

**ВВЕДЕНИЕ**

Потребность в рациональном использовании энергии становится все более значимой на протяжении нескольких последних десятилетий. Некоторые инновации привели к росту использования энергосберегающего остекления для промышленного применения и применения в жилых помещениях и транспортных средствах. Ряд правительственных и частных компаний сосредоточили свои усилия на обеспечении более активного использования энергосберегающих окон [1]. Даже с учетом высокой проницаемости систем энергосберегающего остекления множество имеющихся конфигураций окон будут усовершенствованы с использованием решений по модернизации. Оконные пленки для послепродажного нанесения очень хорошо подходят для данного сектора. Ряд изготовителей предлагают различные оконные пленки для удовлетворения потребностей конечных пользователей. Кроме снижения доли пассивной солнечной энергии, поступающей через остекление зданий, для заказчика важны защита от УФ-излучения, низкий коэффициент отражения видимого света и эстетический вид. Оконные пленки с высоким коэффициентом отражения, которые весьма эффективны при снижении доли солнечной энергии, поступающей через остекление зданий, пользуются успехом в коммерческих зданиях. Однако при использовании в жилых помещениях множество общин и кондоминиумов препятствуют и даже запрещают использование подобных пленок с высоким коэффициентом отражения. При применении в транспортных средствах использование солнцезащитного остекления может повышать комфорт пассажиров и обеспечивать экономию топлива, снижая рабочую нагрузку кондиционеров [2]. Государственный закон определяет характеристики оконных пленок, которые могут быть использованы в транспортных средствах. В целом пленки, имеющие высокую светопрозрачность, низкий коэффициент отражения видимого света и высокий теплоотвод предпочтительны для многих применений.

Таким образом, существует огромный спрос на оконные пленки с высоким коэффициентом отвода солнечного тепла, низким коэффициентом отражения и коэффициентом передачи видимого света от среднего до высокого. Коэффициент пропускания солнечного свет без пропускания солнечного тепла (LSG), обозначаемый как соотношение коэффициента передачи видимого света (VLT), и коэффициент солнечного теплопоступления (SHGC), часто используется для определения эффективности оконной пленки. Данный показатель пригоден для применений, при которых в дополнение к снижению доли пассивной солнечной энергии, поступающей через остекление зданий, требуется также повышенный уровень внутренней освещенности. Несомненно, многие программы скидок по коммунальным услугам разработаны с учетом минимального коэффициента LSG ввиду использования более темных пленок с низким коэффициентом светопрозрачности, снижение доли пассивной солнечной энергии, поступающей через остекление зданий, может быть компенсировано увеличенным спросом на искусственное освещение внутри здания в дневное время. Вновь появляется интерес к повышению поступления дневного света для снижения потребности в искусственном освещении. Иногда хорошая видимость внутри требуется на коммерческих объектах (выставочные залы, витрины и пр.), требующих использования пленок с высоким коэффициентом.

До настоящего момента все оконные пленки с высоким коэффициентом LSG, представленные на рынке, были изготовлены на основе структуры «диэлектрик-серебро-диэлектрик» [3,4]. В целом, в исполнении данных пленок используется до трех слоев серебра, что приводит к высокому коэффициенту отражения инфракрасных лучей длинноволновой области спектра (NIR) и VLT примерно 70 %. Серебро выбрано благодаря его уникальным свойствам [5,6]. Один из недостатков использования серебра является его подверженность коррозии. Проблема возникновения коррозии может быть решена посредством использования сплавов серебра вместо чистого серебра, а также уплотнением краев используемой пленки. Данные пленки также обладают высокой проводимостью и часто создают помехи в работе электронных систем внутрирайонной связи, GPS, мобильных телефонов и пр. Общеизвестно, что промышленное производство пленок на основе серебряных резонаторных отражателей затруднительно, так как весьма незначительное варьирование толщины слоя серебра в результате приводит к значительному изменению цвета, особенно если смотреть в отраженном свете. Кроме того, наличие серебра в покрытиях требует уплотнения краев наносимой пленки. Ненадлежащее или несоответствующее уплотнение краев может привести к возникновению коррозии по краям. При использовании слоистых материалов в транспортных средствах и для промышленного назначения края могут быть обрезаны для эффективного решения проблемы коррозии. Другим недостатком используемых оконных пленок на основе технологии напыления серебра/диэлектрика заключается в том, что данные пленки имеют весьма низкую скорость водопоглощения (WVTR). Так как вода используется для обеспечения отсутствия пузырей и дефектов, удаление остатков воды, собираемой между связующим слоем и пленкой, является крайне важным.

