospace Research in Bulgaria*, Vol.16, pp. 24-34, 2001.
5. Bingham, G. E., T. S. Topham, J. M. Mulholland, I. G. Podolsky. LADA: the ISS plant substrate microgravity testbed. *SAE Paper Number 2002-01-187*, 2001.
6. Morrow, R. C., T. M. Crabbe. Biomass Production System (BPS) plant growth unit. *Advances in Space Research*, Vol. 26, No. 2, pp. 289-298, 2000.
7. Barta, D. J., T. W. Tibbitts, R. J. Bula, R. C. Morrow. Evaluation of light-emitting diode characteristics for a space-based plant irradiation source, *Advances in Space Research*, Vol. 12, No. 5, pp. (5)141-(5)149, 1992.
8. Bula, R., R. Ignatius. Providing controlled environments for plant growth in space. *International Symposium on Plant Production in Closed Ecosystems*, Narita Japan, August 26-29, 1996.
9. Folta, K. M., S. A. Maruhnich. Green light: a signal to slow down or stop. *Journal of Experimental Botany*, pp. 1-13, 2007.
10. Kim, H., G. Goins, R. Wheeler, J. Sager. Green-light supplementation for enhanced lettuce growth under Red- and Blue-light-emitting diodes. *HortScience*, Vol. 39, No. 7, pp. 1617-1622, 2004.
11. Ivanova, T., I. Dandolo, I. Ilieva, Y. Naydenov, M. Levinski, V. Sychev. New LEDs Light Module developed on "Greenhouse-Mars" Project, *Aerospace Research in Bulgaria*, Vol. 23, pp. 85-102, 2009.
12. Smith, H. Light quality, photoperception, and plant strategy. *Annual Review of Plant Physiology*, Vol. 33, pp. 1882-1887, 1982.
13. Smith, H. Phytochromes and light signal perception by plants - an emerging synthesis. *Nature*, Vol. 407, pp. 585-591, 2000.
14. Batschauer, A. Photoreceptors of higher plants. *Planta*, Vol. 206, pp. 479-492, 1998.
15. Smith, H. Phytochrome-mediated responses implications for controlled environment research facilities. *Proceedings of International Lighting in Controlled Environments Workshop, NASA Conference Publication*, Kennedy Space Center, Florida, USA, CP-3309, pp. 57-67, 1994.
16. Ballaré, C. L., A. L. Scopel. Plant photomorphogenesis and canopy growth. *Proceedings of International Lighting in Controlled Environments Workshop, NASA Conference Publication*, Kennedy Space Center, Florida, USA, CP-3309, pp. 89-102, 1994.
17. King, R. W., D. J. Bagnall. Phytochrome, plant growth and flowering. *Proceedings of International Lighting in Controlled Environments Workshop, NASA Conference Publication*, Kennedy Space Center, Florida, USA, CP-3309, pp. 103-109, 1994.
18. Hashimoto, T. Requirements of blue, UV-A and UV-B light for normal growth of higher plants, as assessed by action spectra for growth and related phenomena. *Proceedings of International Lighting in Controlled Environments Workshop, NASA Conference Publication*, Kennedy Space Center, Florida, USA, CP-3309, pp. 143-157, 1994.
19. Ivanova, T., I. Ilieva, Y. Naydenov, V. Sychev, M. Levinskikh. "Greenhouse-Mars" Project: New light-emitting diode module tests. *Proceedings of Conference "Fundamental Space Research"*, Sunny Beach, Bulgaria, pp. 291-294, 2008.
20. Ilieva, I., T. Ivanova, Y. Naydenov, I. Dandolo, D. Stefanov. Plant experiments with light-emitting diode module in SVET Space Greenhouse. *Advances in Space Research*, Vol. 46, No. 7, pp. 840-845, 2010.
21. Moreno, I., U. Contreras. Color distribution from multicolor LED arrays. *Optics Express*, Vol. 15, No. 6, pp. 3607-3618, 2007.