



НАНОСТРУКТУРНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ПИЛОТОВ САМОЛЕТОВ ОТ "ЛАЗЕРНЫХ АТАК"

О.Алексеева, Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Москва

В обзоре методов защиты пилотов от лазерных атак представлены последние достижения в области создания нанокompозитных оптических покрытий. Тонкопленочные интерференционные металл-диэлектрические покрытия используют для улучшения свойств авиационных материалов остекления.

Один из первых случаев лазерных атак с целью отвлечь или временно ослепить летчиков относится к Фолклендской войне 1982 года, когда британские войска использовали лазерные системы против самолётов Аргентины [1]. С начала 1990-х годов в разных странах мира начали регистрировать случаи "лазерного" хулиганства с применением лазерных указок, направленного на гражданские самолеты. Количество их резко растет. Только в США в 2013 году было зарегистрировано 3960 попыток ослепить летчиков (для сравнения – 384 случая в 2006 году) [2]. В России в 2014 году было зафиксировано более 10 случаев. В апреле 2015 года хулиганы пытались ослепить пилотов при посадке пассажирских самолетов в Волгограде и в Саранске, а 17 августа лазерной указкой стали мешать пилотам самолета, заходившего на посадку в аэропорт Пулково (в это время высота полета составляла 3000 м).

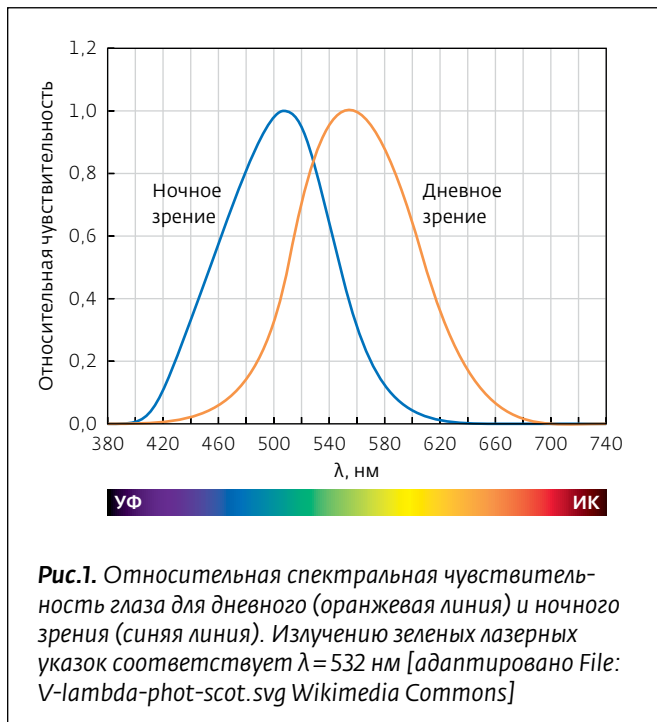
Лазерные указки доступны и в подавляющем большинстве стран разрешены к применению. Как свидетельствует один из многочисленных сайтов, "лазерные указки любого цвета и мощности вы можете купить в нашей компании с доставкой по всей России". Конечно, они были созданы с благими намерениями – для использования на презентациях, при астрономических наблюдениях – но, к сожалению, превратились в потенциально опасное оружие. Сейчас наиболее распространены являются зеленые лазерные указки на основе твердотельных лазеров с диодной накачкой (DPSS – diode pumping solid state). Мощным ИК-лазерным диодом с $\lambda=808$ нм накачивается кристалл Nd:YVO₄, дающий излучение с $\lambda=1064$ нм. После прохождения через кристалл KTiOPO₄ частота излучения удваивается, и генерируется видимый зеленый свет с $\lambda=532$ нм. Отношение мощностей излучения с $\lambda=532$ нм, 808 нм и 1064 нм примерно 1:3:9. Чтобы убрать излучение накачки с $\lambda=808$ и оставшееся излучение с $\lambda=1064$ нм, применяют ИК-фильтры (хотя в дешевых указках такие фильтры могут

отсутствовать). Распространенные зеленые указки имеют мощность 1–5 мВт, но online можно купить зеленые указки мощностью до 1000 мВт.

