

# ЛАЗЕРНЫЕ И ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ

УДК 621.385.12: 621.385.64: 621.385.8

## СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ЦВЕТОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕЗЭЛЕКТРОДНЫХ СВЧ-ЛАМП

Ю. П. МАЧЕХИН, Т. И. ФРОЛОВА, Ю. Л. СТАРЧЕВСКИЙ, Ю. А. ГРИЩЕНКО

В настоящей статье проведен анализ спектральных характеристик безэлектродных СВЧ-ламп и факторов, влияющих на них. Исследования компонентного состава газовой смеси в колбе позволяют получить заданный цвет излучения безэлектродных СВЧ-разрядных ламп. Для реализации поставленной задачи предлагается использовать в качестве активного элемента ламп с СВЧ-накачкой многокомпонентную смесь, каждый элемент которой имеет максимум свечения на определенной длине волны оптического диапазона.

Analyzing spectral characteristics of electrodeless microwave tubes and factors affecting them is done in the paper. Studies of the component composition of the gas mixture in an envelope allow to obtain the given colour of radiation of electrodeless microwave discharge tubes. A multi-component mixture, each element of which has maximum glow on a definite wave length of optical range, is proposed to be used in microwave-pumped tubes as an active element for solving the problem set.

### ВВЕДЕНИЕ

Исследования возможностей использования электромагнитных колебаний высоких и сверхвысоких частот (ВЧ и СВЧ) для возбуждения светоизлучающего разряда, проводившиеся учеными в течение более ста лет, привели к созданию в последнем десятилетии XX века безэлектродных источников света, и теперь открывается новый этап в развитии светотехники, связанный с внедрением долговечных и высокоэффективных индукционных и микроволновых ламп.

Общепринято считать, что разработка высокоэффективных источников видимого света возможна только на основе использования атомных и молекулярных спектров излучения определенных элементов или их соединений. Благодаря своим уникальным характеристикам безэлектродные СВЧ-лампы могут стать эффективной заменой существующим источникам промышленных и общественных помещений, зданий и т.д. К основным достоинствам СВЧ-ламп можно отнести:

- повышенную светоотдачу (130÷170 лм/Вт);
- спектр оптического излучения такой лампы является сплошным и близок к солнечному, но является более экологичным, так как обладает меньшей интенсивностью в области УФ- и ИК-излучения;
- большую долговечность (около 55 тыс. часов);
- возможность регулировки силы света с помощью изменения уровня мощности СВЧ-накачки.

Следует заметить, что спектральные характеристики безэлектродного источника света существенно зависят как от температуры оболочки колбы, так и качественного содержания газовой среды. Одно из преимуществ СВЧ накачиваемых ламп заключается в том, что взаимодействие СВЧ

поля с буферным газом позволяет управлять выходным спектром за счет использования различных добавок газовых смесей. Благодаря этому возможно использование ламп в медицинских областях (для очистки и стерилизации жидких и газообразных сред), в сельскохозяйственных целях (в теплицах), а также для подсветки архитектурных элементов зданий, памятников и других дизайнерских проектов.

### 1. АНАЛИЗ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕЗЭЛЕКТРОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА

Излучение любого источника видимого света редко бывает монохроматичным, т.е. представленным излучением только одной определенной длины волны, оно имеет довольно сложный спектральный состав. Поэтому все источники света характеризуются спектральным распределением энергии излучения (рис. 1). Для выражения этой характеристики используется относительное спектральное распределение энергии  $S(\lambda)$ , определяемая как зависимость интенсивности излучения от длины волны:

$$\Phi(\lambda)\Delta\lambda = S(\lambda)\Delta\lambda. \quad (1)$$

Учитывая тот факт, что окружающие нас объекты не имеют определенного цвета, а имеют некоторую зависимость коэффициента отражения от длины волны падающего излучения, цвет предмета очень зависит от источника освещения. Искусственные источники света, как правило, сравнивают с излучением солнца в полдень, как эталоном белого света.

На основе молекулярного излучения серы можно получить высокоэффективный источник видимого света (КПД ~20 %), спектр которого

очень близок к солнечному спектру, а также к спектральной характеристике человеческого глаза, что положительно влияет на восприятие человеком цвета и общую световую чувствительность глаза (рис. 1). Спектр излучения таких ламп лежит преимущественно в видимой области с цветовой температурой от 4000 К до 8000 К.

