

Высокоэффективные укрывные материалы с квантовыми точками для теплиц

С.А. ПАВЛОВ¹, С.Л. КОРЯКИН^{1, 2}, Н.Е. ШЕРСТНЕВА¹, Е.Ю. МАКСИМОВА^{1, 3}, Е.М. АНТИПОВ^{1, 2}

¹ РХТУ им. Д.И. Менделеева, г. Москва

² МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва

³ E-mail: maksimovalkm@yandex.ru

Аннотация

Рассмотрено применение преобразующих свет полимерных плёнок в качестве укрывных материалов для выращивания тепличных культур в закрытом грунте. Проанализирован эффект повышения уровня фотосинтетически активной радиации (ФАР) в теплице в зависимости от сезона, географической широты, склонения солнца, продолжительности светового дня и других астрономических параметров. Получены результаты по выращиванию ряда тепличных культур в тепличных хозяйствах, расположенных на широте Московской области. Получены заметное сокращение сроков вегетации, а также существенная – от 30 до 100 % – прибавка урожая по сравнению с контрольными условиями.

Ключевые слова: квантовые точки $CdSe/CdS/ZnS$, пик эмиссии, пик экситонного поглощения, люминесцирующие слои, преобразование света, фотосинтез, фотосинтетически активная радиация, ФАР.

Особенностью большинства процессов использования солнечной энергии является то обстоятельство, что спектр солнечного излучения далеко не всегда является оптимальным с точки зрения наиболее эффективного использования солнечной энергии, что в полной мере относится к такому важному для человечества процессу преобразования солнечной энергии, как фотосинтез.

Современной сельскохозяйственной наукой установлено, что фундаментальным фактором, ограничивающим возможную фотосинтетическую продуктивность зелёного растения, является количество квантов солнечного излучения, доступное для поглощения зелёным листом. Ещё

в начале прошлого века К.А. Тимирязев пришёл к следующему фундаментальному выводу: «Мы можем доставить растению сколько угодно удобрений, сколько угодно воды, можем, пожалуй, оберегать его от холода в теплицах, можем ускорить круговорот углекислоты, но не получим органического вещества более того количества, которое соответствует количеству солнечной энергии, получаемой растением от солнца. Это – предел, преступить за который не во власти человека. Но раз мы узнаем этот предел, мы получим настоящую, строго научную меру для предела производительности данной площади земли, а, в то же время, будем в состоянии судить о том, насколько наши культуры приближаются к совершенству...»¹.

Изучение влияния спектрального состава света, проводимое как отечественными, так и зарубежными исследователями ещё с середины прошлого века, позволило достоверно установить влияние излучения различных спектральных диапазонов на рост и развитие растений. Многочисленные экспериментальные данные (например, [1–4]) показывают, что лист довольно сильно поглощает как в синей и ближней ультрафиолетовой областях спектра (350–450 нм), так и красной области видимого диапазона (600–650 нм). Минимум же поглощения приходится на зелёную область (500–550 нм), тогда как на длинах волн, больших, чем 750 нм, поглощение лучистой энергии практически не происходит. Некое поглощение возникает в ближней ИК-области, и обусловлено оно поглощением воды, содержащейся в листьях.

Наиболее физиологически важное поглощение лежит в области 600–700 нм и связано исключительно с хлоро-

¹ Цитируется по [19]

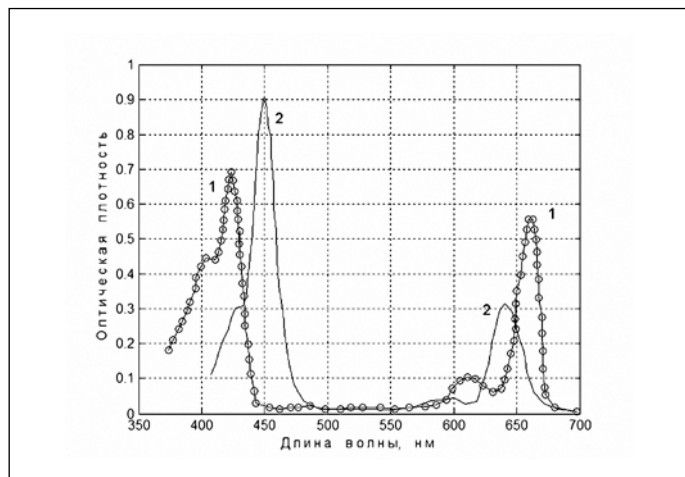


Рис. 1. Спектр поглощения хлорофилла в видимой области: 1 – хлорофилл *a*; 2 – хлорофилл *b*