Для "лазерных атак" чаще всего используют именно зеленые лазерные указки с $\lambda=532$ нм. По данным [3], это примерно 88% всех случаев за период 2004–2008 годы. Глаза чувствительны к узкому интервалу длин волн (380–800 нм), и в этом интервале относительная спектральная чувствительность имеет выраженный максимум для зеленого цвета. При дневном зрении максимум соответствует $\lambda=555$ нм, при ночном он несколько сдвигается в коротковолновую область, $\lambda=507$ нм (рис.1). Поэтому при одинаковой мощности источников разного цвета наиболее ярким глазу кажется зеленый. Действие излучения зеленых лазерных указок с $\lambda=532$ нм, то есть вблизи максимума чувствительности глаза, приводит к вредным эффектам, и к тому же злоумышленникам или хулиганам легко направлять луч на нужный объект.

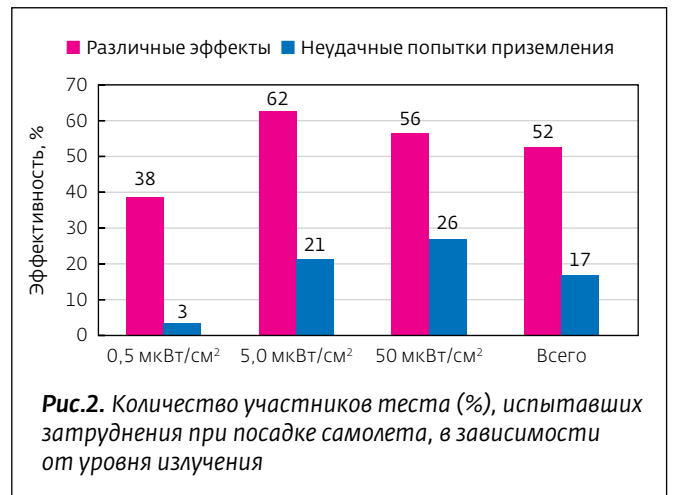
Воздействие зеленого лазерного излучения на пилотов может вызвать различные последствия – от раздражения и отвлечения внимания до нарушения функций глаза. Яркий направленный свет приводит к затенению предметов вблизи луча, появлению бликов, возникновению (на несколько минут) различных остаточных изображений. Возможна кратковременная слепота, сохраняющаяся после окончания воздействия, и даже повреждение хрусталика и сетчатки глаза [4].

В 2004 году был опубликован отчет Федерального управления гражданской авиации (FAA) США об изучении воздействия лазерного излучения ($\lambda=532$ нм) на операционные и визуальные возможности летчиков во время захода на посадку [5]. Использовали безопасные для глаз уровни излучения 0; 0,5; 5 и 50 мкВт/см² (считается, что повреждение глаз происходит при уровне воздействия 2,54 мВт/см² при длительности воздействия более 0,25 сек [3]). Тесты на тренажере самолета "Боинг-727-200" прошли 34 пилота. При уровне воздействия



0,5 мкВт/см² 13 человек "при посадке" испытали трудности, связанные с отвлечением внимания, кратковременной слепотой, ухудшением видимости взлетно-посадочной полосы и др., а один пилот почувствовал необходимость пойти на второй круг. При 5 мкВт/см² трудности испытали 62% (21 человек), 7 попыток посадки были неудачными. При 50 мкВт/см² было 9 неудачных попыток приземления (рис.2). Результаты подтвердили необходимость защиты от излучения при уровне $\geq 0,5$ мкВт/см².

Авторы [6] измерили интенсивность лазерного излучения, проникающего через авиационные ветровые стекла. Лазеры небольшой мощности (50 мВт), в том числе зеленый с $\lambda = 532$ нм, были установлены на взлетно-посадочной полосе на разных расстояниях от стекол, за которыми находились



детекторы. В результате измерений выяснилось, что лазеры с небольшого расстояния могут вызвать поражение глаз, так как интенсивность излучения довольно высока (~ 3 мВ/см² для расстояния 60 м и ~ 1 мВ/см² для 150 м). При расстоянии 300, 460 и 610 м интенсивность излучения составляет 100, 60 и 20 мкВт/см², соответственно. Как уже говорилось выше, и такие уровни воздействия могут вызвать трудности в управлении самолетом из-за временной слепоты, яркого блеска, отвлечения внимания и др.