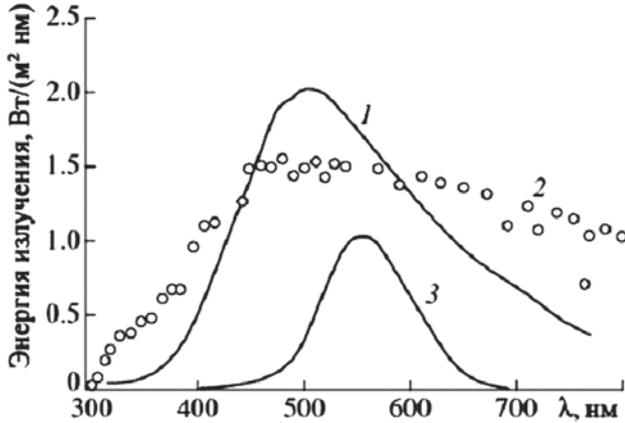


Рис. 1. Спектральные характеристики источников света: 1 – серная лампа; 2 – солнечный спектр; 3 – спектральная чувствительность глаза

При графическом построении зависимости количеств основных цветов в спектре излучения источника света от длины волны этого излучения получают функции длины волны, называемые кривыми сложения цветов. Спектр сложного излучения представляют в виде суммы чистых спектральных цветов, соответствующих его монохроматическим составляющим с учетом их интенсивностей. Основными цветами являются чистые спектральные цвета, соответствующие монохроматическим излучениям с длинами волн 700,0 (красный), 546,1 (зеленый), 435,8 нм (синий):

$$A(\lambda) \equiv R(\lambda) + G(\lambda) + B(\lambda). \quad (2)$$

Кривые сложения этой системы, принятой Международной комиссией по освещению (МКО) и известной под названием МКО RGB, показаны на рис. 2. Наряду с системой RGB существует цветовая система XYZ, основными цветами которой (X) (Y) (Z) являются нереальные цвета, выбранные так, что кривые сложения этой системы (рис. 3) не имеют отрицательных участков, а координата Y равна яркости наблюдаемого объекта, т. к. кривая сложения Y совпадает с функцией относительной спектральной световой эффективности стандартного наблюдателя МКО для дневного зрения. Эта система получила всеобщее распространение и широко используется в колориметрии.

Из вышесказанного следует, что для колориметрических расчетов не важна амплитуда излучения, а лишь сам характер зависимости  $S(\lambda)$ . Это распределение для стандартных источников света A (лампа накаливания с вольфрамовой нитью с

коррелированной цветовой температурой 2856 К) и D65 (воспроизводит освещение усредненным дневным светом с коррелированной цветовой температурой 6500 К), а также для СВЧ-разрядной лампы, излучающим веществом которой является смесь серы с неоном (коррелированная цветковая температура до 8000 К), приведены в табл. 1. Здесь также указаны значения функций сложения, используемые при расчете координат цвета и цветности.

