

**АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ЧЕЛОВЕКА
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СВЕТА С ВАРЬИРУЕМЫМИ
СПЕКТРАЛЬНО-ЦВЕТОВЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

**А.В. Аладов¹, Д.Н. Берлов², А.Л. Закгейм¹,
А.Е. Черняков¹, А.Э. Фотиади³, В.П. Валюхов³**

¹Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур РАН, Санкт-Петербург, Российская Федерация;

²Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, Санкт-Петербург, Российская Федерация;

³Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация

В статье рассматриваются основные схемотехнические и программные аспекты создания светодиодной, динамически управляемой системы высококачественного освещения в широком диапазоне цветовых температур $T_c = 1700 - 10\,000$ К в составе экспериментальной установки аппаратно-программного комплекса для воздействия на функциональное состояние человека. Приведены результаты исследований воздействия освещения с различной цветовой температурой на организм человека на основе изменений показателей электрической активности мозга, сердечной активности, артериального давления и других параметров. Обработка результатов измерений выявила степень влияния и характер воздействия света с разными цветовыми температурами на психофизиологическое и функциональное состояния человека.

Ключевые слова: светодиод, RGB-смешение, динамическое управление светом, световое воздействие, функциональное состояние

Ссылка при цитировании: Аладов А.В., Берлов Д.Н., Закгейм А.Л., Черняков А.Е., Фотиади А.Э., Валюхов В.П. Аппаратно-программный комплекс для определения функционального состояния человека при воздействии света с варьлируемыми спектрально-цветовыми характеристиками // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2019. Т. 12. № 3. С. 63–77. DOI: 10.18721/JPM.12305

**HARDWARE-SOFTWARE COMPLEX FOR CHARACTERISATION
OF A PERSON'S FUNCTIONAL STATUS ON EXPOSURE TO LIGHT
WITH THE VARIED SPECTRAL COLOR PARAMETERS**

**A.V. Aladov¹, D.N. Berlov², A.L. Zakgeim¹,
A.E. Chernyakov¹, A.E. Fotiadi³, V.P. Valyukhov³**

¹ Submicron Heterostructures for Microelectronics Research and Engineering Center of the RAS, St. Petersburg, Russian Federation;

² The Herzen State Pedagogical University of Russia, St. Petersburg, Russian Federation;

³ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation

The article deals with the main circuitry and software aspects of the creation a LED dynamically controlled system of high-quality lighting with the broad range of color temperatures

$T_c = 1700 - 10,000$ K as a part of experimental installation of the hardware-software complex for impact on a person's functional status. The findings of investigation on impacts of lighting with a different color temperature on a human body are given. These studies were based on changes in indicators of electrical activity of the brain, heart work, arterial blood pressure and other parameters. Processing of measurement data revealed efficiency and a nature of influence of light with different color temperatures on psychophysiological and functional status.

Keywords: LED, RGB-color mixing, dynamic light control, light exposure, functional status

Citation: Aladov A.V., Berlov D.N., Zakgeim A.L., Chernyakov A.E., Fotiadi A.E., Valyukhov V.P., Hardware-software complex for characterization of a person's functional status on exposure to light with the varied spectral color parameters, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 12 (3) (2019) 63–77. DOI: 10.18721/JPM.12305

Введение

Современные жители городов длительное время находятся в условиях искусственного освещения. Свет – один из факторов окружающей среды, постоянно сопровождающий человека, поэтому задача оптимизации режимов светового воздействия на его функциональное состояние с учетом психофизиологических особенностей, утомления, индивидуальных биоритмов представляется весьма актуальной. Для ее решения наиболее привлекательны приборы на основе принципа смешения цветов в светодиодных источниках света. Такие устройства на основе многокристалльных RGB-излучателей (RGB – аббревиатура от красного, зеленого и синего цветов), получившие название «интеллектуального света» (smart light) [1], обеспечивают самые разные возможности. Во-первых, они позволяют точно регулировать параметры освещения с учетом различных внешних условий, таких как время года, суточная динамика и т. п.; во-вторых, благодаря этому создаются условия оптимизации рода и режима профессиональной деятельности работника, его индивидуальных психофизиологических параметров, а также его функционального состояния.

Прогресс в развитии технологий источников освещения позволяет выбирать режим освещения с физиологически оптимальными характеристиками и для специфических задач, связанных с применением на производстве, в жилых и общественных помещениях. Такой режим освещения может значительно влиять на психическое и физиологическое состояния человека и корректировать его в благоприятном направлении (например, устранять расстройства или облегчать действие экстремальных психологических нагрузок). Такое световое воздействие может быть не только статическим, но и динамическим, если изменять параметры освещенности и цветовой тем-

пературы в зависимости от требуемых условий (например, времени суток, состояния группы людей или одного человека). Освещение с контролируемыми параметрами имеет преимущества перед традиционным для ряда профессиональных сфер применения (например, хирургия или архитектура).

Таким образом, контролируемое светодиодное освещение выступает как важный инструмент новых медико-биологических технологий лечения и модулирования психофизиологического состояния человека [2]. Известно, например, что определенные параметры светового воздействия могут существенно перестраивать электрическую активность головного мозга [3].

Изменения в психофизиологическом статусе человека в ответ на световое воздействие можно оценивать разными методами, в том числе электроэнцефалографией. Установлено, что показатели электроэнцефалограммы (ЭЭГ) изменяются в ответ как на фотостимуляцию цветным монохроматическим светом [4], так и на световое воздействие с различной цветовой температурой T_c [5] и зависят от используемых спектральных характеристик освещения. Но при этом был также обнаружен эффект индивидуальных нейрофизиологических реакций на одно и то же световое воздействие [5].

Необходимые характеристики режима освещения, который обеспечивает на практике оптимальный физиологический эффект, являются предметом дискуссий. Результаты исследований зачастую противоречивы. Частично это объясняется многообразием режимов освещения и отсутствием единых стандартов. На практике достижение оптимального режима требует выбора источника света, позволяющего быстро и точно менять параметры освещения, а также методик диагностики психофизиологического состояния человека, позволяющих определять, какой режим освещения

необходим в каждом конкретном случае.

Имеющиеся на практике источники не обеспечивают требуемого качества цветопередачи и плавного изменения цветовой температуры.

Именно отсутствие подобной инструментальной базы объясняет тот факт, что в литературе практически нет сведений о системных и комплексных исследованиях особенностей воздействия динамически управляемого («интеллектуального») света с цветовой температурой T_c , варьируемой в диапазоне 1 700 – 10 000 К, на функциональное состояние головного мозга человека.

Цель настоящей работы – создание аппаратно-программного комплекса, позволяющего определять психофизиологическое состояние человека. За основу выбран управляемый интеллектуальный источник излучения с оптической системой, создающей равномерное по яркости и цвету поле свечения.

