

Исследование характеристик светодиодов для фитооблучателей

М.М. ЕРОХИН^{1,2}, П.В. КАМШИЛОВ^{1,3}, В.Г. ТЕРЕХОВ^{1,3}, А.Н. ТУРКИН^{2,3}

¹ ВНИСИ им. С.И. Вавилова, Москва

² МГУ им.М.В.Ломоносова, физический факультет, Москва

³ НИУ «МЭИ», Москва

⁴ E-mail: andrey@turkin.su

Аннотация

Проведены комплексные исследования светодиодов (СД) красного, зелёного и синего света, широко используемых в фитооблучателях для выращивания растений в предприятиях закрытого грунта в условиях светокультуры, включающие в себя измерения спектров излучения красных, зелёных и синих СД в широком диапазоне значений тока при комнатной температуре. Выявлены сдвиги спектральных максимумов излучения красных и зелёных светодиодов при увеличении рабочего тока. На основе результатов проведённых исследований выработаны рекомендации по выбору рабочего режима источников света, используемых в фитооблучателях для выращивания растений в условиях светокультуры, а также предложена модель фитооблучателя с исследованными в данной работе красными, зелёными и синими СД, излучение которых охватывает все области фотосинтетически активной радиации (ФАР).

Ключевые слова: светодиод, СД, фитооблучатель, предприятие закрытого грунта, теплица, светокультура растений.

1. Введение

Оптическое излучение всё в большей степени используется в современных технологических процессах в промышленности и сельском хозяйстве, становится неотъемлемой частью химических производств, играет важную роль в животноводстве, птицеводстве и тепличном растениеводстве [1–3].

Воздействие излучения видимой части спектра на растения исследовалось многими авторами (см., например, [3, 4]). В [4] исследовали влияние освещённости и спектрального состава излучения на эффективность фотосинтеза и продуктивность различных растений, у которых за поглощение света отвечают специальные пигменты, такие как хлорофилл *a* и хлорофилл *b*, каротиноиды и прочие. Хлорофиллы поглощают свет синего и красного спектрального диапазонов, а каротиноиды – синего и зелёного диапазонов. Энергия излучения, поглощаемая различными пигментами, расходуется на развитие корневой системы, созревание плодов, цветение растений и т.д. Остальные части спектра, за исключением янтарного, растениями практически не используются [3, 5, 6].

Парниковые или тепличные фермы – это далеко не новые технологии, но в условиях постоянно растущего населения земного шара и стремления к стабильному, высокоэффективному и стандартизированному производству продуктов питания они станут нормой в будущем, открывая новый огромный сектор агропромышленности. Одним из наиболее важных достижений, определивших

будущее предприятий закрытого грунта и целесообразность их строительства, стало бурное развитие светодиодных технологий [3]. Современные светодиоды (СД) позволяют создавать осветительные и облучательные приборы с требуемым спектральным составом излучения, будучи при этом чрезвычайно устойчивыми к жёстким условиям окружающей среды и относительно небольшими по физи-

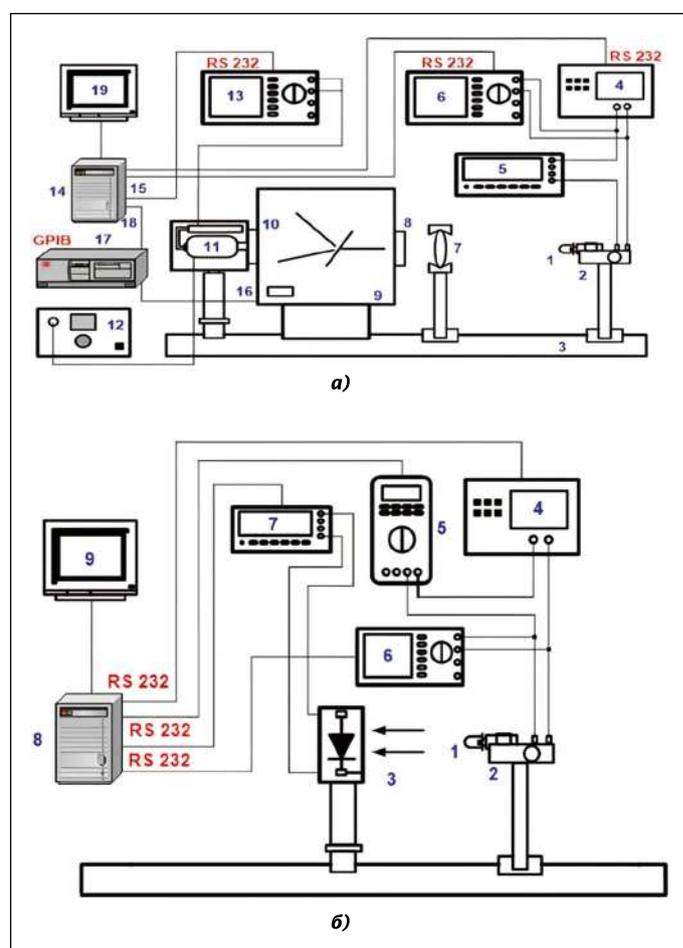


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:
а – Установка для измерения спектров излучения СД
1 – СД, 2 – регулируемый держатель СД, 3 – оптическая скамья, 4 – источник питания, 5 – амперметр, 6 – вольтметр, 7 – коллиматорная линза, 8 – входная щель, 9 – призматический монохроматор SPM-2, 10 – выходная щель, 11 – ФЭУ, 12 – блок питания ФЭУ, 13 – вольтметр, 14 – блок управления, 15 – порт управления шаговым двигателем, 16 – шаговый двигатель, 17 – компьютер, 18 – порт управления шаговым двигателем, 19 – монитор;
б – Установка для измерения зависимости потоков излучения СД от тока
1 – СД, 2 – регулируемый держатель СД, 3 – фотоприёмник, 4 – источник питания, 5 – амперметр, 6 – вольтметр, 7 – блок управления, 8 – компьютер, 9 – монитор