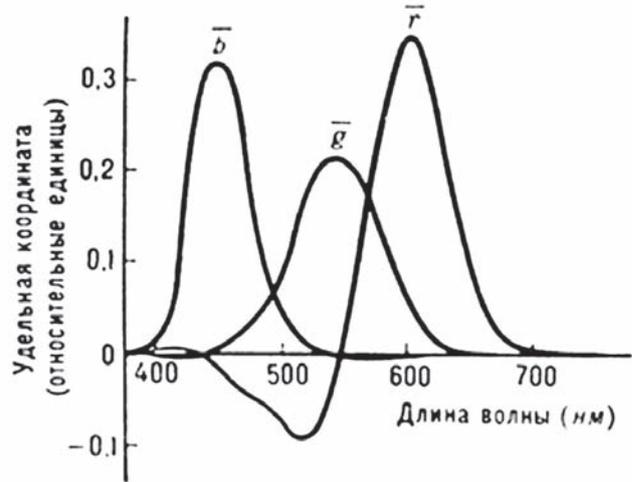


Рис. 2. Кривые сложения цветовой координатной системы МКО RGB

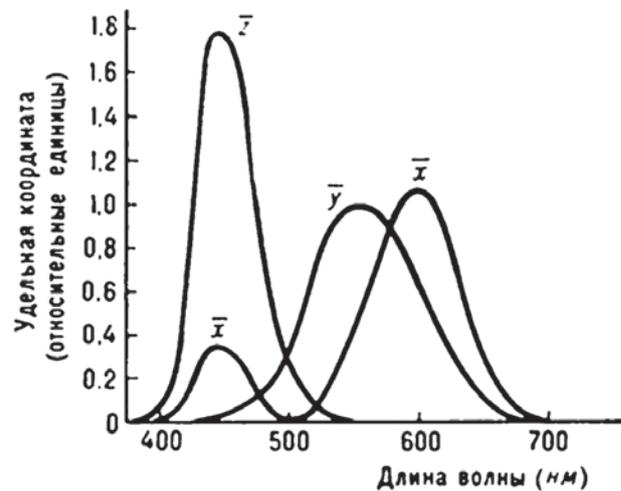


Рис. 3. Кривые сложения цветовой координатной системы МКО XYZ

На рис. 4 показаны кривые сложения вышеуказанных источников излучения. Как видно из рисунка, кривые сложения СВЧ-лампы повторяют форму излучения стандартного источника D65 – дневного солнечного света, в отличие от лампы накала, которая имеет наибольшую составляющую красного цвета (кривая сложения  $\bar{x}(\lambda)$ ).

Расчет цветовых координат спектра излучения осуществляется путем перемножения функции спектрального распределения источника излучения на функции сложения и интегрирования произведений:

Таблица 1

$\lambda$ , нм	$S(\lambda)$ D65	$S(\lambda)$ A	$S(\lambda)$ S-Ne	$\bar{x}(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)$	$\bar{x}(\lambda)$ $S(\lambda)$ D65	$\bar{y}(\lambda)$ $S(\lambda)$ D65	$\bar{z}(\lambda)$ $S(\lambda)$ D65	$\bar{x}(\lambda)$ $S(\lambda)$ A	$\bar{y}(\lambda)$ $S(\lambda)$ A	$\bar{z}(\lambda)$ $S(\lambda)$ A	$\bar{x}(\lambda)$ $S(\lambda)$ S-Ne	$\bar{y}(\lambda)$ $S(\lambda)$ S-Ne	$\bar{z}(\lambda)$ $S(\lambda)$ S-Ne
400	82,8	14,71	45,10	0,0143	0,0004	0,0679	1,184	0,0331	5,622	0,210	0,0059	0,998	0,645	0,018	3,062
450	117,0	33,09	120,00	0,3362	0,0380	1,7721	39,335	4,446	207,336	11,125	1,2574	58,639	40,3440	4,560	212,652
500	109,4	59,86	205,00	0,0049	0,3230	0,2720	0,536	35,336	29,757	0,2933	19,3348	16,282	1,005	66,215	55,760
550	104,0	92,91	164,93	0,4334	0,9950	0,0087	45,073	103,48	0,905	40,267	92,4455	0,808	71,481	164,12	1,435
600	90,0	129,04	121,97	1,0622	0,6310	0,0008	95,598	56,790	0,072	137,07	81,4242	0,103	129,553	76,961	0,098
650	80,0	165,03	99,66	0,2835	0,1070	0,0000	22,68	8,560	0,000	46,786	17,6582	0,000	28,254	10,664	0,000
700	71,6	198,26	75,30	0,0114	0,0041	0,0000	0,8162	0,294	0,000	2,260	0,8129	0,000	0,858	0,309	0,000
710	74,3	204,41	69,40	0,0058	0,0021	0,0000	0,4309	0,156	0,000	1,186	0,4293	0,000	0,402	0,146	0,000
720	61,6	210,36	63,50	0,0029	0,0010	0,0000	0,1786	0,062	0,000	0,610	0,2104	0,000	0,184	0,063	0,000
730	69,9	216,12	57,60	0,0014	0,0005	0,0000	0,0979	0,035	0,000	0,303	0,1081	0,000	0,081	0,029	0,000