Выбор цветových компонент излучателя

Первая проблема, возникающая при разработке мультикристалльных полихромных излучателей, – это выбор области синтезируемых цветов по диаграмме цветности XYZ МКО 1931, а вторая, применительно к белому излучению, – выбор диапазона цветových температур и достижимых значений индексов цветопередачи. Более детальное рассмотрение включает оценку дискретности воспроизведения цветов (иными словами, количество синтезируемых цветов) и обеспечение стабильности поддержания цветových характеристик при изменении яркости и внешних условий. Сложность последней задачи связана с тем, что для полупроводниковых светодиодов (СД) характерна сильная (обычно нелинейная) зависимость мощности и спектров излучения от тока питания и, соответственно, температуры $p-n$ -перехода. Дополнительным негативным фактором при рассмотрении вопросов стабильности цветových характеристик является разная температурная зависимость спектров излучения и эффективности излучателей различного цвета.

Поддержание стабильности координат цветности в широком динамическом диапазоне есть одно из главных условий работы управляемого источника света. Если сравнивать три варианта полноцветных СД с четырьмя излучающими кристаллами, а

именно – RGBA, RGBW_c и RGBW_n, где R, G, B, A – красные, зеленые, голубые и желтые излучающие кристаллы, а W_c и W_n – кристаллы с люминофорным покрытием как источники белого света холодного и нейтрального, соответственно с $T_c \approx 6500$ и ≈ 4000 К, то можно установить [6], что величина общего индекса цветопередачи R_a для системы RGBA меняется незначительно при переходе белого света от холодного ($T_c \approx 6500$ К) к теплему ($T_c \approx 2700$ К) и в среднем равна 80.

Для системы RGBW_c и RGBW_n значение R_a составляет 90 для белого света в области холодных и нейтральных тонов белого света температур и падает до 58 в области теплых тонов.

Таким образом, система RGBA обеспечивает более равномерное распределение R_a во всем диапазоне температур белого света, по сравнению с системами RGBW.

В последнее время [7] появились светодиоды серии OSRAM OSTAR Medical LEACWUWVS2W, содержащие по четыре излучающих кристалла: янтарного (617 нм), зеленого (505 нм), теплого белого с координатами цветности $x = 0,460$, $y = 0,410$ (по XYZ МКО 1931) и холодного белого с $x = 0,305$, $y = 0,325$ (по той же диаграмме) цветов свечения. Экспериментальные исследования спектров излучения источников на светодиодах данной серии, при варьировании спектральных долей мощности различных СД, позволили синтезировать белый свет с набором значений коррелированной цветовой температуры (КТЦ) (2700, 4000, 5000, 6500, 10 000 К), общего и частных индексов цветопередачи $R_1 - R_{14}$.

Было показано, что СД этой серии позволяют достичь более высоких значений R_a (около 90), по сравнению с системой RGBA, а также больших значений специальных ($R_1 - R_{14}$) индексов цветопередачи для разных цветových температур и получить гладкий спектр (рис. 1). Таким образом, данная светодиодная система более всего отвечает поставленным требованиям для синтеза белого света.

Динамически управляемый полупроводниковый источник света

В основе экспериментальной установки лежит модифицированный вариант разработанного ранее [8] мощного управляемого RGB-осветителя на светодиодах серии OSRAM OSTAR Medical LEACWUWVS2W.

Общая структурная схема варианта светильника показана на рис. 2.

Динамически управляемый полупроводниковый источник света включает в себя источник питания (PS) и систему охлаждения (CS); излучающую матрицу (LED-M), состоящую из четырехцветных светодиодов 1 – 4; оптическую систему; электронику обрaмления, в состав которой входят микроконтроллер управления (MC), драйверы токов накачки светодиодных источников (Ds), радиоканал обмена данными; управляющий компьютер (CC). В систему введены линии обратных связей по цветовой

температуре и соответствующее программное обеспечение управления драйверами питания.

Для достижения цели создания «интеллектуального» источника света как части аппаратно-программного комплекса, излучающий модуль изготовлен в виде отдельного блока, внешне подобного компьютерному монитору.

Корпус светильника выполнен методом литья из пластмассы, основная несущая деталь – плата алюминиевого радиатора с закрепленной на ней матрицей мощных многоцветных светодиодов, платами драйверов

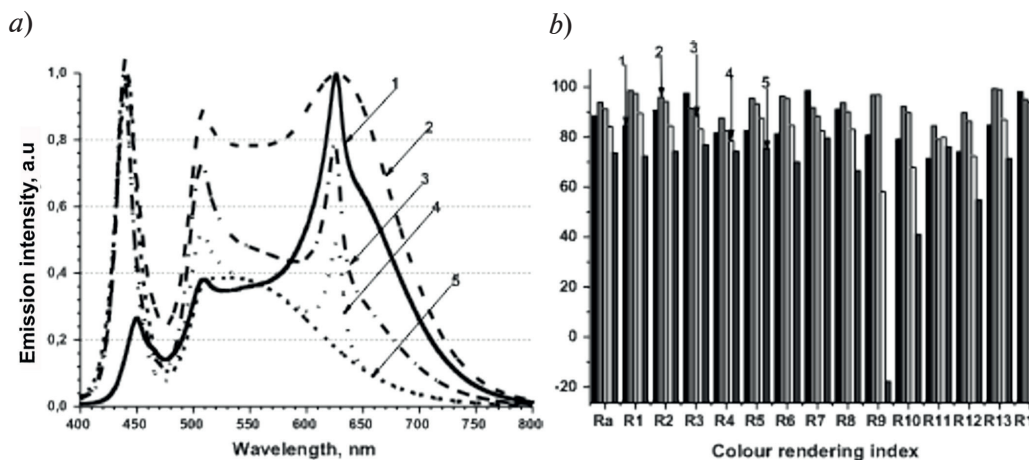


Рис. 1. Основные характеристики светодиодной системы серии OSRAM OSTAR Medical LEACWUWVS2W: *a* – спектры синтезированного белого света для различных T_c ; *b* – общий R_a и специальные ($R_1 - R_{14}$) индексы цветопередачи для различных значений T_c . Цветовые температуры T_c , К: 2700 (1), 4000 (2), 5000 (3), 6500 (4), 10 000 (5)

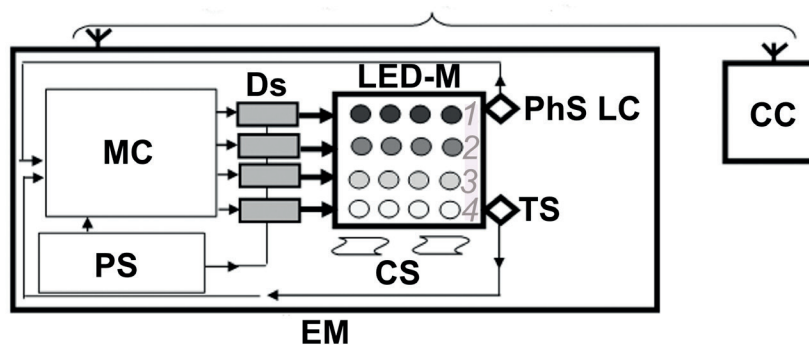


Рис. 2. Общая структурная схема динамически управляемого полупроводникового источника света (радиоканал управляется на частотах 2,4 ГГц, 868 МГц):

EM – излучающий модуль, PS – источник питания, MC – микроконтроллер, Ds – драйверы, EM – излучающий модуль, LED-M – светодиодная матрица, CS – система охлаждения, PhS LC – фотосенсор контроля света, TS – датчик температуры, CC – управляющий компьютер; светодиоды на длинах волн $\lambda = 617$ нм (1), 505 нм (2), теплый белый (3) холодный белый (4)

управления и вентиляторами принудительного охлаждения.