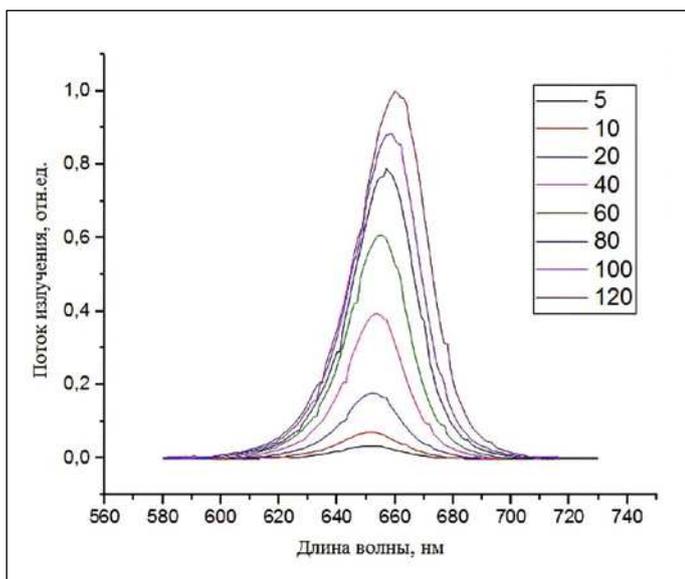


Рис. 2. Типичные спектры красных СД при разных значениях тока (цифры на рисунке соответствуют силе тока в мА)

ческим размерам по сравнению с другими осветительными и облучательными приборами. Кроме того, они имеют значительно большие сроки службы, отличаются низкими рабочими напряжениями и характеризуются сравнительно небольшими тепловыми потерями [7].

Целью данной работы является формирование базы для выбора СД, предназначенных для использования в фитооблучателях для выращивания растений в предприятиях закрытого грунта в условиях светокультуры. Для достижения этой цели была поставлена задача исследования спектральных характеристик СД красного, зелёного и синего света, объяснение особенностей поведения этих спектральных характеристик, а также моделирование фитооблучателя с охватывающим всю область фотосинтетически активной радиации (ФАР) и, что не менее важно, управляемым спектром излучения.

Данные исследования представляют одно из направлений, принятых в настоящее время, которое основывается

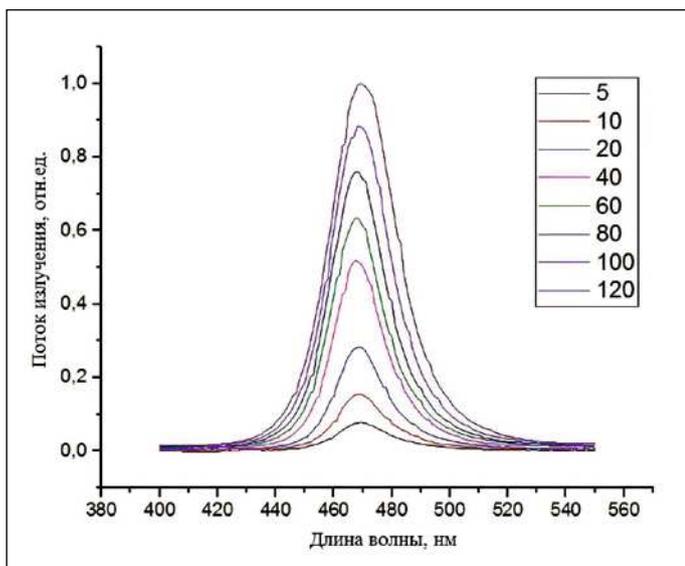


Рис. 4. Типичные спектры синих СД при разных значениях тока (цифры на рисунке соответствуют силе тока в мА)

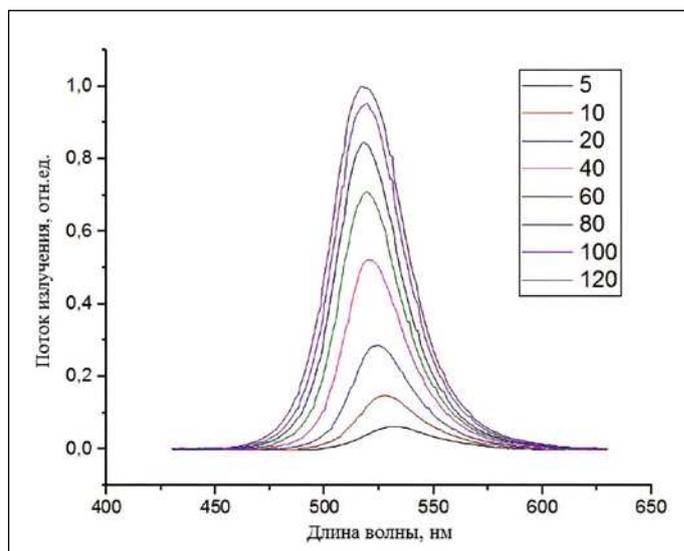


Рис. 3. Типичные спектры зелёных СД при разных значениях тока (цифры на рисунке соответствуют силе тока в мА)

на использовании цветных (монохроматических) СД для применения в фитооблучателях. С этим связан выбор для исследований образцов трёх диапазонов длин волн – синего, зелёного и красного цвета.

