

Сакен Юсупов | saken.jusupov@ledil.com
 Михаил Червинский | Mikhail_Chevinsky@Cree.com
 Екатерина Ильина | tech.support.rus@ledil.com
 Владимир Смолянский | vsmolyanskij@yandex.ru

Создание эффективных светодиодных фитосветильников

➔ В статье рассматривается вопрос создания светодиодных фитосветильников для тепличных хозяйств. Приводятся расчеты и практические примеры реализации осветительных устройств на основе компонентов компаний Cree, «РУСАЛОКС» и LEDiL.



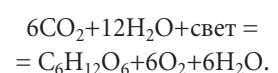
Рис 1 Пример применения светильников боковой досветки

В нашем мире все события между собой взаимосвязаны, причем иногда самым неожиданным образом. К примеру, пламенная речь бывшего президента США Б. Обамы в 2014 г. о необходимости введения санкций против России привела нас сегодня к необходимости написания этой статьи. Американские санкции вызвали продуктовое эмбарго в ответ, в результате которого началось бурное развитие агропромышленного сектора российской экономики, в том числе тепличных хозяйств. А в результате увеличения спроса на оборудование для теплиц вырос интерес производителей светодиодных светильников к технологиям и компонентной базе для тепличного освещения. Конечно, можно строить другие цепочки причинно-следственных связей, например начинать их от трудов академика Алферова или опытов Мичурина и оценивать вероятность их корреляции между собой. Но лучше всего не гадать на причудливых тенях прошлого, а «здесь и сейчас» продолжить разговор о теплицах и растениях. Всякому растению нужно для «счастливой жизни» всего пять компонентов: свет, вода, воздух, питание, тепло. Для лучшего роста и развития нужен оптимальный баланс этих базовых условий. Для разных растений он разный: для северной карликовой березы требуется одно сочетание условий, для астраханского арбуза — другое. Существует множество научных школ и противоречивых мнений о том, какие условия правильные, а какие — не очень. И в наше время об этом жарко спорят ученые мужи, часто обвиняя друг друга в антинаучной ереси. Не затрагивая полемичные вопросы академической науки, лучше поговорим о простых и приземленных технологиях освещения растений.

Потребность растений в свете

Светом мы называем видимую глазом человека часть спектра электромагнитного излучения. Это схематично показано на рис. 2.

Растения тоже поглощают свет и используют его как энергию для фотосинтеза, химического процесса получения питания из углекислого газа и воды. Кратко этот процесс можно описать так:



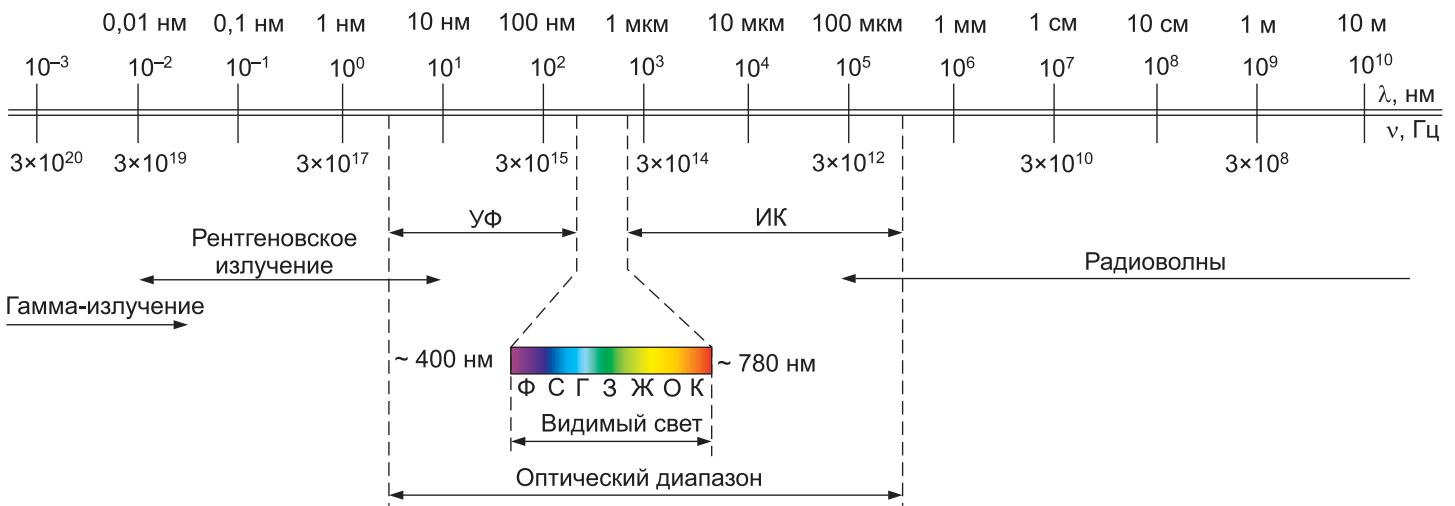


Рис. 2. Видимая часть спектра электромагнитного излучения

Если говорить проще, то фотосинтез выглядит так: углекислый газ + вода + солнце ≥ глюкоза + кислород + вода.

Для улавливания и преобразования света растения используют хлорофилл — тот самый пигмент, который окрашивает листья в зеленый цвет. По химическому строению хлорофилл — группа сложных магнийсодержащих органических внутрикомплексных соединений. Под общим термином «хлорофилл» подразумевают целую группу разных фоточувствительных химических соединений: хлорофилл А, хлорофилл В, каротиноиды.

Их спектральная чувствительность показана на рис. 3.

