

# Исследование систем освещения с полыми протяжёнными световодами

А.И. СТЕРХОВ<sup>1</sup>, А.В. ПАЛАГИН<sup>1</sup>, И.Ю. ЛОШКАРЁВ<sup>2</sup> \*

<sup>1</sup>ООО «Соларжи групп», Ижевск

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова», Саратов

\* E-mail: igyulo@mail.ru

## Аннотация

Приведены сравнительные результаты исследования спектральных характеристик двух разных систем транспортирования света: на основе полимерной плёнки «DF2000MA» (существующей на рынке) и на основе осаждённого в вакууме серебра, покрытого оксидами кремния и титана (разработанной нами). Исследования вариантов «Alanod miro Silver 4270AG», «Alanod miro Silver 4400AG» и «Alanod miro Silver 4400GP» светоотражающего материала «Alanod miro Silver» показали, что по спектральному составу свет на выходе из нашей световодной системы в видимом диапазоне длин волн практически полностью идентичен естественному дневному свету на входе в неё. Показаны преимущества оптических элементов для разработанной нами световодной системы перед используемыми в сравниваемой известной системе.

**Ключевые слова:** световод, полый протяжённый световод, освещение, естественное освещение, спектр.

## Введение

Как известно, применение осветительных систем с полыми протяжёнными световодами для естественного освещения помещений – одно из решений задачи снижения расхода электроэнергии на освещение. Нами разработана собственная осветительная система этого типа с зеркально отражающим материалом на основе осаждённого в вакууме серебра, и цель настоящей работы – сравнить её с известным рыночным аналогом с зеркальным материалом на основе полимерной плёнки «DF2000MA» по точности передачи спектрального состава, по интегральному коэффициенту пропускания как системы в целом, так и составляющих оптических эле-

ментов, а также по технологии выполнения зеркального тубуса, сроку службы системы и др.

## Объекты исследования

Объектами исследования являлись модели осветительной системы со световодом на основе плёнки «DF2000MA» и разработанной нами системы «Solarway» – со световодом с зеркальным тубусом на основе осаждённого в вакууме серебра, покрытого оксидами кремния и титана (рис. 1).

Элементы системы «Solarway»:

- Светоулавливающий купол: прозрачный акриловый лист с мелкой текстурой («Acryl 92-Z»); из ПММА «Plexiglass» (способом вакуумного формования).
- Термобарьер: из акрилового листа толщиной 4 мм.
- Зеркальный тубус: на основе осаждённого в вакууме серебра, покры-

того оксидом кремния  $SiO_2$ , с низким показателем преломления, и оксидом титана  $TiO_2$ , с высоким показателем преломления.

- Светорассеиватель: прозрачный акриловый лист с крупной текстурой («Acryl 92-W»); из ПММА «Plexiglass XT 0A000 Z» (с помощью трафаретной лазерной резки).

## Методика оценки спектрального состава света

Измерения проводились: 1) 01.10.2014 на широте Москвы в 14:00–14:15 по московскому времени, при направлении на юго-восток, угле к горизонту  $60^\circ$ , средней освещённости 5300–5500 лк и облачности около 8 баллов, в диапазоне  $\lambda$  360–760 нм; 2) стандартизованным поверенным мобильным спектрометром МК 350 (компания UPRtek, Тайвань). Измерялись: относительный спектр излучения, коррелированная цветовая температура  $T_{кц}$  и общий индекс цветопередачи  $R_a$  на входе и выходе системы. Для каждого объекта исследования производились 5-кратные измерения.

Измерения проводились для 3-х вариантов материала светопроводящей трубы системы «Solarway»: «Alanod miro Silver 4270AG»; «Alanod miro Silver 4400GP» и «Alanod miro Silver 4400AG».