2. Методика эксперимента

Исследования характеристик СД красного, зелёного и синего света производились с использованием автоматизированной экспериментальной установки на основе монохроматора *SPM-2*. Эта установка, схема которой приведена на рис. 1, позволяет производить измерения спектров излучения СД в широком диапазоне токов, а также зависимости потоков излучения СД от тока. Объектами исследований при этом являлись СД красного, зелёного и синего света, кристаллы которых были выращены методами газовой эпитаксии из металлоорганических соединений. Размер кристалла в исследуемых СД составляет примерно 0,350 мм × 0,350 мм. Кристаллы монтировались в отражатель металлического основания, площадь которого составляет порядка 1,0 см². Применение такого основания снижает тепловое сопротивление СД и создаёт возможность для повышения рабочих токов. Конструкция основания предусматривает металлические выводы для монтажа и электрическое соединение СД. Пространство отражателя заполняется оптическим гелем на основе полимерного материала, что улучшает коэффициент вывода излучения из кристалла. Сверху корпус СД закрывается линзой из поликарбоната, которая позволяет формировать кривую светораспределения с углом порядка 30°. Оптический гель образует вокруг кристалла среду, которая не создаёт на него большую механическую нагрузку и допускает небольшие деформации из-за теплового расширения. Это позволяет повышать значение предельного тока через кристалл небольшого размера до рассмотрения других типов 150 мА. При этом конструкция и технология изготовления исследуемых СД является достаточно типичной для данного вида, что позволяет использовать полученные результаты в качестве основы для рассмотрения других типов СД.

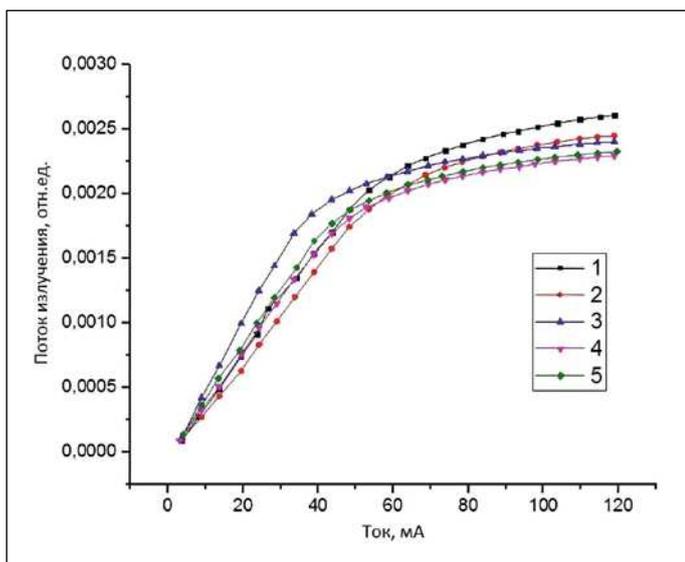


Рис. 5. Зависимости потоков излучения красных СД от тока (цифры на рисунке соответствуют номерам образцов)

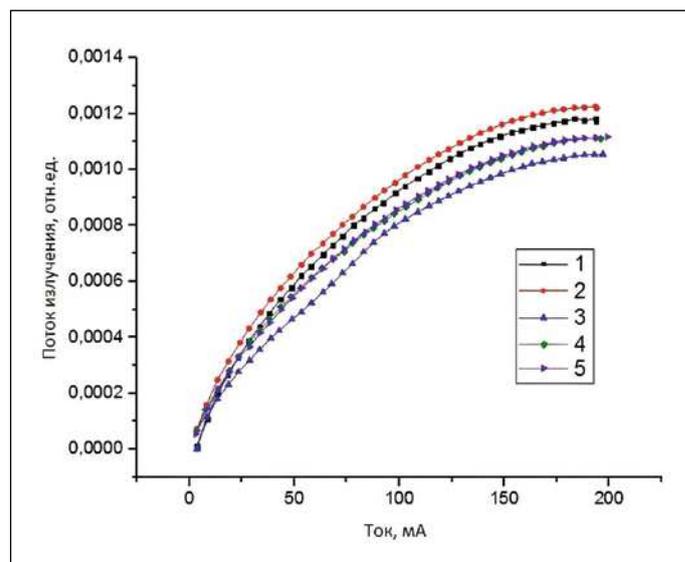


Рис. 6. Зависимости потоков излучения зелёных СД от тока (цифры на рисунке соответствуют номерам образцов)

3. Экспериментальные результаты

В процессе работы были проведены измерения спектров излучения исследуемых СД при разных значениях тока в диапазоне от 5 до 120 мА, типичные примеры которых приведены на рис. 2–4.

У красного СД (рис. 2) при увеличении тока можно наблюдать сдвиг положения максимума относительного спектрального распределения потока излучения в длинноволновую область спектра примерно на 20 нм – из области, приблизительно соответствующей длине волны 650 нм, в область, соответствующую длине волны 670 нм. Подобный сдвиг является характерным для структур на основе фосфида галлия и его твёрдых растворов, излучающих красный и жёлтый свет [8].