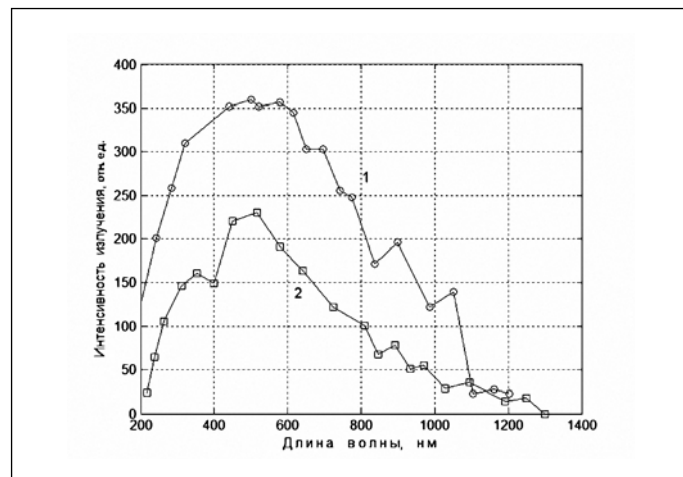


Рис. 2. Относительные спектральные распределения интенсивности прямого (1) и рассеянного (2) солнечного излучения

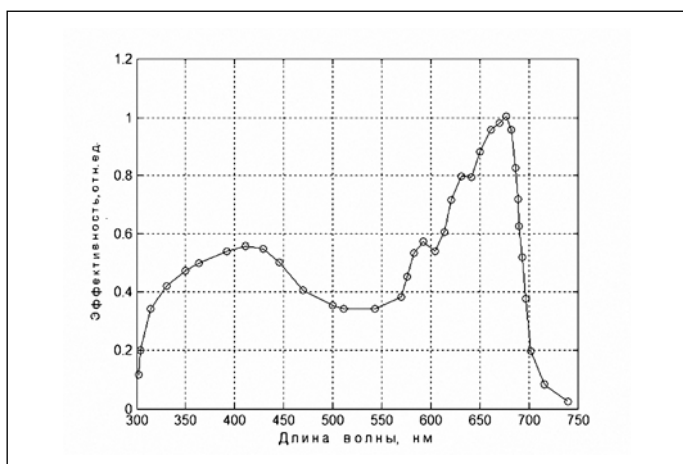


Рис. 3. Относительное спектральное распределение фотосинтетической эффективности излучения

филлом, и лишь малая часть приходится на некоторые другие пигменты, например, каротиноиды. Эта спектральная область называется «фотосинтетически активной радиацией» (ФАР). Типичный спектр поглощения хлорофилла зелёного листа приведён на рис. 1. Далее, на рис. 2 приведены известные спектральные распределения интенсивности прямого и рассеянного солнечного излучения, а на рис. 3 – графики относительного спектрального распределения эффективности фотосинтеза согласно Маккри [5]. В соответствие с приведёнными данными можно полагать, что повышение эффективности процесса фотосинтеза можно осуществить только за счёт специального добавления ФАР в необходимой спектральной области [6]. Действительно, сопоставление данных, приведённых на рис. 1 и 3, с солнечным спектром, приведённым на рис. 2, показывает, что максимум интенсивности солнечного излучения в любом случае не совпадает ни с максимумами поглощения хлорофилла, ни с областью максимума спектра действия для фотосинтеза. В данной работе мы не будем рассматривать причины такой «недоработки» эволюции, которые до настоящего времени окончательно не ясны [4, 7]. Здесь важно отметить то, что наиболее ценное с точки зрения биопродуктивности излучение лежит в красной области спектра (600–670 нм).

Для коррекции солнечного спектра с целью увеличения его фотосинтетической эффективности, нами предложено использование фотоактивной добавки на основе квантовых точек $CdSe/CdS/ZnS$ в плёнках полиэтилена высокого давления (ПЭВД), используемых в качестве укрывного материала для теплиц. Указанные квантовые точки представляют собой новое поколение люминофоров, разработанных в последние годы и обладающих уникальными физико-оптическими свойствами.

Попытки использование люминофоров для коррекции солнечного спектра были предприняты ещё в конце 80-х годов прошлого столетия сотрудниками ряда институтов АН СССР. Были, в частности, разработаны плёночные материалы с использованием неорганических и органических фотолюминофоров на основе соединений европия (III) [8]. Эти люминофоры перевысвечивают ультрафиолетовую составляющую спектра солнечного света в области 300–350 нм в красной видимой части спектра. Однако эти материалы не нашли широкого рас-

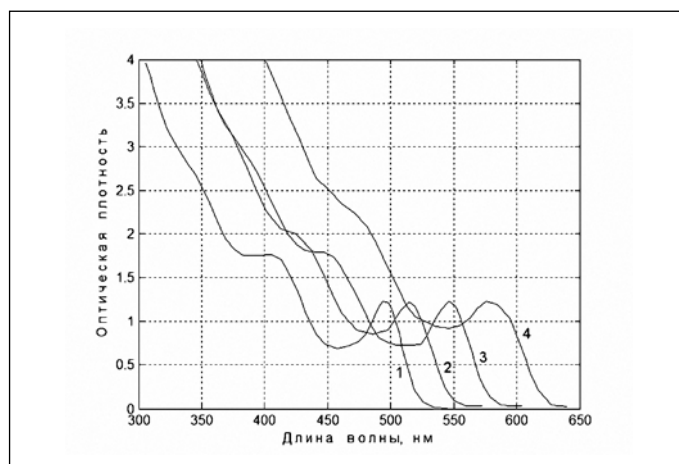


Рис. 4. Типичные спектры поглощения полиэтиленовых плёнок, содержащих квантовые точки различного размера, в видимой области спектра: 1–2,5 нм; 2–2,8 нм; 3–3,4 нм; 4–4,0 нм

пространения в сельском хозяйстве, что было обусловлено, в частности, их неоптимальными спектральными характеристиками, такими как узкие полосы поглощения и излучения, недостаточное значение стоксового сдвига, высокий уровень рассеяния света и низкая фотостабильность, а также сложностью введения добавок в полиэтиленовую матрицу.