Рис. 1. Схематический вид разработанной системы естественного освещения «Solarway»

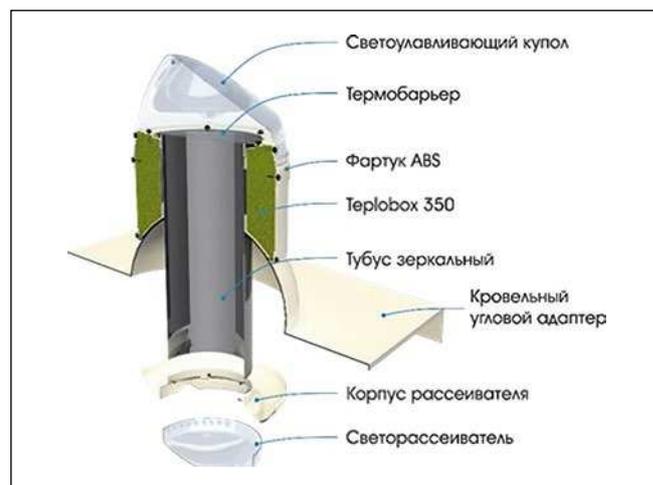


Рис. 2. Макеты системы «Solarway»



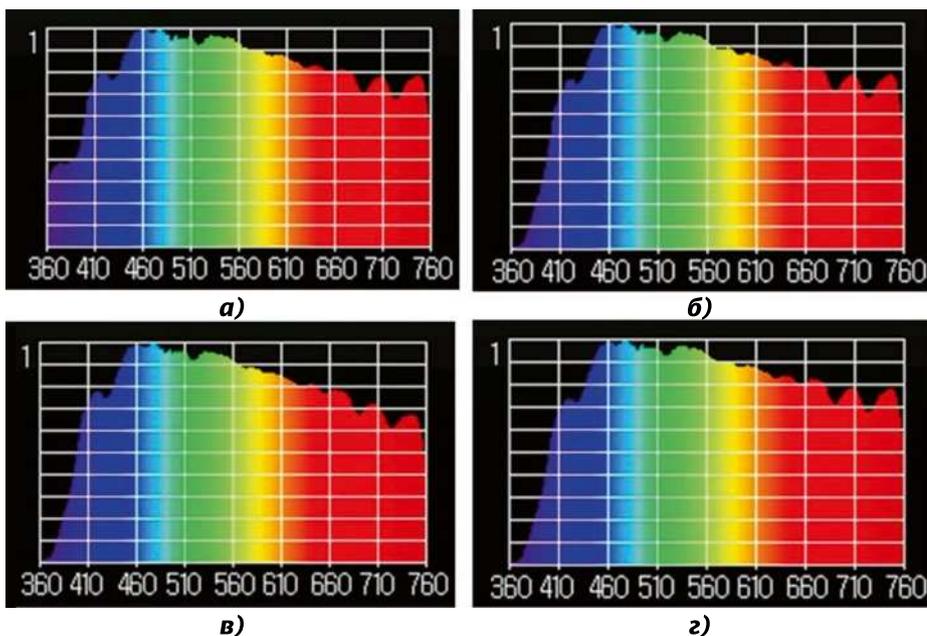
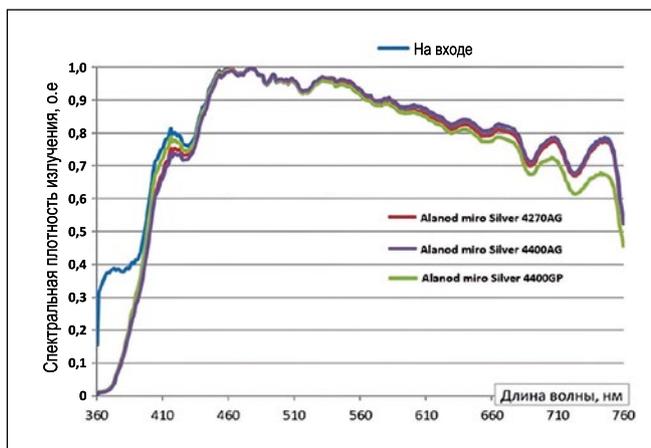


Рис. 3. Относительное спектральное распределение энергии излучения (на момент измерений):