Оптическая система

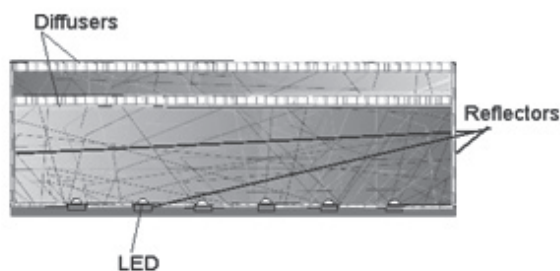
Для аппаратно-программного комплекса, предназначенного для определения психофизиологического состояния человека, разрабатывался мощный управляемый полупроводниковый источник света с большой площадью излучения. Оптическая система комплекса выполнена по оригинальной конструкции и необходима для создания равномерного по яркости и цвету поля свечения источника излучения [9].

Расчеты и оптимизация оптической схемы проводились в соответствии с теорией архитектуры оптимальных оптических систем. Аналогичный подход применялся также при использовании программы ZEMAX 13Release 2 SP1 Premium (64 бит, Radiant ZEMAX LLC, USA).

Отражатель представляет собой два прямоугольных короба, каждый со своим рассеивателем – экраном, одна из сторон которого имеет неоднородность, обеспечивающую заданный угол рассеяния (рис. 3, *a*). Разделение рассеивателя на первичный и вторичный позволяет достичь наилучшего соотношения между пропусканием системы и равномерностью освещенности экрана, а именно – два последовательно установленных рассеивателя обеспечивают высокую степень однородности по цвету и углу излучения. При этом один из рассеивателей создает, в первую очередь, однородность цветовых параметров, а установка следующего рассеивающего экрана обеспечивает в большей степени однородность по углу излучения.

Полихромные СД, расположенные в све-

a)



тильнике, создают свою совокупную картину по цвету и освещенности, в зависимости от расположения их цветовых компонент. При одинаковом пространственном расположении светодиодов совокупная картина, получаемая от множества светодиодов, даже при использовании рассеивателя, имеет большую степень неоднородности по цвету и полю свечения, что приводит к искажению цветовой гаммы подсветки. Для устранения этого недостатка, а также сведения к минимуму aberrаций, получаемых в результате использования рассеивателя, был проведен скорректированный расчет для обеспечения большей однородности цветности излучения. Было рассчитано оптимальное расположение светодиодов с чередованием их ориентации на плате, что необходимо для компенсации неравномерности углового спектра излучения (рис. 3, *b*).

В результате такого расположения светодиодных кристаллов выходное излучение становится практически однородным по цвету, а энергетическая неоднородность составляет не более 20 %.

Результаты расчетов и экспериментов (рис. 4) показали, что при использовании такой оптической системы неоднородность излучения по цвету составляет не более 7 %, а энергетическая неоднородность – не более 20 %.

Особенности схемотехники радиоканала в динамически управляемом полупроводниковом источнике света

Динамически управляемый полупроводниковый источник света, предназначенный для аппаратно-программного комплекса, определяющего и корректирующего функциональное состояние человека, по принципу своего действия является универ-

b)

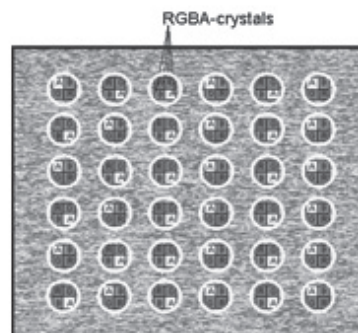


Рис. 3. Оптимизация оптической системы излучателя (схематическое изображение): *a* – вид системы с двумя рассеивателями и рефлектором, *b* – чередование расположения светодиодов на плате для создания однородности по цвету на выходе излучателя (результат расчета)

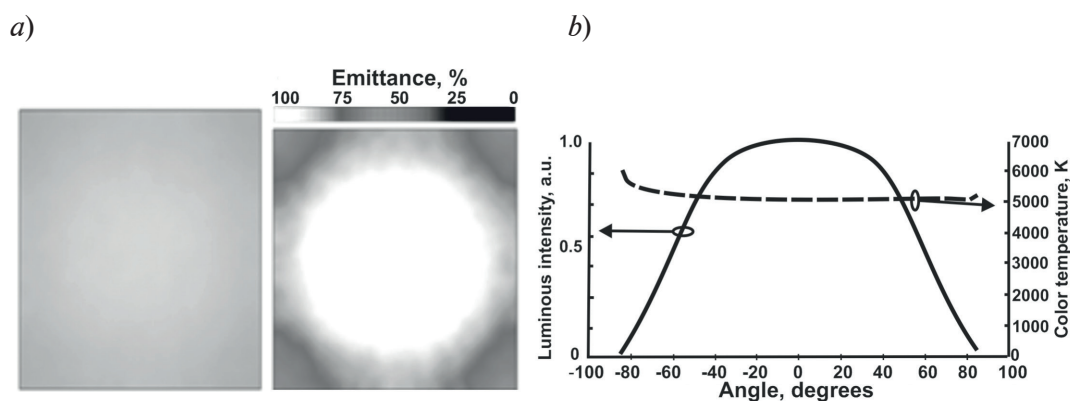


Рис. 4. Результаты расчета (а) и эксперимента (b) для характеристик распределения светового излучения: а – освещенности по цвету (слева) и светимости (справа) на выходе излучателя; б – силы света и цветовой температуры по углу

сальным. Поэтому его можно использовать для освещения самых разных учебных и производственных помещений (например, операционных, аудиторий, спортивных залов, стадионов, супермаркетов и т. п.), имеющих, как правило, большие размеры в трех измерениях: длина, ширина, высота. В этом случае необходимо учитывать влияние земли, отражающей падающие на нее радиоволны в направлении облучаемого объекта, и связанные с этим интерференционные эффекты (Ground reflection (2-ray) model). Для численного расчета дальности действия радиоканала обычно используется модель [10], учитывающая отражения от земли при распространении радиоволн в свободном пространстве. В работе [11] эта модель дополнена с учетом специфики управления светодиодными источниками освещения.

Авторами настоящей статьи разработана и реализована в LabVIEW программа моделирования персональной радиолинии управления источниками освещения с учетом особенностей их практического применения и технических характеристик оборудования, подлежащего инсталляции.