Глядя на график, можно понять, что, в первом приближении, растения наиболее чувствительны к красному и синему свету. А если говорить подробнее, то бытует мнение, что свет с разной длиной волны влияет на разные фазы и процессы роста растений таким образом:

- Волны от 380 нм и короче для растений губительны. Растение может получить сильный ожог, что вызовет пожелтение листьев и скручивание стеблей.
- Волны диапазона 380–430 нм уменьшают межузловую часть растения, ствол становится более массивным. В растении более интенсивно развиваются витамины, растения становятся более холодостойкими.
- Волны длиной 430–490 нм увеличивают размеры листьев, в результате чего растения способны поглощать больше света и увеличить фотосинтез. Это приводит к быстрому росту растений.

- Диапазон 490–570 нм вообще не нужен растениям. Листья отражают зеленый цвет, поэтому мы видим их зелеными.
- Диапазон длин волн 570–600 нм — также маловажный участок спектра. Растения при таком свете вытягиваются.
- Волны диапазона 600–780 нм дают растению основную энергию для фотосинтеза. Эта длина волн способствует бурному росту, который замечен даже в течение дня: растения растут буквально не по дням, а по часам. В них идет интенсивное образование углеводов, что способствует хорошему развитию плодов.
- Волны от 780 нм и длиннее способны увеличить температуру растения, что приведет к его гибели [1].

Некоторые производители для гидропонных систем используют светодиоды с длинами

волн 400, 420, 440, 455, 610, 630, 660, 730 нм. Но отметим, что есть разные точки зрения на счет того, какие спектры света эффективнее для различных растений.

Обобщая тему влияния света на растения, можно сказать, что количество света влияет на интенсивность фотосинтеза, его спектральный состав влияет на фазы роста растений, развития, цветения и плодоношения. Длительность светового периода влияет на фазы цветения и плодоношения.

Параметры и единицы измерения

Для оценки характеристик полезного для растений света используют такие параметры и единицы измерения:

- Photosynthetic Active Radiation (PAR) — фотосинтетически активное излучение (ФАР). Характеризует мощность

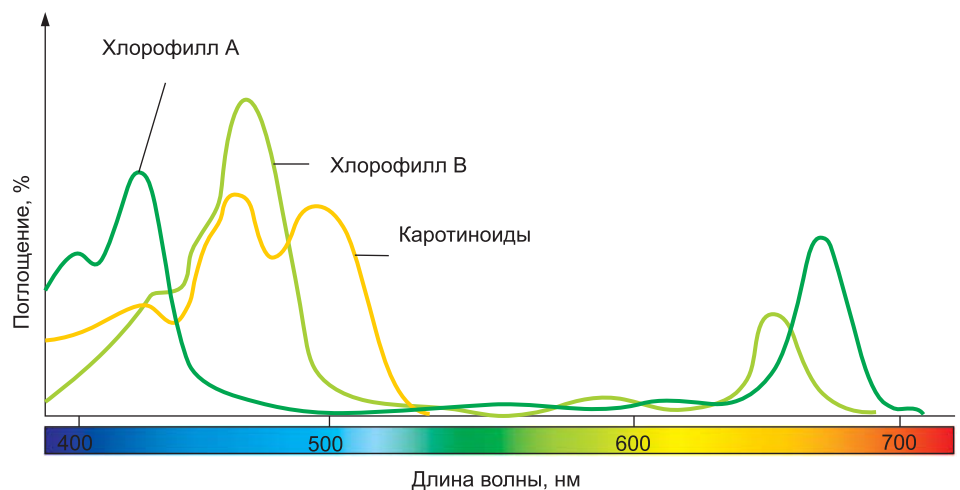


Рис. 3. Спектральная чувствительность хлорофилла



Рис. 4. Оценка рынка фитосветильников по данным Navigant Research

излучения в диапазоне 400–700 нм на 1 м², которое нисходит на растение. Единица измерения — Вт/м².

- Photosynthetic Photon Flux (PPF) — фотосинтетический поток фотонов. Этот параметр используется, чтобы поток света (ФАР) выразить в количестве фотонов в секунду в диапазоне длин волн 400–700 нм. Единица измерения — мкмоль/с.
- Photosynthetic Photon Flux Density (PPFD) — плотность фотосинтетического потока фотонов. Она характеризует число фотонов, падающих в секунду на один квадратный метр в диапазоне длин волн 400–700 нм. Единица измерения — мкмоль/с/м².
- Для понимания масштаба этой величины заметим, что плотность фотосинтетического потока фотонов дневного света в пасмурную погоду составляет примерно 200 мкмоль/с/м².
- Yield Photon Flux (YPF) — усваиваемый растением поток фотонов. Он пред-

ставляет собой ФАР, взвешенную в соответствии с эффективностью фотосинтеза по каждой длине волны [2]. Но вопрос приоритета влияния качества и количества света на рост растений вызывает много научных споров, и на этот параметр мы не будем тратить драгоценное время.

Разным растениям требуется разное количество PPFD. Для понимания рабочего диапазона величин приведем такие рекомендации из открытых источников:

- 75 мкмоль/с/м² требуется для салатов, проращивания зерна, грибов, орхидей.
- 150 мкмоль/с/м² потребляют зеленые растения, пряные травы, корнеплоды.
- 250 мкмоль/с/м² нужно клубнике, перцу, мелким томатам (черри), цитрусовым.
- Более 300 мкмоль/с/м² будут требовать крупные томаты, огурцы, бахчевые.

Эффективность фитосветильника тем выше, чем больше электрической энергии преобразуется в энергию ФАР. Существует

понятие «сумма дневного света» (СДС), которое обозначает количество фотонов, полученных в диапазоне ФАР (400–700 нм) в течение суток на площади 1 м². СДС может иметь глубокое влияние как на развитие, так и на качество выращиваемых растений, например на толщину стебля, ветвистость и число цветков. СДС на открытом воздухе составляет примерно 5–60, а внутри теплицы для большинства растений требуется около 10–12 моль/м²/день.