Для борьбы с лазерными хулиганами в разных странах создают специальные подразделения, ужесточают наказание вплоть до тюремного заключения, вводят запрет на продажу лазерных указок повышенной мощности. В России законопроект об уголовной ответственности был внесен в Госдуму еще в 2011 году, но, по-видимому, до сих пор не принят. Покончить с лазерными хулиганами, конечно, сложно, а в ближайшее время просто невозможно. Поэтому так важны научные разработки, способные ослабить воздействие лазера на пилотов. Один из вариантов – использование различных защитных очков, козырьков и т.п. со специаль-

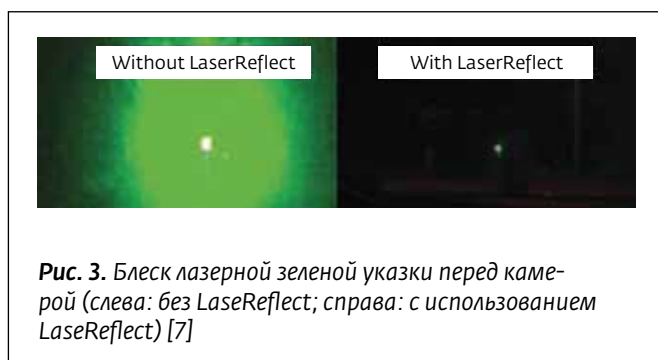


Рис. 3. Блеск лазерной зеленой указки перед камерой (слева: без LaseReflect; справа: с использованием LaseReflect) [7]

ными светофильтрами, блокирующими лазерное излучение.

Для пилотов очень важно следить за показаниями приборов в кабине, за наземными указателями и огнями, поэтому очки должны иметь высокий коэффициент пропускания при блокировке узкого диапазона волн вблизи длины волны λ излучения и обеспечить отличное распознавание цветов. Существует два подхода к созданию антилазерных очков – использование пластиковых линз с введенным красителем и нанесение на линзы покрытий [7]. В первом случае полимерные материалы в процессе производства пропитывают красителем, чувствительным к определенному цвету. Однако со временем такие материалы деградируют. Во втором случае используют современные технологии для нанесения оптических тонкопленочных многослойных покрытий на линзы, выполненные из стекла или пластика. Эти покрытия отражают нежелательное излучение.

Среди основных современных производителей антилазерных очков можно назвать Laser-Gard eyewear (Sperian/Honeywell), LaserShields eyewear (NoIR Laser Co.), Laser Armor eyewear (Night Flight Concepts), Laser Defense Eyewear (PerriQuest) и LaseReflect Aviator eyewear (Iridian Spectral Technologies) [8]. Последняя из этих компаний предложила новое решение – использовать многослойные диэлектрические покрытия [7]. На рис.3 показан эффект применения LaseReflect eyewear.

По информации производителей очки обеспечивают высокое пропускание света (от 50% до 80% для LaseReflect Aviator eyewear), при этом устраняют до 99,5% излучения с $\lambda=532$ нм и позволяют распознавать цвета. Пилоты, проверявшие очки Laser-Gard, подтвердили, что могут различать цвета внутри кабины. Конечно, цвета немного сдвигаются. Это признают и производители. Например, на схеме, представленной Laser Defense Eyewear [9] видно, что ярко-зеленый становится желто-зеленым, красный – оранжевым (рис.4).