У зелёного СД (рис. 3) также наблюдается сдвиг положения максимума с увеличением тока. В этом случае сдвиг происходит в коротковолновую область спектра примерно на 10 нм – из области длин волн, приблизительно соот-

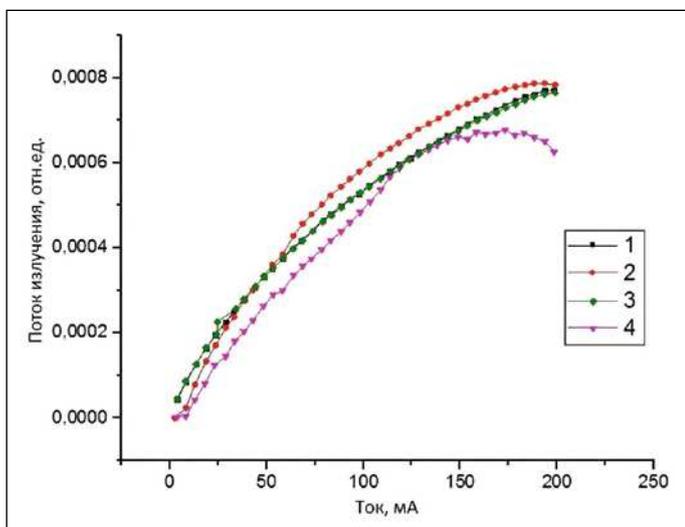


Рис. 7. Зависимости потоков излучения синих СД от тока (цифры на рисунке соответствуют номерам образцов)

ветствующей длине волны 530 нм, в область, соответствующую длине волны 520 нм. Подобный сдвиг положения максимума спектра излучения является достаточно характерным для гетероструктур на основе нитрида галлия и его твёрдых растворов, излучающих зелёный свет [9–12].

В спектре синего СД (рис. 4) с ростом тока сдвиг положения максимума практически не наблюдается: при всех рассмотренных значениях тока длина волны максимума спектрального распределения потока излучения находится в области, приблизительно соответствующей длине волны 470 нм. Отсутствие сдвига длины волны максимума спектрального распределения потока излучения с увеличением тока для кристаллов на основе нитрида галлия и его твёрдых растворов, излучающих синий свет, также является достаточно характерным [9–12].

Отсутствие сдвига положения максимума спектрального распределения потока излучения синих СД при увеличении тока может быть связано с более однородной структурой активной области кристаллов синих СД в связи с меньшей концентрацией индия, и, как следствие, меньшей зависимостью энергии рекомбинации носителей от температуры.

На графиках зависимости потока излучения СД от тока (рис. 5–7) видно, что для красных СД (рис. 5) при токах, меньших чем 35–40 мА, наблюдается линейное увеличение потока излучения при увеличении тока. При дальнейшем увеличении тока, примерно до 60 мА, продолжает наблюдаться увеличение потока излучения, но при этом скорость роста потока излучения снижается. При токах, больших чем 70–80 мА, при увеличении тока рост потока излучения постепенно прекращается, и графики зависимости потока излучения от тока выходят на насыщение при токе порядка 120 мА или выше.

Аналогичный характер зависимости потока излучения от тока наблюдается для зелёных (рис. 6) и синих (рис. 7) СД. При значениях тока, меньших чем примерно 35 мА, зависимости потоков излучения зелёных СД от тока также можно приблизительно аппроксимировать линейной функцией. При дальнейшем повышении тока рост потока излучения начинает замедляться. У зелёных СД насы-

Результаты аппроксимации спектров излучения красных СД

$J, \text{А/см}^2$	$\hbar\omega_{max}, \text{эВ}$	$E_g^*, \text{эВ}$	$E_0, \text{эВ}$	$E_1, \text{эВ}$
5,56	1,906	1,885	0,015	0,021
11,11	1,902	1,893	0,017	0,026
22,22	1,901	1,894	0,015	0,028
44,44	1,898	1,892	0,017	0,027
66,67	1,895	1,888	0,017	0,027
88,89	1,890	1,876	0,018	0,027
111,11	1,885	1,875	0,016	0,030
133,33	1,872	1,858	0,016	0,033

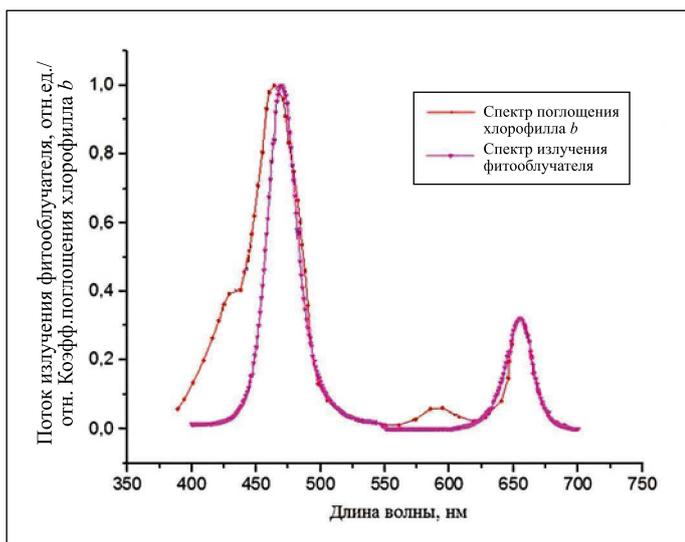


Рис. 8. Спектр поглощения хлорофилла b и смоделированный спектр излучения фитооблучателя

шение потока излучения наблюдается при более высоких, чем у красных СД, значениях тока, равных примерно 125–150 мА.