Необходимые для расчета освещения растений значения PPFD предоставляют производители фитосветильников.

Тепличный свет сегодня

Какие же светильники используются в тепличных хозяйствах сейчас?

Еще пару лет назад большинство теплиц освещалось традиционными источниками света:

- люминесцентными лампами, у которых неплохие параметры PPFD, но невысокий коэффициент использования светового потока и средний срок жизни около 20 000 ч;
- лампами типа ДНАТ, у которых хороший КПД, но срок наработки на отказ в среднем 25 000 ч, и спектр излучения не оптимален для выращивания зелени и нецветущих культур типа редиса, лука, салата.

В последние два года многие тепличные хозяйства начали использовать светодиодные (LED) фитосветильники для освещения растений. Основные причины роста популярности LED-светильников таковы:

- возможность создания светильника с нужным спектром, что повышает усвояемость света (YPF) на 25%;
- долговечность и ударопрочность;
- энергоэффективность.

Кроме того, в результате развития технологий массового производства светодиодов цена LED-светильников становится доступной для многих покупателей.

По данным компании Navigant Research [3], в 2020 г. доля LED-фитосветильников вырастет до 70% по сравнению с сегодняшним значением в 10% (рис. 4).

Взрывной рост рынка LED-освещения мы наблюдаем сейчас в области общего и утилитарного освещения, и это дает основания верить оценкам, приведенным на гистограмме. То есть перед нами очередной «клондайк», и нужно успеть быстрее и де-



Рис. 5. Типы тепличного освещения

шевле наматывать на нем свою толику «золотого песка». С учетом рыночных перспектив надо разобраться, что именно требуется производить, а для этого важно знать, как освещают растения в теплицах.

Светодиоды для тепличных фитосветильников

Условно светильники для теплиц можно разделить на четыре типа по способу применения (рис. 5).

Для понимания того, какие светильники будут востребованы на рынке, важным вопросом является правильный выбор комплектующих. Ключевым элементом фитосветильников, определяющим их основные характеристики, является собственно источник света — светодиоды.

Рассмотрим ассортимент светодиодов, рекомендуемых для задач освещения растений, на примере продукции одного из лидеров рынка — компании Cree.

В первую очередь нашего внимания заслуживают цветные светодиоды серий XQ-E, XQ-A и XP-E (рис. 6). Их спектральные характеристики представлены на рис. 7.

Светодиоды серии XP-E имеют широкое распространение благодаря стандартному корпусу и посадочному месту, а также хорошей совместимости с большим парком вторичной оптики. Они особенно популярны при решении задач, требующих сложных форм КСС, формируемых с высокой точностью. Сам корпус светодиодов XP в свое время стал стандартом для всего рынка (размер посадочного места 3,5×3,5 мм) и после успеха серии XP-E стал основой для проектирования таких легендарных серий, как XT-E, XP-G2, XP-G3, XP-L, XP-L2, XHP35. Таким образом, компания Cree предлагает разработчикам широкий выбор цветов и мощностей в стандартном корпусе XP, что позволяет реализовать в одном и том же корпусе светильника различные исполнения по мощности и спектру излучения.

Светодиоды XQ-E наследуют у серии XP-E используемые типы кристаллов, что делает эти семейства эквивалентными по ряду основных цветовых, оптических и электрических характеристик. Однако важным преимуществом XQ-E является более компактный корпус (1,6×1,6 мм), что позволяет практически вчетверо повысить плотность светового потока и мощность светильника и открывает широкие возмож-

| | Глубокий синий | Зелёный | Красный | Глубокий красный | Дальний красный |
|------------|--|---|--|---|---|
| Размер, мм | 450 нм | 525 нм | 625 нм | 660 нм | 730 нм |
| 3,45 |  XP-E |  XP-E2 |  XP-E2 |  XP-E XQ-E High Efficiency |  XP-E |
| |  XP-E2 | | | New! | |
| 1,6 |  XQ-E |  XQ-E |  XQ-E |  XQ-E XQ-E High Efficiency | |
| |  XQ-A |  XQ-A |  XQ-A | New! | |

Рис. 6. Монохромные светодиоды Cree

ности по цветосмещению при использовании сборок из нескольких светодиодов под одной оптикой. Эти преимущества до недавнего времени широко использовались, в основном, в задачах архитектурного освещения и шоу-техники, где повышение плотности светового потока позволяло сделать осветительный прибор незаметным на фоне освещаемого объекта.

Для стремительно развивающегося рынка светодиодных фитосветильников серия XQ-E позволяет также проектировать компактные решения, что является важной потребительской характеристикой при выборе светильника для теплицы, так как его размер определяет степень затенения естественного освещения. При применении сборок из светодиодов XQ-E в решениях для многоярусных систем

выращивания растений обеспечивается хорошая однородность формируемого цвета, а также возможность более точно сформировать распределение света, эффективно используя его для освещения именно листьев растения, а не грунта или межрядных пространств.

Для задачи стимуляции хлорофиллов А и В, определяющих интенсивность фотосинтеза, наиболее важны светодиоды с длиной волны 660 и 450 нм, представленные сериями XP-E и XQ-E с цветами Royal Blue и High Efficiency Photo Red.

Основные характеристики этих светодиодов приведены на рис. 8.

Среди синих светодиодов можно отметить серию XP-E2 Royal Blue, имеющую лучший уровень эффективности по критерию поток ФАР/потребляемая мощность в номинальном режиме.