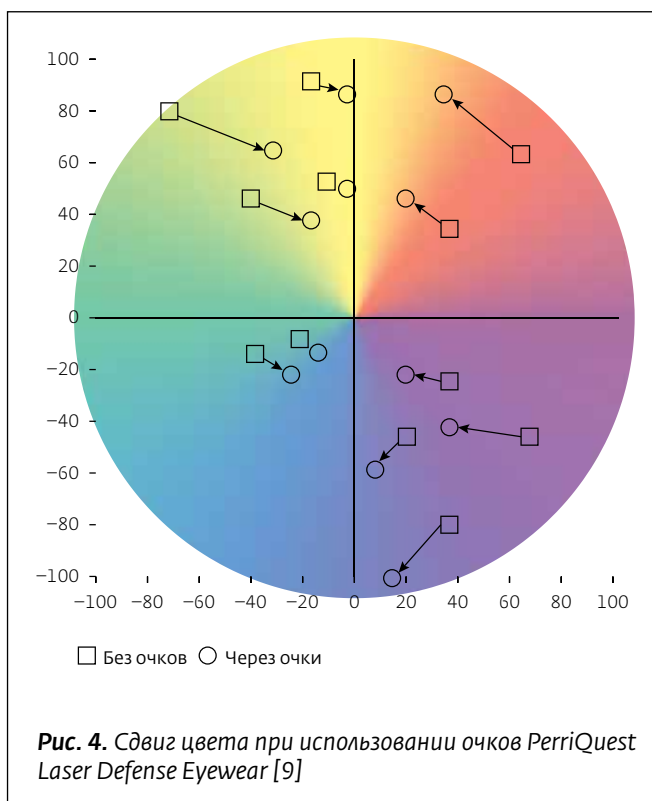


Рис. 4. Сдвиг цвета при использовании очков PerriQuest Laser Defense Eyewear [9]

Использование очков может быть полезным, но не снимает все проблемы. Даже лучшие из них ухудшают видимость (особенно при ночных полетах), ослабляют и в некоторой степени искажают определенные цвета и тем самым мешают различать индикаторы приборов в кабине или сигнальные огни аэродрома. Нет необходимости носить очки в течение всего полета, так как атакам самолеты подвергаются при взлете или посадке, но если не носить их постоянно, то можно не успеть надеть в нужный момент. К тому же их нужно бережно хранить. Более того, многие пилоты по разным причинам просто не хотят носить очки. Федеральное авиационное управление США (FAA) в настоящее время не требует применения специальных антилазерных очков [8], но желающие иметь дополнительную защиту могут их применять.

Другой подход к защите от лазерных атак основан на последних достижениях в области создания нанокompозитных оптических покрытий. Тонкопленочные интерференционные металл-диэлектрические покрытия уже используют для улучшения свойств авиационных материалов остекления (например, для снижения солнечного и СВЧ-излучения в зарубежных самолетах). Российскими учеными разработаны тепло- и радиозащитные материалы авиацион-

ного остекления на основе органического стекла с тонкими многослойными оптическими интерференционными покрытиями [10]. Недавно исследователи из Lewis University, США, (химики, физики и специалисты в области авиации) предложили использовать светочувствительные нанокompозитные покрытия для защиты самолетов от лазерных атак [2]. Эти покрытия наносят непосредственно на ветровое стекло кабины. Основа синтезированных в работе нанокompозитов – квантовые точки CdS, закрепленные на частицах TiO_2 . В материал были дополнительно введены органические лиганды, усиливающие поглощение лазерного излучения определенной длины волны. Для получения прозрачного покрытия нанокompозитный материал диспергировали в растворе поливинилового спирта (ПВС), который служил полимерной матрицей. Раствор наносили на ветровые стекла от Boeing 737 и проводили термообработку. Были получены прозрачные пленки с разной концентрацией наночастиц. На рис. 5 показано 4 образца – контрольный из чистого ПВС и А, В, С с разной концентрацией наночастиц (концентрация растет от А к С).

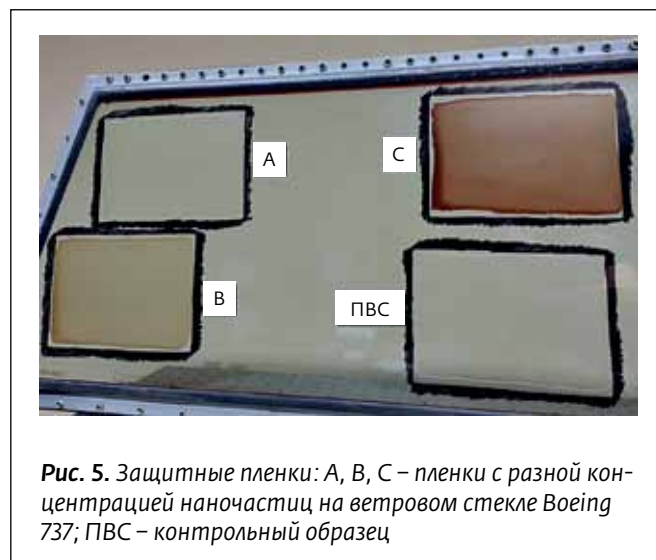


Рис. 5. Защитные пленки: А, В, С – пленки с разной концентрацией наночастиц на ветровом стекле Boeing 737; ПВС – контрольный образец