а – естественного дневного на момент измерений,  $T_{кц} = 5850 \text{ K}$ ,  $R_a = 99$ ; б – на выходе из системы со светоотражающим материалом «Alanod miro Silver 4270AG»;  $T_{кц} = 5850 \text{ K}$ ,  $R_a = 99$ ; в-на выходе из системы со светоотражающим материалом «Alanod miro Silver 4400GP»,  $T_{кц} = 5900 \text{ K}$ ,  $R_a = 99$ ; з – на выходе из системы со светоотражающим материалом «Alanod miro Silver 4400AG»,  $T_{кц} = 5750 \text{ K}$ ,  $R_a = 99$

Рис. 4. Графики относительного спектрального распределения энергии дневного излучения на входе и на выходе из системы «Solarway» с вариантами «Alanod miro Silver 4270AG», «Alanod miro Silver 4400GP» и «Alanod miro Silver 4400AG» светоотражающего материала



Макеты светопроводящей трубы имеют следующие размеры: длина – 200 мм и диаметр – 90 мм (рис. 2).

Измеренные  $T_{кц}$  естественного уличного излучения колебались в пределах 5750–5900 К, а  $T_{кц}$  на выходе из трубы с «Alanod miro Silver 4270AG», «Alanod miro Silver 4400AG» и «Alanod miro Silver 4400GP» составили 5850, 5750 и 5900 К соответственно.

Исследование началось с измерения относительного спектра естественного дневного излучения и продолжилось для трёх вариантов материала зеркального тубуса световода на выходе. Результаты этой части исследования приведены на рис. 3 и в табл. 1.

Согласно табл. 1 и рис. 4, относительный спектр излучения на выходе из световодных систем практически тот же, что и на входе в них.

Из рис. 4 видно, что в диапазоне  $\lambda$  435–760 нм относительные спектры излучения систем со световодом с «Alanod miro Silver 4270AG» и «Alanod miro Silver 4400AG» полностью идентичны относительному спектру излучения (естественного) на входе в них, а вот относительный спектр излучения системы с «Alanod miro Silver 4400GP» несколько беднее на правом краю этого диапазона.

В диапазоне  $\lambda$  360–410 нм все эти три варианта отражающего материала дают спектральные отклонения от

естественного дневного излучения из-за того, что в акриловые материалы включены УФ абсорбирующие фотостабилизаторы, защищающие акриловый полимер от разрушающего действия УФ излучения. Эти спектральные отличия не являются значимым недостатком, т.к. человеческий глаз мало чувствителен в этом диапазоне  $\lambda$ . Последнее подтверждается и тем, что, по нашим измерениям, все три варианта дают на выходе из системы практически максимально возможный  $R_a$ , приходящий дневному освещению: 99<sup>1</sup>.

Интегральный коэффициент отражения всех трёх вариантов зеркального материала системы «Solarway» находится на уровне или выше, чем у микроструктурной полимерной плёнки сравниваемой световодной системы (табл. 2).

Коснёмся различий технологий получения этих отражающих материалов:

- Зеркальная микроструктурная полимерная плёнка получается путём осаждения на её основу испарённого серебра и других металлов, закрепляемых интерференционным слоем. Плёнка крепится на алюминиевую подложку с помощью клея. Применение зеркальной плёнки «DF2000MA» в качестве отражающего материала систем транспортирования света [4] сопряжено с относительным риском и с особыми условиями при эксплуатации: она не должна использоваться в качестве отражателя с источниками излучения без УФ поглощающего фильтра [4]; её температура при эксплуатации должна составлять 22–49 °С; при использовании интенсивных источников излучения вроде светодиодов должна предусматриваться защитная конструкция, минимизирующая энергетическую экспозицию и нагрев плёнки. (Такие источники излучения могут вызывать изменение и потемнение её поверхности.) Исходные модели показали, что первые изменения цвета поверхности наступают после энергетической экспозиции 50 кДж/мм<sup>2</sup> в диапазоне  $\lambda$  420–500 нм при температуре плёнки 50 °С.

<sup>1</sup> При необходимости эти различия между естественным излучением и излучением на выходе из световодных систем можно немного снижать, изготавливая нижний светорассеиватель, который не нуждается в УФ защите, из акрила без УФ абсорбирующих добавок.

