

Реализация лабораторного образца настраиваемого многоцветного источника света¹

Н. КАРЛИ¹, А. СПЕРЛИНГ², Г. БИЗЯК^{1,3}

¹ Люблянский университет, Любляна, Словения

² Национальный физико-технический институт, Брауншвейг, Германия

³ E-mail: grega.bizjak@fe.uni-lj.si

Аннотация

В Национальном физико-техническом институте, Германия, был сконструирован и изготовлен настраиваемый многоцветный источник света (НМИС) (*tunable colour light source*). Он состоит из интегрирующей сферы с 24-мя СД, питающимися от управляемого компьютером источника питания. НМИС предназначен для формирования любого спектра видимого излучения и позволяет минимизировать количество источников света, используемых в лабораториях для проведения калибровки. Благодаря наличию встроенного спектрометра была реализована обратная связь, позволяющая улучшить характеристики НМИС и стабилизировать спектральное распределение генерируемого им излучения. Перед тем, как перейти к практической реализации НМИС, был проведён ряд исследований, позволяющих спрогнозировать его работу и возможности на примере нескольких выбранных спектров. В ходе практической реализации НМИС возникли некоторые трудности, в частности, связанные с оптимизацией спектра генерируемого излучения, зависимостью спектра СД от протекающего через СД тока и от температуры СД, нелинейной зависимостью светового потока СД от протекающего через него тока, а также с проблемами, возникающими при малых значениях весовых коэффициентов (*synthesis coefficient*).

Ключевые слова: СД, настраиваемый многоцветный источник света, спектральное распределение энергии излучения, *LabVIEW*.

1. Введение

Настраиваемые многоцветные источники света (НМИС) могут ис-

пользоваться в разных областях применения, исключая общее освещение и включая проведение калибровки в лабораториях. Фактически, НМИС представляют собой многоканальные источники света, в которых в настоящее время используются преимущественно комплекты светодиодов (СД), позволяющие воспроизводить различные спектральные распределения энергии излучения (СРЭИ). Некоторые настраиваемые источники света, включающие в себя разное количество СД и имеющие регулируемые спектры излучения, уже имеются в продаже и могут использоваться для освещения, при проведении химических исследований и в индустрии развлечений. Те из них, которые предназначены для общего освещения, часто способны генерировать белый свет с различной коррелированной цветовой температурой (КЦТ) [1] и состоят из от двух до четырёх разных СД. Многоканальные СД источники света используются также при проведении различных химических опытов и измерений. Они обычно содержат от четырёх до восьми разных монохроматических СД, у которых пиковые длины волн распределены в пределах видимой области спектра. Для освещения также используются многоканальные источники света (с узкими пучками лучей) с одноцветными и белыми СД. По сравнению с НМИС, предназначенными для использования в лабораториях и для калибровки фотометрических приборов, эти устройства часто содержат меньшее количество разных СД и не включают в себя спектрометры, позволяющие в реальном масштабе времени измерять спектр генерируемого излучения. Измерение генерируемого спектра и работа «с обратной связью» обеспечивают возможность регулировать и стабилизировать спектр излучения предназначенного для проведения калибровок НМИС, что име-

ет решающее значение для используемых для калибровки источников света. Идеальный калибровочный НМИС должен обладать способностью воспроизводить СРЭИ любого источника света для последующей калибровки фотометрического измерительного оборудования.

Важно значение имеет то обстоятельство, что калибровочный НМИС может генерировать излучение с различными СРЭИ и заданными фотометрическими и колориметрическими характеристиками, такими как яркость, КЦТ, координаты цветности (x , y) и индекс цветопередачи. Реализация СРЭИ различных иллюминантов при помощи одного-единственного источника света значительно облегчает и удешевляет калибровку оборудования применительно к различным СРЭИ. Помимо воспроизведения СРЭИ реальных источников света, калибровочный НМИС позволяет реализовывать иллюминанты, которые описаны только теоретически.

Калибровочный НМИС, основанный на использовании интегрирующей сферы с 24-мя входными отверстиями для СД, был разработан в Национальном физико-техническом институте, Германия. Изготовленный калибровочный НМИС предназначен, главным образом, для калибровки различных приборов и измерительного оборудования применительно к разным спектрам [2]. В статье описана программа, используемая для управления калибровочным НМИС, и проблемы, с которыми пришлось столкнуться в процессе разработки. Большая часть этих проблем связана с практическим применением разработанного метода оптимизации и характеристиками реальных СД, которые не являются линейными функциями времени и электрического тока. В статье также описана работа разработанного калибровочного НМИС.