Были проведены лабораторные и полевые испытания с использованием Nd:YAG зеленого лазера (длина волны 532 нм, мощность 20 мВт) и синего лазера (длина волны 447 нм, мощность 20 мВт). Для полевых испытаний лазеры были установлены на расстоянии ~60 и 150 м. На рис.6 приведены значения интенсивности ($мВт/см^2$)

НОВЫЕ КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА "ТЕХНОСФЕРА"



Цена 2800 руб.

СПРАВОЧНИК ПО ЛАЗЕРНОЙ СВАРКЕ

Редактор оригинального издания С.Катаяма

Среди технологий, предназначенных для обработки материалов лазером, особо выделяется лазерная сварка, включившая в себя последние достижения в разработке лазерных устройств. Для ее правильного применения и использования требуется ясное понимание физических механизмов и явлений, сопровождающих лазерную сварку. Поэтому в справочнике рассмотрены разнообразные лазерные или гибридные процессы сварки, сварка различных видов материалов, приведено описание металлургических, химических и механических аспектов сварки.

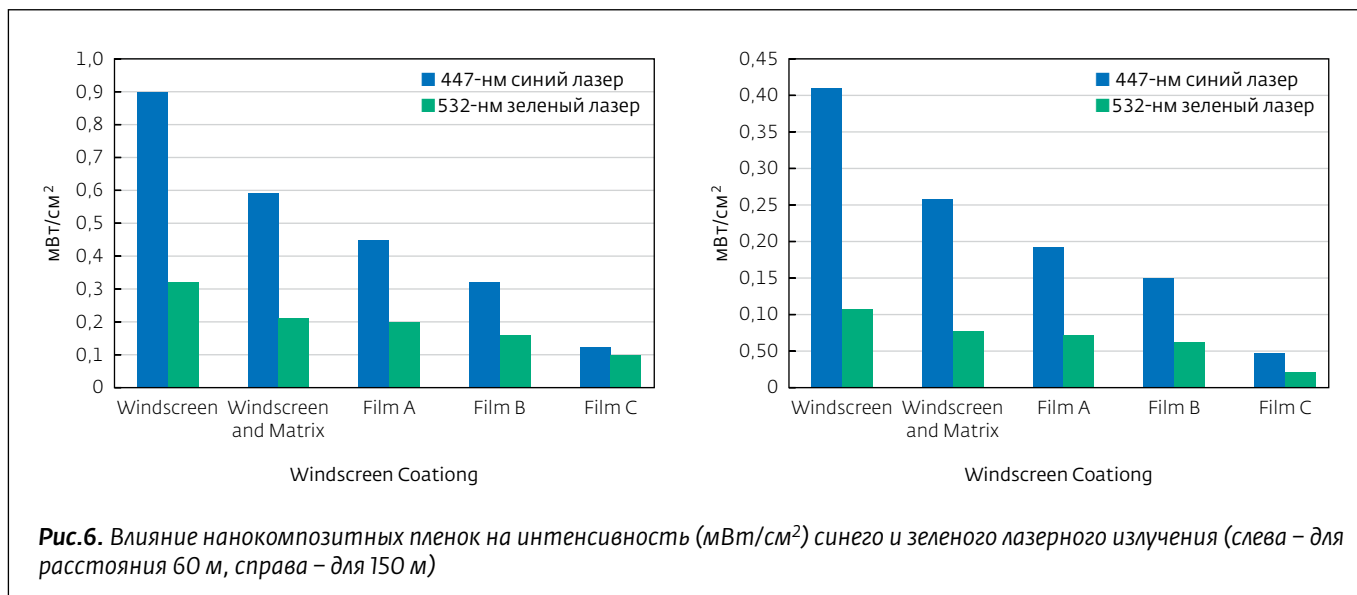
Справочник разделен на четыре части. В разделе I рассмотрены базовые принципы физических процессов сварки и раскрыты причины появления дефектов. Раздел II посвящен конкретным технологиям, рассмотрена лазерная сварка различных материалов. В разделе III представлены методы численного моделирования процесса лазерной сварки, описана процедура калибровки инструментов в роботизированной сварке. В разделе IV рассмотрены конкретные значения рабочих параметров и условий сварки в промышленных применениях.