Не содержащие металла солнцезащитные пленки (SRF) были разработаны компанией 3М для использования на ветровых стеклах транспортных средств [7,8]. Данные пленки предназначены для использования в многослойном исполнении, желательно в сочетании с зеленым стеклом, поглощающим инфракрасные лучи. Данные пленки основаны на модификации технологии использования полимерного многослойного отражателя, разработанной в 1960-х г.г. в компании Dow Chemical [9] и впоследствии доработанной в компании 3М [10]. Так как данные пленки, отражающие инфракрасные лучи длинноволновой области спектра не содержат никаких металлов, то не существует никаких проблем, связанных с созданием радиочастотных помех и возникновением коррозии. Многослойное стекло изготавливается посредством наслаивания пленок SRF между слоями поливинилбутирала, при этом стекло продемонстрировало незначительное изменение цвета при наслаивании и превосходную способность выдерживать атмосферные воздействия.

В настоящей статье представлено сравнение оконных пленок для послепродажного нанесения на основе структуры «диэлектрик/серебро» и на основе многослойного полимерного материала. Alfrey и другие показали, что полимерная пленка, включающая сотни слоев двух материалов, отличающихся коэффициентом преломления, могут быть созданы для образования флуоресцирующей пленки [9]. Ширина спектра и местоположение границы полосы определяются толщиной каждой пары слоев. Толщина данных слоев может быть выбрана таким образом,

чтобы полоса однократного отражения возникала в инфракрасной части спектра электромагнитных волн. Если левая граница полосы расположена примерно в 900 нм, и полоса отражения имеет ширину спектра 300 нм, значительная часть отражения второго порядка будет попадать в оптическую область спектра. Однако если обеспечить точный контроль толщины данных отдельных пар слоев, интенсивность спектра второго порядка может быть сведена к минимуму. Оптические свойства отражателей инфракрасных лучей длинноволновой области спектра, созданные из полимерных материалов, имеют преимущество вследствие низкого оптического поглощения, незначительной оптической дисперсии и оптических констант двоякопреломляющих систем. Данные пленки могут иметь высокую передачу видимого света, острые отражающие границы полос и низкую неравномерность вне полосы пропускания.

С учетом конструктивных соображений ограничивается размещение правой границы полосы за пределами 1200 нм вследствие того, что отражение 3<sup>го</sup> порядка возникает в оптической области спектра. Несмотря на то, что может быть обеспечена высокая эффективность спектра первого порядка, вследствие данного ограничения большая часть спектра солнечного излучения в длинноволновой ИК-области спектра за пределами 1200 нм не охвачена. В пленках SRF используется отличная слоистая структура, которая не имеет аналогичных ограничений. Оконная пленка, имеющая весьма высокий коэффициент передачи видимого света, может быть изготовлена с применением пленки SRF, используемой на начальной стадии наслоения [7,8], однако коэффициент солнечного теплопоступления недостаточно низкий для некоторых применений.

В последнее время поглощающие инфракрасные лучи наночастицы, такие как оксид индия и олова (ITO), оксид сурьмы и олова (ATO) и гексаборида лантана (LaB<sub>6</sub>) использовались в солнцезащитных пленках [11,12,13]. Данные частицы относительно невидимы, но обеспечивают сильное поглощение длинноволновой ИК-области спектра. Они могут быть включены в поливинилбутираль, используемый в качестве промежуточного слоя в многослойном стекле или акрилового твердого покрытия. Значительная часть полосы поглощения гексаборида лантана совпадает с полосой поглощения оксида железа, присутствующего во всех зеленых стеклах, при этом общая эффективность остекления и пленки в некоторой степени уменьшена в случае использования для внутренней стороны стекла. Оксид индия и олова ITO весьма дорогостоящий вследствие ограниченных поставок и высокого спроса на него, так как он используется в качестве прозрачного