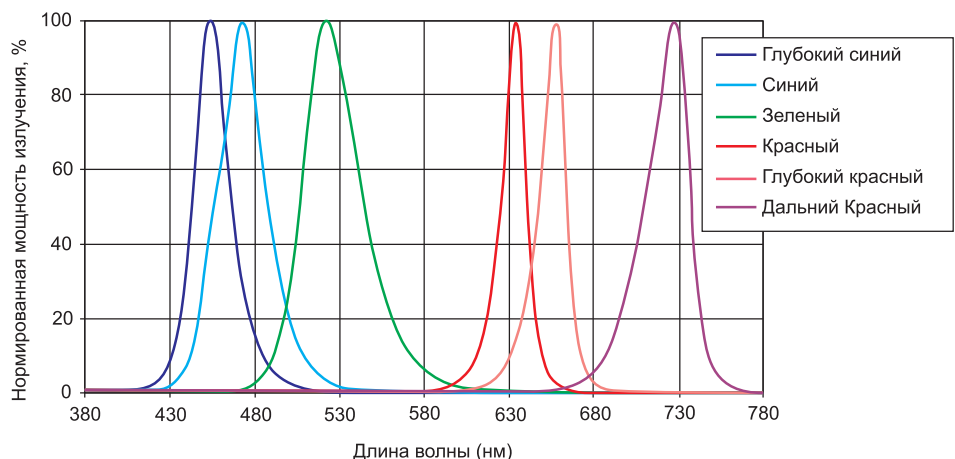
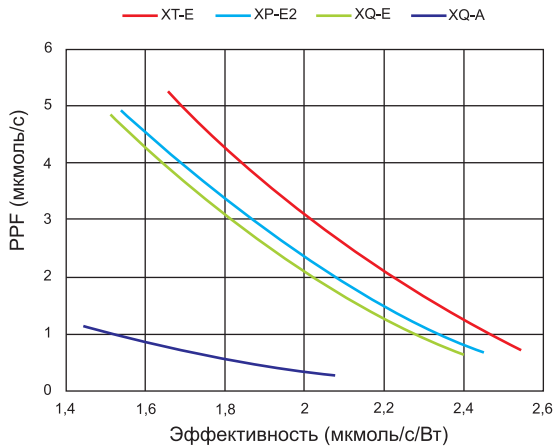


Рис. 7. Спектральные характеристики монохромных светодиодов Cree

Светодиоды XLamp глубокий синий цвет (450 нм)

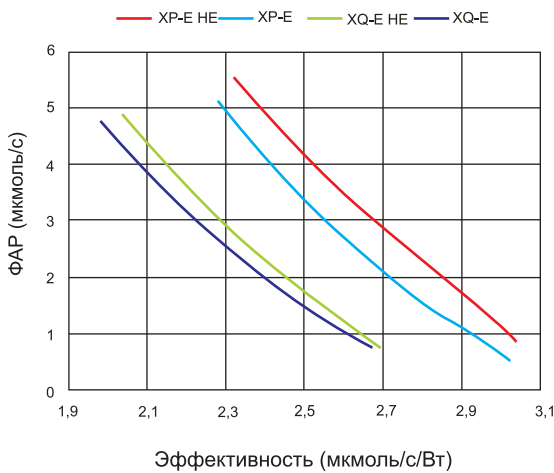


Tj = 85°C



| Серия | XT-E | XP-E2 | XQ-E | XQ-A |
|------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Размер корпуса | 3,45 мм | 3,45 мм | 1,6 мм | 1,6 мм |
| Типовая мощность | 575 мВт | 625 мВт | 600 мВт | 250 мВт |
| Максимальный ток | 1,5 А | 1 А | 1 А | 0,25 А |
| Срок службы при 85 °С | R90 = 73 000 часов | R90 = 79 000 часов | R90 = 64 000 часов | R90 = 45 000 часов |
| Срок службы при 105 °С | R90 = 73 000 часов | R90 = 79 000 часов | R90 = 64 000 часов | R70 > 50 000 часов |

Светодиоды XLamp глубокий красный цвет (660 нм)



Tj = 85°C



| Серия | XP-E HE | XQ-E HE |
|------------------------|---------------------|---------|
| Размер корпуса | 3,45 мм | 1,6 мм |
| Типовая мощность | 425 мВт | 375 мВт |
| Максимальный ток | 1 А | 1 А |
| Срок службы при 85 °С | R90 > 100 000 часов | |
| Срок службы при 105 °С | R90 > 100 000 часов | |

Рис. 8. Характеристики светодиодов XQ-E и XP-E Royal Blue и High Efficacy Photo Red

| | Хлорофилл | Полный спектр | | |
|---|--|--|------------------------|------------------------|
| | Blue+Red | White+Red | 90 CRI White | 70 CRI White |
| Совпадение со спектром поглощения хлорофиллов | ●●●● | ●●● | ●● | ● |
| Совпадение с кривой McCree | ●●● | ●●●● | ●●● | ●● |
| Совпадение со спектром дневного неба | ● | ●● | ●●● | ●● |
| Эффективность (PPF/W) | ●●●● | ●●● | ● | ●●● |
| Качество цветопередачи | ● | ●●●● | ●●●● | ●●● |
| Возможность динамического контроля | ●●● | ●●● | ● | ● |
| Светодиоды | 455 нм Глубокий синий+ 660 нм Красный | 4000K, 70 CRI Белый+ 660 нм Красный | 4000K, 90 CRI Белый | 4000K, 70 CRI Белый |
| | | | | |

Рис. 9. Сравнение различных технологий формирования спектра фитосветильника

Версия XP-E Photo Red с глубоким красным цветом также уникальна своей эффективностью — до 3 мкмоль/с/В в номинальном режиме на токе 350 мА. На максимальном токе 1 А с одного светодиода поток ФАР может достигать уровня 5,6 мкмоль/с.