Выбор частотного диапазона и технологий системы управления имеет первостепенное значение, от которого зависят безопасность проведения операций (в хирургии), экологическая и психофизическая обстановка в операционной, энергоэффективность и обеспечение всех оптических и электрических характеристик светильника. При разработке динамически управляемого полупроводникового источника света были подробно рассмотрены основные технологии, используемые при построении устройств малого радиуса действия (SRD) –

беспроводных персональных радиосетей: ISM (Industrial, Scientific, Medical) с частотами 868 и 2400 МГц, Bluetooth (IEEE 802.15.1), Wi-Fi (IEEE 802.11), ZigBee (IEEE 802.15.7) [12 – 16].

Беспроводная персональная радиолиния связи представляет, помимо аппаратного воплощения, программное обеспечение, реализующее радиопrotocol. Для реализации стандартных стеков (Bluetooth, Wi-Fi, ZigBee) требуется расширенный объем флеш-памяти микроконтроллера для различных стеков протоколов от десятков килобайт для ZigBee до одного мегабайта для Wi-Fi (32 – 70 кбайт ZigBee 2,4 ГГц, 250 кбайт Bluetooth 2,4 ГГц, 1 Мбайт WLAN 2,4 ГГц). Кроме расширенного объема памяти, стандартные протоколы требуют повышенной мощности микроконтроллеров. Учитывая избыточность и сложность стандартных протоколов, разработчики беспроводных персональных радиосетей в субгигагерцовом диапазоне 868 МГц используют фирменные протоколы, так называемые проприетарные протоколы (неопубликованные и не доступные другим пользователям), которые могут оказаться менее затратными. Такой путь был использован при разработке обмена данными и взаимодействия между системами светодиодного светильника. Совместимость стандартных технологий с оборудованием других производителей здесь не имеет значения [17].

Из-за большого времени задержки при подключении хирургического светильника к сети Bluetooth (порядка 3 с), применение этой технологии в медицине оказывается проблематичным. Устройства Bluetooth в медицине применяются обычно для отладки

и настройки медицинского оборудования в дооперационный период. Данные моделирования и эксперимента показывают, что радиолиния технологии ISM 868 МГц имеет существенные преимущества по энергоэффективности (энергетический бюджет радиолинии LM (link margin)), дальности действия и экологическим факторам, по сравнению с радиолинией 2400 МГц по технологии ZigBee.

Энергетический бюджет радиолинии LM оценивается (в дБм) из выражения

$$LM = TX\ power - RX\ sensitivity + Ant\ gain - P_{pr},$$

где $TX\ power$ – мощность передатчика, $RX\ sensitivity$ – чувствительность приемника, $Ant\ gain$ – суммарное усиление передающей и приемной антенн, P_{pr} – полная принимаемая энергия.

Для уверенной работы радиолинии необходимо значение LM не менее 10 – 20 дБм. Выделение полосы частот 863 – 870 МГц (в ЕС частота составляет 865,564 МГц) для медицинских приборов с уровнем излучательной мощности, не превышающей –10 дБм, и суммарным усилением приемной и передающей антенн, не превышающим –10 дБм, позволяет получить энергетический бюджет LM-трансивера +22 дБм, даже при уровне излучательной мощности –20 дБм. Фирмой Semtech разработано и выпускается семейство трансиверов SX123X [18]. При скорости приема 1,2 кбит/с трансивер имеет чувствительность приемника –124 дБм, регулируемый уровень мощности лежит в диапазоне от –20 до +20 дБм. Одним из основных практических применений этой серии является использование этих трансиверов в пультах дистанционного управления. Энергетический бюджет LM-трансивера SX128 (в дБм) составит:

$$LM = -20 + 124 - 10 - 71,9 = + 22,1,$$

что обеспечит успешную передачу пакетов по радиолинии на расстояние, определяемое для идеальной модели Фрииса.

В этом отношении ISM-диапазон 868,7 МГц имеет необходимое преимущество (с экологической точки зрения) перед ISM-диапазоном 2,4 ГГц, стандартная электронная мощность передатчика в котором обычно составляет от 0 до 3 дБм. Это обстоятельство было использовано при разработке сетевого варианта светодиодного

светильника, поскольку работа обслуживающего персонала и пациентов должна проходить при минимальном облучении радиочастотным сигналом.

Программное управление аппаратно-программным комплексом

Управление световыми параметрами динамически управляемого полупроводникового источника света, предназначенного для аппаратно-программного комплекса, осуществляется с удаленного компьютера, в котором используется разработанное программное обеспечение.

При этом модуль управления источником интеллектуального света работает в диапазоне частот 2,4 МГц и предоставляет следующие возможности:

автономную работу;

изменение и контроль режимов работы пользователем посредством персонального компьютера (ПК);

управление светильником с мобильных устройств с помощью операционной системы Android.

Для обеспечения связи между светильниками и ПК используется беспроводное соединение Bluetooth. Интерфейсы разработаны под Windows и Android.

В работе модуля предусмотрено создание библиотеки спектров с возможностью их коррекции по индивидуальной настройке. Однако основной режим работы – автоматический, по заданной программе освещения. Для этого в окне программирования задаются алгоритмы освещения в зависимости от задач светового воздействия. Эти программы также можно корректировать по временным и световым параметрам.

Влияние светового воздействия на психофизиологическое состояние человека

Аппаратно-программный комплекс, предназначенный для определения психофизиологического состояния человека, включает в себя мощный управляемый интеллектуальный источник света с большой площадью излучения, с учетом фактора прямого свечения на испытуемого, и электроэнцефалограф «Телепат-104Д» (г. Санкт-Петербург). Регистрация ЭЭГ проводилась монополярным способом с использованием индифферентных электродов, расположенных на мочках ушей волонтера. Запись производилась в следующих отведениях: Fp1, Fp2, F3, F4, F7, F8, C3,

S4, P3, P4, T3, T4, T5, T6, O1, O2 (по системе «10-20»). Частота оцифровки сигналов составляла 250 Гц, полоса пропускания по высоким частотам – 35 Гц, постоянная времени – 0,3 с.

Целью исследования было изучение особенностей влияния динамически управляемого света от полупроводникового источника с КЦТ, варьируемой в диапазоне от 1700 до 10000 К, на функциональное состояние головного мозга человека. Световой поток источника света в зависимости от КЦТ составлял 1000 – 4000 лм.

Сначала электроэнцефалограмма у испытуемых регистрировалась в условиях затемненного помещения в течение двух минут, тем самым создавались условия исходного контрольного состояния. Затем испытуемые подвергались двухминутным световым воздействиям (последовательно, с двухминутными перерывами), включающим пять различных цветовых температур, программно предустановленных в светодиодном источнике света.

Полученные данные обрабатывались с использованием спектрального анализа, который осуществлялся с помощью программы «WinEEG Версия 1.3». Определялись значения спектральной мощности стандартных диапазонов ЭЭГ (дельта-, тета-, альфа-, и бета-ритмов), эпоха анализа при расчете спектров составляла 4 с. Усредненные спектральные показатели вычислялись для всех записанных фрагментов ЭЭГ в фоновых условиях и при световом воздействии.