2. Управление генерируемым спектром

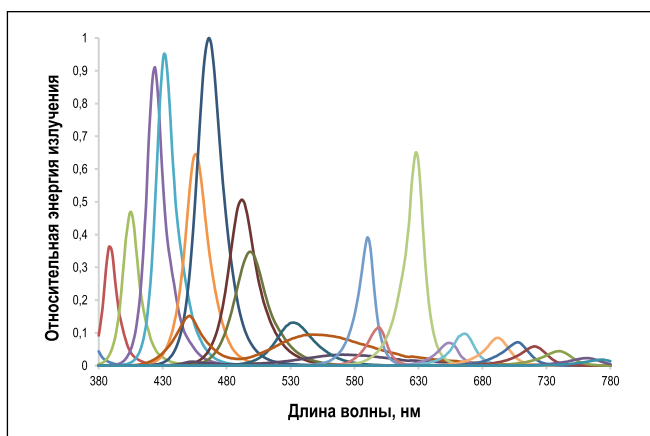
Задачей калибровочного НМИС с большим количеством СД является формирование любого заданного спектра. В основу калибровочного НМИС положена интегрирующая сфера с многочисленными входными отверстиями, предназначенными для СД и формирующими окружность вокруг выходного отверстия сферы (рис. 1).

¹ Перевод с англ. Е.И. Розовского

Рис. 1. Калибровочный НМИС. Слева: интегрирующая сфера с СД, установленными вокруг выходного отверстия. Справа: 24-канальный источник питания постоянного тока



Рис. 2. Спектры 22-х монохроматических и 2-х белых СД, использовавшихся в калибровочном НМИС, которые были измерены управляющей программой НМИС при номинальных значениях токов. Спектры нормированы применительно к максимуму СРЭИ наиболее мощного СД



Так как СД экранированы и освещают только заднюю поверхность сферы, то прямой свет СД не может выходить за пределы сферы. СД подключены к многоканальному источнику постоянного тока, причём каждый отдельный СД или каждая группа одинаковых СД подключены к одному из каналов. Источник постоянного тока подключён к управляющему персональному компьютеру через универсальную интерфейсную шину, позволяющую контролировать каждый из каналов в отдельности. Окружающее выходное отверстие интегральной сферы кольцо СД заканчивается входным устройством волоконно-оптического кабеля спектрометра. При этом используемый спектрометр подключён к управляющему персональному компьютеру через USB. Калибровочный НМИС управляется программой, написанной в среде LabVIEW™.

Так как калибровочный НМИС задуман как источник света с регулируемым спектром, то очень важно, чтобы ток каждого из СД устанавливался индивидуально. Внутренние коэффициенты использования (*internal output coefficient*) K_i , где i – номер конкрет-

ного СД, используются управляющей программой для описания индивидуальных настроек, исходя при этом из отношения светового потока СД при заданном значении тока к световому потоку этого же СД при номинальном значении тока. K_i могут изменяться в диапазоне от 0 до 1. Это позволяет описать вклад каждого из СД в полный световой поток калибровочного НМИС.

Алгоритм расчёта 24-х K_i , обеспечивающих формирование желательного синтезированного спектра, состоит из нескольких шагов. Целью программы является по возможности наиболее близкая подгонка генерируемого спектра, который измеряется самим НМИС, к желательному спектру. На первом шаге желательный спектр загружают в программу, в качестве «целевого», и программа старается сформировать наиболее приближённый к нему спектр при помощи измеренных заранее спектров СД, установленных в калибровочном НМИС. Так как полный световой поток калибровочного НМИС должен быть регулируемым, так чтобы обеспечить на выходе НМИС желательную яркость без изменения формы спектра, то желатель-

ный спектр нормируется. Управляющая программа обеспечивает возможность задать количество СД, которое должно быть использовано для синтеза желательного спектра, и их номинальные токи. На основе известного желательного спектра и измеренных заранее спектров отдельных СД, рассчитываются весовые коэффициенты, позволяющие по возможности наилучшим образом приблизить синтезированный спектр к желательному.

Чтобы обеспечить возможность создания источника света с любым желательным СРЭИ, калибровочный НМИС был снабжён 22-мя монохроматическими СД и двумя дополнительными белыми СД (тёпло-белого и холодно-белого света), спектры которых приведены на рис. 2. Эти СД были выбраны таким образом, чтобы их СРЭИ были равномерно распределены по всей видимой части спектра, от 380 до 780 нм. Такое распределение позволяет синтезировать непрерывный спектр генерируемого НМИС излучения.

СД тёпло-белого и холодно-белого света были включены в набор из-за отсутствия СД с пиковой длиной волны в области 550 нм. Пиковые длины волн СД и соответствующие им относительные амплитуды излучения приведены в таблице, где СД тёпло-белого и холодно-белого света присвоены, соответственно, номера 23 и 24. Относительные амплитуды излучения приведены в таблице для лучшего понимания различий в потоках излучения используемых СД. Спектры СД приведены к спектру СД с максимальным потоком излучения. Так как СД с пиковыми длинами волн в диапазоне от 650 до 780 нм имеют более слабые по сравнению с другими СД потоки излучения, то при синтезировании спектров с большими длинноволновыми составляющими (красная часть видимого спектра) полный световой поток калибровочного НМИС может оказаться очень низким.