Серия XT-E Royal Blue интересна своими возможностями по работе на относительно больших токах, до 1,5 А. Это позволяет получать больший вклад в общий поток ФАР с одного светодиода, снижая тем самым общую стоимость светильника.

Серии XQ-E Photo Red и Royal Blue немного уступают аналогам в большем корпусе по производительности, однако, как было уже отмечено выше, предлагают больше возможностей по снижению габаритов светильника благодаря компактному корпусу.

Для удобства расчетов в документации на описанные светодиоды, доступной

на официальном сайте компании, приведены значения ФАР.

Например, для конкретного светодиода LED XQ-E Photo Red XQEEPR-00-0000-000000A01:

- длина волны 650–670 нм;
- минимальная мощность излучения при токе 350 мА — 350 мВт;
- расчетное значение PPF — 2,06 мкмоль/с.

Формирование спектра LED-фитосветильников

Основные стратегии построения спектра светодиодных фитосветильников представлены в таблице на рис. 9.

На сегодня существует два основных подхода к форматированию спектра:

- использование преимущественно красных и синих светодиодов, дающих спектр, имеющий высокий коэффициент корреляции с целевым спектром поглощения хлорофиллов А и В;
- использование в качестве целевой функции спектральной чувствительности растений по МакКри (К. J. McCree) или спектра естественного излучения (дневное небо).

Первая стратегия с применением современных эффективных светодиодов (XP-E, XQ-E) позволяет достичь очень высоких расчетных показателей по эффективности светильника, однако в некоторых реальных исследованиях показано, что высокое значение потока ФАР при низком коэффициенте заполнения спектра не всегда гарантирует высокий урожай.

Расхожее утверждение о том, что растениям совсем не нужен зеленый и желтый свет, не объясняет успешного опыта использования при выращивании растений ламп ДНАТ, спектр излучения которых лежит как раз в середине видимого диапазона.

При использовании стратегии формирования так называемого «полного спектра» можно рассчитывать на то, что растения будут получать энергию, спектральное распределение которой приближено к естественным условиям. При этом увеличивается вероятность успешного вызревания различных культур без специальной оптимизации спектра, так сказать, опытным путем, что требует дополнительных длительных исследований. Также важным преимуществом правильно сформированного полного спектра является положительное влияние на биохимию (меньшее содержание

нитратов) и морфологию (отсутствие отклонений формы) растений.

С точки зрения практической реализации, простейшим решением «полного спектра» являются светильники на обычных белых люминофорных светодиодах. Типичное для люминофора излучение в видимом человеком диапазоне является также достаточно эффективным с точки зрения поглощения растениями (по критерию близости спектральной чувствительности растений по МакКри). Для дополнительной стимуляции хлорофиллов, таком спектре также присутствует монохромная составляющая первичного излучения синего кристалла с длиной волны 430–450 нм, которое не полностью поглощается люминофором. Так, например, спектр с параметрами 4000К 80CRI, используемый в большинстве современных серий светодиодов компании Cree (XQ-E, XP-E2, XP-G2/3, XP-L, XHP35 и т. д.), является лучшим компромиссом с точки зрения высокой фотосинтетической эффективности спектра и доступных бинов с высокими значениями светового потока.

Оptionальное добавление к такому спектру красных светодиодов с длиной волны 660 нм позволяет дополнительно увеличить его фотосинтетическую эффективность, сохраняя при этом преимущества натурального белого света.

В качестве одного из возможных решений, использующих преимущества компактных светодиодов XQ-E и излучения «полного спектра», рассмотрим плату ФитоStrada_2×2MX&Jenny_4×16_XQE компании «РУСАЛОКС» [4]. Внешний вид платы показан на рис. 10.

В этих платах светодиоды собраны в четыре кластера по 16 светодиодов в каждом. Рассматриваемое исполнение платы представляет собой единый кластер



Рис. 10. Внешний вид платы ФитоStrada

Таблица 1. Параметры ФитоStrada_2×2MX&Jenny_4×16_XQE без оптики

| | |
|-------------------------------|-------|
| Световой поток, лм | 7207 |
| Световая эффективность, лм/Вт | 107 |
| Электрическая мощность, Вт | 67,2 |
| Мощность излучения, Вт | 23,5 |
| ФАР, мкмоль/с/м ² | 1,96 |
| PPF, мкмоль/с | 131,7 |
| YPF, мкмоль/с | 113,1 |

Таблица 2. Спектральный состав излучения ФитоStrada_2×2MX&Jenny_4×16_XQE

| | |
|----------------|----|
| Хлорофилл А, % | 29 |
| Хлорофилл В, % | 14 |
| Каротиноиды, % | 21 |

из 12 белых и четырех красных (Photo Red) светодиодов XQ-E.

Технические характеристики рассматриваемой модификации платы приведены в табл. 1, спектральный состав излучения указан в табл. 2.

