

Леонид Новаковский | pharos-Alef@yandex.ru | Марк Фонтанон (Marc Fontoyont)
 Жан-Пьер Мира (Jean-Pierre Miras) | Паоло де Векки (Paolo de Vecchi)
 Жан Шанюссо (Jean Chanussot) | Марко Анджелини (Marco Angelini)
 Кристоф Марти (Christophe Marty) | c.marty@ingelux.com
 Грегори Дюшен (Gregory Duchêne) | Кацуаки Макита (Kazuaki Makita) | kazuaki.makita@toshiba.co.jp

«Мона Лиза» в новом свете

В рамках шефства над музеем «Лувр», которое взяла компания Toshiba, решено было разработать новую лампу с очень высокими эксплуатационными характеристиками для дополнительного освещения картины «Мона Лиза». Для этого был собран специальный коллектив разработчиков. Разработкой изделия руководила компания ARKANZ. Разработкой изделия занималась компания ARKANZ совместно с российской компанией Фарос-Алеф имеющей оригинальную патентованную технологию смесителей света, которое называется Scheib Новое световое оборудование было установлено 4 июня 2013 г.

Введение

Для максимально качественного освещения картины «Мона Лиза» была специально разработана светодиодная лампа. Работы по ее проектированию финансировались известной японской компанией Toshiba. Новая лампа (рис. 1) установлена на полке, разработанной перуанским архитектором Лоренцо Пикерасом (Lorenzo Piquer). Система освещает картину снизу вверх и состоит из 34 одно- и многокристальных светодиодов. Она заменяет прежнюю лампу из семи светодиодов, которая работала с 2005 г. Чтобы добиться максимально однородного освещения картины, были спроектированы три оптические системы: первичная оптика на самих светодиодах, система цветового смешения Scheib и третья система из двойной линзы со встроенным фильтром, которая фокусирует свет на кар-



Рис. 1. TOSHIBA Lamp 2013 с 34 светодиодами, разработанная для освещения картины «Мона Лиза»

тине и регулирует его качество. Лампа имеет также встроенную рамку. Еще одно назначение этого устройства — свободная регулировка цветовых температур с поддержанием высокого (более 95) индекса цветопередачи (CRI) при максимальной области цветовой гаммы (в связи с исследовательскими работами Международной комиссии по освещению). Эти цели достигаются без выработки ИК- или УФ-излучения. Чтобы специалисты Лувра могли легко и точно настраивать спектральный состав света (отклонение Duv), была разработана специальная высокоуровневая система команд. Эти изменения полезны главным образом для корректировки окрашивания, вызванного защитным стеклом и окружающей световой обстановкой, с целью получения наилучшей цветопередачи. Наконец, лампа снабжена чрезвычайно мощной системой охлаждения, стабилизирующей цветовое смешение и обеспечивающей срок службы в 80 000 ч. Благодаря применению светодиодов последнего поколения, эта лампа потребляет при работе всего около 20 Вт.

Исходные принципы освещения и функциональные требования к новой лампе

В 2005 г. Лоренцо Пикерасу была поручена реконструкция Зала Джоконды в Лувре, а Марк Фонтанон отвечал за освещение. При этом решено было осветить «Мону Лизу» не каким-то особым образом, а как можно ближе к тому, как освещены соседние картины. Исходя из того, что картина висит на конкретной стене за толстым ламинированным стеклом, необходима была осветительная система с корректировкой цветопередачи. Схема освещения снизу вверх

с полки позволила скрыть лампу и тем самым избежать возможных отражений.

В ходе реконструкции, которая проходила в 2005 г., мы поняли, что осветительная система из множества светодиодов может эффективно обеспечить оптимальную цветовую коррекцию (наилучшую передачу цветов с коррекцией окрашивания, вызванного прохождением света через толщу стекла, и учетом окружающего освещения). Существенным конструктивным ограничением была малая длина светодиодной лампы, которая позволяла бы смонтировать ее внутри полки. Лампа, спроектированная в 2005 г., состояла из семи светодиодов и на тот момент уже подвергалась детальному колориметрическому исследованию (рис. 2, 3).