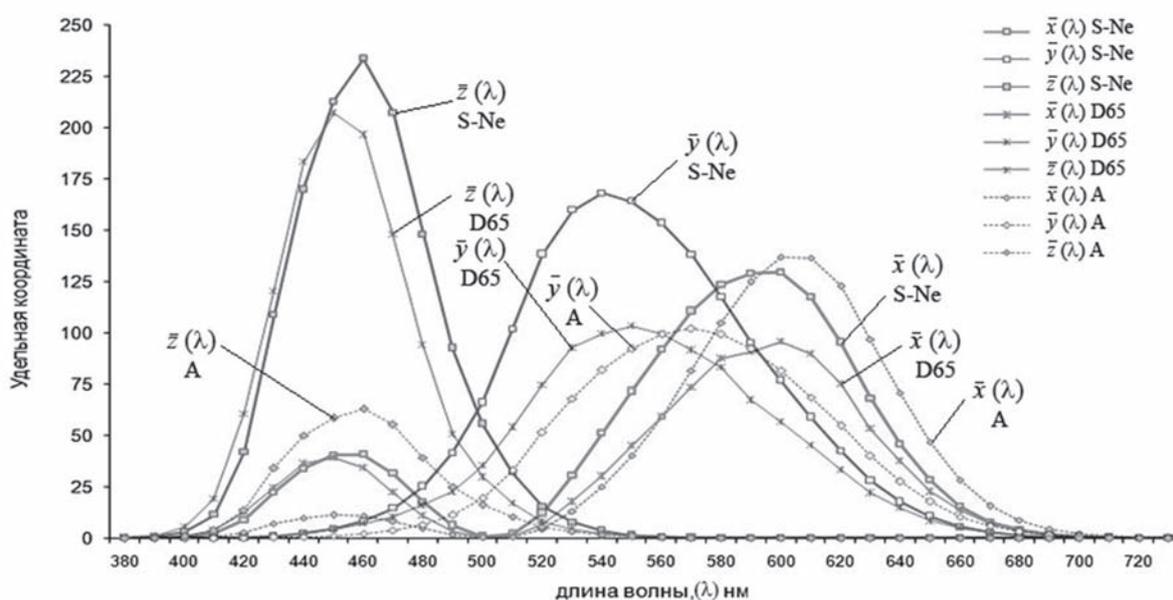


Рис. 4. Кривые сложения цветовой координатной системы МКО XYZ для различных источников излучения

$$X = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda,$$

$$Y = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda,$$

$$Z = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda,$$

где  $X, Y, Z$  — координаты цвета в системе МКО XYZ;  $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$  — ординаты кривых сложения;

$\lambda_1, \lambda_2$  — диапазон длин волн (380 ... 780 нм);  $\Phi(\lambda)$  — спектральное распределение мощности излучения источника света.

В табл. 2 приведены расчетные значения координат цвета и цветности для рассматриваемых источников излучения. Благодаря введению нормирующего коэффициента  $k$  осуществляется перерасчет цветовых координат таким образом, чтобы значение координаты  $Y$  всегда было равно 100. Значение нормирующего коэффициента обычно принимается равным:

Таблица 2

Параметр	D65 (воспроизводит освещение усредненным дневным светом)	A (лампа накаливания с вольфрамовой нитью)	СВЧ-лампа
нормирующий коэффициент, $k$	0,09	0,09	0,06
координаты цвета в системе МКО XYZ, $X$	95,03	109,82	81,54
координаты цвета в системе МКО XYZ, $Y$	100,00	100,00	100,00
координаты цвета в системе МКО XYZ, $Z$	108,82	35,55	81,84
координаты цветности, $x$	0,31	0,45	0,31
координаты цветности, $y$	0,33	0,41	0,38

$$k = \frac{100}{\sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} [\Phi(\lambda) \bar{y}(\lambda)] \Delta\lambda}$$

Как видно, координаты цветности СВЧ-ламп и солнечного спектра практически одинаковы. Что еще раз подтверждает, что спектр излучение серной СВЧ-разрядной лампы является квазисолнечным.