Анализ результатов исследования показал наличие двух характерных типов изменений в ЭЭГ: в динамике альфа- и тета-ритмов при описанных световых воздействиях на волонтеров. В отдельных случаях наблюдались добавочные изменения спектральных характеристик дельта-ритма, но какого-либо значимого влияния используемого светового воздействия на мощность бета-ритма обнаружено не было. Таким образом, можно было считать, что повышение или понижение спектральной мощности альфа- и тета-ритмов ЭЭГ является наиболее информативным в оценке воздействия света.

При воздействии света с величиной КТЦ 10 000 К, изменения в значениях спектральной мощности альфа- и тета-ритмов ЭЭГ превышали 25 % от исходного уровня. Таким образом, отмечается существенное влияние этого режима освещения на

функциональное состояние головного мозга человека; такое световое воздействие можно считать физиологически активным.

При воздействии света с величиной КТЦ 3800 К изменение спектральной мощности в тета-диапазоне не превышало 25%. Однако значения спектральной мощности альфа-ритма в правых средневисочной, задневисочной и затылочной областях мозга понизились более чем на 25%. Следовательно, световое воздействие с цветовой температурой 3800 К также можно признать физиологически активным. При этом выявлен эффект латерализации с более выраженным влиянием на правое полушарие.

При воздействии света с величиной КТЦ 1700 К в большинстве регистрируемых областей мозга (за исключением отведений P4 и T6) наблюдалось повышение спектральной мощности альфа- и тета-ритмов более чем на 25%. Таким образом, световое воздействие с КТЦ 1700 К также является физиологически активным.

При воздействии света с величиной КТЦ 7000 К, изменения в спектральной мощности альфа- и тета-ритмов не превышали 25% ни в одном из отведений; в таком случае данное световое воздействие можно охарактеризовать как физиологически нейтральное.

Исходя из полученных данных, можно сделать заключение, что при световом воздействии с цветовой температурой в диапазоне 1700 – 10 000 К показатели спектральной мощности тета- и альфа-ритмов электроэнцефалограммы отражают результирующий эффект такого воздействия и его величину. Пороговое значение в 25% относительно исходного уровня спектральной мощности можно использовать для разграничения физиологически нейтрального и физиологически активного уровней эффектов светового воздействия. В этом случае снижение спектральной мощности альфа- и тета-ритмов более чем на 25% от фоновых значений может быть связано с повышением уровня активации коры головного мозга (активирующий эффект светового воздействия), а увеличение спектральной мощности альфа-ритма более чем на 25% и тета-ритма на 25% может отражать понижение уровня активации коры головного мозга (релаксирующий эффект светового воздействия).

Соотношение же альфа- и бета-ритмов ЭЭГ можно рассматривать как отражение



баланса возбуждения и торможения в коре человеческого мозга [19 – 21]; при этом альфа-ритм преимущественно связан с процессами торможения. Поэтому усиление его мощности в спектре ЭЭГ можно трактовать как релаксационный эффект вследствие усиления процессов торможения в центральной нервной системе, а ослабление мощности альфа-ритма в спектре ЭЭГ – как тонизирующий эффект в результате ослабления тормозных процессов [22 – 24].

Интерпретация роли сдвигов тета-ритма может быть более разнонаправленной, поскольку отмечено его участие в таких различных явлениях, как утомление, эмоциональная обработка, процессы внимания, памяти, обработка ошибок [25, 26]. Однако в данном случае существенной представляется однонаправленность сдвигов альфа- и тета-ритмов: изменения в мощности альфа-ритма не сопровождаются компенсаторными изменениями медленных ритмов. Подобные сочетанные сдвиги альфа- и тета-ритмов могут свидетельствовать в пользу изменения уровня бодрствования, тонизирующим или релаксационным эффектами в коре головного мозга человека [27, 28].

Заключение

Впервые разработан аппаратно-программный комплекс для определения психофизиологического состояния человека, включающий мощный управляемый интеллектуальный источник света, оптическую систему для создания равномерного по яркости и цвету поля свечения источника излучения. Использование этого комплекса как инструмента воздействия белого света с варьируемой цветовой температурой показало, что белый свет с наиболее близкими к дневному свету значениями цветовой температуры (3800, 4800 и 7000 К) не оказывает существенного влияния на спектральные характеристики основных ритмов ЭЭГ. Такое световое воздействие можно охарактеризовать как физиологически нейтральное, а светодиодные источники освещения с подобными значениями цветовых температур можно рекомендовать для продолжительного искусственного освещения бытовых и общественных помещений общего назначения, когда не предъявляются специальные требования к параметрам освещения. Напротив, белый свет с цветовыми температурами 1700 и 10 000 К является физиоло-

гически активным, его использование приводит к существенному изменению тета- и альфа-ритмов электроэнцефалограммы. В наибольшей степени это выражено для света с цветовой температурой 10 000 К.

Обобщая эти результаты, следует отметить, что физиологически нейтральным является белый свет, насыщенный излучением среднего участка спектра, тогда как более теплые и более холодные тона освещения, насыщенные излучением крайних участков видимого спектра, являются физиологически активными. Поскольку такое освещение влияет на параметры ЭЭГ, его можно использовать для коррекции психологических и функциональных физиологических состояний человека.

Выделены два основных типа светового воздействия: активирующий и релаксирующий, при этом характер эффекта индивидуален и может различаться для разных людей даже при использовании идентичного режима освещения. Это определяет необходимость индивидуального подбора режимов освещения для направленного изменения функционального состояния человека, с учетом характера его реакции и исходного функционального состояния. Сам тип реагирования, по-видимому, можно определить по характеру ЭЭГ-ответа на стандартизированное светодиодное освещение с определенной цветовой температурой, а величина этих изменений во время регистрации электроэнцефалограммы может служить маркером изменений функционального состояния человека.

На основании разработанных методик появляется возможность индивидуального подбора режима освещения для направленного изменения функционального состояния человека, что подтверждается испытаниями в составе АПК в ООО «Центр авиакосмической медицины» (г. Москва) [29] и в ФГУ «Государственный научно-исследовательский испытательный институт военной медицины Министерства обороны РФ» (г. Москва) [30].

Совместно с медицинскими исследовательскими учреждениями, а именно – Центром авиакосмической медицины (г. Москва), Государственным медицинским университетом им. И.П. Павлова (г. Санкт-Петербург), Национальным медицинским исследовательским центром психиатрии и неврологии им. В.М. Бехтерева (г. Санкт-Петербург), – комплекс

использовался в качестве инструментальной базы при проведении медико-биологических исследований [31 – 33].

Измерения световых параметров выполнены в центре коллективного пользования (ЦКП) «Элементная база радиофотоники и нанoeлектроники: технология, диагностика, метрология».