3. Метод оптимизации

В данном случае, процесс оптимизации – это автоматизированный процесс управления выбранным набором СД в целях получения идеального для синтеза желательного спектра сочетания как самих СД, так и их токов питания. Совокупный (синтезированный) спектр 24-х СД оптимизи-

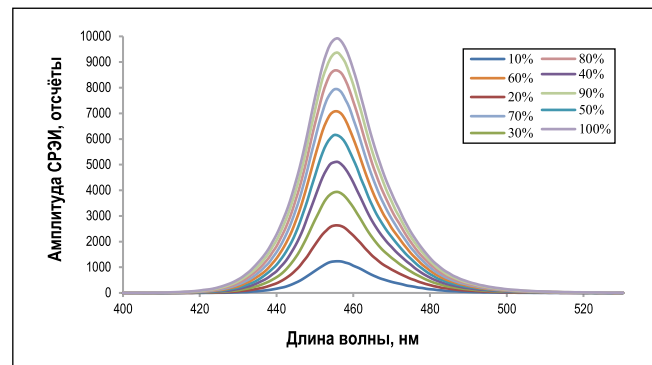
руется таким образом, чтобы спектр излучения, выходящего из выходного отверстия интегрирующей сферы, был по возможности наиболее близок к желательному. Критерий оптимизации основан на сумме рассчитываемых с интервалом 1 нм квадратов разностей спектральных характеристик калибровочного НМИС и желательного излучения (метод наименьших квадратов). Так называемая погрешность синтеза (*synthesis error*) S_{err} рассчитывается по формуле:

$$S_{err} = \int (b(\lambda) - a(\lambda))^2 d\lambda, \quad (1)$$

где $a(\lambda)$ – измеренный спектр калибровочного НМИС, а $b(\lambda)$ – желательный спектр. Кроме того, значение S_{err} позволяет судить о качестве подгонки спектра калибровочного НМИС к желательному СРЭИ.

Имеется большое количество публикаций, посвящённых исследованиям различных НМИС, в которых используются СД, и тому, как подогнать синтезированный спектр по возможности наиболее близко к желательному. Для удовлетворения упомянутого условия можно воспользоваться двумя подходами, а именно, методом последовательных приближений или методом аппроксимации. В [3] был предложен настраиваемый СД источник света, в котором оптимизация (подгонка) спектра осуществлялась при помощи простого, но медленного метода последовательных приближений, тогда как в [4] было предложено использовать метод отсечки (*pruning process*), в рамках которого оптимизация осуществлялась посредством удаления отдельных СД с целью получения их оптимального набора. Большинство описанных в статьях методов основаны на методе оптимизации Гаусса, который используется для решения нелинейных задач посредством минимизации суммы квадратов разностей значений функций. В рассматриваемом случае мы также воспользовались оптимизацией Гаусса для минимизации суммы квадратов разностей измеренных спектральных характеристик калибровочного НМИС и желательного излучения, так как это приводит к минимальному расхождению между этими двумя спектрами. Весовые коэффициенты K_i , которые рассчитываются в процессе оптимизации, в совокупности описывают синтезированный спектр, который наиболее близок

Рис. 3. Зависимость амплитуды СРЭИ СД от тока. В поле рисунка приведены значения токов, выраженные в % от номинального тока, при котором измерялось СРЭИ СД, имеющего постоянный цвет



к желательному. К сожалению, в базовом методе оптимизации Гаусса часть коэффициентов K_i могут оказаться отрицательными. А так как весовые коэффициенты K_i соответствуют световым потокам СД, которые не могут быть отрицательными, то синтезированный спектр излучения не может быть реализован с использованием отрицательных коэффициентов. Поэтому нужен метод, в котором помимо требования минимизации суммы квадратов разностей спектральных характеристик присутствовали бы и другие ограничения, а именно, то, что рассчитанные значения всех коэффициентов K_i должны быть положительными или равными нулю. В [5] приведён алгоритм неотрицательного метода наименьших квадратов (*NNLS*), который оказался оптимальным методом решения неотрицательной задачи с ограничениями в виде неравенств. В [6] был предложен быстрый алгоритм метода наименьших квадратов с ограничениями, исключающими использование отрицательных коэффициентов, в основу которого был положен стандартный алгоритм этого типа [5], тогда как в [7] сообщили о наличии в свободном доступе написанной на языке Си программы для решения разреженной задачи наименьших квадратов с ограничениями (*sparse constrained least-squares problem*).

Из-за того, что в данном случае приемлемыми являются только положительные (или равные нулю) решения задачи оптимизации Гаусса, то нами был опробован метод *NNLS*, в котором принимается во внимание условие неотрицательности весовых коэффициентов. Вначале мы опробовали не только *NNLS*, но и несколько других методов, воспользовавшись при этом измеренными спектрами СД, входящих в состав калибровочного НМИС. Так как для всех рассмотренных желательных спектров наилучшие резуль-

таты были получены в случае метода *NNLS*, то было решено реализовать его в среде *LabVIEW™*, использовавшейся для управления калибровочным НМИС.