проводника в дисплеях с плоским экраном. Даже при том, что полоса поглощения оксида сурьмы и олова ATO находится дальше в ИК-области спектра в сравнении с ITO и LaB<sub>6</sub>, она может быть совмещена с высоким коэффициентом отражения многослойной полимерной пленки в длинноволновой ИК-области спектра для получения оконной пленки с высоким коэффициентом пропускания солнечного света без пропускания солнечного тепла.

## ОПТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Эффективные показатели двоякопреломляющих материалов могут быть использованы как для межфазных, так и фазовых пределов в оптической модели 2x2 для прогнозирования оптических характеристик совмещенных стоп с использованием двоякопреломляющих и изотропных материалов [10]. Используя данные о толщине слоев и измеренные оптические константы для всех компонентов, включая связующий слой, стекло и твердое покрытие, может быть обеспечена достаточно хорошая аппроксимация измерений нормального падения. Часто проще использовать смоделированные результаты при падении не по нормали, чем преодолевать трудности при измерениях падения не по нормали [14].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Смоделированный и измеренный спектры светопропускания многослойной полимерной пленки, состоящей из 224 слоев, изготовленной и использованием PET и PMMA, представлены на Рисунке 1а. Как видно из Рисунка 1а, практически весь свет в диапазоне 850 нм – 1200 нм отражается при отсутствии потери передачи (кроме потерь зон Френеля) в видимой части спектра и ИК-области спектра за пределами 1200 нм. При использовании покрытия ATO с внутренней стороны данной пленки передача в видимой части спектра может быть отрегулирована примерно до 70 %, при этом практически вся длинноволновая ИК-область спектра в диапазоне 850–2500 нм может быть заблокирована (Рисунок 1б) при поддержании высокого коэффициента отражения многослойного материала. Толщина или количество ATO в полимерном слое могут быть увеличены или уменьшены по желанию для регулирования коэффициента передачи видимого света. Частицы, такие как технический углерод, обладающие способностью поглощения в видимой части спектра используются для получения оконных пленок с отличным коэффициентом передачи видимого света [15]. Кроме того, можно включить данные частицы для резкого снижения коэффициента передачи в видимой части спектра без

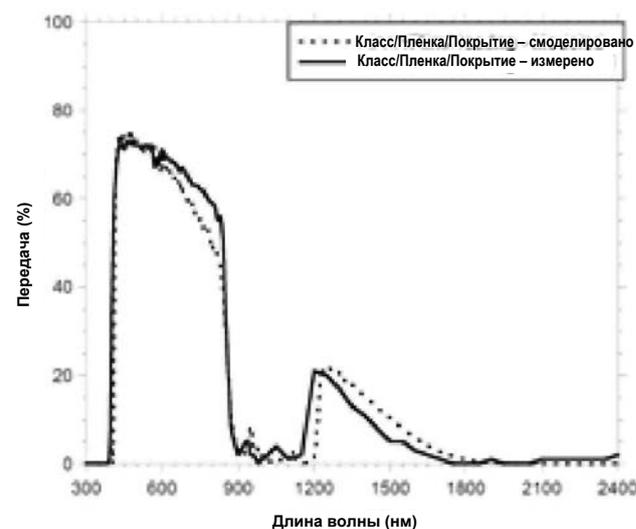
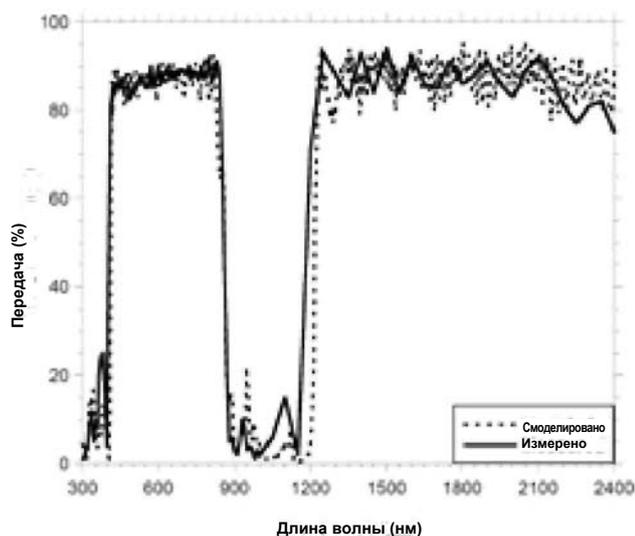