Спектр излучения ФитоStrada_2×2MX&Jenny_4×16_XQE показан на рис. 11. Расчет проведен в специализированном калькуляторе компании Cree. Данный инструмент дает возможность синтезировать фактически любой спектр, используя все цвета, доступные в линейке светодиодов компании. Протокол отчета включает в себя

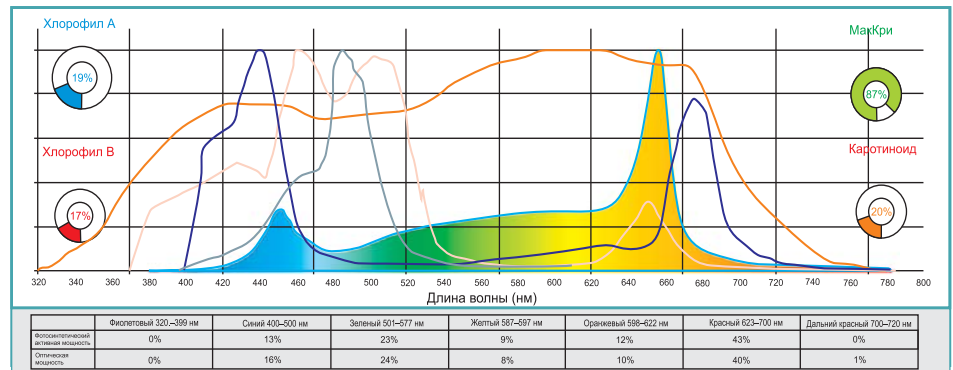


Рис. 11. Спектр излучения Фито Strada_2×2MX&Jenny_4×16_XQE

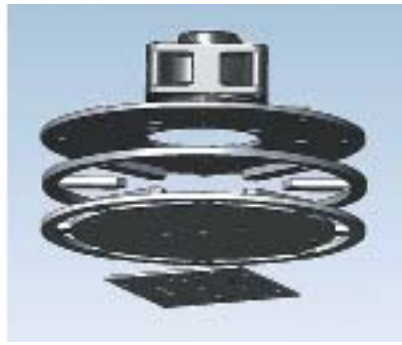


Рис. 12. Радиатор «ПК ИК Технологии» с активным охлаждением



Рис. 13. Светильник в сборе с линзой НВ-2×2МХ

конфигурацию светодиодов с указанием конкретных бинов и условий работы, необходимых для формирования целевого спектра, а также основные параметры решения с точки зрения эффективности применения для освещения растений и параметры цветопередачи.

Оптимизация конструкции LED-фитосветильника

Возвращаясь к задаче создания светильника для теплиц, нам также нужно минимизировать общий вес системы освещения и ее размеры, ибо большой вес системы требует усиления несущей конструкции теплицы, а большие светильники затеняют грядки от солнца днем. Самая тяжелая часть светильника — это система охлаждения светодиодов (радиатор). Чаще всего в качестве радиатора используют большой и тяжелый кусок алюминия, обработанный в меру наличия технологических возможностей. Но есть интересные разработки, позволяющие значительно

снизить вес и размеры радиатора при помощи активного охлаждения. К примеру, компания «ПК ИК Технологии» разработала оригинальный активный радиатор, показанный на рис. 12.

Применение таких радиаторов позволило создать малогабаритный светодиодный фитосветильник мощностью 68 Вт, диаметром 200 мм и весом менее 1 кг (без драйвера) [5].

Конструкция светильника позволяет закрепить плату компании «РУСАЛОКС» со светодиодами Cree на рабочей поверхности радиатора и накрыть светодиодную плату линзой из семейств Strada-2×2МХ или НВ-2×2МХ [5] производства компании LEDiL (рис. 13).

Линза полностью покрывает светодиодную плату и защищает ее от воздействий внешней среды. А штатная силиконовая прокладка, расположенная по периметру линзы, обеспечивает степень герметизации до уровня IP67. Защита светодиодов при помощи линзы дает возможность делать

светильники без плоского защитного стекла, которое поглощает и переотражает до 20% полезного светового потока. Отказ от него позволяет создавать светодиодные светильники, лучшие по энергоэффективности и себестоимости.

Кроме того, линзы в фитосветильниках направляют всю полезную фотосинтетическую активную радиацию на зеленые листья растений, наполненные хлорофиллом. И чтобы с максимальной пользой использовать драгоценные микромоли полезных фотонов, нужно грамотно подобрать оптику и правильно разместить и направить светильники.

Сценарии освещения теплиц

Рассмотрим несколько типовых сценариев освещения теплиц, для этих задач будем использовать оптику LEDiL.

Освещение растений сверху

При освещении растений необходимо учитывать то, что растениям свойственен фототропизм (реакция на направление падения света). Если искусственный свет падает на растения так же, как естественный (сверху), то растениям не приходится расходовать энергию на изменение положения листьев, чтобы получить максимум света, что происходит при боковом освещении. Кроме того, растения будут меньше искривлять стебли.

Рассмотрим теплицу для выращивания рассады или теневых растений, например орхидей, размерами 50×8 м с четырьмя грядками шириной 1 м, расстоянием между осями грядок — 2 м. Светильники расположим на высоте 2,7 м по оси грядок с шагом 0,72 м. Количество светильников в линии — 70 шт., суммарная мощность — 4,7 кВт. Рекомендованный для орхидей PPFД должен быть около 75 мкмоль/с/м².

Для освещения грядок сверху хорошо подойдет семейство линз НВ-2х2МХ [6] со светоди-