Основанный на *NNLS* метод оптимизации описывается следующим образом:

- Минимизируйте $\|Ax - b\|$ при условии $x \geq 0$, где A – матрица размером $m \times n$, $m \geq n$, b – составляющая m вектора данных, а x – составляющая n вектора решения. Следует найти матрицу A , которая была бы решением уравнения $Ax \approx b$, где $x \geq 0$. Элементами матрицы A служат компоненты выбранных СРЭИ измеренных СД, причём n – это количество СД, а $m = 401$ – размерность выбранного вектора СРЭИ, измеренного с шагом 1 нм в диапазоне длин волн от 380 до 780 нм. Желательный спектр отображён вектором b , имеющим ту же размерность $m = 401$, что и у матрицы A .

В [5] был описан алгоритм, состоящий из 9-ти шагов. Процесс начинается с приравнивания всех составляющих вектора x к нулю, создания множества Z , содержащего все индексы, и пустого множества P . В основном цикле проводятся расчёт градиентного вектора w , используя при этом текущее значение x :

$$w = A^T (b - Ax). \quad (2)$$

Если Z представляет собой пустое множество или если все составляющие вектора w , индексы которых присутствуют в Z , имеют значения ≤ 0 , то решение найдено, и процесс завершается. В ином случае, на следующем шаге максимальную составляющую вектора w переносят из Z в P . Если хотя одна из составляющих имеет отрицательное значение, то в качестве пробного решения может быть принята только часть Z . Поэтому на сле-

Рис. 4. Пример СД, у которого амплитуда СРЭИ и пиковая длина волны зависят от тока. В поле рисунка приведены значения токов, выраженные в % от номинального тока, при котором измерялось СРЭИ. Штриховая красная линия демонстрирует смещение пиковой длины волны

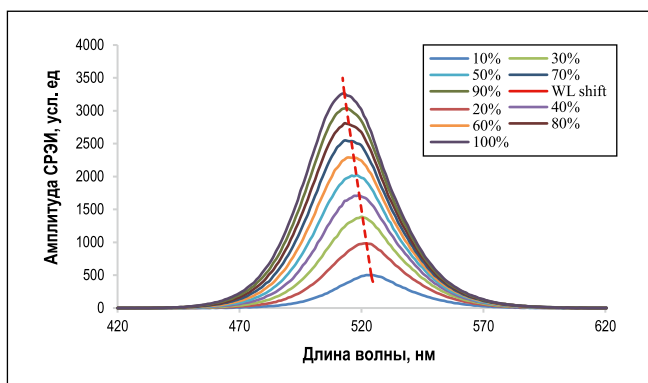
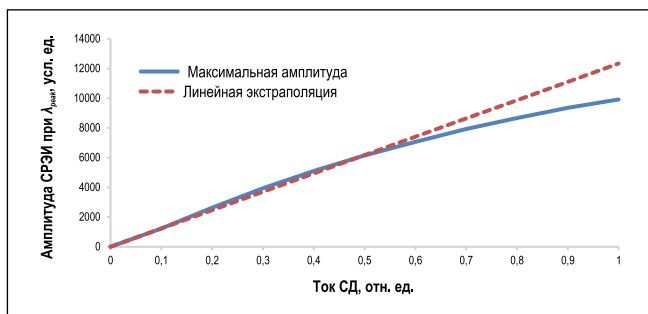


Рис. 5. Зависимость амплитуды СРЭИ от тока СД (синяя кривая). Пунктирная красная линия соответствует линейной экстраполяции начального участка, соответствующая токам, меньшим чем 10 % от номинального тока СД



дующем шаге требуется найти индекс q , такой, чтобы величина

$$\frac{x_q}{(x_q - z_q)} \quad (3)$$

оказалась наименьшей из всех подобных величин, полученных применительно к отрицательным элементам Z . При помощи соответствующего этому q значения α можно записать линейную сумму

$$x = x + \alpha(z - x). \quad (4)$$

На последнем шаге все индексы, соответствующие которым составляющие вектора x равны нулю, переносят из Z в P^2 . Это относится к x_q , но может охватывать и другие составляющие. По завершении процесса множество P описывает вектор весовых коэффициентов. Более подробно этот процесс описан в [8, 9].

4. Проблемы, связанные с практической реализацией НМИС

Основной вопрос, который возникает при практической реализации калибровочного НМИС в целом и программы оптимизации в частности, состоит

в том, как определяемую оптимизирующим коэффициентом K_i часть светового потока реализовать за счёт изменения питающего СД тока. В реализованном методе *NNLS* для расчёта K_i используются измеренные спектры СД. Каждый из K_i определяет требуемую часть светового потока соответствующего СД, измеренного при номинальном значении тока. К сожалению, световой поток, как правило, нелинейно зависит от протекающего через СД тока, так что K_i нельзя непосредственно использовать для расчёта соотношения между током СД и его номинальным значением. Для правильного определения тока СД следует принимать во внимание зависимость СРЭИ СД от тока. Пример такой зависимости приведён на рис. 3.