Исследования выполнены при частичной поддержке Соглашения о субсидии с Минобрнауки России (№ соглашения ЭБ 075-02-2018-929, внутренний номер соглашения 14.604.21.0187, уникальный идентификатор проекта RFMEFI60417X0187).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schubert, E.F., Kim J.K. Solid-state light sources getting smart // Science. 2005. Vol. 308. No. 5726. Pp. 1274–1278.
2. Katsuura T., Jin X., Baba Y., Shimomura Y., Iwanaga K. Effects of color temperature of illumination on physiological functions // J. Physiol. Anthropol. Appl. Human Sci. 2005. Vol. 24. No. 4. Pp. 321–325.
3. Зенков Л.Р. Клиническая электроэнцефалография (с элементами эпилептологии). М.: Медпресс-информ, 2004. 368 с.
4. Гуменюк В., Батова Н., Мельникова Т., Глазачёв О., Голубева Н., Климина Н., Хюбнер П. Системный анализ корректирующего действия цветомузыки // Вестник РАМН. 1998. № 2. С. 18–25.
5. Корсакова Е.А., Слезин В.Б., Шульц Е.В., Аладов А.В., Закгейм А.Л., Мизеров М.Н. Воздействие белого света с варьируемой цветовой температурой на электроэнцефалограмму человека // Вестник новых медицинских технологий. 2012. Т. 19. № 4. С. 30–33.
6. Аладов А.В., Бирючиский С.Б., Дубина М.В., Закгейм А.Л., Мизеров М.Н. Цветодинамически управляемый операционный светильник с полноцветным светодиодом // Светотехника. 2012. № 2. С. 13–18.
7. https://html.alldatasheet.com/html-pdf/1023757/O_S_R_A_M/_L_E_A_C_W_U_W_V_S_2_W/_1_7_8/_1/_L_E_A_C_W_U_W_V_S_2_W.html
8. Аладов А.В., Васильева Е.Д., Закгейм А.Л., Иткинсон Г.В., Лундин В.В., Мизеров М.Н., Устинов В.М., Цацульников А.Ф. О современных мощных светодиодах и их светотехническом применении // Светотехника. 2010. № 3. С. 8–16.
9. Аладов А.В., Бирючинский С.Б., Закгейм А.Л., Мизеров М.Н. Осветительное устройство на основе многокристалльных полихромных светодиодов. Пат. № 99589, Российская Федерация. МПК F21S 2/00.; заявитель и патентообладатель НТЦ микроэлектроники РАН. № 2010123719/07, заявл. 03.06.2010; опубл. 20.11.2010. Бюлл. № 32. 7 с., с илл.
10. Kvaksrud T.I. Range measurements in an open field environment // Design Note DN018. Texas Instruments, SWRA 169A, 1–14. Режим доступа: <https://www.ti.com/lit/an/swra169a/swra169a.pdf>.
11. Aladov A.V., Valyukhov V.P., Kuptsov V.D., Demin S.V., Valyukhova A.V. Special features of radio control link for energy efficient LED light sources // St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 2017. Vol. 10. No. 2. Pp. 16–27.
12. Aladov A.V., Valyukhov V.P., Kuptsov V.D., Zakgeim A.L., Mizerov M.N., Demin S.V., Valyukhova A.V. Wireless networks of energy efficient dynamically controlled LED sources // St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 2017. Vol. 10. No. 2. Pp. 28–37.
13. Аладов А.В., Валюхов В.П., Закгейм А.Л., Черняков А.Е., Цацульников А.Ф. Динамически управляемые светодиодные источники света для новых технологий освещения // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2014. № 4 (206). С. 38–47.
14. Аладов А.В., Валюхов В.П., Демин С.В., Закгейм А.Л., Черняков А.Е., Цацульников А.Ф. Беспроводные сети управляемых энергоэффективных светодиодных источников освещения // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2015. № 1 (213). С. 50–60.
15. Аладов А.В., Аладов В.Н., Валюхов В.П., Закгейм А.Л., Цацульников А.Ф. Светоэкология и новые технологии освещения // Архитектура и строительные науки. 2014. Вып. 1, 2 (18, 19). С. 2–5.
16. Аладов А.В., Бирючинский С.Б., Валюхов В.П., Закгейм А.Л., Тальнишних Н.А., Черняков А.Е. Динамически управляемая система освещения светодиодами с широким диапазоном цветовых температур (2800 – 10 000 К) и высоким качеством цветопередачи ($R_A > 90$) // Светотехника. 2016. № 6. С. 19–25.

17. **Пушкарев О.** Использование диапазонов 433 и 868 МГц в системах промышленной телеметрии // *Электронные компоненты*. 2012. № 2. С. 42–48.
18. SX1238 – Fully integrated transceiver with +27 dBm Tx power. Datasheet, rev.2 2014 y. Режим доступа: <http://www.semtech.com/wireless-rf/rf-transceivers/sx1238> //
19. **Павлова Л.П.** Доминанты деятельного мозга человека. Системный психофизиологический подход к анализу ЭЭГ. СПб.: Информ-навигатор, 2017. 432 с.
20. **Abdou A.M., Higashiguchi S., Horie K., Kim M., Hatta H., Yokogoshi H.** Relaxation and immunity enhancement effects of γ -aminobutyric acid (GABA) administration in humans // *Biofactors*. 2006. Vol. 26. No. 3. Pp. 201–208.
21. **Klimesch W.** Alpha-band oscillations, attention, and controlled access to stored information // *Trends in Cognitive Sciences*. 2012. Vol. 16. No. 12. Pp. 606–617.
22. **Кирой В.Н., Ермаков П.Н.** Электроэнцефалограмма и функциональные состояния человека. Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского ун-та, 1998. 264 с.
23. **Базанова О.М.** Современная интерпретация альфа-активности электроэнцефалограммы // *Успехи физиологических наук*. 2009. Т. 40. № 3. С. 32–53.
24. **Bazanova O.M., Vernon D.** Interpreting EEG alpha activity // *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*. 2014. Vol. 44. No. 1. Pp. 94–110.
25. **Aftanas L.I., Golocheikine S.A.** Human anterior and frontal midline theta and lower alpha reflect emotionally positive state and internalized attention: high-resolution EEG investigation of meditation // *Neuroscience Letters*. 2001. Vol. 310. No. 1. Pp. 57–60.
26. **van Driel J., Ridderinkhof K.R., Cohen M.X.** Not all errors are alike: theta and alpha EEG dynamics relate to differences in error-processing dynamics // *Journal of Neuroscience*. 2012. Vol. 32. No. 47. Pp. 16795–16806.
27. **Cajochen C., Brunner D.P., Krauchi K., Graw P., Wirz-Justice A.** Power density in theta/alpha frequencies of the waking EEG progressively increases during sustained wakefulness // *Sleep*. 1995. Vol. 18. No. 10. Pp. 890–894.
28. **Lagopoulos J., Xu J., Rasmussen I., Vik A., Malhi G.S., Eliassen C.F., Arntsen I.E., Sæther J.G., Hollup S., Holen A., Davanger S., Ellingsen O.** Increased theta and alpha EEG activity during nondirective meditation // *The Journal of Alternative and Complementary Medicine*. 2009. Vol. 15. No. 11. Pp. 1187–1192.
29. **Аладов А.В., Закгейм А.Л., Клишин Г.Ю., Костромин В.Н., Мизеров М.Н., Потапов М.Г., Стелинговский К.В.** Разработка аппаратно-программного комплекса для определения и коррекции психофизиологического и функционального состояния человека-оператора методом аудиовизуального воздействия с применением динамически управляемого полупроводникового источника света // Итоговая конференция по результатам выполнения мероприятий за 2010 год в рамках приоритетного направления «Живые системы» ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 годы». Сб. тез. 25–27 ноября 2010 г., Москва. С. 141.
30. **Аладов А.В., Корсакова Е.А., Слезин В.Б., Шульц Е.В., Закгейм А.Л., Мизеров М.Н.** Динамика альфа-ритма ЭЭГ человека при воздействии белого света с различной цветовой температурой // *Научные труды III съезда физиологов СНГ*. Под ред. А.И. Григорьева и др. г. Ялта, Украина. 1–6 октября 2011. Москва, Ялта: Медицина – Здоровье, 2011. С. 105.
31. **Слезин В.Б., Корсакова Е.А., Мизеров М.Н., Закгейм А.Л., Аладов А.В., Мошко М.В.** Способ оказания активирующего воздействия на функциональное состояние человека световым излучением от светодиодного источника. Пат. № 2517367. Российская Федерация. МПК А61N 5/06, А61В 5/0476; заявитель и патентообладатель – авторы патента. № 2012133348/14, заявл. 27.07.2012; опубл. 27.05.2014. Бюлл. № 15.
32. **Слезин В.Б., Корсакова Е.А., Мизеров М.Н., Закгейм А.Л., Аладов А.В., Мошко М.В.** Способ оценки воздействия на функциональное состояние головного мозга человека светового излучения. Пат. № 2515150. Российская Федерация. МПК А61В 5/0476, А61N 5/06; заявитель и патентообладатель – авторы патента. № 2012133343/14, заявл. 27.07.2012; опубл. 10.05.2014. Бюлл. № 13.
33. **Слезин В.Б., Корсакова Е.А., Мизеров М.Н., Закгейм А.Л., Аладов А.В., Мошко М.В.** Способ оказания релаксирующего воздействия на функциональное состояние человека световым излучением от светодиодного источника. Пат. № 2514727. Российская Федерация. МПК А61N 5/06, А61В 5/0476; заявитель и патентообладатель – авторы патента. № 20121333435/14, заявл. 27.07.2012; опубл. 10.02.2014 Бюлл. № 4.