К 2013 г. как в технологиях освещения, так и в колориметрии произошел заметный прогресс. Соответственно, появилась возможность усложнить задачу, разработав лампу:

- на базе светодиодов с высокой световой отдачей и лучшим спектральным распределением;



Рис. 2. Лампа из семи светодиодов, разработанная в 2005 г. Pharos—Alef—Sklaer в сотрудничестве с Fraen Corporation Srl и DEF Srl (проект архитектора Л. Пикераса и дизайнера по свету М. Фонтанона)

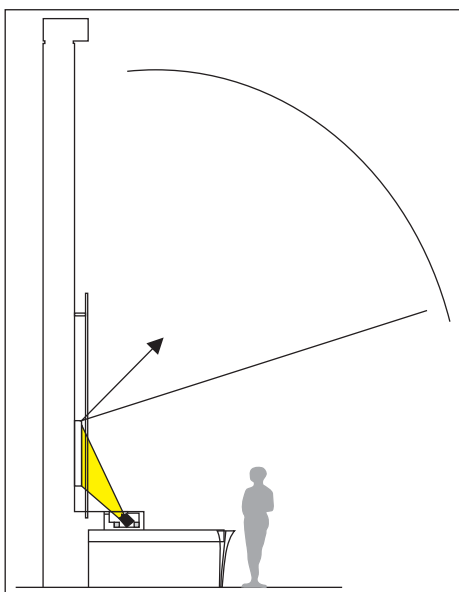


Рис. 3. Принцип освещения «Моны Лизы» снизу вверх, разработанный в 2005 г. (архитектор Л. Пикерас и дизайнер по свету М. Фонтанон)

- с более точной оптикой, которая позволила бы существенно повысить однородность освещения картины;
- со встроенной рамкой, имеющей резкие края;
- со встроенной системой корректировки цветопередачи для простого и точного управления спектральным составом света;
- с увеличенной областью цветовой гаммы для повышения качества экспозиции (по результатам исследований МКО);
- с применением избранных методов, которые могли бы быть внедрены во всех музеях.

Ультрасовременная лампа

Первая лампа, разработанная для «Джоконды» в 2005 г. компанией Sklaer GmbH (филиалом Arkanz) в сотрудничестве с Fraen Corporation

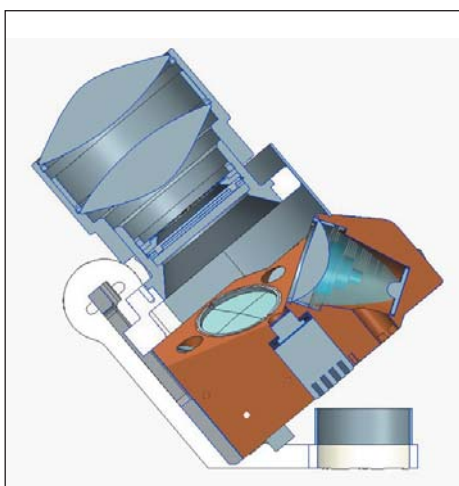


Рис. 4. Новый проектор Toshiba Mona Lisa, проектировщик Витторио Ферри (Vittorio Ferri), 2013 г.

Srl и DEF Srl, состояла из семи светодиодов, цветосмесителя-преобразователя FOCON (волоконно-оптического преобразователя) и активной системы охлаждения с постоянно работающим вентилятором. Каждый канал имел независимое питание стабилизированным током. Эта лампа отработала 70 000 ч без отказов.

Разработка новой лампы, осуществляемая под руководством Arkanz Lighting в тесном сотрудничестве с Toshiba Lighting, потребовала новаторских технологических решений: 34 светодиода располагаются по звездообразной схеме, чтобы обеспечить однородность цвета на всей площади картины. Спектральное распределение светодиодов было тщательно подобрано таким образом, чтобы получить CRI до 98 в требуемом диапазоне цветых температур. Для охлаждения лампы используются массивный медный радиатор и вентилятор, призванные максимально ограничить цветные отклонения и гарантировать определенный спектральный состав света на протяжении требуемого срока службы.