У синих СД (рис. 7) линейная зависимость потока излучения от тока наблюдается при токах, меньших чем примерно 75–80 мА, тогда как при дальнейшем увеличении тока рост потока излучения начинает плавно замедляться, как и у зелёных светодиодов, и насыщение потока излучения наблюдается у синих светодиодов при значениях тока, превышающих примерно 130–150 мА.

4. Обсуждение экспериментальных результатов

1. Отмеченное выше изменение наклона зависимостей потоков излучения от тока в области больших токов, а именно, при плотности тока, превышающей 130 А/см² для красных СД и превышающей 140 А/см² для зелёных и синих СД, можно объяснить нагревом активных областей СД кристаллов, который приводит к изменению механизмов протекания тока и механизмов рекомбинации носителей в активной области.

2. Для описания основных пиков спектров излучения можно воспользоваться предложенной в [14] аппроксимацией спектров излучения, которую можно представить в виде:

$$I(\hbar\omega) = A_0 \cdot \frac{1 + \exp\left(-\frac{\hbar\omega_{max} - E_g}{E_0}\right)}{1 + \exp\left(-\frac{\hbar\omega - E_g}{E_0}\right)} \times \frac{1 + \exp\left(\frac{\hbar\omega_{max} - (E_g + \Delta F)}{E_1}\right)}{1 + \exp\left(\frac{\hbar\omega - (E_g + \Delta F)}{E_1}\right)}. \quad (1)$$

где $\hbar\omega_{max}$ — энергия максимума спектрального распределения, E_g — ширина запрещённой зоны активной области

кристалла, ΔF — сдвиги энергетических зон (валентной и проводимости) в активной области кристалла, E_0 и E_1 — параметры аппроксимации спектров в длинноволновой и коротковолновой областях соответственно.

Результаты аппроксимации для красных, зелёных и синих СД приведены в табл. 1, 2 и 3 соответственно. При этом значения параметров приведены для нескольких плотностей тока, что делает возможным их использования для сравнения СД с кристаллами разной площади.

Из табл. 1 следует, что при увеличении плотности тока, протекающего через кристалл, у красных СД наблюдается смещение положения максимума излучения $\hbar\omega_{max}$ в сторону более низких энергий, что соответствует наблюдавшемуся в эксперименте сдвигу спектра в длинноволновую область.

Из результатов, представленных в табл. 2, следует, что имеет место смещение максимума излучения зелёных СД в сторону более высоких энергий, что также соответствует наблюдавшемуся в эксперименте сдвигу спектров зелёных СД в коротковолновую область излучения при увеличении плотности тока, протекающего через кристалл. Также можно заметить, что с увеличением плотности тока сдвиг положения максимума уменьшается, и при плотностях тока, больших чем 100 А/см², он практически перестаёт наблюдаться.

Результаты, представленные в табл. 3, говорят о том, что смещение максимума излучения при увеличении плотности тока, протекающего через кристалл, у синих СД не наблюдается, в отличие от красных и зелёных СД. Приведённые результаты расчётов, как и в случаях красных и зелёных СД, соответствуют полученным для синих СД экспериментальным данным.

3. По параметру аппроксимации E_1 можно оценить нагрев структуры. Заметим, что для всех исследуемых СД можно считать $E_1 \approx kT$, что при комнатной температуре составляет примерно 26 мэВ. Таким образом, по результатам аппроксимации спектров излучения при разных токах можно оценить нагрев активной области кристаллов при разных значениях плотности токов.

Результаты аппроксимации спектров излучения
зелёных СД

$J, \text{А/см}^2$	$\hbar\omega_{max}, \text{эВ}$	$E_g, \text{эВ}$	$E_0, \text{эВ}$	$E_I, \text{эВ}$
5,56	2,332	2,282	0,048	0,029
11,11	2,350	2,341	0,055	0,030
22,22	2,365	2,361	0,056	0,030
44,44	2,379	2,391	0,058	0,033
66,67	2,387	2,408	0,058	0,035
88,89	2,391	2,401	0,057	0,039
111,11	2,390	2,386	0,057	0,041
133,33	2,390	2,377	0,056	0,046

Таблица 3

Результаты аппроксимации спектров излучения синих СД

$J, \text{А/см}^2$	$\hbar\omega_{max}, \text{эВ}$	$E_g^*, \text{эВ}$	$E_0, \text{эВ}$	$E_I, \text{эВ}$
5,56	2,644	2,634	0,045	0,027
11,11	2,644	2,634	0,043	0,028
22,22	2,644	2,634	0,038	0,029
44,44	2,649	2,640	0,040	0,030
66,67	2,649	2,640	0,041	0,033
88,89	2,649	2,649	0,044	0,034
111,11	2,644	2,649	0,045	0,039
133,33	2,640	2,640	0,048	0,041

необходимое для того или иного растения, и таким образом разработать оптимизированный фитооблучатель под каждый тип растений, что может быть экономически целесообразным.

