

Невидимая власть света. Опыт спектрального инжиниринга в экспозиционном освещении

Т.В. ТРИШИНА

ООО «Трион», Москва
E-mail: vtv@trion-led.ru

Аннотация

В статье описаны различные технологии спектрального инжиниринга для максимально точной цветопередачи музейных экспонатов. Основываясь на собственном опыте и исследованиях, авторы приводят подробный обзор совершенствования процесса использования люминофоров для производства СДов: их характеристик, особенностей, проблематики. Отдельное внимание уделено совершенно новому подходу: применению полупроводниковых наночастиц – квантовых точек. Ключевым является вопрос повышения квантовой эффективности, рассмотрены специфические особенности спектрального инжиниринга относительно кривой Планка, а также внедрённый специальный стандарт биновки. Весь материал наглядно проиллюстрирован практическими примерами, реализованными компанией *Lumileds* в Рейксмюсеуме, а также компанией МДМ-Лайт в Эрмитаже, *Surround Art Gallery*, Бузеоне, *ILONA-K Artspase*. Приведены обоснованные технические решения для создания идеального музейного освещения.

Ключевые слова: музейные экспонаты, музейное освещение, экспозиционное освещение, люминофор, квантовые точки, кривая Планка

Введение

Совершенно новые страницы рождаются в последние годы в истории светотехники. Масштабные проекты в сфере искусства требуют разработки всё более совершенных подходов к созданию идеального света для сверхточной цветопередачи. В результате складываются сложнейшие световые концепции, в основе которых лежат нанотехнологии.

Сегодня вполне можно говорить о свете как инструменте, имеющем особую власть. Ведь многое из того, что задумано природой или создано человеком, способно обрести истин-

ную ценность и законченный смысл лишь в том случае, если это можно наблюдать, видеть. Когда естественное освещение отсутствует или его недостаточно, в дело вступает светотехника. Исходя из задач, с помощью света можно формировать нужную атмосферу, менять настроение, воздействовать и управлять. Но величайшее мастерство проявляется тогда, когда свет в помещении должен остаться в стороне, уступив место главному – встрече зрителя с предметом искусства.

Пожалуй, самым сложным с точки зрения решения светотехнических задач является музейное освещение. Строгие требования к его исполнителям вполне объяснимы. Во-первых, ценные экспонаты нельзя повредить, безопасный свет в музейном пространстве – непереносимое, базовое условие: в спектральном составе недопустимо присутствие ультрафиолетового и инфракрасного излучений. Во-вторых, важно не исказить восприятие экспонируемых объектов. Цветопередача должна быть максимально возможного качества. Фактически, именно свет определяет всё, что увидит посетитель.

Известно, что для предметов изобразительного искусства возрастом более века идеальным является источ-

ник света, полностью повторяющий тот, при котором они создавались. Вряд ли кто-нибудь уделял светотехнической игре столь же много внимания, как художники. Работы старых мастеров являются эталоном цвета и света. Воссоздать естественное освещение, которое сверхточно передаст всё, вложенное в работу автором, – великое искусство сегодня.

Результатом исследования данного вопроса и практического применения разработок стали успешно зарекомендовавшие себя технологии и проекты.

Основная часть: методы, результаты

Качество цветопередачи СД в последние годы выросло кардинально. Ещё недавно всерьёз обсуждавшийся *CRI (colour rendering index)* – индекс цветопередачи, появившийся в 1960–1970 годы и главенствующий более полувека – сегодня совсем потерял актуальность. Ведь отражая цветопередачу на восьми основных (*R1-R8*) и семи дополнительных цветовых шаблонах (*R9 – R15*), он допускает существенные провалы в отдельных частных индексах (рис. 1).

Тенденцией современности являются чёткие требования к частным значениям. Уже в 2013 году при реализации компанией *Philips Lighting* проекта реконструкции Рейксмюсеума в Амстердаме специалистам компании *Lumileds* пришлось сконструировать специальный спектр, уделив особое внимание частному индексу *R9*, отвечающему за передачу насыщенного красного, и *R15*, отражающему телесные оттен-

Рис. 1. Индекс цветопередачи



sample	v'	v''	Phv _{lm}	CRI	R9	R15
#16	0.2497	0.5227	1049.9	97.7	97.0	98.7
#17	0.2498	0.5227	1052.9	97.8	97.3	98.9
#18	0.2491	0.5225	1049.0	97.9	97.7	99.1
#19	0.2492	0.5222	1048.4	97.9	97.6	99.0
#20	0.2487	0.5224	1051.5	97.8	97.3	98.8



Рис. 2. Ян Адам Круйзенан «Дама с собачкой»

ки. Их обязательность наглядно иллюстрирует фламандская школа живописи с её палитрой из земельных пигментов. Классическим примером служит полотно Яна Адама Круземана «Дама с собачкой», освещение которого акцентирует внимание на красном платье в центре композиции и одновременно выгодно подчёркивает цвет кожи (рис. 2).