Рисунок 1а и 1б: Смоделированный и измеренный спектры светопропускания полимерной многослойной пленки без покрытия (Рисунок 1а) и пленки с покрытием ATO (Рисунок 1б).

значительного изменения коэффициента передачи инфракрасного излучения или концентрации АТО в покрытии.

В отличие от напыляемых пленок со структурой «серебро/диэлектрик» все полосы отражения, основанные на диэлектрических компонентах, имеют переход к меньшим длинам волн с увеличением угла падения (далеко от нормального падения). Данное смещение угла вызвано зависимостью косинуса угла сдвига фаз между лучами, отраженными от смежных поверхностей контакта. Вследствие увеличения угла падения центры полос отражения с поляризацией, перпендикулярной плоскости падения пучка, и с поляризацией, параллельной плоскости падения пучка, переходят к более коротким длинам волн с учетом эффективной фазовой толщины слоев. Полимер с высокой двоякопреломляющей способностью может быть использован для создания диэлектрических отражателей, которые поддерживают или увеличивают свой коэффициент отражения при увеличении угла падения. Кроме того, для падения не по нормали поляризационные эффекты в изотропных материалах ограничивают крутизну границы полосы естественного света, которая может оказывать значительное влияние на чистоту цвета. Двоякопреломляющие полимеры могут быть использованы для создания отражателя, который имеет согласованную границу полосы малой длины волны при всех углах как для света с поляризацией, параллельной плоскости падения пучка, так и для света с поляризацией, перпендикулярной плоскости падения пучка, исключая данные трудности.

Так как полоса отражения многослойного полимерного отражателя переходит к длинам волн с меньшей длиной, в которых находится большее количество солнечной энергии (Рисунок 3а), происходит быстрое снижение коэффициента солнечного теплопоступления при больших углах падения. Как видно из Рисунка 2а и 2б, данный переход в значительной степени выше в многослойных полимерных конструкциях по сравнению с оконными пленками на основе структуры «диэлектрик/серебро». Оптические свойства данных двух типов пленки при падении по нормали и при 60° от нормали (задано как 0 в таблице и на рисунках) представлены в Таблице 1.

Следует отметить, что не существует никаких стандартов по характеристикам вне оси. Методы промышленных стандартов (см. Совет по оценке светопрозрачных конструкций, <http://www.nfrc.org/>) и программное обеспечение (Window 5, доступное для загрузки с сайта <http://windows.lbl.gov/software/window/window.html>) предназначены для выполнения расчетов вне центра с учетом типа материалов, исходя из алгоритма, описанного Furler [16], данные расчеты приводят к недостаточной аппроксимации для двоякопреломляющих материалов. В результате расчеты годовой потребности в энергии представляют приблизительный прогноз по экономии, достигаемой при использовании многослойных полимерных оконных пленок. Кроме того, так как падающая солнечная энергия

Таблица 1: Свойства по пропусканию солнечной энергии полимерной оконной пленки для послепродажного нанесения и оконной пленки со структурой диэлектрик/серебро.