Изменение тока СД влияет также и на температуру p - n -перехода, что приводит к изменению СРЭИ СД. Это изменение СРЭИ выражается в зависимости от тока смещении пиковой длины волны и соответствующем изменении цвета генерируемого света. Однако, так как в случае калибровочного НМИС были зарегистрированы только очень небольшие смещения пиковых длин волн используемых СД, то в программу оптимизации не была включена подпрограмма, которая позволяла бы учесть подобные смещения. Вместо этого в программу *LabVIEWTM* была внесена дополнительная программа управления с обратной связью,

которая не только поддерживает стабильность генерируемого НМИС излучения, но и может устранить относительно небольшое влияние смещения пиковых длин волн СД на спектр этого излучения. В будущем, если используемые СД будут заменены на СД большей мощности, у которых смещения пиковых длин волн оказываются более существенными, то потребуются ввести программу, позволяющую учесть эти смещения. Пример смещения пиковой длины волны СД приведён на рис. 4.

Для того чтобы определить зависимость светового потока СД от тока, требуется провести несколько измерений СРЭИ СД. Управляющая программа калибровочного НМИС использует результаты 10-ти измерений каждого из СД, проведённых при разных токах, в диапазоне от 10 до 100 % от номинального (I_{max}) с шагом 10 %. Программа начинает с первого СД, ток которого устанавливается равным 10 % от I_{max} , а затем переходит ко второму СД, потом к третьему и т.д. После измерения последнего СД ток увеличивается на 10 %. Программа осуществляет 9 увеличений тока, тем самым по 10 раз измеряя СРЭИ каждого из СД.

Если использовать соответствующую пиковой длине волны амплитуду СРЭИ в качестве меры светового потока СД, то её зависимость от тока СД будет выглядеть так, как это показано на рис. 5. Для включения этой зависимости в управляющую программу калибровочного НМИС её следует описать математически. Было установлено, что зависимость светового потока от тока можно аппроксимировать кривой, описываемой полиномом. В большинстве случаев, измеренную зависимость можно с достаточной точностью аппроксимировать полиномом 3-го порядка.

При помощи такой, как показанная на рис. 5, измеренной зависимости светового потока от тока СД, на основе значений весовых коэффициентов K_i , которые были рассчитаны программой оптимизации применительно к желательному спектру, можно для каждого из СД определить значение тока, обеспечивающего требуемую величину светового потока этого СД. Однако перед внесением поправок в коэффициенты K_i , следует проверить, достаточно ли велики значения K_i , чтобы обеспечить получение оптимального светового потока кали-

² В [8] и, соответственно, в [9] была допущена опечатка: вместо «из Z в P » было «из P в Z ». — Прим. пер.

бровочного НМИС. Весовые коэффициенты K_i определяют световые потоки СД, причём равное 1 значение коэффициента соответствует световому потоку, генерируемому рассматриваемым СД при номинальном значении тока. Если коэффициент окажется слишком маленьким, то есть не превышающим величину, лежащую в диапазоне от 0,05 до 0,1, то СД обычно не включится из-за слишком малого прямого напряжения. Чтобы избежать получения таких малых значений коэффициентов и обеспечить оптимальный световой поток калибровочного НМИС, все СД нормируются применительно к тому СД, который имеет наибольший световой поток из всей совокупности световых потоков СД, обеспечивающих получение желательного СРЭИ. Ток СД с наибольшим весовым коэффициентом K_i устанавливается равным номинальному с соответствующим увеличением токов остальных СД. Одновременно соответствующим образом масштабируется и желательное СРЭИ, что позволяет сравнить желательный и синтезированный спектры. Если некоторые из весовых коэффициентов K_i окажутся меньше, чем требуется для включения соответствующих СД, то эти СД исключают из набора, используемого для получения рассматриваемого желательного спектра, и процесс оптимизации запускают по новой для получения нового наилучшего приближения без использования исключённых СД.

Из-за колебаний температуры и старения СД, генерируемое калибровочным НМИС излучение, а именно, СРЭИ НМИС в целом и входящих в него СД в частности, может изменяться во времени. Для уменьшения упомянутых эффектов, в управляющую программу был введён дополнительный алгоритм. Это простая итерационная программа оптимизации, которая старается минимизировать погрешность синтеза S_{err} за счёт небольших изменений токов всех СД. Благодаря этому алгоритму излучение калибровочного НМИС остаётся стабильным, причём оказалось, что в ряде случаев S_{err} становится даже чуть лучше (уменьшается). Причиной этого служит, главным образом, возможность осуществления обратной связи с использованием встроенного спектрометра, что является главным преимуществом описываемого

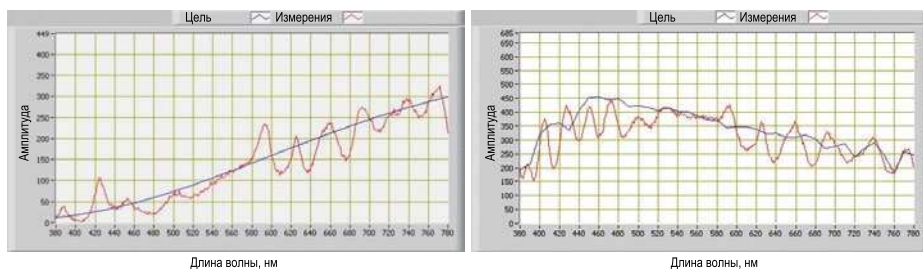


Рис. 6. Желательный спектр (синяя линия) и оптимизированный спектр выходящего излучения (красная линия) при воспроизведении иллюминантов А (слева) и D65 (справа)