На основе полученных результатов были смоделированы спектры фитооблучателей. Моделирование производилось таким образом, чтобы спектр излучения облучателя был максимально приближен к спектру поглощения того или иного пигмента растения. Например, на рис. 8 представлен спектр поглощения пигмента хлорофилла *b*, а также спектр смоделированного фитооблучателя (рабочие токи красных, зелёных и синих СД равны, соответственно, 60 и 80 мА). Как видно на рисунке, спектр излучения смоделированного фитооблучателя хорошо согласуется со спектром поглощения пигмента хлорофилла *b*, а значит, такой излучатель может обеспечить сравнительно большую энергоэффективность.

Нагревом можно объяснить и заметное на рис. 2–4 увеличение полуширины пика, которое в переводе на длины волны составило в среднем примерно от 10 до 25 нм.

Такой сдвиг особенно чётко проявляется у красных СД, кристаллы которых изготовлены на основе сложных четверных растворов алюминия, галлия, индия и фосфора, а также у зелёных СД, в активной области кристаллов которых имеет место высокая концентрация индия. В активной области кристаллов синих СД концентрация индия ниже, и сдвиг выражен не так ярко.

4. Параметр аппроксимации E_0 для красных, зелёных и синих СД варьируется в пределах 15–20 эВ, 45–60 эВ и 50–62 эВ соответственно. Видно, что для красных СД значения данного параметра меньше, чем kT , но отличие не очень существенное, а для зелёных и синих СД значение параметра E_0 заметно больше, чем kT . Это различие особенно сильно проявляется в нитридах из-за больших флуктуаций потенциала.

5. На основе полученных результатов можно сформулировать рекомендации для разработки и производства источников света и светотехнических изделий на основе красных, зелёных и синих СД. Поскольку с увеличением тока в спектрах красных и зелёных СД наблюдается сдвиг положения максимума, то указанный сдвиг нужно учитывать при выборе рабочего режима светотехнического устройства путём подбора как диапазона рабочего тока, так и теплового режима. При этом правильный выбор рабочего тока и теплового режима важен ещё и потому, что увеличение плотности тока в активной области кристалла СД приводит к её перегреву, который может быть критичным для деградации параметров СД и источников света и фитооблучателей на их основе. Для подбора теплового режима следует использовать эффективные средства отвода тепла, вплоть до принудительного охлаждения СД устройства в тех случаях, когда это является критичным.

5. Моделирование фитооблучателя

На основе проведённых исследований характеристик СД было выполнено моделирование источника излучения с управляемым спектром, предназначенного для использования в фитооблучателях. В качестве управляющих параметров использовались ток для изменения положения спектральных максимумов в той или иной области активного поглощения пигментов и количество работающих единичных излучателей для корректировки соотношения потоков излучения или фотонов в различных диапазонах области ФАР [2,3].

Такой фитооблучатель смог бы обеспечить необходимый спектр излучения для различных вегетационных периодов. Другими словами, он смог бы обеспечить необходимый спектр в течение всего периода роста растения и при этом требовал бы минимальных затрат энергии. Меняя управляющие параметры, можно добиться сравнительно высокой производительности на любой из стадий роста растения. Ещё одним преимуществом такого фитооблучателя является то, что он охватывает сравнительно большой спектральный диапазон, включающий в себя всё – и красную, и зелёную, и синюю – области ФАР. После моделирования источника излучения с перестраиваемым спектром и проведения исследований с его помощью, можно определить оптимальное количество светодиодов,

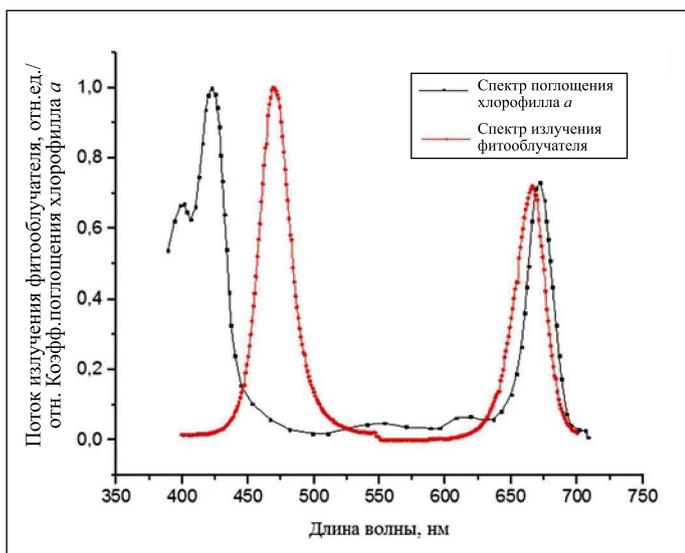


Рис. 9. Спектр поглощения хлорофилла *a* и смоделированный спектр излучения фитооблучателя

Следует отметить, что исследуемые СД не перекрывают часть приведённого на рис. 8 спектра поглощения хлорофилла *b* (область 600–620 нм). Для охвата этого участка спектра было бы целесообразно использовать СД янтарного цвета, которые в данной работе не исследовались.

На рис. 9 представлен спектр поглощения пигмента хлорофилла *a*, а также спектр соответствующего смоделированного фитооблучателя (рабочие токи красных, зелёных и синих СД равны, соответственно, 120 и 100 мА). Из рисунка видно, что с помощью исследованных СД можно сформировать спектр, который относительно хорошо согласуется со спектром поглощения пигмента только в длинноволновой области.