Новые перспективы в разработке преобразующих свет материалов открыло создание нового поколения люминофоров на основе полупроводниковых коллоидных материалов $CdSe/CdS/ZnS$ [9]. Важно отметить, что люминофоры подобного типа обладают целым рядом уникальных оптических и коллоидных свойств, делающих их особенно привлекательными для получения преобразующих свет материалов для сельского хозяйства. Так, в частности, для них характерны широкий спектр поглощения в синей и ближней ультрафиолетовой областях (рис. 4) и высвечивание в виде относительно узкого пика в практически любом диапазоне видимого спектра.

Общие закономерности спектрального преобразования, осуществляемого с помощью люминофоров, были впервые сформулированы ещё С.И. Вавиловым. Эффективность преобразования определяется энергетическим выходом люминесценции, который не может превышать 1. При антистоксовом возбуждении, то есть при $\nu_{\text{возб}} < \bar{\nu}$, где $\bar{\nu}$ – среднее значение частоты в полосе излучения, энергетический выход фотолюминесценции должен убывать с возрастанием разности частот $(\bar{\nu} - \nu_{\text{возб}})$ [10]. Важно отметить, что квантовый выход люминесценции рассматриваемых материалов близок к 1, что представляет весьма полезным для практического применения.

Наряду с квантовым выходом, важным фактором, определяющим эффективность преобразования спектра, является энергетический выход люминесценции. Так, поток, излучаемый люминофором F_{λ} в результате возбуждения его в некой широкой области спектра, можно определить с учётом выражения

$$\eta_{\text{эн}} = \varphi_{\lambda}(\lambda) / \varphi_{\text{в}}(\lambda), \quad (1)$$

где $\varphi_{\lambda}(\lambda)$ и $\varphi_{\text{в}}(\lambda)$ – соответствующие спектральные потоки излучения, $\eta_{\text{эн}}$ – энергетический выход люминесценции:

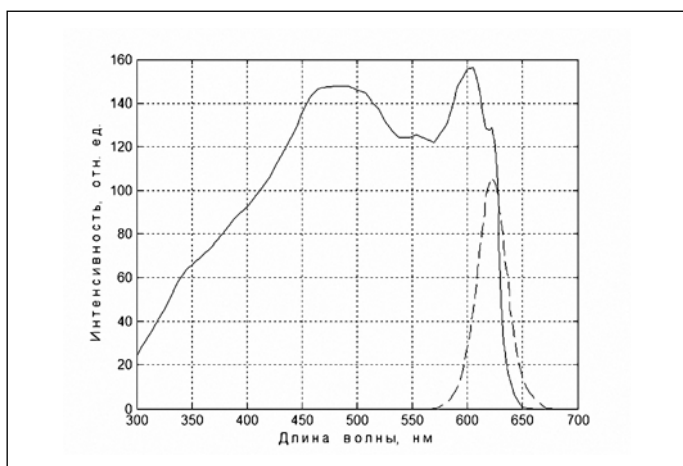


Рис. 5. Спектры возбуждения (сплошная линия) и излучения (пунктирная линия) квантовых точек CdSe/CdS/ZnS

$$F_{\lambda} = \int \phi_{\lambda}(\lambda) d\lambda = \int \phi_{\sigma}(\lambda) \eta_{\text{ЭП}}(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

Конечной целью преобразования солнечного спектра является увеличение потока излучения в области ФАР [11]:

$$E_{\text{ФАР}} = \int_{400}^{700} c(\lambda) I(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

где $c(\lambda)$ – спектр действия для фотосинтеза, $I(\lambda)$ – спектральное распределение мощности солнечного излучения. Сопоставление квантового выхода процесса фотосинтеза (рис. 3) и спектров возбуждения и излучения квантовых точек (рис. 5) однозначно указывает на эффективность использования квантовых точек для указанных целей.

В условиях естественного освещения поток ФАР зависит от целого ряда факторов. Во-первых, как показывают кривые, приведённые на рис. 2, спектры прямого и рассеянного естественного излучения заметно различаются. Под «прямым» понимается излучение, которое падает на поверхность земли в виде коллимированного потока. Рассеянным называется то излучение, которое попадает на землю после отражения и рассеивания его молекулами газов воздуха, каплями воды, кристаллами льда и прочими неоднородностями, находящимися в атмосфере. Суммарный поток включает оба вида излучения, причём соотношение этих составляющих зависит как от состояния атмосферы и времени года, так и от высоты солнца над горизонтом. Так, например, до восхода солнца на растения попадает только рассеянное излучение, но затем, по мере увеличения высоты стояния солнца над горизонтом, доля прямого излучения возрастает, а доля рассеянного – уменьшается.