Книга адресована студентам, инженерам, ученым, преподавателям и станет важной и полезной для всех, кто интересуется лазерной сваркой – от новичков до специалистов и экспертов.

Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2015. –
704 с. + 34 с. цв. вклейки
ISBN 978-5-94836-420-9

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

☎ 125319, Москва, а/я 91; ☎ (495) 234-0110; ☎ (495) 956-3346; ✉ knigi@technosphera.ru, sales@technosphera.ru



света, проникшего "в кабину" через ветровое стекло и через 4 образца пленок, покрывающих стекло.

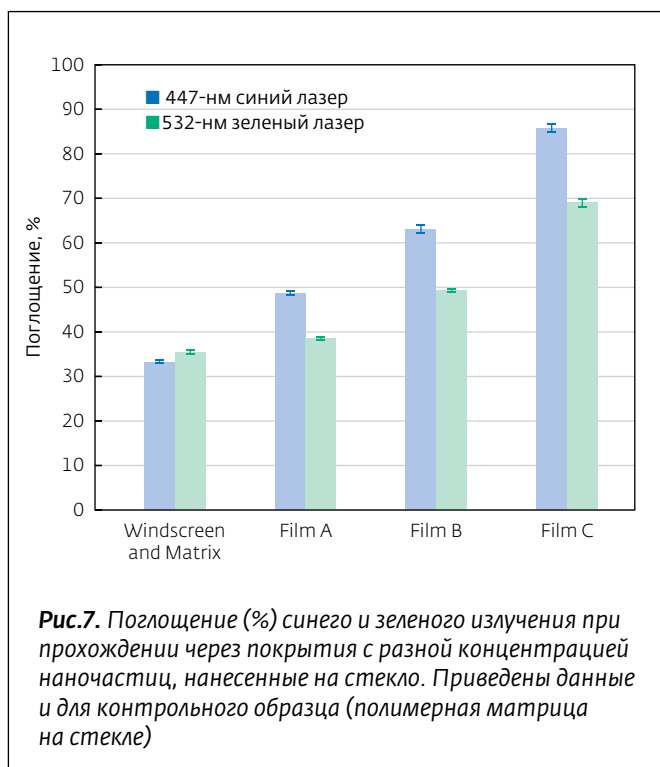
Как уже говорилось выше, считается, что повреждение глаз происходит при уровне воздействия 2,54 мВт/см²; к ослеплению вспышкой приводит 0,1 мВт/см² [2, 3]. Как видно из рис.6, наличие покрытий заметно снижает риск ослепления. Для образца Film C при расстоянии 60 м мощность на единицу площади равна или чуть превышает

0,1 мВт/см², а при расстоянии 150 м для обоих лазеров она заметно ниже порога ослепления. Интенсивность лазерного излучения благодаря применению покрытий снижается на 36–88% (рис.7).

Для повышения эффективности покрытий следует провести дополнительные исследования влияния состава нанокompозита. Далее, важно убедиться, что покрытия не ухудшают видимость и не снижают способность пилотов распознавать цвета. Безусловно, также необходимо оценить, как влияют реальные условия полета (температура, УФ-излучение и др.) на долговечность покрытия.

Авторами [2] пока получены только научные результаты, говорить об их внедрении, конечно, рано. А вот пленки MetaAir, разработанные компанией Lamda Guard, в ближайшее время планируется испытать на ветровых стеклах самолетов Airbus [11]. Lamda Guard (подразделение Metamaterial Technologies Inc.) и Airbus год назад объявили о стратегическом партнерстве с целью широкого внедрения пленок MetaAir™ для защиты ветровых стекол самолетов. Эти прозрачные наноструктурные оптические интерференционные пленки созданы на основе метаматериалов (нанокompозитов особой геометрии) [12]. По информации компании, пленки способны отражать лазерное излучение одного или нескольких цветов (ширина полосы 15–20 нм) в интервале углов падения ±50 градусов, не искажая видимость. Пленки путем адгезии крепятся на внутреннюю поверхность ветрового стекла кабины (рис.8).