Для охвата коротковолновой области спектра поглощения пигмента хлорофилла *a* и других пигментов целесообразно использовать фиолетовые СД [13, 14]. На рис. 10 представлены спектры излучения таких СД при различных значениях тока [13, 14]. Как видно на рисунке, максимум излучения этих СД соответствует максимуму поглощения пигмента хлорофилла *a* в фиолетовой области спектра (рис. 9), а это говорит о том, что при использовании данных СД фитооблучатель сможет эффективно работать с пигментами и в коротковолновой области спектра.

6. Заключение

В результате проведённых исследований красных, синих и зелёных СД были получены зависимости их спектров и потоков излучения от тока. С помощью проведённых аппроксимаций были объяснены механизмы протекания тока и рекомбинации в исследованных СД, а также установлена корреляция между результатами спектральных измерений и измерений зависимости потока излучения от тока для красных, зелёных и синих СД. На основе полученных экспериментальных результатов была предложена модель фитооблучателя с управляемым спектром излучения, сформированная с учётом выявленных экспериментально спектральных особенностей, например, сдвига положения максимума спектра излучения при увеличении тока в сторону длинных волн у красных СД и в сторону

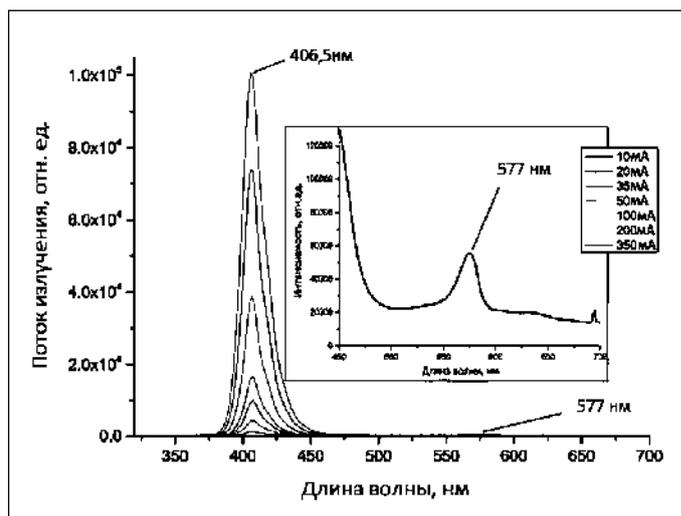


Рис. 10. Спектр излучения фиолетового СД при различных значениях тока [13]

коротких волн у зелёных СД, тогда как у синих СД сдвиг положения максимума не наблюдался. Проведённое моделирование показало, что эти фитооблучатели позволяют перестраивать спектр излучения в зависимости от потребностей – различные вегетационные периоды роста растений требуют различные спектры излучения, т.к. в разные периоды развития растения за его рост отвечают пигменты с разными спектрами поглощения.

Похожая модель многоцветного источника излучения с управляемым спектром была описана в [15], где авторы предложили многоцветный источник света на основе светодиодов с возможностью управления спектром путём измерения тока через светодиоды для использования в качестве универсального калибровочного источника. Различия состоит в том, что авторы [15] помимо цветных СД, излучающих в разных диапазонах видимого спектра, использовали ещё и СД белого света. Принимая во внимание полученные в [15] результаты, можно предположить, что использование СД белого света целесообразно и в фитооблучателях, и исследование характеристик таких СД и моделирования фитооблучателей с их использованием может являться темой продолжения описанных выше исследований.

Исследования проводились при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта «Комплексные исследования в области светоделикультуры растений и создание высокоэффективных светодиодных фитооблучателей, обеспечивающих повышение энергоэффективности промышленных теплиц». Соглашение о предоставлении субсидии № 14.576.21.0099 от 26.09.2017 г. Идентификатор Соглашения: 0000000007417PD20002. Уникальный идентификатор работ (проекта) RFMEFI57617X0099.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочная книга по светотехнике / Под ред. Ю.Б. Айзенберга. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Знак, 2006. – 972 с.
2. Прикупец Л.Б. Технологическое освещение в агропромышленном комплексе России // Светотехника. – 2017. – № 6. – С. 6–14.
3. Прикупец Л.Б., Боос Г.В., Терехов В.Г., Тараканов И.Г. Исследование влияния излучения в различных диапазонах области ФАР на продуктивность и биохимический состав биомассы салатно-зелёных культур // Светотехника. – 2018. – № 5. – С. 6–12.

4. Протасова Н.Н. Светокультура как способ выявления потенциальной продуктивности растений // Физиология растений.– 1987. – Том 34, № 4. – С. 812–822.

5. Бахарев И.А., Прокофьев А.Ю., Туркин А.Н., Яковлев А.А. Применение светодиодных светильников для освещения теплиц: реальность и перспективы // СТА.– 2010.– № 2. – С. 76–82.

6. Прокофьев А.Ю., Туркин А.Н., Яковлев А.А. Перспективы применения светодиодов в растениеводстве // Полупроводниковая светотехника.– 2010.– № 5. – С. 60–63.

7. Блейки Р. Светодиодное освещение – будущее растениеводства // Полупроводниковая светотехника.– 2018.– № 2. – С. 54–58.

8. Шуберт Ф. Светодиоды. Пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича, 2-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008.– 496 с.