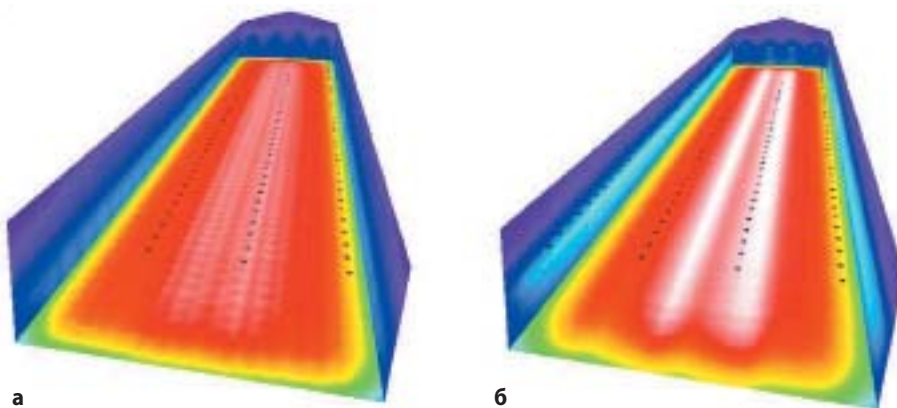


Рис. 14. Освещение теплицы сверху: а) с оптикой CS14713_НВ-2Х2МХ-В с матрицей 4×16_ХQ-Е (Е_{ср} = 4100 (4600) лк, Е_{мин}/Е_{макс} > 0,58, PPFД = 75 (84) мкмоль/с/м², ФАР = 14 (15) Вт/м², СДС (16 ч) = 4,3); б) с оптикой CS14839_НВ-2Х2МХ-WWW с матрицей 4×16_ХQ-Е (Е_{ср} = 4100 (4800) лк, Е_{мин}/Е_{макс} > 0,44, PPFД = 74 (88) мкмоль/с/м², ФАР = 13 (16) Вт/м², СДС (16 ч) = 4,3)

одной платой ФитоStrada_2x2MX&Jenny_4x16_XQE. Распределение света в фиктивных цветах, а также результаты расчета для этого варианта показаны на рис. 14а и 14б. В случае а) получилось более равномерное освещение теплицы в горизонтальной плоскости. В случае б) — лучшая вертикальная составляющая освещенности. Если требуется больше света, то количество светильников надо увеличить или делать светильники, содержащие несколько таких модулей. К примеру, если надо получить 150 мкмоль/с/м², то количество модулей нужно увеличить в два раза.

Освещение растений на столах

Рассмотрим пример освещения стола габаритами 2×2 м. Высота установки светильников над столом — 1,2 м. Лучше

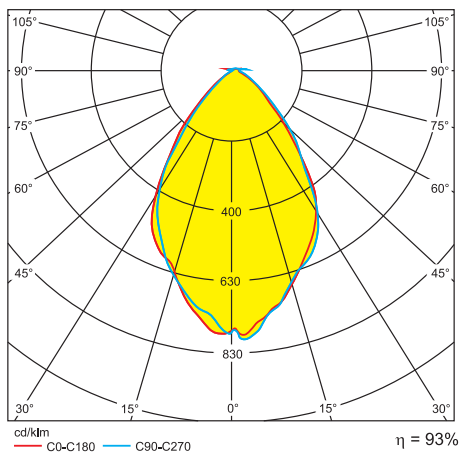


Рис. 15. Диаграмма линзы CS14839_HB-2x2MX-WWW

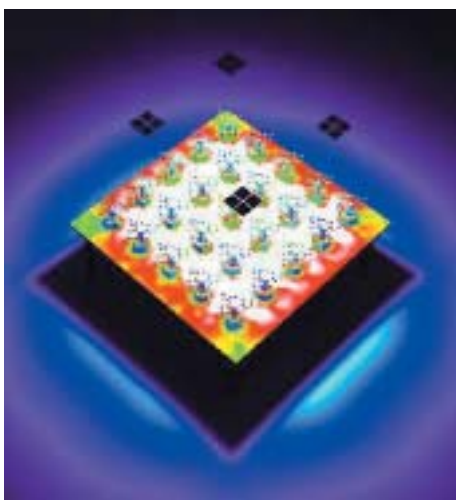


Рис. 16. Освещение растений на столе (результаты расчета E_{сп} = 15340 лк, E_{мин}/E_{сп} = 0,61, PPF_D = 281 мкмоль/с/м²; ФАР = 51 Вт/м²)

всего подойдет сюда линза CS14839_HB-2X2MX-WWW (рис. 15).

Чтобы создать уровень PPF_D более 250 мкмоль/с/м², потребуется всего четыре светильника по четыре модуля с платой ФитоStrada_2x2MX&Jenny_4x16_XQE, расположенные по квадрату со стороной 1 м (рис. 16).

Из расчета PPF_D определим время работы такой установки так, чтобы СДС = 10(12). Получается всего 10(12) ч для большинства растений. Для теневых растений и рассады количество модулей в светильниках можно сократить до 1 шт.

Освещение растений на стеллажных полках

Как правило, при выращивании салатов используются стеллажи, имеющие несколько уровней один над другим — от семян салата до живого растения в специальной климатической камере.

Рассмотрим освещение такого стеллажа с габаритами каждой полки 10×2×0,8 м (Д×Г×В). Светильники устанавливаются

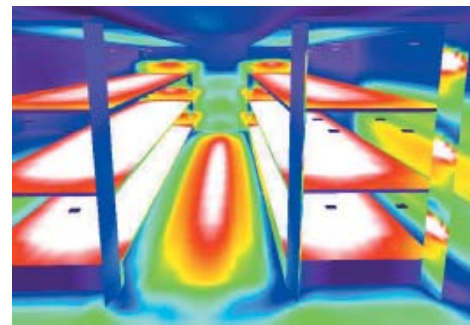


Рис. 17. Освещение стеллажа (результаты расчета E_{сп} = 8080 лк, E_{мин}/E_{сп} = 0,63; PPF_D = 149 мкмоль/с/м², ФАР = 26 Вт/м²)

на высоте 0,6 м от растений. Так как размещение светильников одинаково для каждой полки, то приведем распределение освещенности на одной полке (рис. 17). Схема установки — четыре линии по 10 светильников с шагом 0,5 м между линиями и 1 м между светильниками в линии.