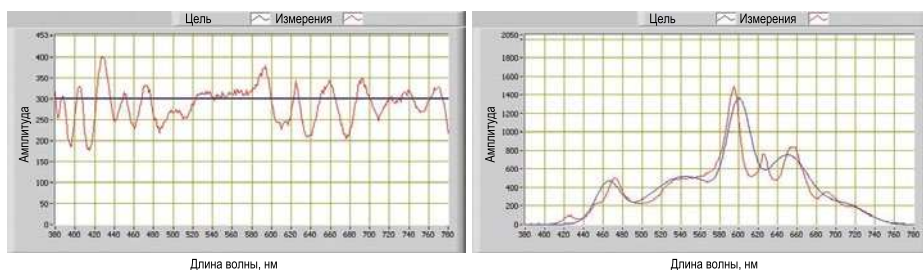


Рис. 7. Желательный спектр (синяя линия) и оптимизированный спектр выходящего излучения (красная линия) при воспроизведении спектров EE05 (слева) и ОСД (справа)

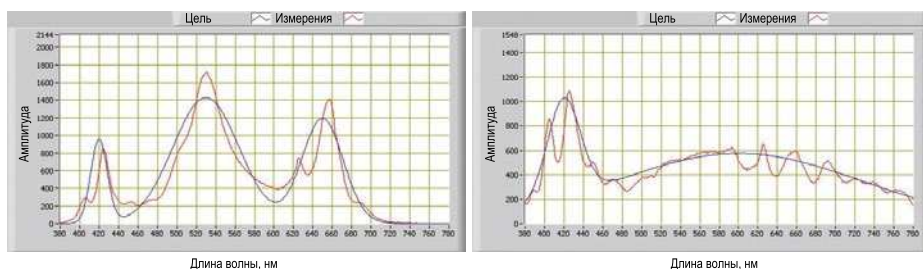


Рис. 8. Желательный спектр (синяя линия) и оптимизированный спектр выходящего излучения (красная линия) при воспроизведении спектров RGB СД (слева) и белого СД (справа)

го НМИС перед прочими имеющимися в продаже НМИС. На первом шаге этот дополнительный алгоритм обратной связи поочередно увеличивает токи СД на заданную величину (1–5 % от номинального тока). Размер приращения может быть задан в управляющей программе. После увеличения тока одного из СД, встроенный спектрометр измеряет полученный спектр, после чего повторно рассчитывается погрешность синтеза S_{err} . Если полученное значение S_{err} окажется более хорошим, то изменение тока этого СД сохраняется и впредь. Если же S_{err} ухудшится, то восстанавливается прежнее значение тока. Затем алгоритм обратной связи переходит к следующему СД. После проверки всех СД, алгоритм обратной связи снова начинает с первого СД, пытаясь улучшить S_{err} . Если на предыдущем этапе увеличение тока не привело к улучшению S_{err} , то на следующем этапе обратной связи токи СД будут уменьшены на заданную вели-

чину. Таким образом, небольшие изменения токов СД будут реализованы как в одну, так и в другую сторону, с тем, чтобы улучшить сходство между СРЭИ калибровочного НМИС и желательным спектром и сохранять стабильность калибровочного НМИС даже при небольших изменениях условий эксплуатации и характеристик отдельных СД.

Таким образом, управляющая программа разработанного калибровочного НМИС состоит из трёх подпрограмм. После запуска управляющей программы, происходит загрузка желательного спектра и запрашиваются номинальные значения токов установленных СД. Затем первая подпрограмма определяет зависимости световых потоков всех СД от тока. Она начинается с 10 % от номинальных токов установленных СД и с шагом 10 % доходит до уровня 100 %. После измерения всех СД, запускается алгоритм оптимизации второй подпрограммы и рассчитываются значения весовых

Пиковые длины волн и относительные мощности пиков излучения 24-х отобранных СД

СД	Пиковая длина волны, нм	Относительная мощность пика	СД	Пиковая длина волны, нм	Относительная мощность пика
1	380	0,042	13	599	0,116
2	388	0,361	14	628	0,648
3	405	0,463	15	654	0,069
4	424	0,900	16	666	0,099
5	431	0,943	17	692	0,086
6	456	0,645	18	707	0,071
7	466	1	19	721	0,058
8	492	0,500	20	739	0,044
9	498	0,341	21	762	0,023
10	513	0,213	22	774	0,018
11	531	0,131	23 (тёпло-белый)	572	0,0339
12	590	0,390	24 (холодно-белый)	451	0,1516