Относительное спектральное распределение энергии естественного излучения на входе  
и выходе из световодных систем, о.е.

$\lambda$ , нм	На входе	Световод из «Alanod miro Silver 4270AG»	Световод из «Alanod miro Silver 4400GP»	Световод из «Alanod miro Silver 4400AG»
385	0,39	0,21	0,23	0,21
390	0,41	0,29	0,31	0,28
400	0,60	0,51	0,56	0,50
410	0,75	0,68	0,72	0,66
420	0,79	0,75	0,77	0,73
430	0,76	0,74	0,75	0,73
440	0,88	0,86	0,86	0,85
450	0,97	0,97	0,96	0,95
460	0,99	0,99	0,99	0,98
470	0,98	0,98	0,98	0,98
480	0,99	0,99	0,99	0,99
490	0,95	0,95	0,95	0,96
500	0,96	0,96	0,96	0,96
510	0,95	0,95	0,95	0,93
520	0,92	0,92	0,92	0,93
530	0,96	0,96	0,96	0,97
540	0,96	0,96	0,95	0,97
550	0,96	0,95	0,94	0,96
560	0,92	0,92	0,91	0,93
570	0,90	0,89	0,89	0,90
580	0,90	0,89	0,89	0,90
590	0,87	0,87	0,86	0,88
600	0,87	0,87	0,86	0,88
610	0,86	0,86	0,85	0,87
620	0,83	0,83	0,82	0,85
630	0,81	0,81	0,80	0,83
640	0,83	0,83	0,81	0,84
650	0,80	0,80	0,78	0,81
660	0,80	0,79	0,77	0,81
670	0,81	0,80	0,78	0,82
680	0,78	0,78	0,75	0,79
690	0,70	0,70	0,67	0,71
700	0,76	0,76	0,71	0,77
710	0,78	0,77	0,71	0,78
720	0,68	0,68	0,62	0,69
730	0,71	0,70	0,63	0,71
740	0,77	0,76	0,67	0,77
750	0,77	0,76	0,66	0,77

Рис. 5. Вид световодов двух сравниваемых систем (вариант 2013 г.)



Рис. 6. Вид зеркального тубуса световода на основе полимерной плёнки «DF2000MA» после определённого срока эксплуатации без УФ поглощающего фильтра



• Зеркальный материал «*MiroSilver*» получается путём осаждения испарённого серебра на алюминиевую подложку и закрепления его оксидами  $\text{SiO}_2$  и  $\text{TiO}_2$ . При этом никакого клея уже не используется.

Материал плёнки, в отличие от осаждённого серебра, иногда бывает совсем не пригоден из-за отслаивания плёнки, снижающего характеристики передачи естественного уличного света.

Ещё одна задача исследования состояла в изучении воздействия УФ излучения на элементы системы «*Solarway*».

В 2016 г. проводилось техническое обслуживание световодов (4 года после установки). В одном из них использовался зеркальный плёночный материал «*DF2000MA*», а в другом – материал на основе осаждённого в вакууме серебра, покрытого оксидами  $\text{SiO}_2$  и  $\text{TiO}_2$  (рис. 5). Купола для обеих систем были выполнены из ПММА без защиты от УФ излучения. Через 4 года зеркальный материал «*DF2000MA*» полностью пожелтел (рис. 6). Но даже пожелтевший материал отражает практически полный спектр света с искажениями в жёлтом, красном или зелёном участках диапазона  $\lambda$ , но эти искажения для человеческого глаза практически незаметны.

Для изготовления купола для световодов применяется ПММА. Данный материал отсекает большую часть входящего УФ излучения (не менее

72,5 %), однако даже незначительная пропущенная его часть приводит к пожелтению отражающего материала. Для дополнительного блокирования этого излучения в некоторых системах используется антиконденсационный диск (термобарьер), также из ПММА.

Приземное УФ излучение (в основном лежащее в диапазоне  $\lambda$  300–400 нм), попадающее в световод с отражающими материалами «*Alanod miro Silver 4400AG*», «*Alanod miro Silver 4270AG*» или «*Alanod miro Silver 4400GP*», их серебряному покрытию не вредит, т.к. почти полностью отражается от него.