Тип	VLT (%)		VLR (%)		SHGC		Отражение УФ-лучей (%)
	0	60	0	60	0	60	
Полимерная многослойная с АТО	69	60	8,5	13	0,51	0,42	99,9
7-слойная ITO/Ag	69	62	8,0	12	0,47	0,44	99,9

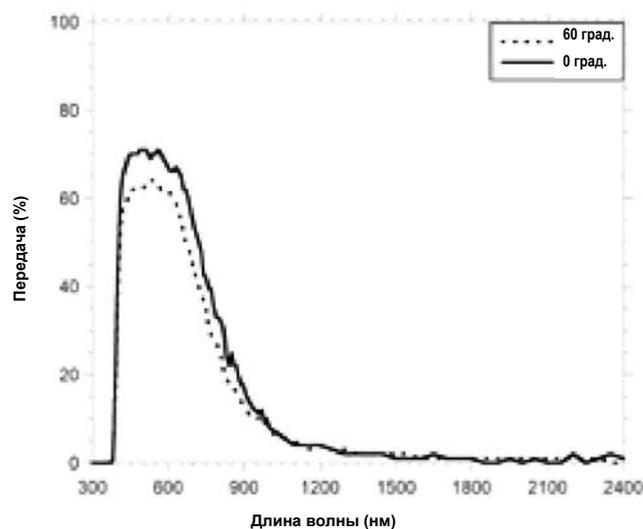
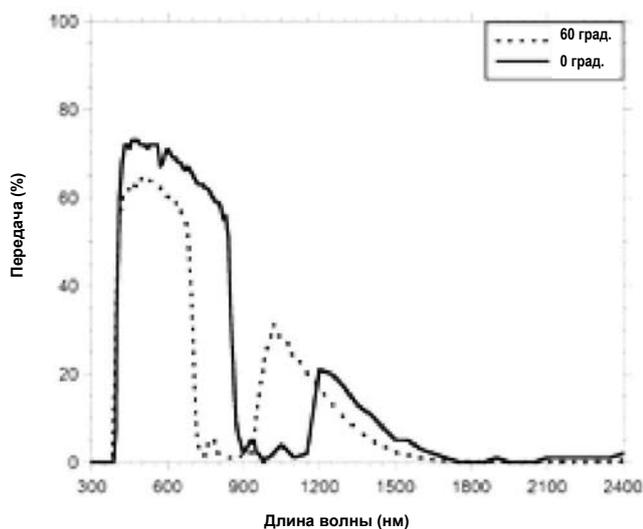


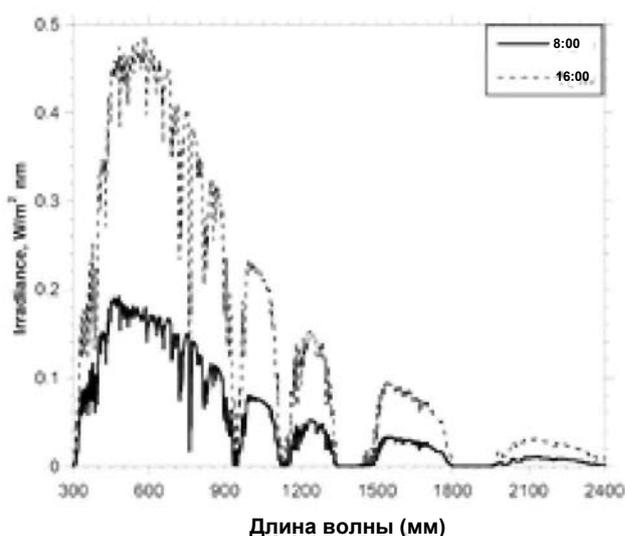
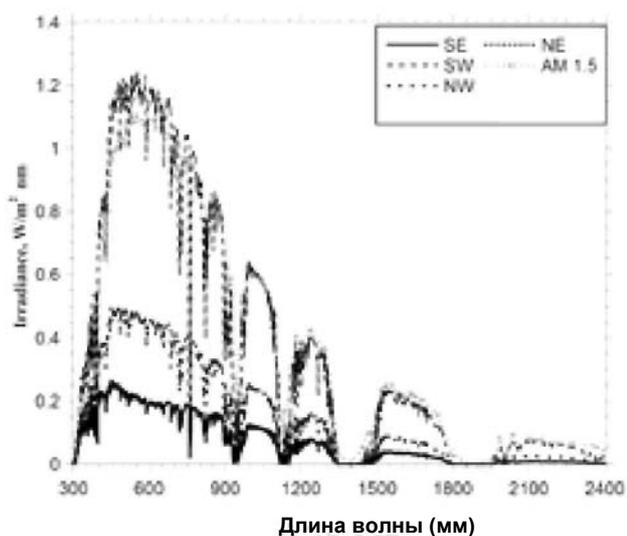
Рисунок 2а и 2б: Коэффициент передачи многослойной полимерной пленки с покрытием АТО (Рисунок 2а) и 7-слойной ITO/Ag/ITO пленки (Рисунок 2б) при нормальном падении и при 60° от нормального падения.