коэффициентов K_i , которые определяют собой требуемые токи СД и позволяют синтезировать желательный спектр. В конце процесса оптимизации рассчитанные весовые коэффициенты пропорционально увеличивают, так чтобы наибольший из них стал равен 100 %. Это делается для обеспечения наибольшей возможной для желательного спектра яркости выходного отверстия калибровочного НМИС. В конце этой подпрограммы весовые коэффициенты преобразуются в требуемые токи СД, для чего используются измеренные ранее зависимости светового потока от тока. И наконец, каналы питания калибровочного НМИС настраивают на соответствующие значения тока и включают. После прогрева, требующегося для стабилизации выходных характеристик СД, запускается третья подпрограмма с обратной связью, обеспечивающая непрерывное измерение генерируемого СРЭИ и старающаяся улучшить подгонку к желательному спектру посредством небольших изменений токов каждого отдельного СД, как это описано выше.

5. Результаты

Калибровочный НМИС предназначен для повторения любого СРЭИ в ограниченном диапазоне длин волн от 380 до 780 нм. Подгонка СРЭИ, генерируемого совокупностью большого количества СД, к желательному СРЭИ осуществляется при помощи метода оптимизации, который был описан в разделе 3. Из-за нелинейно-

сти характеристик СД, рассчитанные весовые коэффициенты должны быть скорректированы для преобразования их в требуемые токи СД. Для того чтобы это можно было сделать при помощи математических алгоритмов, следует провести многочисленные измерения СРЭИ СД, что увеличивает продолжительность процесса в целом. Для уменьшения продолжительности подготовительной стадии, все измеренные СРЭИ могут быть сохранены в памяти для последующего использования, т.е. для синтезирования других спектров. Получающееся в результате СРЭИ калибровочного НМИС может отличаться от заданного желательного СРЭИ как из-за особенностей процесса оптимизации, так и из-за ограниченности количества используемых в НМИС СД и их пиковых длин волн, а также из-за изменения их радиометрических характеристик под влиянием изменений температуры, старения и т.д.

При наличии программы и измеренных при разных значениях тока и сохранённых СРЭИ СД, калибровочный НМИС практически мгновенно формирует на выходе интегрирующей сферы оптимизированное СРЭИ. Благодаря обратной связи по спектру, в основе которой лежат осуществляемые при помощи спектрометра периодические измерения СРЭИ на выходе НМИС, сформированный спектр остаётся неизменным на всём протяжении работы НМИС. Основным достоинством использования встроенного спектрометра

и осуществляемых в реальном масштабе времени периодических измерений является возможность и вариативность замены одного или нескольких СД без проведения каких бы то ни было дополнительных расчётов или внесения изменений в написанную в *LabVIEWTM* управляющую программу. Весь процесс в целом, начиная с измерения СРЭИ установленным СД и заканчивая синтезированием и поддержанием выходного СРЭИ, осуществляется автоматически.

Для демонстрации качества синтезируемых спектров приведём несколько примеров реализации хорошо известных желательных спектров. На рис. 6–8 приведены результаты оптимизации и синтезирования, проведённых применительно к шести желательным спектрам, а именно, к спектру стандартного иллюминанта А МКО, стандартному спектру дневного света *D65* МКО, равноэнергетическому спектру (*EE 05*), типичному спектру излучения органического СД (ОСД), спектру *RGB* СД и спектру белого СД. В этих примерах использовался набор СД, описанный в разделе 2. Все спектры были измерены при помощи встроенного в НМИС спектрометра.

5. Заключение

Калибровочный НМИС разработан для обеспечения фотометрических лабораторий возможностью калибровки приборов и измерительного оборудования с использованием различных

спектров излучения. Помимо основной задачи, разработанный калибровочный НМИС может оказаться полезным при проведении исследований в области предназначенных для калибровки новых стандартных источников света МКО. Выбор метода *NNLS* для оптимизации генерируемого калибровочным НМИС спектра излучения оказался успешным и, несмотря на ограниченные количество и разнообразие типов использовавшихся СД, обеспечил малые расхождения между желательным спектром и спектром калибровочного НМИС. Благодаря наличию встроенного спектрорадиометра и использованию описанного в разделе 4 метода последовательных приближений, удалось дополнительно улучшить совпадение спектра НМИС с желательным спектром. Как следует из рис. 6–8, между этими спектрами всё ещё остаются заметные различия, которые в будущем можно будет устранить, используя большее количество СД в калибровочных НМИС следующего поколения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Zhong, P., He, G., Zhang, M.* Spectral optimization of the color temperature tunable white light-emitting diode (LED) cluster consisting of direct-emission blue and red LEDs and a diposphor conversion LED // *Optics Express.* – 2012. – Vol. 20, No. S5, – P. A684-A693.
2. *Bizjak, G., Lindemann, M., Sperling, A., Sauter, G.* Tunable LED colour source // *Proceedings of the CIE Expert Symposium on Spectral and Imaging Methods for Photometry and Radiometry, CIE, Vienna, 2010.*
3. *Fryc, I., Eppeldauer, G., Brown, S.W., Ohno, Y.* LED-based spectrally tunable source for radiometric, photometric and colorimetric applications // *Opt. Eng.* – 2005. – Vol. 44, No. 11.
4. *Wu, C.-C., Hu, N.-C., Fong, Y.-C., Hsiao, Y.-C., Hsiao, S.L.* Optimal pruning for selecting LEDs to synthesize tunable illumination spectra // *Light. Res. Technol.* – 2012 – Vol. 44, No. 4. – P. 484–497..
5. *Lawson, C. L., R.J. Hanson, R.J.* Solving least squares problems. Chapter 23. Linear Least squares with linear inequality constraints // *Society for industrial and applied mathematics, 1995.*
6. *Bro, R., Jong, S.D.* A fast non-negativity-constrained least squares algorithm // *Journal of Chemometrics.* 1997. – Vol. 11, No. 5. – P. 393–401.
7. *Cantarella, J., Piatek, M.* Tsnpls: A solver for large sparse least squares problems with non-negative variables // *Computing Research Repository CoRR, 2004.*
8. *Carli, N., Sperling, A., Bizjak, G.* Optimization methods for spectral synthesizing of a tune-