В истории с Рейксмюсеумом – одним из крупнейших в мире музеев, экспонирующим более 7500 работ от эпохи Возрождения до наших дней – результат был достигнут с помощью сложного спектрального инжиниринга, дающего высокие показатели частных индексов $R9$ (97) и $R15$ (98) при общем Ra 98 (рис. 3). В основу легла технология смешения люминофора – базового компонента СД, отвечающего за цветопередачу.

Люминофор представляет собой компонент на основе редкоземельных металлов, как правило, это иттрий-алюминиевый гранат, активированный европием. Большинство всех белых СД состоят из люминофорного – жёлтого, зелёного и/или красного – покрытия и СД чипа, излучающего синий свет с узким спектром в диапазоне 440–470 нм. Люминофоры поглощают часть излучения синего кристалла, переизлучая его в более широкой жёлто-зелёной части спектра. Свет, воспроизводимый люминофором, в сочетании с оставшимся синим излучением, проходящим через его слой, воспринимается человеческим глазом как белый (рис. 4).

Характеристики белого СД, в том числе его надёжность, зависят от выбора люминофорных материалов и метода, используемого для их интеграции в СД. Широкодоступные жёлтые люминофоры обычно обеспечивают хорошее широкополосное излучение в видимой области спектра от 500 до 700 нм, эффективное поглощение синего света от 420 до 480 нм, а также хорошую химическую и термическую стабильность. Однако в их спектре излучения отсутствует красный цвет, поэтому белые СД, содержащие лишь жёлтые люминофоры, часто характеризуются голубовато-белым оттенком и имеют цветовую температуру от 4000 до 6500 К. Отсутствие красного излучения в составе спектра – их основная проблематика, влияющая на степень цветопередачи, которая в результате оказывается низкой.



Рис. 3. Музей Рейксмюсеум

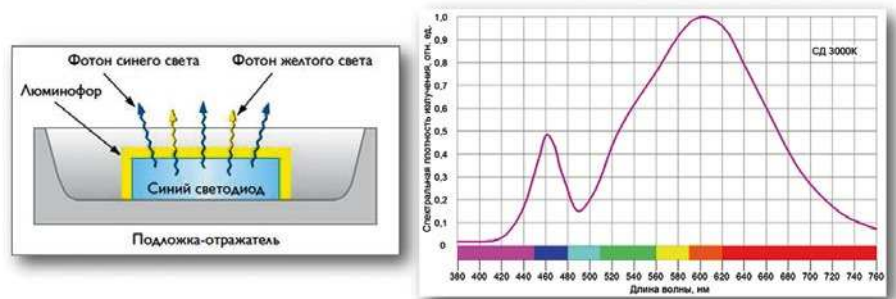


Рис. 4. Принцип действия люминофора в СД

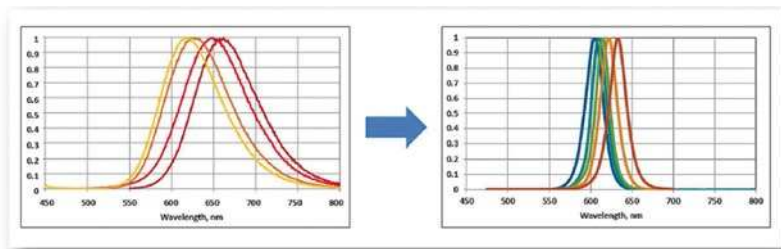


Рис. 5. Сужение полуширины волны излучения красного люминофора для максимального увеличения эффективности преобразования

Для производства СД с низкой цветовой температурой (1800–4000 К) необходимо использование красных люминофоров. Широкое применение в настоящий момент получили нитридные люминофоры, обладающие достаточной квантовой эффективностью – чувствительностью света, но при этом имеющие целый ряд существенных минусов. Так, тушение люминесценции для них начинается уже при температуре 95 °С, квантовая эффективность при этом значительно снижается, что приводит к так называемой деградации люминофора и смещению цветовой координат СД. Кроме того, нитридные люминофоры имеют большую полуширину волны излучения. Это снижает эффективность на низких цветовых температурах за счёт смещения квантового преобразования в более длинноволновую область спектра, нечувствительную

ни для человеческого глаза, ни для спектрофотометра. Таким образом, типичный СД с цветовой температурой 2700–3000 К и Ra 90 обладает более низкой эффективностью по сравнению с аналогичным СД 4000 К Ra 80. Стоимость же оказывается выше. Есть и ещё один фактор: при формировании спектра СД с 2700 К Ra 90 из-за высокого содержания нитридного люминофора существенный объём излучения приходится на инфракрасную часть спектра, что абсолютно неприемлемо для музейного освещения.