Статья поступила в редакцию 22.05.2019, принята к публикации 08.07.2019.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

АЛАДОВ Андрей Вальменович – старший научный сотрудник Научно-технологического центра микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

194021, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26.
aaladov@mail.ioffe.ru

БЕРЛОВ Дмитрий Николаевич – старший преподаватель кафедры анатомии и физиологии человека и животных Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

191186, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, наб. реки Мойки, 48
dberlov@yandex.ru

ЗАКГЕЙМ Александр Львович – кандидат технических наук, заведующий сектором Научно-технологического центра микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

194021, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26.
zakgeim@mail.ioffe.ru

ЧЕРНЯКОВ Антон Евгеньевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Научно-технологического центра микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

194021, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26.
chernyakov.anton@yandex.ru

ФОТИАДИ Александр Эпаминондович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры физической электроники Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
fotiadi@rphf.spbstu.ru

ВАЛЮХОВ Владимир Петрович – доктор технических наук, профессор Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
Valyukhov@yandex.ru

REFERENCES

1. Schubert, E.F., Kim J.K., Solid-state light sources getting smart, Science. 308 (572) (2005) 1274–1278.

2. Katsuura T., Jin X., Baba Y., et al., Effects of color temperature of illumination on physiological functions, J. Physiol. Anthropol. Appl. Human Sci. 24 (4) (2005) 321–325.

3. Zenkov L.R., Klinicheskaya elektroentsefalografiya (s elementami epileptologii) [Kinetic electroencephalography (with epileptological elements)], Medpress-Inform, Moscow, 2004.

4. Gumenyuk V., Batova N., Melnikova T., et al., Sistemnyy analiz korriruyushchego deystviya

tsvetomuzyki [System analysis of corrective function of color music], Annals of the Russian Academy of Medical Sciences. (2) (1998) 18–25.

5. Korsakova E.A., Slezin V.B., Shults E.V., et al., The effects of white light with variable color temperature on human encephalogram, Vestnik Novykh Meditsinskikh Tekhnologiy. 19(4) (2012) 30–33.

6. Aladov A.V., Biryuchiskiy S.B., Dubina M.V., et al., Tsvetodinamicheski upravlyayemyy operatsionnyy svetilnik s polnotsvetnym svetiododom [Color-dynamically controlled operating lamp with a full-color LED], Svetotekhnika. (2) (2012) 13–18.