Во-вторых, сама эффективность преобразования излучения слоем люминофора зависит от отмеченных выше условий облучения, а именно, от угла падения луча, который, в свою очередь, зависит от склонения солнца, продолжительности светового дня, доли рассеянной составляющей потока и некоторых других параметров. Подробное изучение общих закономерностей процессов флуоресценции в оптических слоях, проведённое нами ранее [13–15], позволило установить целый ряд факторов, которые не-

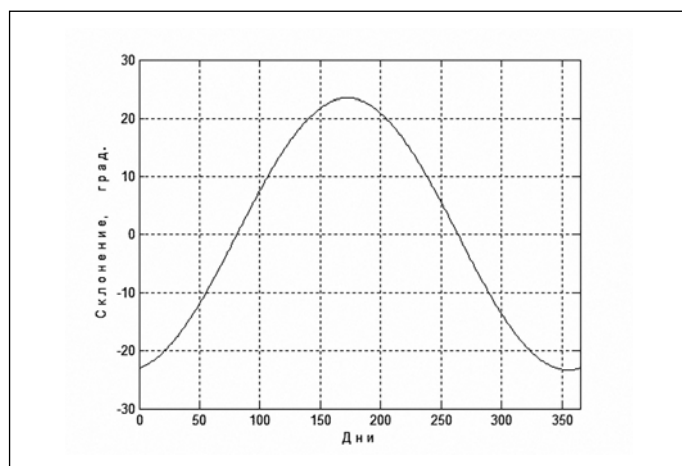


Рис. 6. Склонение солнца на широте Москвы (55,7° с.ш.)

обходимо учитывать при прогнозировании процесса преобразования света. Так как «астрономические» аспекты солнечного излучения хорошо известны, мы привлечём их для объяснения наблюдаемых закономерностей.

Так, удельный (на единицу площади) поток солнечного излучения, падающий на горизонтальную плоскость вне атмосферы Земли, может быть рассчитан по формуле, аналогичной приведённой в [11]:

$$H_0 = \left(\frac{t_s G_0}{\pi} \right) \left(\cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \sin W_s + \frac{2\pi W_s}{360} \sin \phi \cdot \sin \delta \right), \quad (4)$$

где G_0 – солнечная постоянная ($G_0 = 1,34$ кВт/м²); ϕ – географическая широта местности, град.; t_s – продолжительность светового дня, с; δ – склонение солнца, град.; W_s – часовой угол солнца на закате, град.

Далее, склонение солнца δ может быть определено, как

$$\delta = \delta_0 \sin \left[360 \cdot (284 + n) / 365 \right], \quad (5)$$

где $\delta_0 = 23,5^\circ$, n – номер дня года. Продолжительность светового дня в часах может быть вычислена по формуле

$$t_s = \frac{2}{15} \arccos(-\tan \phi \tan \delta). \quad (6)$$

а время захода солнца (по среднему универсальному солнечному времени) – по формуле

$$t_z = 6 + \frac{12}{\pi} \arcsin(\tan \phi \tan \delta). \quad (7)$$

Результаты расчётов по формулам (5) – (7) представляются принципиально важными для оценки эффективности использования эффекта преобразования света и приведены на рис. 6–8.

Поскольку орбита Земли является не круговой, а эллиптической, то необходимо произвести учёт эллиптичности по формуле [11]:

$$H = \left[1 + e \cdot \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] H_0, \quad (8)$$

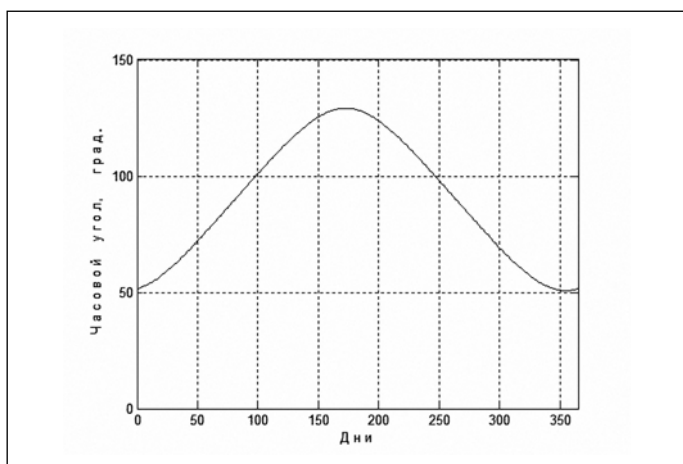


Рис. 7. Годовая зависимость часового угла при заходе солнца на широте Москвы (55,7° с.ш.). Дни отсчитываются, начиная с 1 января

где $e = 0,333$ – постоянная, учитывающая эллиптичность орбиты земли. Считается, что до поверхности земли солнечное излучение доходит в виде суммы прямого и рассеянного потоков [11].

Так как прямой и рассеянный потоки имеют различный спектральный состав (рис. 2), то это обстоятельство оказывает определённое влияние на эффективность процесса преобразования света. Произведём оценку «индекса ясности» k_T , который представляет собой отношение суммарного суточного потока солнечного излучения, попавшего на единицу площади горизонтальной площадки на поверхности земли, к соответствующему потоку солнечного излучения вне атмосферы

$$k_T(n) = \frac{H_1(n)}{H(n)}, \quad (9)$$

где $H_1(n)$ – величина потока солнечного излучения, достигшего поверхности земли.