В поиске путей решения данных проблем, исследовательский центр Lumileds в 2012 году выходит на принципиально новый путь к работе с источниками света. Нитридные красные люминофоры начали замещать коллоидными квантовыми точками – полупроводниковыми наночастицами диаметром от 3 до 10 нм. Пре-

Рис. 6. Увеличение эффективности при зелёном люминофоре

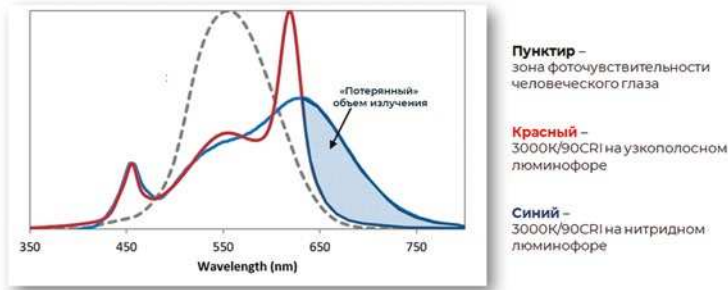
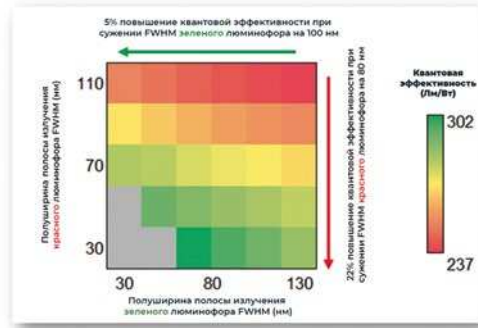


Рис. 7. Сравнение СД 3000 К Ra 90 на базе узкополосного красного и на базе классического нитридного люминофоров

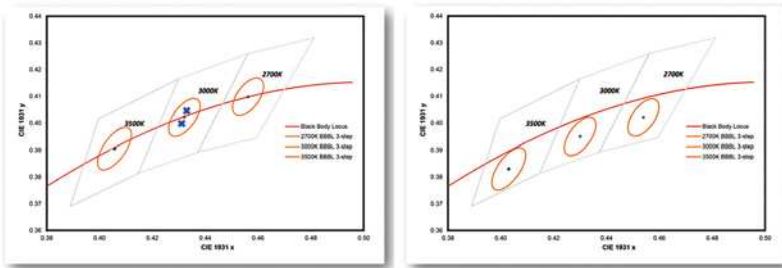


Рис. 8. Принцип биновки СД Lumileds



Рис. 9. Фрески Калязинского Троице-Макарьева монастыря

образование на базе квантовых точек позволило настраивать на любую длину волны с гораздо более узкой в сравнении с нитридными люминофорами полушириной. Массовое применение квантовых точек неразрывно связано с именем профессора Кена Шимидзу, автора многочисленных патентов

и идеолога повсеместного внедрения технологии квантовых точек в промышленное производство СД.

Ключевая особенность узкополосных люминофоров заключена в существенном сужении полуширины полосы спектра переизлучения и корректровке доминантной длины волны

излучения. При этом квантовая эффективность значительно возрастает. Максимальная величина её рассчитывается на основе световой эффективности излучения, содержащегося в спектре, и учитывает так называемый стоксов сдвиг – разницу длин волн максимумов спектров поглощения и флуоресценции. За счёт сужения полуширины волны излучения красного люминофора достигается максимальное увеличение эффективности преобразования (рис. 5). Так, при сужении на 80 нм со 110 нм, характерных для нитридного люминофора, до 30 нм – на коллоидных квантовых точках – она повышается на 22 %, то есть возрастает с 239 до 291 лм/Вт. Подобная история – повышение эффективности – прослеживается и с зелёным люминофором, правда не столь значительно, поскольку весь спектр его излучения в основном находится в видимой части (рис. 6).