Чтобы обеспечить рекомендуемое значение PPF_D (150 мкмоль/с/м²) на одной полке площадью 20 м², требуется всего 26 светильников (две линии по 13 шт. с шагом 0,78 м) с оптикой CS14764_STRADA-2X2MX-VSM и платой ФитоStrada_2x2MX&Jenny_4x16_XQE. Световая диаграмма линзы показана на рис. 18. При этом суммарная электрическая мощность на одну полку составит 1,74 кВт.

Боковая подсветка растений

Так как верхний свет не всегда достигает нижних листьев растений, то в некоторых случаях используют боковую досветку с целью повышения урожайности. Пример такого освещения грядок показан на рис. 1. Для таких задач разумно

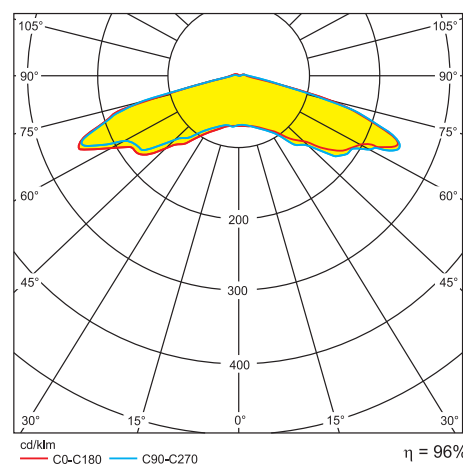


Рис. 18. Диаграмма линзы CS14764_STRADA-2x2MX-VSM

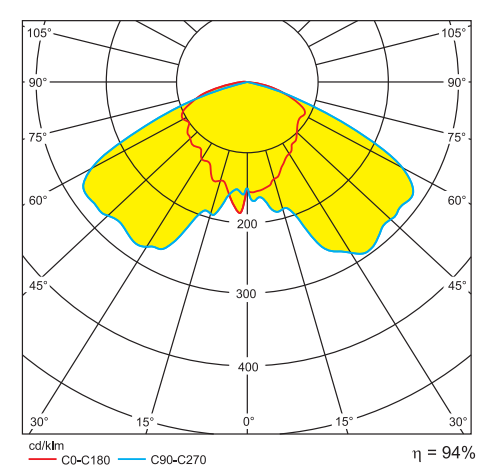


Рис. 19. Диаграмма линзы C14642_FLORENCE-1R-UP

применять линейную оптику с широкой световой диаграммой, например линзу CS14642_FLORENCE-1R-UP. Диаграмма распределения силы света этой линзы представлена на рис. 19.

Фитотрон

Схемотехника платы ФитоStrada_2x2MX&Jenny_4x16_XQE позволяет отдельно управлять четырьмя цепочками разноцветных светодиодов, что дает возможность создавать на ее основе источники света для исследовательских фитотронов (помещений для выращивания растений в искусственно регулируемых условиях).

Так, сочетание оптики CS14839_HB-2x2MX-WWW и CS14764_STRADA-2x2MX-VSM в соотношении 2:1 можно использовать в лабораторном фитотроне, в котором воссоздаются специальные микроклиматические условия для выращивания растений. В таких устройствах важный вопрос отводится качеству смещения цветов, так как важно, чтобы растения получали не только равномерное освещение, но и равномерный спектральный состав, что достигается с помощью самой оптики (направление света как в горизонтальную, так и в вертикальную плоскость) и усиливается зеркальным покрытием стенок.

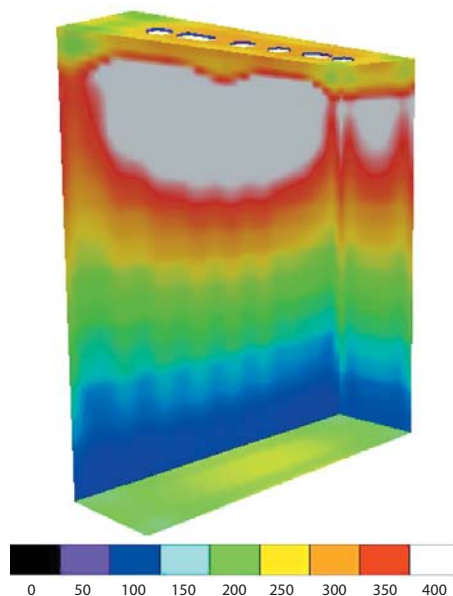


Рис. 20. Распределение освещенности внутри фитотрона (результаты расчета на полу $E_{ср} = 11730$ лк, $E_{мин}/E_{ср} = 0,8$, $PPFD = 215$ мкмоль/с/м², $ФАР = 39$ Вт/м²)

Рассмотрим фитотрон с габаритами 2x0,6x2,3 м, коэффициент отражения стенок $\rho = 77\%$ (рис. 20).

Внутри фитотрона при освещении в течение 14(16) ч СДС будет равна 10,8(12,4) моль/м²/день,

что позволяет выращивать большинство растений.

В статье рассмотрены возможности создания тепличных светильников с использованием:

- светодиодов Cree с высокой ФАР;
- оригинальных плат «РУСАЛОКС»;
- активных радиаторов, позволяющих создавать легкие и мощные светильники;
- оптики LEDiL, которая позволяет равномерно осветить рядки минимальным количеством светильников.

Применяя в разных комбинациях эти компоненты и технологии, можно создать современные, инновационные LED-фитосветильники, которые будут способствовать повышению урожайности тепличных растений при уменьшении затрат. ●

Литература

1. <http://фитосветильники.рф/>
2. https://ru.wikipedia.org/wiki/Фотосинтетически_активная_радиация
3. www.navigantresearch.com/
4. http://rusalox.ru/product/fitostrada_2x2mx-jenny_4x16_xqe/
5. www.freepm.ru/Models/135076
6. www.svetolego.com/2x2-mx-prom
7. www.svetolego.com/svtotehraschet