Одним из наиболее трудных моментов было смешение цветов на очень малом расстоянии — 12 см. Преодолеть эту трудность удалось с помощью партнерской компании Fraen Srl, которая встроила оптоволоконный смеситель Scheib в смесительно-проекционную оптическую систему.

Источник тока для светодиодов был спроектирован компанией DEF Srl (Ломбардия, Италия). Компания DEF также отвечала за сборку и управление качеством для итальянского отделения UL International. Для цветового смешения и беспомехового регулирования яркости используются два драйвера типа D-LED Push с поддержкой технологии DALI, работающие в режиме стабилизации тока. Push — это очень компактный многоканальный токовый драйвер светодиодов, специально адаптированный для светодиодных ламп. Он оснащен интерфейсами DALI и 0/10 В, а также управляющим контуром для защиты от перегрева.

Для управления драйверами и хранения программ используется стандартный контроллер

CP64-LX-C производства компании AELSYS (Прованс–Альпы–Лазурный Берег, Франция). Компания AELSYS занимается разработкой и изготовлением DALI- и DMX-контроллеров, которые сопрягаются с внешними датчиками (например, датчиками освещенности и детекторами присутствия). В Лувре контроллер соединен по каналу Ethernet с главной шиной музея.

Программное обеспечение для настройки (WINCP) было дооснащено колориметрическим модулем, который автоматически устанавливает уровни в семи группах светодиодных модулей после выбора трех параметров: цветовая температура, сила света и отклонение от линии черного тела. Компания AELSYS разработала приложение для Windows 8, обеспечивающее связь между CP64-LX-C и сенсорным ПК-планшетом Toshiba по Wi-Fi или интерфейсу USB 3.

В ходе работы над этой «концепт-лампой» компания Arkanz Lighting и ее партнеры изучили и реализовали ряд защищенных патентами технических решений, которые открывают путь к появлению новых мощных музейных проекторов с высокими эксплуатационными характеристиками (рис. 4).

Оптическая оптимизация для обеспечения высокой однородности освещения всей поверхности картины

В предыдущей модели лампы применялась одиночная асферическая проекционная линза с числовой апертурой 0,8. Световой пучок формировался волоконно-оптическим преобразователем с трапециевидной выходной диафрагмой, прямоугольная проекция которой в точности совпадала с картиной.

В новой светодиодной лампе образца 2013 г. сохранена основная структура из множества источников света, но усовершенствовано их пространственное распределение, чтобы повысить однородность цвета и яркости освещения. Общее количество светодиодов увеличено с 7 до 34, из них семь однокристалльных светодиодов и три многокристалльные сборки по девять кристаллов в каждой.