Далее сравним кривую спектра для СД с цветовой температурой 3000 К и индексом цветопередачи Ra 90, созданного на базе узкополосного красного люминофора с аналогичным современным СД на классическом нитридном люминофоре (рис. 7). На графике виден объём излучения в дальней красной области, расходуемый впустую: оно не учитывается в общей эффективности СД, а в контексте экспозиционного освещения инфракрасное излучение оказывает пагубное воздействие на освещаемые объекты.

Также рассмотрим специфические особенности спектрального инжиниринга относительно кривой Планка. Кривая на диаграмме цветовых координат соответствует точкам координат абсолютно чёрного тела, нагреваемого до определённой температуры в градусах Кельвина. Расположение на кривой Планка является эталоном биновки (сортировки на группы) для СД белого цвета. Биновка же по цветовой температуре всегда будет иметь некоторое отклонение, выражаемое в шагах эллипса МакАдама, показывающего отклонение СД от стандартных цветовых значений. На сегодня стандартом для массового рынка является показатель в три шага, однако для экспозиционного освещения требуется гораздо более высокая точность и идентичность. Коварная особенность кривой Планка: координаты одного источника света, расположенные чуть выше кривой, а второго – чуть

ниже, визуально делают их восприятие зеленоватого или розоватого оттенков. Для того, чтобы избежать данного оптического эффекта, *Lumileds* внедрил специальный стандарт биновки, когда все СД в партии располагаются чуть ниже кривой Планка. Результатом стало обеспечение максимальной равномерности света на объекте (рис. 8).

Данные продукты уже успели зарекомендовать себя на достойном техническом уровне.

Одним из знаковых стал опыт спектрального инжиниринга для уникальной экспозиции фресок Калязинского Троице-Макарьева монастыря. Фрагменты фресок, написанных царскими живописцами в XV веке, дожившие до нашего времени, уцелевшие после затопления монастыря в процессе создания Угличского водохранилища в 1940 году, были освещены на базе маломощных прожекторов с цветовой температурой 2700 К и индексом *Ra* 97 (рис. 9).

В августе 2018 года состоялось торжественное открытие первого в России инновационного музея бумаги на территории Полотняно-Заводской бумажной мануфактуры, приуроченное к её 300-летию. Для нового «Бузеона» отреставрировали более тысячи квадратных метров исторического здания, он вобрал в себя десятки уникальных экспозиций: экспонаты собирались по всей стране – у производителей бумаги, в Питерском институте, на аукционах и в антикварных лавках. Освещение объекта выполнено с помощью источников света 3000 К *Ra* 90 для акцентирующего освещения и *Ra* 80 – для общего (рис. 10).

Совершенно новая технология применена в *Surround Art Gallery* – галерее, предлагающей посетителям оценить красоту окружающего мира, искусно переданную художниками в фотографиях и скульптуре. Авторы, ставшие широко известными благодаря своему незаурядному мастерству и оригинальному видению, такие как: Брэд Вилсон, Аарон Рид, Джек Стормс, Луис Альберто Киспе Апарисио – впервые представили своё творчество в *Surround Art Gallery*. При освещении коллекционных, эксклюзивно предоставленных галерее фоторабот, помимо источников света с улучшенной цветопередачей, используется технология кадрирования, ограничивающая световое пятно



Рис. 10. Освещение экспозиции в музее бумаги на территории Полотняно-Заводской бумажной мануфактуры



Рис. 11. Освещение экспозиции в *Surround Art Gallery*



Рис. 12. Освещение в выставочном пространстве *ILONA-K Artspase*



Рис. 13. Освещение экспозиции «Линия Рафаэля 1520–2020»

по контуру экспоната. Такой подход в освещении позволяет создать его особенный сценарий – контрастный и драматичный (рис. 11).

В выставочном пространстве *ILONA-K Artspase*, расположившемся в башне Меркурий Международного делового центра Москва-Сити,

реализован проект Илоны Кесаевой по популяризации российского искусства. Насыщенная цветом экспозиция работ Ольги и Олега Татаринцевых «Утопия в цифрах», рассказывающая об угрозах современной цивилизации, освещена источниками с цветовой температурой 4000 К *Ra* 97. Зада-

чей было безупречно передать все оттенки (рис. 12).