## 2. ИЗУЧЕНИЕ КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА СВЧ-ЛАМП

Одним из эффективных источников света является возбуждаемый СВЧ-излучением разряд в газовой смеси, основным компонентом которой служит испаряемая в процессе разряда сера. Чтобы создать свечение газовой смеси, в колбе лампы необходимо обеспечить пробой газа, который заключается в превращении непроводящего вещества в проводник в результате приложения к нему достаточно сильного поля. Разряд в этом случае возбуждается микроволновым излучением с частотой 2,45 ГГц, которое широко используется в промышленности, науке, медицине. Микроволновое поле вызывает тлеющий разряд в буферном газе, имеющем при низком исходном давлении низкий порог пробоя. Одновременно поле нагревает – вплоть до испарения – порошок серы. В образовавшейся газовой смеси уже высокого давления микроволновое поле переводит атомы (а также димеры и т.д.) серы в возбужденные состояния. При этом действует и канал непосредственного атомарного и молекулярного поглощения и столкновительный механизм. Наконец, переизлучение из возбужденных состояний формирует наблюдаемый спектр свечения с максимальной яркостью в области зеленых длин волн (рис. 5). При этом если добавить в колбу лампы часть других химических элементов, ее спектр излучения изменится, так как в атомах различ-

ных химических элементов энергии квантовых скачков между разрешенными орбиталями отличаются, и они будут излучать свет с различными длинами волн. В зависимости от того, какое выходное излучение необходимо получить, в колбу следует добавить элемент, длина волны которого при сложении со спектром паров серы будет доминирующей.

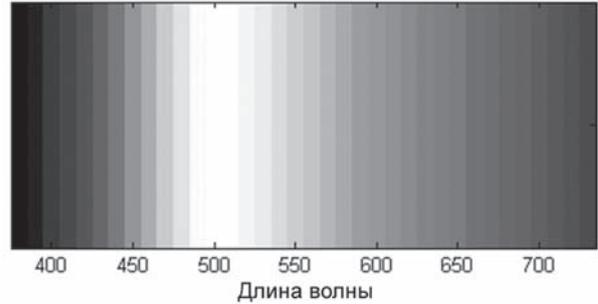


Рис. 5. Распределение интенсивности энергии излучения безэлектродной СВЧ-ламп на парах серы

Например, для увеличения излучения красного света серной лампы, который более эффективен для улучшения роста растений, в колбу лампы с серой можно добавить бромистый кальций  $\text{CaBr}_2$  (рис. 6) [8]. Получаем подобный спектр с дополнительным пиком в области красных длин волн на 625 нм. Добавление  $\text{CaBr}_2$  позволяет увеличить эмиссию электронов в диапазоне красных длин волн за счет небольшого уменьшения эмиссии в более коротковолновой области видимого света и с небольшим количеством увеличения ИК-излучения.

При рассмотрении спектра излучения натрия в видимой области наблюдаются две близко расположенные линии в желтой части спектра, а у ртути спектральные линии приходятся на сине-голубую область. Однако, для эффективного управления спектром излучения лампы, следует также учитывать характер взаимодействия дополнительных

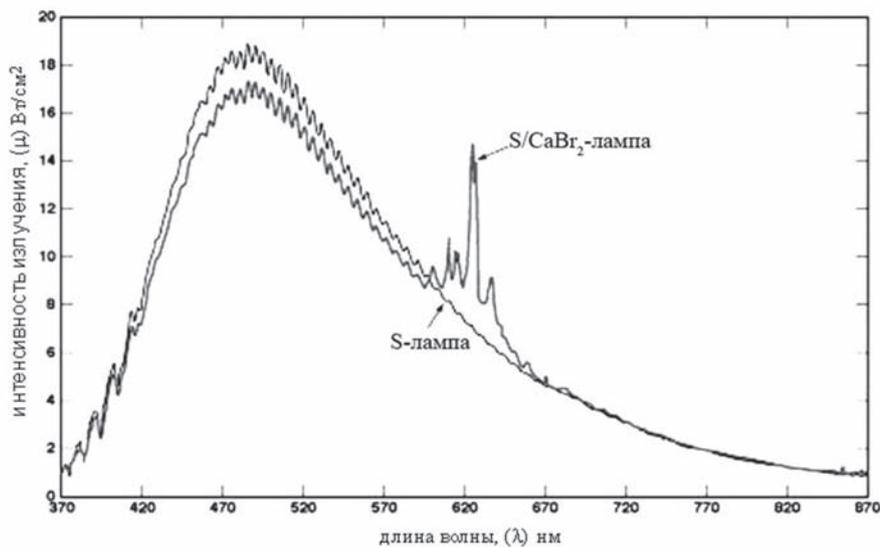


Рис. 6. Спектр излучения серной лампы и спектр лампы с добавлением в колбу бромистого кальция