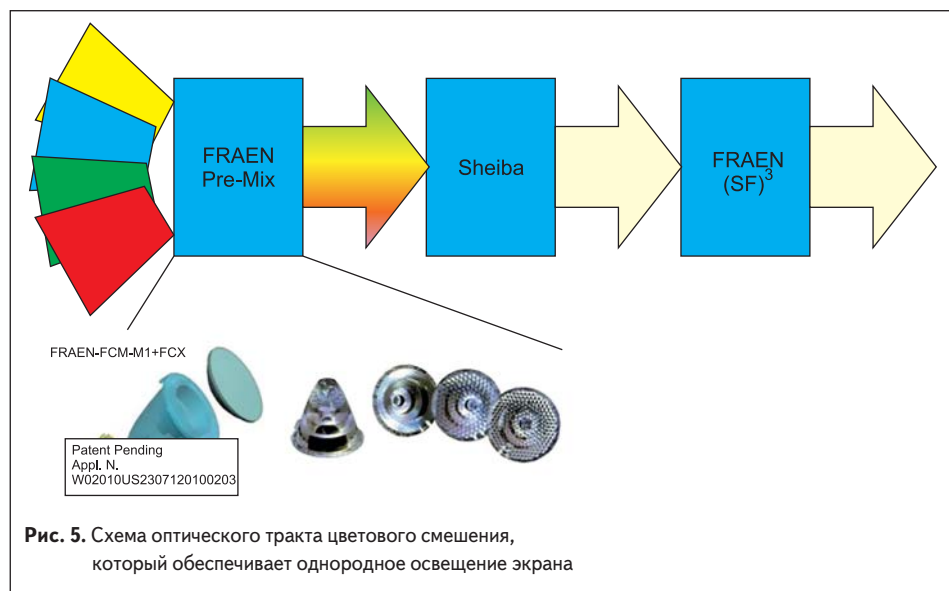
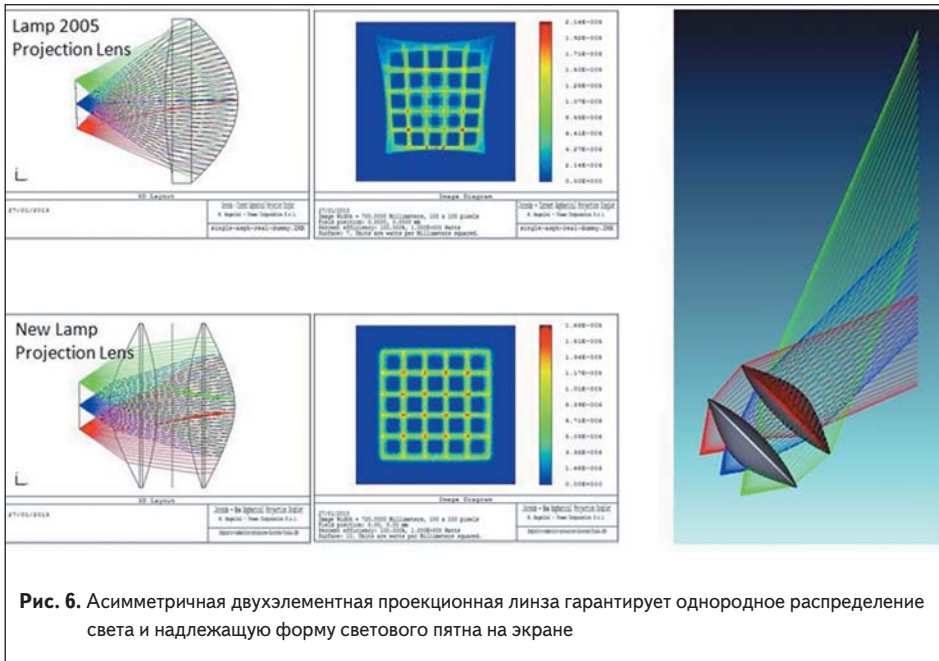


Рис. 5. Схема оптического тракта цветowego смешения, который обеспечивает однородное освещение экрана



Цветовое смешение реализуется последовательно в три этапа:

- Первый этап «предварительного смешения» выполнен на базе специальных оптических компонентов Fraen для цветового смешения светодиодного излучения (FRAEN-FCM-M1+FCX, заявка на патент № WO2010US23071 20100203).
- На втором этапе используется оптическая система Scheib.
- На третьем этапе используется специальный диффузный фильтр (SF)³ (рис. 5).

Оптическая система предварительного смешения фокусирует излучение 34 светодиодов на диске, создающем световое пятно высокой степени однородности. Размеры этого светового пятна оптимизированы относительно размеров картины «Мона Лиза».

За смесителем Scheib в фокальной плоскости проекционной системы было решено расположить трапециевидную диафрагму. Это позволяет спроецировать прямоугольное световое пятно на плоскость экрана, расположенную не перпендикулярно к оптической оси лампы.