Далее были проведены сравнительные исследования оптических элементов разработанной нами световодной системы «*Solarway*» (модель «*Solargy SW 250*», диаметр световода 250 мм) и существующей на рынке световодной системы на основе полимерной плёнки «*DF2000MA*» (модель «*Solatube 290DS*», диаметр световода 350 мм)<sup>2</sup>. Соответствующие измерения проводились люксметром *DT-1309*, с диапазоном измерения ( $1 \cdot 10^{-1}$ – $4 \cdot 10^5$ ) лк, 27 февраля 2017 г. под открытым пасмурным небом с переменной облачностью 8–10 баллов.

О КПД световодной системы можно судить по общему коэффициенту пропускания света  $\tau_0$ , который рас-

считывается по методике для расчётов КЕО при боковой системе освещения с разными схемами расположения зданий в условиях застройки, а также в помещениях с верхней (через фонари разной конструкции) и комбинированной (верхней и боковой) системами естественного освещения [11]:

$$\tau_0 = \tau_1 \cdot \tau_2 \cdot \tau_3 \cdot \tau_4 \cdot \tau_5,$$

где  $\tau_1$  – коэффициент светопропускания материала (системы), определяемый по [11, табл. Б.7];  $\tau_2$  – коэффициент, учитывающий потери света в переплётах светопроёма, определяемый также по [11, табл. Б.7] (размеры светопроёма принимаются равными размерам коробки переплёта по наружному обмеру);  $\tau_3$  – коэффициент, учитывающий потери света в несущих конструкциях, определяемый по [11, табл. 8] (при боковом освещении  $\tau_3 = 1$ );  $\tau_4$  – коэффициент, учитывающий потери света в солнцезащитных устройствах, определяемый в соответствии с [11, табл. Б.8];  $\tau_5$  – коэффициент, учитывающий потери света в защитной сетке, устанавливаемой под фонарями, принимаемый равным 0,9 [11].

Из табл. 3 видно, что заявленные значения  $\tau_0$  без учёта зеркального тубуса для сравниваемых моделей «*Solargy SW 250*» и «*Solatube 290 DS*» – 67 и 58 % соответственно.

Из табл. 4 следует, что общие оптические потери в элементах «*Solatube 290 DS*» составляют 45 %, а – «*Solargy SW*» – 23 %. Таким образом, основные потери в «*Solatube 290 DS*» приходятся на её оптические элементы и. Из этого можно сделать однозначный вывод: уровень светопередачи оптических элементов разработанной системы в 1,4 раза выше, чем у сравниваемой системы «*Solatube*».

## Заключение

Проведены сравнительные исследования световодных систем освещения на основе полимерной плёнки «*DF2000MA*» и на основе осаждённого в вакууме серебра, покрытого оксидами кремния и титана. Спектральные измерения показали небольшое преимущество разработанной системы «*Solarway*» по интегральной отражательной способности отражающего материала зеркального тубуса. Исследования системы «*Solarway*»

<sup>2</sup> Длина и диаметр световодов значения не имеют, т.к. измерения проводились без зеркального тубуса.

Сравнительные характеристики зеркального материала систем освещения со световодами

Параметры	Технология на основе полимерной плёнки «DF2000MA», нанесённой с помощью ламинирования («Solatube»)	Технология на основе полимерной плёнки «DF2000MA», нанесённой с помощью ламинирования («Solarspot»)	Технология на основе осаждённого в вакууме серебра, покрытого оксидами кремния и титана («Solarway»)
Интегральный коэффициент отражения зеркального материала	99,7 %	99,7 %	«Alanod miro Silver 4270AG» → 99,8 % «Alanod miro Silver 4400AG» → 99,8 % «Alanod miro Silver 4400GP» → 99,8 %

Сравнительные (заявленные производителем) характеристики оптических элементов систем освещения со световодами (без зеркального тубуса)