варьируется от места к месту и зависит от большого ряда факторов, включая водяной пар, способный сконденсироваться и дать осадки, альbedo земной поверхности, подпитку и концентрацию атмосферных загрязнителей помимо прочего, коэффициенты солнечного теплопоступления варьируется в зависимости от формы спектра падающего солнечного излучения. Расчет характеристик энергии и солнечного излучения, выполняемый с использованием стандартного спектра падающего солнечного излучения (ISO 9050 или ASTM E891), не обеспечивает точного прогноза характеристик данных пленок. Спектр падающего солнечного излучения также в значительной степени изменяется с учетом времени суток. Gueymard [17] разработал полную модель для

спектральной плотности потока излучения. Кривые спектральной плотности потока излучения на четырех различных фасадах здания, расположенного в Атланте, рассчитанные с использованием модели SMARTS, представлены на Рисунке 3а. Кроме того, на Рисунке 3б представлена спектральная плотность потока излучения на одном и том же фасаде для двух различных вариантов времени суток. Как и следовало ожидать, поверхностная плотность потока солнечного излучения в значительной степени варьируется в зависимости от времени суток и фасада здания. В Таблице 2 представлены общие коэффициенты солнечного теплопоступления напыляемых многослойных и полимерных многослойных пленок для различных кривых спектральной плотности потока излучения (рассчитано с использованием модели SMARTS).

Таблица 2: Коэффициенты солнечного теплопоступления напыляемой многослойной пленки со структурой «серебро-диэлектрик» и полимерной многослойной оптической пленкой (MOF) при различных углах падения и спектральных плотностях потока излучения.

Угол падения (град.)	Твид		SHGC (AM1.5)		SHGC (SE)		SHGC (SW)		SHGC (NE)		SHGC (NW)	
	Напыляемая многослойная	MOF										
0	70.9	70.5	45.7	49.3	48.6	51.8	48.6	54.5	48.7	51.1	47.8	51.7
5	70.8	70.5	45.6	49.3	48.5	51.7	48.5	54.5	48.6	51.1	47.7	51.7
10	70.8	70.4	45.5	49.2	48.4	51.7	48.4	54.5	48.5	51.1	47.7	51.6
15	70.7	70.2	45.4	49.1	48.3	51.5	48.3	54.4	48.4	51.0	47.6	51.5
20	70.5	69.9	45.2	48.8	48.1	51.3	48.1	54.1	48.2	50.8	47.4	51.3
25	70.3	69.6	45.0	48.4	47.9	50.9	47.9	53.7	48.0	50.5	47.2	50.9
30	70.0	69.2	44.7	47.8	47.6	50.1	47.6	52.9	47.7	49.9	46.9	50.2
35	69.6	68.7	44.4	46.8	47.2	49.1	47.2	51.7	47.3	48.8	46.5	49.1
40	68.8	68.1	43.9	45.6	46.7	47.8	46.7	50.3	46.8	47.5	46.0	47.8
45	68.0	67.2	43.4	44.3	46.2	46.4	46.1	48.8	46.2	46.3	45.4	46.5
50	66.8	66.2	42.6	43.0	45.4	45.0	45.3	47.3	45.4	44.9	44.6	45.1
55	65.0	64.5	41.7	41.4	44.3	43.3	44.2	45.4	44.3	43.3	43.6	43.5
60	62.3	62.1	40.3	39.5	42.8	41.3	42.7	43.1	42.8	41.4	42.1	41.5
65	58.6	58.3	38.3	36.9	40.7	38.6	40.6	40.1	40.7	38.7	40.1	38.8
70	52.7	52.3	35.4	33.4	37.4	34.8	37.4	36.0	37.5	34.9	36.9	34.9