элементов с буферным газом, а также с СВЧ-энергией. Потому что изменения частоты и мощности СВЧ-накачки безэлектродной лампы приводит к замедлению либо ускорению развития разряда, то есть уменьшению или увеличению яркости лампы.

### ВЫВОДЫ

В работе были проанализированы спектральные характеристики излучения безэлектродной серной лампы и факторы, влияющие на них.

Показано, что получение заданного цвета излучения можно достичь с помощью добавления различных химических элементов или веществ в колбу СВЧ-лампы. При этом возможно улучшить цветопередачу окружающих объектов и изменить выходной спектр безэлектродных источников излучения на основе СВЧ-разряда. Проведение более подробного исследования спектральных характеристик безэлектродной СВЧ-лампы от компонентного состава рабочего вещества позволит также, в свою очередь, управлять частотой электромагнитного источника, используемого в качестве СВЧ-накачки.

### Литература.

- [1] Диденко А.Н., Зверев Б.В. СВЧ-энергетика. — М.: Наука, 2000. — 262 с.
- [2] Мак-Доналд А. Сверхвысокочастотный пробой в газах. / Под ред. М.С. Рабиновича. — М.: 1969. — 279 с.
- [3] Козлов А.Н., Ляхов Г.А. и др. СВЧ и ВЧ возбуждение ВЧ разряда в парах серы с неоном // Письма в ЖТФ, 1999. — Т. 25. — Вып. 13. — С. 27–33.
- [4] Юшков Д.Д. Источники света на основе безэлектродного СВЧ-разряда (обзор) // Светотехника, 1984. — № 2. — С. 33-39.
- [5] Медведев С.А., Кустов Е.Ф., Арсеньев П.А. Сверхвысокочастотный пробой в газах // ПТЭ, 1965. — № 6. — С. 186-197.
- [6] Рохлин Г.Н. Разрядные источники оптического излучения (обзор развития) // Светотехника, 1995. — № 4. — С. 34-51.
- [7] Луизов А.В. Цвет и свет. — Л. Энергоатомиздат, 1989. — 256 с.
- [8] Donald A. MacLennan. Sulfur lamp with CaBr<sub>2</sub> additive for enhanced plant growth // NASA Tech Briefs, 2000.

Поступила в редколлегию 19.02.2009



**Мачехин Юрий Павлович**, доктор технических наук, лауреат Государственной премии Украины в области науки и техники, заслуженный метролог Украины, академик академии наук прикладной радиоэлектроники, заведующий кафедрой ФОЭТ ХНУРЭ. Область научных интересов: лазерная измерительная техника и оптоэлектронные приборы.



**Фролова Татьяна Ивановна**, кандидат физ.-мат. наук, доцент кафедры ФОЭТ Харьковского национального университета радиоэлектроники. Область научных интересов: разработка трехмерных математических моделей вакуумных приборов; численное моделирование нелинейных процессов в нетрадиционных приборах со скрещенными полями; проектирование новых электронных СВЧ приборов



**Старчевский Юрий Львович**, кандидат физ.-мат. наук, доцент кафедры ФОЭТ Харьковского национального университета радиоэлектроники. Область научных интересов: разработка трёхмерных (3D) математических моделей электронных приборов; моделирование нелинейных физических процессов в мощных (в том числе релятивистских) приборах СВЧ; математическое моделирование генерации мощных электронных пучков.



**Грищенко Юлия Алексеевна**, аспирант кафедры ФОЭТ Харьковского национального университета радиоэлектроники. Область научных интересов: компьютерное моделирование СВЧ-приборов (в частности, безэлектродных ламп на основе СВЧ-разряда); колориметрические расчеты спектра излучения источников света.