Далее, доля диффузного излучения H_D может быть определена по формуле

$$\frac{H_D}{H_1} = 1.39 - 4.03k_T + 5.53k_T^2 - 3.11k_T^3. \quad (10)$$

Суть процесса преобразования солнечного спектра заключается в эмиссии (переизлучении) на определённой длине волны света, поглощённого в широкой спектральной области. Примеры спектров поглощения разработанных нами материалов на основе ПЭВД, содержащих квантовые точки различных размеров, приведены на рис. 4. Одной из уникальных особенностей оптики квантовых точек является широкий, практически сплошной спектр поглощения в синей и ближней ультрафиолетовой областях спектра, лежащих в области длин волн, меньших пика экситонного поглощения, что нехарактерно для традиционных керамических и органических люминофоров, в том числе и редкоземельных. Другой особенностью флуоресценции разработанных нами преобразующих свет материалов является зависимость эффективности преобразования спектра от угла прохождения коллимированного солнечного излучения через люминесцирующий слой. Это обусловлено как изменением физических свойств света (в частности,

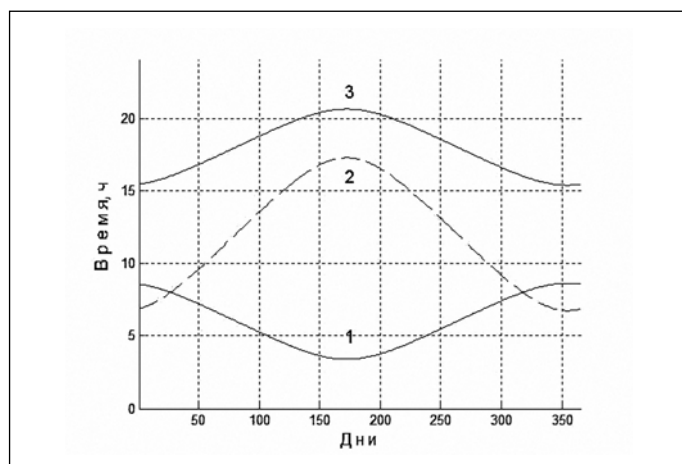


Рис. 8. Результаты определения продолжительности светового дня, а также времени восхода и захода солнца на широте Москвы (55,7° с.ш.) по среднему универсальному солнечному времени. 1 – продолжительность светового дня; 2 – время восхода солнца; 3 – время захода солнца

его спектрального состава), так и эффективности самого процесса преобразования света слоем с изменением угла падения h . Вопросы эффективности преобразования света, связанные с изменением угла прохождения луча через слой, были рассмотрены нами ранее [13].

Далее, угол падения коллимированного потока солнечного излучения определяется по известной формуле [16]

$$\sin(h) = \sin(\phi)\sin(\delta) + \cos(\phi)\cos(\delta)\cos(t) \quad (11)$$

Угол падения коллимированного потока солнечного излучения в полдень на широте Москвы приведён на рис. 6. Определение соотношения коллимированного и рассеянного потоков было проведено нами ранее на основе трёхпотокового приближения [16]. Это позволило оценить прибавку к ФАР в зависимости от условий естественного освещения. Вычисление полного потока (или дозы) ФАР проводили по соотношению

$$\sum Q_{ФАР} = A \sum S + B \sum D + F_L, \quad (12)$$

где $A = 0.6$, B – коэффициент перехода от дневных сумм прямого солнечного излучения к дневным суммам прямой

ФАР (табл. 1); $\sum S$ – полный поток рассеянного излучения, $\sum D$ – полный поток прямого излучения, F_L – люминесцентный поток.

Результаты вычислений приведены на рис. 9, 10. Далее, по экспериментальным спектрам освещённости, полученным для фотоактивной добавки на основе квантовых точек $CdSe/CdS/ZnS$ (рис. 11), по формуле (12) был определён вклад в ФАР люминесцентного потока F_L (рис. 10, кривая 3). Видно, что в диапазоне ФАР при 600–650 нм интенсивность излучения возрастает на 15–65 % в зависимости от времени проведения испытаний.

Экспериментально эффективность преобразования света (χ) можно оценить, в первом приближении, по изменениям интегральной интенсивности в областях 400–550 и 550–700 нм:

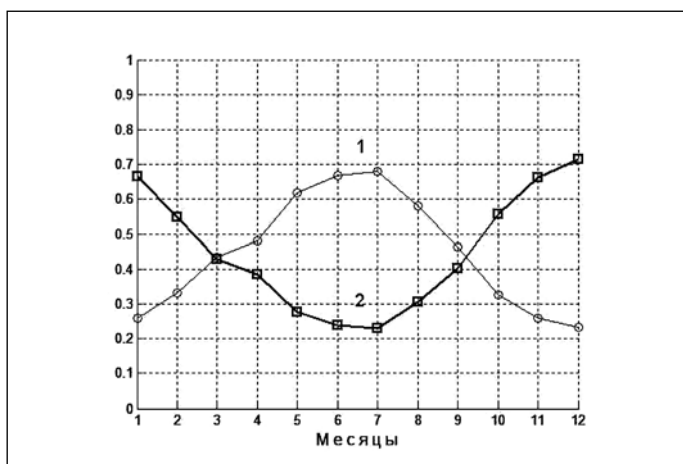


Рис. 9. Временной ход коэффициента ясности (1) и доли рассеянного потока (2), отн. ед.