Основные преимущества этой технологии заключаются в том, что пилотам не нужно будет использовать очки; а пленка абсолютно не мешает следить



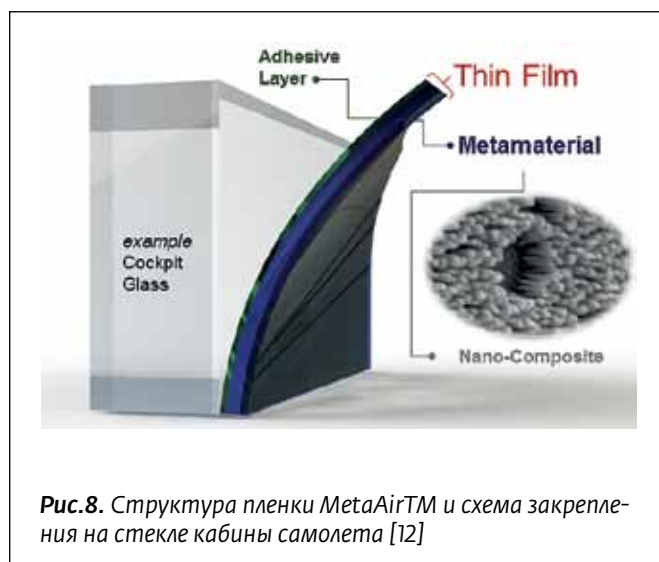


Рис. 8. Структура пленки MetaAir™ и схема закрепления на стекле кабины самолета [12]

за показаниями приборов, индикаторными цветовыми указателями внутри кабины. Предварительные испытания показали, что применение пленки не мешает правильно различать сигнальные огни аэропорта. Из-за УФ-деградации адгезионного слоя через ~ 5000 часов полета потребуются его замена, но сам метаматериал не имеет срока использования.

По оценкам, выпуск продукта начнется в 2016 г. Испытания, по-видимому, займут несколько лет. Если они окажутся успешными, пленка MetaAir™ будет сначала сертифицирована для Airbus (A320, A350, A380 и др.), а затем станет доступна и другим производителям самолетов. Это будет первое широкомасштабное применение оптического нанокompозитного метаматериала. По сообщению SBCNews (2015), Innovacorp инвестирует в Metamaterial Technologies Inc. 2 миллиона долларов с целью модифицирования продуктов metaAir для задач авиакосмической отрасли [13].

К сожалению, случаев лазерного хулиганства не становится меньше. Научному сообществу специалистов в области фотоники предстоит решить еще много задач. Необходимо не только снизить уровень возможного воздействия на пилотов, но и обеспечить защиту детекторов, видеокамер и других оптических приборов, которые также стали подвергаться лазерным атакам.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Anderberg, O.E. Bring, M.L. Wolbarsht. Blinding laser weapons and international humanitarian law. - J. of Peace Research, 29 (3),

- 287-297 (1992).
2. **R.S. Phillips, H.K. Bilan, Z.X. Widell et al.** Measuring the effectiveness of photoresponsive nanocomposite coatings on aircraft windshields to mitigate laser intensity. – J. of Aviation Techn&Eng., 4, 49-54 (2015).
 3. **V.B. Nakagawara, R.W. Montgomery, K.J. Wood.** Laser illumination of flight crew personnel by month, day of week, and time of day for a 5-year study period: 2004-2008. DOT/FAA/AM-11/7. Office of Aerospace Medicine Washington, DC 20591. Final Report. April 2011.
 4. Руководство по лазерным излучателям в аспекте безопасности полетов. 2003 Международная организация гражданской авиации. Doc 9815 AN/447. – www.favt.ru/public.
 5. **V.B. Nakagawara, R.W. Montgomery, A.E. Dillard, L.N. McLin, C.W. Connor.** The effects of laser illumination on operational and visual performance of pilots during final approach. DOT/FAA/AM-04/9 2004.
 6. **R.J. DeMik, S.L. Harriman, R.S. Phillips et al.** Measuring intensity of laser light penetration flight decks in laser illumination. – J. of Aviation Techn&Eng., 3, 9-16 (2013.)
 7. **J. Palidwar.** Eyewear helps thwart laser-pointer attacks. – **Photonics Spectra**, January 2014.
 8. Protective eyewear for pilots, <http://www.laserpointersafety.com>. July 2015.
 9. Laser Defense Eyewear – PerriQuest. www.perriquest.com/laser-defense-eyewear.
 10. **А.Г. Крынин, Ю.А. Хохлов, В.А. Богатов, П.П. Кисляков.** Прозрачные интерференционные покрытия для функциональных материалов остекления. – Труды ВИАМ, № 11 (2013).
 11. www.lamdaguard.com.
 12. www.metamaterial.com/metaair.
 13. **K. Parsons.** Airbus links partnership with Dartmouth company. – CBC News Posted: Apr 27, 2015.

ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ ЛАЗЕР

Новый подход, который использует световой поток для перемещения зеркал, может быть использован в новом поколении лазерных технологий для широкого диапазона применений, включая дистанционное зондирование, навигацию автономных автомобилей и трехмерную биомедицинскую визуализацию.

Группа инженеров из Калифорнийского университета в Беркли, под руководством Конни Чен-Хаснейна (Connie Chang-Hasnain), профессора электротехники и вычислительной техники, использовала новую концепцию для автоматизации способа, которым источник света изменяет длину своей волны, когда он сканирует окружающий ландшафт. Разработка сможет найти применение в технологии формирования изображений, использующей лидар, а также в оптической когерентной томографии (ОКТ).

В статье описывается быстрый самоперестраивающийся лазер, который может значительно снизить потребление питания, уменьшить габариты, вес и стоимость лидаров и систем ОКТ, имеющихся сегодня на рынке Nanoscale Science and Engineering Graduate Group (Калифорнийский университет в Беркли). Разработка поможет снизить объем и массу компонентов, что позволит использовать их в смартфонах или небольших БПЛА.

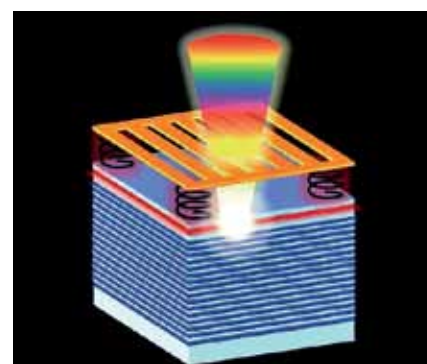
Лидар работает путем наведения луча света на цель с последующим измерением количе-

ства времени до регистрации системой отражения. Поскольку скорость света постоянна, эта система может использоваться для вычисления расстояния. Машины, управляемые без участия человека, и технология дистанционного зондирования используют лидары для навигации и создания трехмерных карт.

ОКТ использует тот же принцип измерений в миллиметровом масштабе для медицинской визуализации. Технология используется для создания поперечных изображений сетчатки глаза и помогает определить заболевания на ранних стадиях, включая возрастную макулодистрофию (группа заболеваний, при которых поражается сетчатка глаза и нарушается центральное зрение).

Движение зеркал происходит благодаря воздействию силы света. Когда луч лазера перемещается, он должен постоянно менять свою частоту так, чтобы система смогла вычислить разницу между входящим, отраженным и исходящим светом. Для изменения частоты как минимум одно из двух зеркал в лазерном резонаторе должно перемещаться с высокой точностью.

Механизмы управления зеркалами – компоненты, которые делают имеющиеся системы лидаров и ОКТ крупногабаритными, энергозатратными, медленными и сложными. Чем быстрее система должна работать – например,



Самоперестраивающийся лазер совмещает оптическое поле с механическим движением высококонтрастной отражательной дифракционной решетки (НСС, high-contrast grating). Зеркало НСС поддерживается механическими пружинами, соединенными со слоями полупроводника. Красный слой усиливает лазер, а синие слои формируют второе зеркало системы. Сила света заставляет верхнее зеркало вибрировать с высокой частотой. Вибрация позволяет лазеру автоматически менять цвет при сканировании

автономный автомобиль – тем больше требуется энергии. Новизна конструкции состоит в интегрировании полупроводникового лазера с зеркалом. Размер такого лазера не превышает нескольких сотен микрометров, и он может получать питание от батарейки АА.

Соединение лазера со сверхтонкой, высококонтрастной отражательной дифракционной решеткой позволило исследователям использо-