7. <https://html.alldatasheet.com/html-pdf/1023757/OSRAM/LEACWUWVS2W/178/1/LEACWUWVS2W.html>.
8. **Aladov A.V., Vasilyeva E.D., Zakgeym A.L., et al.**, O sovremennykh moshchnykh svetodiodakh i ikh svetotekhnicheskom primenenii [On modern powerful LEDs and their lighting engineering application], *Light and Engineering*. (3) (2010) 8–16.
9. **Aladov A.V., Biryuchinskiy S.B., Zakgeym A.L., Mizerov M.N.**, Osvetitelnoye ustroystvo na osnove mnogokristalnykh polikhromnykh svetodiodov [A lighting unit based on multichip polychromatic LEDs], Pat. No.99589, Russian Federation, MPK F21S 2/00.; Submicron Heterostructures for Microelectronics Research and Engineering Center of the RAS is a declarant and patentee. No.2010123719/07, declar. 03.06.2010; publ. 20.11.2010, Bull. No. 32.
10. **Kvaksrud T.I.**, Range measurements in an open field environment, Design Note DN018, Texas Instruments, SWRA 169A, 1–14. <https://www.ti.com/lit/an/swra169a/swra169a.pdf>.
11. **Aladov A.V., Valyukhov V.P., Kuptsov V.D., et al.**, Special features of radio control link for energy efficient LED light, *St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics*. 10 (2) (2017) 16–27.
12. **Aladov A.V., Valyukhov V.P., Kuptsov V.D., et al.**, Wireless networks of energy efficient dynamically controlled LED sources, *St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics*. 10 (2) (2017) 28–36.
13. **Aladov A.V., Valyukhov V.P., Zakgeym A.L., et al.**, Type LED dynamically controlled light sources for novel lighting technology, *St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics*. (4 (206)) (2014) 38–47.
14. **Aladov A.V., Valyukhov V.P., Demin S.V., et al.**, The wireless network of controlled energy effective LED lighting sources, *St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics*. (1 (213)) (2015) 50–60.
15. **Aladov A.V., Aladov V.N., Valyukhov V.P., et al.**, Svetoekologiya i novyye tekhnologii osveshcheniya [Light ergonomics and new lighting technologies], *Arkhitektura i Stroitelnyye Nauki*. (1, 2 (18, 19)) (2014). 2–5.
16. **Aladov A.V., Biryuchinskiy S.B., Valyukhov V.P., et al.**, Dinamicheski upravlyayemaya sistema osveshcheniya svetodiodami s shirokim diapazonom tsvetovykh temperatur (2800 – 10 000 K) i vysokim kachestvom tsvetoperedachi ($R_A > 90$) [A dynamically-controlled lighting system with (2800 – 10 000 K) LEDs providing a high-quality color transfer], *Light and Engineering*. (6) (2016) 19–25.
17. **Pushkarev O.**, Ispolzovaniye diapazonov 433 i 868 MGts v sistemakh promyshlennoy telemekhniki [The use of 433 and 868 MHz ranges in the industrial telemetric systems], *Electronic Components*. (2) (2012) 42–48.
18. SX1238 – Fully integrated transceiver with +27 dBm Tx power. Datasheet, rev.2 2014 y. <http://www.semtech.com/wireless-rf/rf-transceivers/sx1238//>.
19. **Pavlova L.P.**, Dominanty deyatelnogo mozga cheloveka. Sistemnyy psikhofiziologicheskiy podkhod k analizu EEG [Dominants of an active human cerebrum. Systematic psychophysiological approach to an analysis of EEG], *Inform-Navigator*, St. Petersburg, 2017.
20. **Abdou A.M., Higashiguchi S., Horie K., et al.**, Relaxation and immunity enhancement effects of γ -aminobutyric acid (GABA) administration in humans, *Biofactors*. 26 (3) (2006) 201–208.
21. **Klimesch W.**, Alpha-band oscillations, attention, and controlled access to stored information, *Trends in Cognitive Sciences*. 16 (12) (2012) 606–617.
22. **Kiroy V.N., Ermakov P.N.**, Elektroentsefalogramma i funktsionalnyye sostoyaniya cheloveka [Electroencephalogram and a human functional status], Rostov Institute Publishing, Rostov-on-Don, 1998.
23. **Bazanova O.M.**, Sovremennaya interpretatsiya alfa-aktivnosti elektroentsefalogrammy [Modern interpretation of alpha-activity from electroencephalogram], *Uspekhi Fiziologicheskikh Nauk*. 40 (3) (2009) 32–53.
24. **Bazanova O.M., Vernon D.**, Interpreting EEG alpha activity, *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*. 44 (1) (2014) 94–110.
25. **Aftanas L.I., Golocheikine S.A.**, Human anterior and frontal midline theta and lower alpha reflect emotionally positive state and internalized attention: high-resolution EEG investigation of meditation, *Neuroscience Letters*. 310 (1) (2001) 57–60.
26. **van Driel J., Ridderinkhof K.R., Cohen M.X.**, Not all errors are alike: theta and alpha EEG dynamics relate to differences in error-processing dynamics, *Journal of Neuroscience*. 32 (47) (2012) 16795–16806.
27. **Cajochen C., Brunner D.P., Krauchi K., et al.**, Power density in theta/alpha frequencies of the waking EEG progressively increases during sustained wakefulness, *Sleep*. 18 (10) (1995) 890–894.
28. **Lagopoulos J., Xu J., Rasmussen I., et al.**, Increased theta and alpha EEG activity

during nondirective meditation, *The Journal of Alternative and Complementary Medicine*. 15 (11) (2009) 1187–1192.

29. **Aladov A.V., Zakgeym A.L., Klishin G.Yu., et al.**, Razrabotka apparatno-programmnogo kompleksa dlya opredeleniya i korrektsii psikhofiziologicheskogo i funktsionalnogo sostoyaniya cheloveka-operatora metodom audiovizualnogo vozdeystviya s primeneniym dinamicheskii upravlyayemogo poluprovodnikovogo istochnika sveta [Hardware-software design for characterization and correction of a person-operator's functional status using technique of audiovisual impact with dynamically-controlled semiconductor light source], Summarizing conference devoted to the progress in implementation of the measures for the year 2010 in the context of the preferred direction 'Living Systems' for Federal Target Program "Research and Design in the Preferred Directions of Development of the Science and Technology Complex of Russia for 2007–2012", Collection of abstracts, November 25–27, 2010, Moscow, P. 141.

30. **Aladov A.V., Korsakova E.A., Slezin V.B., et al.**, Dinamika alfa-ritma EEG cheloveka pri vozdeystvii belogo sveta s razlichnoy tsvetovoy temperaturoy [Alpha-rhythm dynamics of a human EEG on exposure by white light with various color temperature], *Scientific Transactions of the 3D Congress for Physiologists of CIS*, Ed. by A.I. Grigoryeva et al., Yalta, Ukraine, October 1–6, 2011, "Meditsina – Zdorovye", Moscow, Yalta,

2011, P. 105.

31. **Slezin V.B., Korsakova E.A., Mizerov M.N., et al.**, Sposob okazaniya aktiviruyushchego vozdeystviya na funktsionalnoye sostoyaniye cheloveka svetovym izlucheniym ot svetodiodnogo istochnika [Method of activation influence of LED light emission on a human functional status], Pat. No. 2517367, Russian Federation, MPK A61N 5/06, A61B 5/0476; The patent authors are declarants and patentees, No. 2012133348/14, declar. 27.07.2012; publ. 27.05.2014 Bull. No. 15.

32. **Slezin V.B., Korsakova E.A., Mizerov M.N., et al.**, Sposob otsenki vozdeystviya na funktsionalnoye sostoyaniye golovnogo mozga cheloveka svetovogo izlucheniya [The light impact on the functional status of a human brain: an assessment method], Pat. No. 2515150, Russian Federation, MPK A61B 5/0476, The patent authors are declarants and patentees, No. 2012133343/14, declar. 27.07.2012; publ. 10.05.2014, Bull. No. 13.

33. **Slezin V.B., Korsakova E.A., Mizerov M.N., et al.**, Sposob okazaniya relaksiruyushchego vozdeystviya na funktsionalnoye sostoyaniye cheloveka svetovym izlucheniym ot svetodiodnogo istochnika [Method of relaxation influence of LED light emission on a human functional status], Pat. № 2514727, Russian Federation, MPK A61N 5/06, A61B 5/0476; The patent authors are declarants and patentees, No. 20121333435/14, declar. 27.07.2012; publ. 10.02.2014, Bull. No. 4.

Received 22.05.2019, accepted 08.07.2019.

THE AUTHORS

ALADOV Andrey V.

Submicron Heterostructures for Microelectronics, Research & Engineering Center, RAS
26 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
aaladov@mail.ioffe.ru

BERLOV Dmitriy N.

The Herzen State Pedagogical University of Russia
48 Moika Emb., St. Petersburg, 191186, Russian Federation

ZAKGEIM Alexader L.

Submicron Heterostructures for Microelectronics Research and Engineering Center of the RAS
26 Politekhnicheskaya St., St. Petersburg, 194021, Russian Federation
zakgeim@mail.ioffe.ru

CHERNYAKOV Anton E.

Submicron Heterostructures for Microelectronics Research and Engineering Center of the RAS
26 Politekhnicheskaya St., St. Petersburg, 194021, Russian Federation
chernyakov.anton@yandex.ru

FOTIADI Alexander E.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation

fotiadi@rphf.spbstu.ru

VALYUKHOV Vladimir P.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation

Valyukhov@yandex.ru