$$\chi = \int_{400}^{550} I(\lambda)d\lambda / \int_{550}^{700} I(\lambda)d\lambda \quad (13)$$

Обработка экспериментальных данных, приведённых на рис. 10, показала, что 60 % излучения, поглощённого в синей области, оказывается высвеченным в красной области. Потери излучения, происходящие по различным причинам, составляют не более чем 40 %. Для коррекции спектра люминесценции нами были также использованы смеси дисперсии квантовых точек с различными максимумами эмиссии. Эффективные спектры таких смесей были исследованы нами ранее в [14, 15].

Важно отметить, что на широтах средней полосы России урожайность практически пропорциональна метеорологически возможному потоку ФАР [17–20]. Поэтому при увеличении потока ФАР на 50 % следует ожидать соответствующего увеличения интенсивности фотосинтеза. Это обстоятельство иллюстрирует спектр освещённости под плёнкой ПЭВД (толщина 50 мкм), содержащей различные концентрации фотоактивного компонента, приведённый на рис. 11. Данный рисунок непосредственно показывает существенное увеличение интенсивности излучения в области ФАР.

В [21] нами были проведены испытания на широте Московской области разработанного материала на основе плёнки ПЭВД, содержащей квантовые точки. Были использованы следующие культуры в закрытом грунте: капуста белокачанная (*Brassica oleracia var. capitata L.*), капуста цветная (*Brassica oleracia var. botrytis L.*), салат (*Latuca sativa L.*), томаты (*Solanum lycopersicum erensuletum*), огурцы (*Cucumis sativus*). Результаты полностью подтвердили предположения.

Так, биомасса капусты *Brassica oleracia var. capitata L.*, выращенной под преобразующей свет плёнкой, была на 45–75 % выше, чем в контрольных условиях (нелюминесцирующая плёнка). Прибавка биомассы капусты-*Brassica oleracia var. botrytis L.* и салата *Latuca sativa L.* составила до 30–40 % и 25–30 % соответственно, а вес плодов томата *Solanum lycopersicum erensuletum* и огурца *Cucumis sativus* увеличился на до 35 и 50 % соответственно.

Некоторые результаты по выращиванию огурцов сортов «Престиж» и «Миракл» в закрытом грунте под флуо-

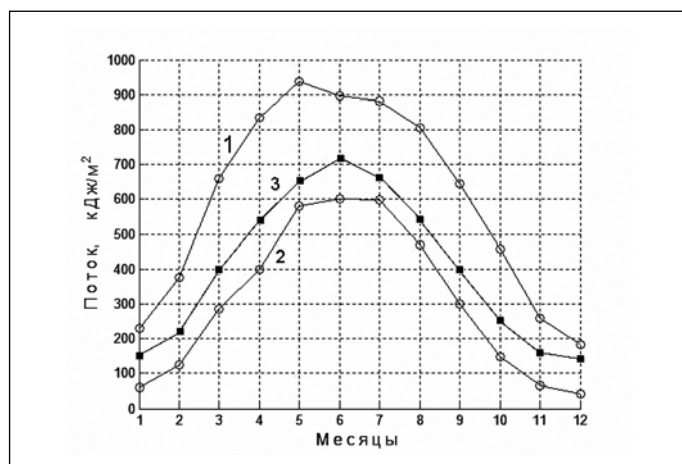


Рис. 10. Суммарный поток солнечного излучения (1), поток рассеянного излучения (2) и суммарный поток преобразованного излучения в области ФАР (3)

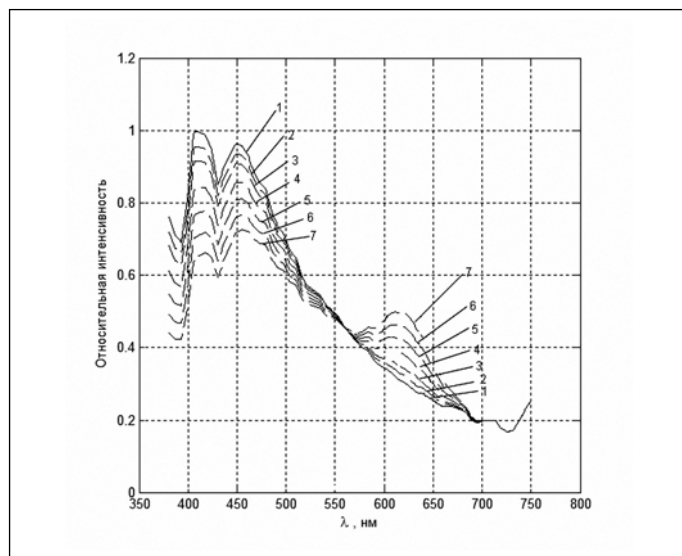


Рис. 11. Спектр естественной освещённости под плёнкой ПЭВД (толщина 50 мкм), содержащей различные концентрации фотоактивного компонента: 1 – немодифицированная плёнка, 2 – содержит 0.1 мг/г квантовых точек, 3–0.2 мг/г, 3–0.4 мг/г, 5–0.6 мг/г, 6–0.8 мг/г, 7–1.0 мг/г

ресцирующими плёнками приведены в табл. 2. Наблюдаемая прибавка урожая в данных опытах существенно выше статистической погрешности опыта. Результаты изучения продуктивности культуры томата сорта «Ла-ла-фа» (гибрид F_1) приведены в табл. 3. Видно, что продуктивность экстремальным образом зависит от концентрации квантовых точек в укрывном материале, и что максимум продуктивности приходится на содержание квантовых точек в материале 3–5 мг/г.