Жемчужиной коллекции экспозиционного освещения, несомненно, является знаковый проект «Линия Рафаэля 1520–2020». Выставка проходила в Государственном Эрмитаже в февралемарте 2020 года в залах Невской парадной анфилады Зимнего дворца. Её приурочили к 500-летию со дня смерти Рафаэля Санти (1483–1520), посвятив феномену влияния художника на европейское искусство с XVI века до наших дней. Экспозиция предлагает познакомиться с работами самого Рафаэля, а также творчеством его последователей. Это более трёхсот образцов живописи, графики, скульптуры и прикладного искусства из коллекций Эрмитажа и двенадцати собраний

России и Западной Европы, среди которых представлены как знаменитые шедевры, так и ранее неизвестные работы. Для освещения экспозиции применялись источники света с КЦТ 3000 К Ra 97 и осветительные приборы с диммированием, позволившие настроить оптимальный световой поток для каждого из полотен (рис. 13).

Заключение

Это лишь некоторые примеры применения новых продуктов и технологий освещения. От проекта к проекту появляются всё более сложные световые решения. На сегодня очевидно, что метод использования квантовых точек является самым перспективным для поисков повышения эффективно-

сти цветопередачи. Постоянно растущие ожидания со стороны учреждений искусства и наша возможность воплотить эти замыслы, открывают огромные горизонты для развития светотехнической отрасли в России.



Тришина Татьяна Владимировна.

Окончила Новосибирский государственный университет, получила диплом с отличием по специальности «Востоковедение, африканистика» в 2009 г. С 2012 г.

Управляющий партнер и Коммерческий директор ООО «Трион»

Генриху Сергеевичу Сарычеву – 90 лет

19 декабря 2022 г. исполнилось 90 лет доктору технических наук, действительному члену Академии электротехнических наук РФ Генриху Сергеевичу Сарычеву. Начав свою трудовую деятельность во Всесоюзном научно-исследовательском светотехническом институте в 1956 г. по окончании МЭИ, Г.С. Сарычев связал свою профессиональную и творческую жизнь с институтом, проработав в нём 60 лет.

Благодаря своим способностям учёного и организатора он за короткий срок прошёл трудовой путь от инженера до заместителя директора ВНИСИ по научной работе (1972–1988 гг.). Работая научным руководителем института, Генрих Сергеевич многое сделал для развития светотехнической науки и светотехнической промышленности. Со свойственной ему творческой энергией, увлечённо разрабатывал проекты развития отрасли, внедрял новые виды светотехнической продукции и прогрессивную систему управления качеством. Заметна роль Г.С. Сарычева в становлении и развитии светотехнической промышленности в Азербайджане, Армении, Молдавии и Таджикистане. Под руководством и при личном участии юбиляра было сформировано и получило развитие применение оптического излучения в технологических и биологических процессах. Совместно с учениками Г.С. Сарычевым разработаны теория, инженерные методы расчётов и организовано широкое внедрение



в научную и промышленную практику всех элементов облучательной техники, включая специальные разрядные лампы ВД и облучатели. Результаты этих работ были воплощены в растениеводстве, фотохимическом синтезе новых материалов, УФ отверждении лаковых покрытий и печатных красок в мебельной, радиоэлектронной и полиграфической промышленности, в множительной технике.

В 1992 г. вышла в свет монография Г.С. Сарычева «Облучательные светотехнические установки», не имевшая аналогов в отечественной и мировой литературе. В непростые для института 1990-е гг. коллектив лаборатории под руководством Генриха Сергеевича сохранился и в 2000-х гг. активно работал

в области разработки осветительных приборов со светодиодами, в том числе для специальных целей, занимался внедрением первых СД в осветительные установки столицы. Ряд городских пешеходных надземных переходов того периода были оснащены светильниками со светодиодами, разработанными в лаборатории Г.С. Сарычева.

За большие заслуги в научной деятельности в 2000 г. Генрих Сергеевич был избран действительным членом Академии электротехнических наук РФ. Творческий и научный труд Г.С. Сарычева характеризуют более 250 научных публикаций, авторских свидетельств и патентов на изобретения. Многие из них вошли в основные курсы подготовки инженеров-светотехников, в ряд учебников и монографий.

Многолетняя трудовая деятельность Г.С. Сарычева отмечена рядом наград, в т.ч. орденом «Знак почёта», медалями «За доблестный труд» и «В ознаменование 100-летия со дня рождения В.И. Ленина», знаком «Почётный машиностроитель, золотыми и серебряными медалями ВДНХ.

Мы с глубоким уважением благодарим юбиляра за многолетний труд и, поздравляя Генриха Сергеевича с Юбилеем, желаем юбиляру крепкого здоровья, успехов, удачи, творческой энергии и многих жизненных сил!

Редколлегия и редакция журнала, сотрудники ВНИСИ им. С.И. Вавилова, друзья, коллеги и ученики