Рисунки 3а и 3б: Спектральная плотность потока излучения, рассчитанная при различных условиях.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отражающие инфракрасные лучи полимерные многослойные пленки были покрыты наночастицами АТО, поглощающими инфракрасное излучение, для создания оконных пленок для послепродажного нанесения с высоким коэффициентом светопропускаемости и высоким коэффициентом отведения тепла. Было показано, что данные пленки имеют более высокий коэффициент отведения тепла при увеличенных углах высоты солнца. Так как данные пленки не содержат никаких напыляемых слоев, они имеют высокие скорости водопаропроницаемости и их проще установить. Представлено сравнение данных пленок и напыляемых пленок со структурой «серебро/диэлектрик».

## СПРАВОЧНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. См. веб-сайт <http://www.eere.energy.gov/>
2. J. J. Finley, «Развитие солнцезащитного отражающего инфракрасное излучение остекления в транспортных средствах», *Заседание 44<sup>й</sup> ежегодной конференции по техническим вопросам Общества по вакуумным покрытиям*, стр. 193–203, 2001.
3. <http://www.v-kool-usa.com/>
4. <http://www.vista-films.com/>
5. P. H. Berning и A. F. Turner, «Вынужденная передача в поглощающих пленках, используемых в конструкции полосового фильтра», 47(3), 230, *J. Opt. Soc. Am.*, 1957 г.
6. P. H. Berning, «Принципы проектирования архитектурной облицовки», 22(24), 4127, *Appl. Opt.*, 1983 г.
7. J. Boettcher, M. Scott, B. Koster и M. Kominami, «Отражающая солнечные лучи и не содержащая металла пленка в результате обеспечивает многослойное исполнение», стр. 513, конференция Glass Processing Days, июнь 2001 г.
8. J. Boettcher, M. Kominami и M. Scott, «Результаты многослойного исполнения при использовании не содержащей металла и нейтрального цвета отражающей солнечные лучи пленки», стр. 538, конференция Glass Processing Days, 2003 г.
9. T. Alfrey Jr., E. F. Gurnee и W. J. Schrenk, «Физическая оптика флуоресцирующей многослойной пластмассовой пленки», 9(6), 400, *Poly. Eng. Sci.*, 1969 г.
10. M. F. Weber, C. A. Stover, L. R. Gilbert, T. J. Nevitt и A. J. Ouderkerk, «Большая двоякопреломляющая оптика в многослойных полимерных отражателях», *Science*, 287, 2451, 2000 г.
11. S. A. Barth, A. B. Port и C. L. Hubbard, Патент США № 6 663 950, «Оптически активный композиционный материал для пленки», 16 декабря 2003 г.
12. S. Schlem и G. B. Smith, «Слабые наночастицы LaB6 в полимерах как оптимизированное солнцезащитное остекление», 82(24), 4346, *Appl. Phys. Lett.*, 2003 г.
13. G. B. Smith, M. J. Ford, C. Masens и J. Muir, «Энергосберегающие покрытия в проекте NanoHouse™», 4, 381, *Current Applied Physics*, 2004 г.
14. A. Roos, P. Polato, P. A. vanNijnatten, M. G. Hutchins, F. Olive, и C. Anderson, «Оптические свойства с угловой зависимостью теплоотражающих и солнцезащитных окон. Моделирование в зависимости от измерений», 69, 15, *Solar Energy*, 2000 г.
15. D. J. McGurran, R. L. Brott, J. A. Olson, Патент США № 6 811 867, 2 ноября 2007 г.
16. R. A. Furler, «Угловая зависимость оптических свойств однородных стекол», 97(2), 1129, *ASHRAE Trans.*, 1991 г.
17. C. A. Gueymard, «Усовершенствованная модель поверхностной плотности потока солнечного излучения и процедура расчета спектрального солнечного теплопоступления», 113(1), *ASHRAE Trans.*, 2007 г.