В старой лампе использовалась одиночная асферическая проекционная линза. Новая лампа оснащена специально разработанной асферически-симметричной двухэлементной линзой с числовой апертурой 0,7 (рис. 6). Разработка этой системы из двух линз была обусловлена необходимостью устранить искажение верхней стороны асимметричной проекции светового пучка. В результате удалось получить на картине четкое прямоугольное световое пятно. Более того, тщательная тонкая настройка системы дает возможность отслеживать контраст между картиной (освещенной частью) и ее рамой.

Рассматривая вопрос о том, как должна падать яркость света от освещенной области к темной, коллектив решил не подсвечивать раму, а сделать границу слегка размытой, смягчив профиль.

Повышенная однородность освещения экрана — одно из наиболее заметных точечных усовершенствований в новой модели (рис. 7).

Поскольку оптическая ось лампы образует угол приблизительно в 60° с перпендикуляром к плоскости картины, существовал риск, что нижняя часть будет освещена значительно ярче верхней. Чтобы этого избежать, необходимо было в дополнение к предварительному смесителю, оптической системе Scheib и двухэлементной линзе разработать еще один специальный фильтр, получивший название (SF)³, для более точной балансировки распределения света по поверхности картины. Фильтр



(SF)³ может быть спроектирован в расчете на самые разные углы падения относительно осей X и Y, а также разные характеристики оптической системы.

Технология цветового смешения светодиодного излучения с использованием волоконно-оптической плоскопараллельной пластины (Scheib)

Цветовое смешение излучения от 34 светодиодов в новом прожекторе для «Моны Лизы» осуществляется с помощью устройства, позволяющего уменьшить размер светового пятна. Оно представляет собой волоконно-оптическую плоскопараллельную пластину (Scheib) и основано на том же принципе, что и FOCON в прожекторе старого образца, но с более сложно устроенными диафрагмами. Конструктивно устройство имеет вид пучка оптических волокон толщиной 4 мм с высоким коэффициентом заполнения и большой числовой апертурой. Большая апертура (0,5) позволяет расположить светодиодные модули по широкому конусу с углом $\pm 32^\circ$. В ходе испытаний это устройство продемонстрировало высокое качество цветового смешения и однородность освещения около 95%.

Scheib используется для передачи и формирования светового пучка в случаях, когда требуется точно задать распределение света на небольшом участке пространства (рис. 8). Эта элегантная технология успешно используется для формирования подвижного светового пучка в оригинальных прожекторах и является предметом патентной заявки № 2283986, поданной компаниями Pharos-Alef Ltd. и Sklaer GmbH.

Полный контроль над спектром и мощностью излучения

Было предложено два различных режима управления: один для колориметрических регулировок перед окончательной приемкой на месте, а второй — для текущей эксплуатации, со связью по протоколу DALI, который используется в Лувре. Первый режим был особенно важен, учитывая новаторский характер изделия.

Было разработано программное колориметрическое средство по материалам текущих исследований Международного совета музеев (ИКОМ) и Международной комиссии по освещению (МКО). Это средство позволяет нам перемещаться в колориметрическом пространстве, свободно управляя координатами цветности излучаемого света с поддержанием оптимального качества света (высокого индекса цветопередачи и максимальной области цветовой гаммы) в каждый момент времени. Разработка данной программы потребовала специальной калибровки каждого цветового канала и коррекции влияния оптических систем с использованием фотометрического шара.

Однако окончательные решения об этих регулировках принимались отделом консервации Лувра, поэтому был разработан протокол, позволяющий выполнять регулировки на месте, находясь непосредственно перед картиной «Мона Лиза». Окончательная регулировка производилась куратором Винсентом Делювэном (Vincent Delieuvin) при содействии Лоренцо Пикераса в условиях смешанного общего освещения (люминесцентное освещение со слабой примесью естественного).