able colour light source // *Light & Engineering.* – 2018. – Vol. 26, No. 3. – P. 99–108.

9. *Карли Н, Сперлинг А., Бизяк Г.* Методы оптимизации синтезирования спектров настраиваемых многоцветных источников света // *Светотехника.* – 2018. – № 3. – С. 24–31.

10³. Routine «Solve nonnegative least-squares constrains problem – lsqnonneg», MATLAB – Maths Works Deutschland, Available: <http://www.mathworks.com/help/matlab/ref/lsqnonneg.html?requestedDomain=www.mathworks.com>. [Accessed 2.11.2015].

11³. *Luo, M.R., Xu, L., Wang, H.* An LED based spectrum design for surgical lighting // *Proc. of 28th CIE Session, 2015.*

³ Ссылка на эту работу в тексте статьи отсутствует. – Прим. пер.



Нина Карли (Nina Carli). Окончила Люблянский университет, после чего стажировалась в Национальном физико-техническом институте, Германия, и в лаборатории освещения

и фотометрии электротехнического факультета Люблянского университета



Армин Сперлинг (Armin Sperling), Ph.D. (1994 г.). Руководитель отделения фотометрии и спектрометрии Национального физико-технического института, Германия. Заместитель руководителя

отделения 2 МКО, председатель Немецкого национального комитета МКО и член экспертного совета комитета по стандартизации в области света Немецкого института стандартов

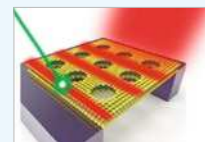


Грега Бизяк (Grega Bizjak), Ph.D. Профессор и руководитель лаборатории освещения и фотометрии электротехнического факультета Люблянского университета. Вице-президент

МКО, президент Словенского национального комитета МКО и представитель Словении в отделении 2 МКО. Область научных интересов: фотометрия, энергоэффективное внутреннее и наружное освещение, использование естественного света и использование СД для освещения

Создан самый тонкий световод – толщиной в три атома

Разработчики ряда оптических устройств стремятся делать их всё меньшими и меньшими. Их конечной целью является создание интегрированных фотонных кристаллов, размеры которых будут сопоставимы с размерами обычных кремниевых полупроводниковых кристаллов, что, в свою оче-



редь, должно привести к появлению вычислительных систем, обладающих высоким быстродействием, и устройств хранения информации, обеспечивающих высокую плотность записи.

Один из ключевых компонентов таких устройств – оптический волновод, световод, который играет ту же самую роль, что и токопроводящие дорожки или шины в обычной электронике. Но попытки миниатюризации этого компонента наталкиваются на ряд трудностей, связанных с ограничениями, накладываемыми законами физики.

Самые миниатюрные световоды, которые удавалось сделать до последнего времени, имеют толщину 200–300 нм. Однако исследователям из Калифорнийского университета в Сан-Диего удалось подобрать материал и изготовить из него работающий световод, состоящий из трёх атомарных слоёв, так что его толщина равна около 0,6 нм (т.е. более чем в 500 раз меньше, чем у световодов, используемых сейчас).

Ключевым моментом во всём этом деле стал материал из семейства переходных металлических дихалькогенидов – дисульфид вольфрама, одно из отличительных свойств которого – то, что даже в монослое этого материала при комнатной температуре формируются достаточно стабильные квазичастицы, состоящие из связанных электрона и электронной дырки, так называемые экситоны. В дополнение к этому, монослой дисульфида вольфрама способен проводить свет видимого диапазона, и этот материал стал первым в истории науки, при столь малой толщине обеспечивающим работу со светом видимого диапазона.

Учёным пока удалось изготовить лишь несколько образцов самых тонких световодов на сегодняшний день. Но после того, как будет разработана технология производства высококачественных плёнок дисульфида вольфрама в промышленных масштабах, световоды из этого материала быстро найдут практическое применение в коммерческих оптоэлектронных устройствах.

dailytechinfo.org/
28.08.2019