Выводы

1. Изучение оптических свойств полимерных плёнок, содержащих в качестве фотоактивного компонента квантовые точки, позволило установить основные особенности процесса преобразования солнечного спектра. Было установлено, что эффективность процесса преобразования солнечного спектра зависит как от люминесцентных и оптических свойств плёнок, так и от ряда метеороло-

Эффективные коэффициенты перехода от дневных сумм прямого солнечного излучения к дневным суммам прямой ФАР для различных широт [18]

Широта местности, град.	Месяц							
	5	6	7	8	9	10	11	12
66	0,40	0,40	0,40	0,39	0,37			
50	0,41	0,42	0,42	0,41	0,405	0,385		
23	0,425	0,425	0,425	0,425	0,420	0,415	0,410	0,41

Таблица 2

Урожайность огурцов сортов «Престиж» и «Миракл» в возрасте 90 дней, выращенных в закрытом грунте под разработанными флуоресцирующими плёнками

Сорт	Вариант опыта	Урожайность, кг/м ²	Число плодов, шт./м ²	Средний вес плода, г
Престиж	Контроль	6,2	65	95
	Преобразующая свет плёнка, 2 мг/г *	21,0	140	150
Миракл	Контроль	13,2	110	120
	Преобразующая свет плёнка, 2 мг/г *	20,8	160	130

* Концентрация фотоактивного компонента

Таблица 3

Результаты изучения продуктивности культуры томата сорта «Ла-ла-фа» (гибрид F_1) при выращивании в закрытом грунте под преобразующей свет плёнкой, содержащей квантовые точки в различной концентрации

Покрытие	Концентрация фотоактивного компонента в плёнке, мг/г				
	2,0	3,0	5,0	8,0	10,0
Продуктивность, кг/м ²	9,1	11,7	11,5	9,3	7,7
Продуктивность, % относительно контрольных условий	136	150	148	136	124

гических и астрономических факторов. К ним, в частности, относятся географическая широта местности, величина склонения солнца, продолжительность светового дня, доля коллимированного и рассеянного потоков в общем потоке солнечного излучения.

2. Установлено, что добавка люминесцентного потока к потоку естественной ФАР на широте средней полосы России возрастает в осеннее-зимний период и сокращается в летние месяцы. Аналогичным образом, эффективность преобразования света возрастает с увеличением географической широты местности. Это позволяет заключить, что применение преобразующих свет материалов для интенсификации процесса фотосинтеза весьма эффективно для средней полосы России, испытывающей очевидный недостаток ФАР практически в течение всего вегетационного периода. В связи с этим, применение преобразующих свет материалов целесообразно как в основной (летний) период вегетации, так и в осенне-зимний период.

3. Эффективность преобразования света при этом может достигать 50 %. Потери же светового потока, поглощённого плёнкой в фотосинтетически малоценных синей и ближней ультрафиолетовой областях солнечного спектра, происходящие по различным причинам, не превышают 40 %.

4. Предварительные вегетационные опыты, проведённые с рядом тепличных культур, показали существенную прибавку как общей биомассы, так и массы плодов, обусловленную процессами общей интенсификации фотосинтеза в результате увеличения потока ФАР.

5. Оценена оптимальная концентрация квантовых точек в укрывном материале, которая составила 3–5 мг/г.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, Соглашение о предоставлении субсидии № 14.574.21.0064 (уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57414X0064).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихомиров А.А., Шарупич В.П., Лисовский Г.М. Светокультура растений: биофизические и биохимические основы. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. – 213 с.

2. Шпольский Э.В. Спектр поглощения хлорофилла в растворе и в естественном состоянии // Изв. АН СССР. Сер. биол. – 1947. – № 3. – С. 391–406.

3. *Свенцицкий И.И.* Оценка фотосинтетической эффективности оптического излучения // Светотехника.– 1965.– № 4. – С. 19–24.

4. *Тихомиров А.А., Лисовский Г.М., Сидько Ф.Я.* Спектральный состав света и продуктивность растений. – Новосибирск: Наука, 1991.

5. *McCree, K.J.* The Action Spectrum, Absorptance and Quantum Yield of Photosynthesis in Crop Plants // Agricultural and Forest Meteorology.– 1972. – Vol. 9. – P. 191–216.

6. *Молчанов А.Г., Самойленко В.В.* Энергосберегающее оптическое облучение промышленных теплиц. – Ставрополь: АРГУС, 2013.– 120 с.

7. *Шульгин И.А.* Растение и солнце. – Л.: Гидрометеиздат, 1973.