9. Золина К.Г., Кудряшов В.Е., Туркин А.Н., Юнович А.Э. Спектры люминесценции голубых и зелёных светодиодов на основе многослойных гетероструктур InGaN/AlGaIn/GaN с квантовыми ямами // ФТП.– 1997. – Том 31, № 9. – С. 1055–1061.

10. Kudryashov, V.E., Turkin, A.N., Yunovich, A.E., Zolina, K.G., Nakamura, S. Spectra of superbright blue and green InGaN/AlGaIn/GaN light-emitting diodes // Journal of the European Ceramic Society. – Vol. 17, Issues 15–16. – P. 2033–2037.

11. Yunovich, A.E., Kovalev, A.N., Kudryashov, V.E., Turkin, A.N., Zolina, K.G., Kovalev, A.N., Manyachin, F.I. Mechanism of electroluminescence in InGaN/AlGaIn/GaN heterojunctions with quantum wells // Proc. of the 2nd Symp. on III–V Nitride Materials and Processes. Electrochem. Soc., Pennington, NJ.– 1998. – Vol. 98–02. – P. 83–102.

12. Кудряшов В.Е., Туркин А.Н., Юнович А.Э., Ковалёв А.Н., Маняхин Ф.И. Люминесцентные и электрические свойства светодиодов InGaN/AlGaIn/GaN с множественными квантовыми ямами // ФТП.– 1999. – Том 33, № 4. – С. 445–450.

13. Авакянц Л.П., Асланян А.Э., Боков П.Ю., Волков В.В., Матешев И.С., Туркин А.Н., Червяков А.В., Юнович А.Э. Люминесцентные и электрические свойства ультрафиолетовых и фиолетовых светодиодов из гетероструктур на основе нитрида галлия // Учёные записки физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.– 2016.– № 3, 163401–1 – 163401–7.

14. Волков В.В., Коган Л.М., Туркин А.Н., Юнович А.Э. Спектры люминесценции мощных светодиодов на основе нитрида галлия в ультрафиолетовой и фиолетовой областях спектра // ФТП.– 2018. – Том 52, № 10. – С. 1172–1176.

15. Карли Н., Сперлинг А., Бизяк Г. Реализация лабораторного образца настраиваемого многоцветного источника света // Светотехника.– 2019.– № 5. – С. 13–19.



Ерохин Михаил Михайлович. Окончил в МГУ им. М.В. Ломоносова (2019 г.). Инженер испытательного центра ВНИСИ им. С.И. Вавилова



Камшилов Павел Валентинович. Окончил в 1998 году Московский государственный университет геодезии и картографии (1998 г.) по специальности «Опτικο-электронные приборы и системы». Главный специалист ВНИСИ им. С.И. Вавилова, ассистент кафедры светотехники НИУ «МЭИ»



Терехов Владислав Геннадьевич, инженер. Окончил с отличием Московский государственный университет экономики, статистики и информатики по специальности «Прикладная информатика в экономике». Руководитель департамента по продвижению МСК «БЛ Групп» и научный сотрудник ВНИСИ им. С.И. Вавилова. Член оргкомитета Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия. Структуры и приборы» и эксперт по энергосберегающим технологиям в освещении Российского союза строителей



Туркин Андрей Николаевич, кандидат физико-математических наук. Окончил МГУ им. М.В. Ломоносова (1995 г.). Доцент кафедры оптики, спектроскопии и физики наносистем физического факультета ФГБОУ ВПО «МГУ им. М.В. Ломоносова». Доцент кафедры светотехники НИУ «МЭИ»

Учёные научились «хранить» механические и световые волны

Волны света и звука лежат в основе большинства наших технологий – от двигателей до смартфонов. Учёные, однако, ещё не нашли способа сохранить волну в целостности на неопределённое время, а затем направить её в нужную точку, пишет *Science Daily*.



Эксперимент учёных из Городского университета Нью-Йорка и Технологического института Джорджии доказал, что нетрадиционные формы возбуждения открывают новые возможности контроля за распространением и рассеянием волн. Аккуратно настроив временную зависимость от возбуждения, можно поймать волну в полости, а затем выпустить её в нужном направлении. Для этого исследователям нужно было понять, как изменить базовые взаимодействия между волнами и материалами. Когда волна света или звука сталкивается с препятствием, она либо частично поглощается, или отражается и рассеивается. Процесс поглощения вызывает немедленное превраще-

ние волны в тепло или другие формы энергии. Вещества, не поглощающие волны, могут только отражать их.

Целью учёных был поиск метода имитации процесса поглощения без превращения волны в другие формы энергии, но сохранение её в материале. Эта идея, предложенная теоретиками два года назад, получила название *когерентной виртуальной поглощения*. Чтобы доказать эту теорию, пришлось подогнать временную эволюцию волн таким образом, чтобы, вступая в контакт с неабсорбирующими материалами, они не отражались и не поглощались. Волна должна быть поймана внутри, как если бы она была поглощена – и её можно будет освободить по необходимости.

Этот универсальный метод, экспериментально уже опробованный на механических волнах, можно с тем же успехом использовать для радиоволн или света, утверждают авторы опубликованной в журнале «*Science Advances*» статьи. Так что соответствующие устройства в будущем могли бы преобразить то, как мы собираем энергию, храним информацию и разное-разное другое.

nanonewsnet.ru
03.09.2019