Характеристики	Технология на основе полимерной плёнки «DF2000MA» («Solatube 290 DS»)	Технология на основе осаждённого в вакууме серебра, покрытого оксидами кремния и титана («Solargy SW 250»)
Технология выполнения светособирающего устройства и защитного купола Коэффициент светопропускания $\tau_1$	ПК или ПММА, методом литья, «Plexiglass» (ФРГ) 0,83 [6] или 0,92	ПММА, методом вакуумного формования, «Plexiglass» (ФРГ) 0,92
Светорассеиватель Коэффициент светопропускания $\tau_4$	«Dual Diffuseur Optiview»® «Dual Diffuseur Vision»® 0,82 или 0,79	ПММА, графетная лазерная резка «Plexiglass XT 0A000Z» (ФРГ), 0,90
Общий коэффициент пропускания света $\tau_0$ ( $\tau_2 = 0,9$ , $\tau_4 = 0,9$ , $\tau_5 = 1,0$ при $\tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \tau_4 = \tau_5$ )	0,55 или 0,58	0,67
Факторы	Высокая ударопрочность Интегральный коэффициент пропускания УФ излучения 72,5 %	Высокая ударопрочность Интегральный коэффициент пропускания УФ излучения 72,5 %

Сравнение освещённости (лк) на выходе из элементов световодов (без зеркального тубуса) систем «Solargy SW» и «Solatube 290 DS»

Наименование элемента системы	«Solatube 290 DS»			«Solargy SW 250»		
	Без элемента	С элементом	Интегральный коэффициент пропускания элемента(ов)	Без элемента	С элементом	Интегральный коэффициент пропускания элемента(ов)
Купол	23750	15675	0,66	24235	23265	0,96
Термобарьер	нет	нет	-	23563	21910	0,93
Рассеиватель	24255	20130	0,82	23900	21271	0,89
Все элементы одновременно и последовательно друг над другом	21455	11753	0,55	21205	16498	0,77

проводились для трёх вариантов отражающего материала «*Alanod miro Silver*». Спектральный состав выходящего из системы «*Solarway*» света в диапазоне  $\lambda$  410–760 нм для двух из них, «*Alanod miro Silver 4270AG*» и «*Alanod miro Silver 4400AG*», полностью идентичен естественному дневному свету на входе в систему, а для третьего, «*Alanod miro Silver 4400GP*», близок к нему, незначительно проигрывая в дальнем красном диапазоне  $\lambda$  (660–760 нм). В фиолетовом диапазоне  $\lambda$  (385–410 нм) все эти варианты «*Alanod miro Silver*» дают малозначимые оптические потери.

В целом, согласно измерениям, зеркальный тубус с материалом «*Alanod miro Silver*» передаёт практически полностью и без спектральных искажений естественный дневной свет (в диапазоне  $\lambda$  385–750 нм).

Зеркальный материал разработанной системы «*Solarway*» показал преимущество по сроку службы (без защиты от УФ излучения) перед плёночным материалом «*DF2000MA*» – 25 против 10 лет. Кроме того, в отличие от мультиполимерной плёнки он надёжен в эксплуатации (не расслаивается и не отслаивается) в северных климатических зонах РФ.

Сравнение некоторых светотехнических характеристик оптических элементов разработанной системы («*Solarway*») и существующей на рынке («*Solatube*») показало значительное преимущество первых.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. URL: <http://www.solarway.su/> (дата обращения: 26.04.2019).
2. Палагин А.В., Стерхов А.И., Корепанов Е.В. Сравнение систем естественного освещения зданий по функционально-энергетическим факторам // Интеллектуальные системы в производстве. – 2014. – № 2 (24). – С. 191–194.
3. Соловьёв А.К. Полые трубчатые световоды и их применение для естественного освещения зданий // Промышленное и гражданское строительство. – 2007. – № 2. – С. 53–55.
4. URL: <https://multimedia.3m.com/mws/media/9824490/3mtm-specular-film-df-2000ma-technical-data-sheet.pdf> (дата обращения: 26.04.2019).
5. URL: [http://www.napcs.o.hu/my\\_content/dok/CSTB\\_Report\\_2011.pdf](http://www.napcs.o.hu/my_content/dok/CSTB_Report_2011.pdf) (дата обращения: 26.04.2019).