8. *Иваницкий А.Е., Коваль Е.О., Райда В.С.* Люминесцентные свойства полиэтиленовых плёнок с добавками фотолюминофоров // Люминесценция и сопутствующие явления. Труды VII Всероссийской школы-семинара, 13–18 ноября 2001. – Иркутск, 2002.

9. *Васильев Р.Б., Дирин Д.Н.* Квантовые точки: синтез, свойства, применение. – М.: ФНМ, 2007.

10. *Адирович Э.М.* Люминесценция и законы спектрального преобразования // Успехи физических наук.– 1950. – Т. 4, № 3. – С. 341–368.

11. *Кондратьев К.Я.* Актинометрия. – Л.: Гидрометеорологическое изд-во., 1965.– 685 с.

12. *Павлов С.А., Максимова Е.Ю., Корякин С.Л., Шерстнева Н.Е., Антипов Е.М.* Оценка светимости субпикселей люминесцентного видеомонитора на основе квантовых точек CdSe/CdS/ZnS // Российские нанотехнологии.– 2016. – Т. 11, № 3–4. – С. 64–68.

13. *Павлов С.А., Крикушенко В.В., Антипов Е.М., Воронец Н.Б. Максимова Е.Ю., Шерстнева Н.В., Корякин С.Л.* Светоотдача и эффективность флуоресценции полимерных слоёв, содержащих коллоидные полупроводниковые люминофоры на основе квантовых точек CdSe/CdS/ZnS // Оптика и спектроскопия.– 2015. – Т. 119, № 2. – С. 133–137.

14. *Антипов Е.М., Корякин С.Л., Максимова Е.Ю., Павлов С.А., Шерстнева Н.Е.* Особенности формирования цветности излучения дисперсий квантовых точек CdSe/CdS/ZnS в многокомпонентных системах // Светотехника.– 2017.– № 4. – С. 31–34.

15. *Antipov, E.M., Sergey L. Koryakin, S.L., Elena Yu. Maksimova, E.Y., Sergey A. Pavlov, S.A., Natalya E. Sherstnyova, N.E.* Features of Forming CdSe/CdS/ZnS Quantum Points Dispersion Radiation Chromaticity in Multicomponent Systems // Light & Engineering.– 2017. – Vol. 25, No. 3. – P. 244–249.

16. *Сивков С.И.* Методы расчёта характеристик солнечной радиации. – Л.: Гидрометеорологическое изд-во., 1968.– 232 с.

17. *Тооминг Х.Г.* Солнечная радиация и формирование урожая. – Л.: Гидрометеиздат, 1977.– 200 с.

18. *Тооминг Х., Нийлиск Х.* Коэффициенты перехода от интегральной радиации к ФАР в естественных условиях // В: Фотоактинометрические исследования растительного покрова. Таллин: «Валгус». 1967. – С. 140–149.

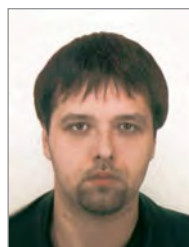
19. *Шаин С.С. и др.* Свет и развитие растений. – М.: Сельхозиздат, 1963.– 622 с.

20. *Леман В.М.* Курс светокультуры растений. – М.: Высшая школа, 1976.– 271 с.

21. *Павлов С.А., Воронец Н.Б.* Квантовые точки и урожай // ЕСУ. Химические науки.– 2014.– № 10. – С. 89–91.



Павлов Сергей Алексеевич, доктор хим. наук, профессор. Окончил в 1976 г. Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева. Гл. специалист кафедры химической технологии полимерных композиционных лакокрасочных материалов и покрытий этого вуза. Область научных интересов: реология высокомолекулярных соединений, использование коллоидных люминофоров («квантовых точек») в полимерных композиционных покрытиях, материалы для оптических устройств вывода информации



Корякин Сергей Леонидович, химик. Окончил в 2014 г. Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева. Техник кафедры химической технологии полимерных композиционных лакокрасочных материалов и покрытий этого вуза. Аспирант факультета фундаментальной физико-химической инженерии Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. Область научных интересов: полимерные композиционные лакокрасочные материалы и покрытия, антикоррозионные материалы специального назначения



Шерстнева Наталья Евгеньевна, химик. Окончила в 2010 г. Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева. Инженер кафедры химической технологии полимерных композиционных лакокрасочных материалов и покрытий этого вуза. Область научных интересов: полимерные композиционные лакокрасочные материалы и покрытия, реология высокомолекулярных соединений



Максимова Елена Юрьевна, химик. Окончила в 1982 г. Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева. Зав. лабораторией кафедры химической технологии полимерных композиционных лакокрасочных материалов и покрытий этого вуза. Область научных интересов: полимерные композиционные лакокрасочные материалы и покрытия, реология высокомолекулярных соединений



Антипов Евгений Михайлович, доктор хим. наук, профессор. Окончил в 1972 г. МИФИ. Зав. кафедрой химической технологии полимерных композиционных лакокрасочных материалов и покрытий Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева и зам. декана по научной работе факультета фундаментальной физико-химической инженерии Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. Область научных интересов: реология высокомолекулярных соединений, полимерные композиционные покрытия.