Важно было настоять на новаторском процессе, который позволяет куратору отрегулировать свет и цвета на картине и добиться точной передачи ее действительных цветов (рис. 9). Разработанный процесс заслуживает применения во многих музеях, по крайней мере в тех из них, где кураторы хотели бы скорректировать освещение ввиду ухудшения состояния картины или неподходящих условий общего освещения, требующих локальной цветовой коррекции.



Рис. 8. Волоконно-оптическая пластина Scheib (запатентованная технология Pharos-Alef, Россия)

Самая высококачественная в мире светодиодная лампа

В 2010 г. группа компаний Toshiba приступила к реализации новых инициатив в области светотехники, цель которых — способствовать выработке новой «культуры освещения» во всем мире. В рамках первого проекта по реконструкции наружного освещения музея был подписан контракт с музеем Лувр (с 30 июня 2010 г. по 31 декабря 2013 г.). В начале декабря 2011 г. были переведены на светодиодную основу освещение пирамиды Лувра, трех пирамидок и павильона Кольбера, а 24 мая 2012 г. — освещение Наполеоновского двора. В настоящее время идет переоборудование освещения Квадратного двора, которое должно завершиться к концу 2014 г.

Проект по реконструкции наружного освещения не ограничен простыми вспомогательными технологическими работами, а нацелен на «более устойчивое, эффективное и бережное» сохранение всемирного культурного наследия с целью достичь «единения искусства с техникой» и снизить энергопотребление до уровня в 73%.

Музей Лувр признает, что в результате удалось «уменьшить воздействие на окружающую среду и одновременно представить искусство в новом свете». Неудивительно, что в мае 2012 г. был подписан новый партнерский контракт на реконструкцию внутреннего освещения музея. В рамках этого контракта будет переведено на светодиодные лампы освещение ряда помещений, начиная с Зала Джоконды, где находится «Мона Лиза», прозванная «сокровищем Лувра», а затем Красного зала, где выставляются знаменитые

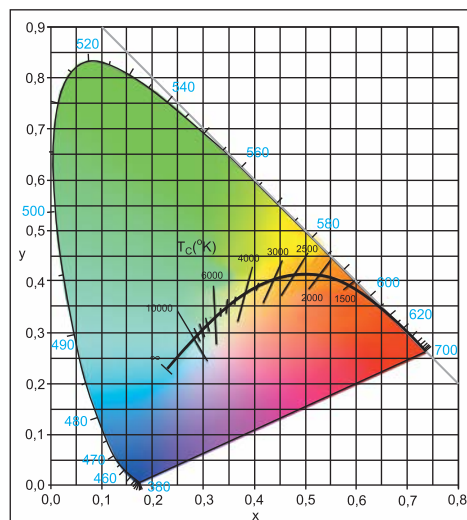


Рис. 9. Система управления обеспечивает высочайшее качество освещения во всех рабочих точках в широком диапазоне температур. Большая область цветовой гаммы достигается за счет применения большого количества светодиодов. Перемещение по диаграмме осуществляется с помощью средства Ingelux, разработанного на основе накопленного багажа знаний

крупные полотна, например «Коронование императора и императрицы». Также будет заменено освещение на входе в Наполеоновский зал, а точнее, на входе в сам музей.

Под пристальным надзором технической группы

Компания Toshiba начала исследовать возможность разработки новой лампы для освещения «Моны Лизы» еще в 2012 г. Технико-экономическое обоснование проекта по улучшению технических характеристик старой лампы разрабатывалось в течение двух месяцев, начиная с июня 2012 г., совместно с германской компанией Arkanz GmbH. После этого мы приступили к технологической разработке по следующим направлениям:

- оценка возможных технологий регулирования светового потока, коррелированной цветовой температуры, Duv и индекса цветопередачи;

Винсент Делювэн, куратор Отдела итальянской живописи XVI в. музея Лувр:

В Лувре особое внимание уделяется тому, чтобы каждый предмет искусства был освещен надлежащим образом. Каждая картина заслуживает того, чтобы рассматривать ее при наилучшем освещении, позволяющем понять технику художника или оценить изысканность его палитры. При этом освещение не должно со временем вызывать структурную деформацию, изменение свойств пигментов или повреждение лака. А отражения предметов окружающей обстановки на стекле, которым защищены некоторые экспонаты, могут мешать восприятию. В случае «Моны Лизы» присутствуют практически все эти ограничения, причем в весьма выраженной форме. За прошедшие 500 лет деревянный подрамник покоребился и принял выпуклую форму. В результате на нем развилась сложная сеть трещин, повредивших тонкую работу Леонардо да Винчи. Слои лака, нанесенные на картину, окислились, потемнели и придали желтоватый оттенок цветовой гамме. Наконец, защитное стекло, которое для этой картины сделано особенно толстым, представляет собой цветовой фильтр, и влияние этого фильтра необходимо компенсировать при помощи освещения. Специалисты музея хотели бы, чтобы этот крупнейший объект мирового культурного наследия был освещен с применением лучших имеющихся технологий. Мы рады, что благодаря партнерству с компанией Toshiba смогли использовать последние достижения светотехники на благо этой картине. Этот подход воплощает в себе дух экспериментирования и дух самого Леонардо да Винчи.

Софи Лемоньер, директор по архитектуре музея Лувр:

Здание музея Лувр постоянно преобразуется. Одним из аспектов такого преобразования стало создание новой лампы для «Моны Лизы», которая является плодом сотрудничества известных специалистов.

Новый современный проектор для «Моны Лизы» был разработан к повторному открытию Зала Штатов в 2005 г., а сегодня он реконструирован. Благодаря участию компании Toshiba удалось вновь собрать коллектив из знаменитых специалистов. Мы рады представить сегодня картину и на ее примере продемонстрировать преимущества новейших технологий освещения.

Авторы благодарят Жана-Луи Беллека, начальника сервисной службы архитектурного отдела музея Лувр, за его тщательный надзор за выполнением проекта и активное участие в обмене мнениями.

- исследование технических решений, позволяющих повысить равномерность освещения «Моны Лизы», а также однородность спектрального состава света на всей поверхности картины;
- исследование решений, позволяющих создать идеальное обрамление по краям прямоугольной картины;
- определение способов радикального снижения выработки ультрафиолетового и инфракрасного излучения. Первый опытный образец был изготовлен в январе 2013 г. Работа лампы была протестирована в реальных условиях, на картине «Мона Лиза», с участием куратора отдела итальянской живописи XVI, в Винсента Делюэна и архитектора Зала Джоконды Лоренцо Пикераса. В феврале прошлого года по итогам экспериментов на месте были окончательно определены спектральный состав света и световой поток лампы (таблица).

Т а б л и ц а . Технические характеристики лампы Toshiba

Параметры	Характеристики	Лампа Toshiba
КЦТ при высоком ИЦП, К	2700–3800	Регулируется от 2700 до 3800; для «Моны Лизы» выбрано 3200
Сдвиг относительно линии черного тела	–	Диапазон регулирования 0,02–0,01
Световой поток, лм	–	Для «Моны Лизы» 88 (может быть повышен до 400)
ИЦП	>90	95–98 на линии черного тела
Шкала качества цвета	>85	>95 для «Моны Лизы». Поддерживается на уровне выше 85 при различных значениях КЦТ 2700–3800 К
Ультрафиолетовое излучение, мкВт/лм	<5	<3
Инфракрасное излучение, Вт	<0,1	<0,05
Равномерность освещения картины $E_{мин}/E_{ср}$	>0,6	0,85 (по 16 точкам), >0,92 при окружающем освещении
Равномерность освещения картины по вертикали	>0,9	0,93 ($E_{1/2макс}$ выше $E_{ср}$)
Средняя освещенность, лк	100–250 (точечное + окружающее освещение)	180 на стекле / 108 на картине (только точечное)
Проекция светового потока за пределами рамки	<1%	<0,5%
Срок службы лампы, ч	>50 000	~80 000