6. URL: <http://www.cstb.fr/pdf/atec/GS06-G/AG142204.pdf> (дата обращения: 26.04.2019).

7. URL: <http://www.bibliorossica.com/book.html?currBookId=10063> (дата обращения: 26.04.2019).

8. URL: <https://solarspot.co.uk/wp-content/uploads/2018/01/BRE-Testing-of-light-tubes.pdf> (дата обращения: 26.04.2019).

9. URL: [http://www.casaportale.com/public/uploads/relazione\\_ebner.pdf](http://www.casaportale.com/public/uploads/relazione_ebner.pdf) (дата обращения: 26.04.2019).

10. URL: [http://www.geinnovations.net/solarspotnews\\_court.html](http://www.geinnovations.net/solarspotnews_court.html) (дата обращения: 26.04.2019).

11. СП 23–102–2003 «Свод правил по проектированию и строительству. Естественное освещение жилых и общественных зданий».



**Стерхов Алексей Иванович**, инженер. Окончил в 2009 г. Ижевский ГТУ. Технический директор ООО «Соларджи групп». Область научных интересов: освещение, энергосбережение, световоды



**Палагин Александр Вадимович**, инженер. Окончил в 2009 г. Ижевский ГТУ. Главный научный сотрудник ООО «Соларджи групп». Область научных интересов: освещение, энергосбережение, световоды



**Лоскарёв Игорь Юрьевич**, кандидат техн. наук. Окончил в 1993 г. Саратовский орден «Знак Почёта» институт механики сельского хозяйства им. М.И. Калинина. Доцент кафедры «Инженерная физика, электрооборудование и электротехнологии» ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова». Область научных интересов: освещение, энергосбережение, световоды

## Найден способ производить дешёвые ИК линзы

Учёные из США, Республики Корея и Италии определили и разработали новый метод получения полимеров, которые могут использоваться в качестве линз для ИК излучения.

Впервые оранжевые пластиковые линзы для ИК излучения были созданы пять лет назад, но тогда они оказались неприменимы для каких-либо практических целей. Затем команда учёных усовершенствовала этот полимерный материал на основе серы и смогла найти ему применение в создании линз, объективов и окон для приборов, регистрирующих ИК излучение. «Технология ИК-визуализации уже широко используется для военных целей, таких как ночное видение и ракеты с тепловым наведением, – рассказывает профессор кафедры химии и биохимии Университета Аризоны Д. Пьюн, который возглавляет лабораторию, разработавшую полимер. – Но для потребителей и транспортного сектора себестоимость ограничивает масштабирование производства таких изделий».

Новый способ получения этого материала, о котором учёные рассказывают в своей работе, может сделать ИК стекла и линзы дешевле и расширить спектр их применений. Новое поколение полимеров более прочное и термостойкое, чем соединения, созданные 5 лет назад. Тогда они изготавливались с использованием германия – дорогого, тяжёлого, редкого и токсичного металла.

Теперь же ИК прозрачные материалы состоят из молекул полимера с внедрёнными в него атомами серы. Благодаря дисульфидным связям такие полимеры и приобретают отличительные оптические свойства. Но, с другой стороны, они уменьшают прочность и термостойкость материала. Кроме того, включение дополнительных органических молекул для придания материалу прочности привело к снижению прозрачности, поскольку почти все органические молекулы поглощают в ИК диапазоне.

В новой работе исследователи нашли способ это исправить. Они создали компьютерную модель, чтобы найти органические молекулы, которые бы повышали прочность и термостойкость полимера, но не поглощали в ИК диапазоне. Так как количество органических соединений исчисляется десятками миллионов, перебрать их все вручную не представляется возможным. Новая компьютерная модель нашла несколько кандидатов, которые были успешно испытаны в лаборатории. Одним из них оказалась сложная молекула на основе карбасной структуры, называемой *норборнадиеном*.

Главная особенность новых материалов заключается в том, что их можно производить при более низких температурах, чем стекла на основе германия, поэтому процесс их получения оказывается существенно дешевле.

Статья учёных опубликована в журнале «*Angewandte Chemie*».

nanonewsnet.ru/  
01.11.2019