

НГУЕН КУАНГ ХИЕП, Т. И. ЯКУШЕНКОВА

РАСЧЕТ И ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХЗЕРКАЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Предлагается принцип нахождения всех возможных вариантов конструкций двухзеркальных фокусирующих композиций, приводятся обобщенная методика и результаты расчета их конструктивных параметров, рассматривается графический способ одновременного представления результатов расчета многих вариантов и их характеристик.

Ключевые слова: двухзеркальная композиция, коэффициент экранирования.

Введение. При разработке оптических систем различного назначения широко используются двухзеркальные композиции как в качестве самостоятельных систем, так и в составе сложных. В современной литературе [1—3] описываются конструкции и методы расчета известных двухзеркальных объективов Кассегрена, Ричи — Кретьена, Грегори, Шварцшильда и др., а также телескопические системы различного назначения. Однако их использование в новых разработках затруднено вследствие отсутствия данных обо всех возможных конструкциях и описания обобщенного метода их расчета.

Использование двухзеркальных композиций при разработке новых оптических систем — таких как системы адаптивной оптики (центрированные, внеосевые, децентрированные), системы с увеличенным пределом визирования различно удаленных объектов, системы трансформирования лазерного пучка, широкоугольные и панорамные зеркальные и зеркально-линзовые системы — требует анализа большого количества данных. На этом этапе исходный вариант конструкции двухзеркальной композиции достаточно представить со сферическими поверхностями; основные свойства такой конструкции определяются радиусами кривизны зеркал и расстоянием между ними (r_1, r_2, d).

В настоящей статье предлагается принцип нахождения таких фокусирующих двухзеркальных композиций, позволяющий найти все возможные варианты конструкций, приводятся методика и результат их расчета, а также графический способ представления результатов расчета одновременно для многих вариантов.

Принцип построения двухзеркальных композиций. На основе известных в геометрической оптике условий формирования действительного или мнимого изображения по взаимному расположению фокусов в двухкомпонентной системе для описания всех возможных конструкций двухзеркальных композиций предлагается принцип их построения по ходу первого параксиального луча.

Во всех рассматриваемых вариантах положение и фокусное расстояние f'_1 (или радиус кривизны r_1) первого зеркала предлагается считать постоянным. В этом случае положение второго зеркала определяется коэффициентом экранирования, равным отношению высот падения первого параксиального луча на зеркала ($k=h_2/h_1$).

Принцип нахождения всех возможных вариантов двухзеркальных композиций можно продемонстрировать для варианта с удаленным объектом ($s_1=-\infty, \beta_0=0$) на примере, когда первое зеркало вогнутое, а второе зеркало располагается в зоне $0 < k < 1$ (рис. 1). В исходном варианте (вариант 0 на рисунке) второе зеркало плоское, его фокус F_2 находится в бесконечности. При изменении знака и величины радиуса кривизны r_2 второго зеркала, когда его фокус F_2 будет менять свое положение, будут изменяться и значение фокусного расстояния $f'_{\text{экв}}$ эквивалентной системы, и положение самого фокуса $F'_{\text{экв}}$.

Все многообразие двухзеркальных композиций для выбранных значений k и f'_1 можно найти при изменении r_2 , когда фокус F_2 перемещается от $-\infty$ до $+\infty$.

При приближении F_2 к F'_1 плоское зеркало преобразуется в выпуклое, его радиус r_2 уменьшается, эквивалентное фокусное расстояние системы увеличивается и фокус $F'_{\text{экв}}$ системы остается действительным и удаляется по ходу луча от F'_1 . Так формируются объективы типа объектива Кассегрена с радиусами кривизны одного знака (см. рис. 1, вариант 1). При совпадении F_2 с F'_1 система становится афокальной (см. рис. 1, вариант 2; в данной статье не рассматривается). При дальнейшем уменьшении r_2 , когда второе зеркало остается выпуклым, формируются конструкции с мнимым фокусом (вариант 3). В случае когда второе зеркало преобразуется в вогнутое, его передний фокус F_2 перемещается от плоского зеркала до $+\infty$. Так формируются объективы из двух вогнутых зеркал с фокусом эквивалентной системы $F'_{\text{экв}}$, расположенным между зеркалами (вариант 4).

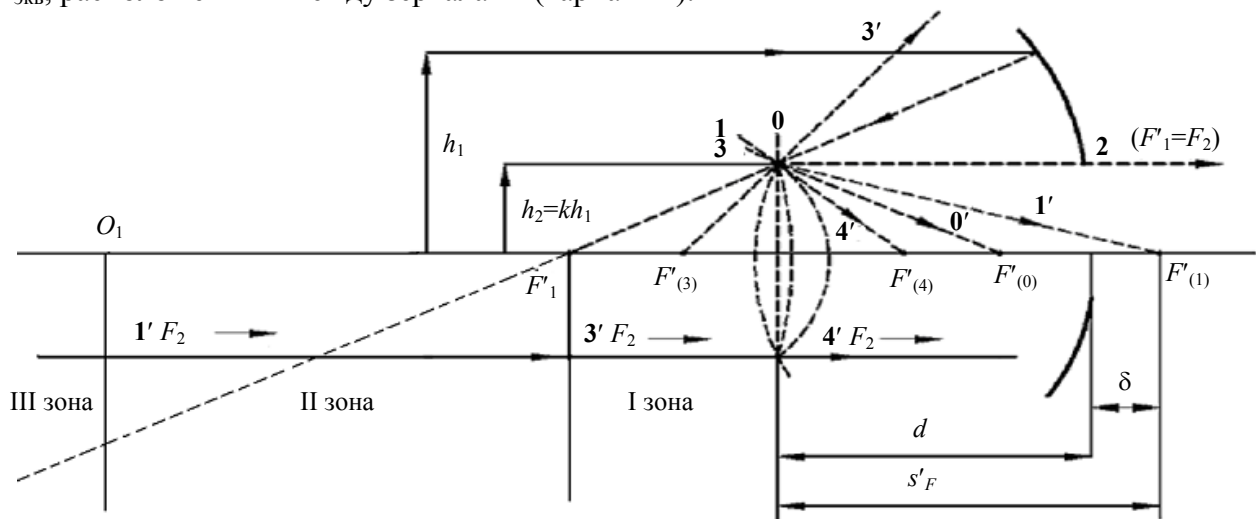


Рис. 1

Таким образом, для выбранных значений k и f'_1 (или радиуса кривизны r_1) первого зеркала были найдены три типа двухзеркальных фокусирующих конструкций: два объектива и компонент с мнимым фокусом. Различные варианты каждого типа могут отличаться значением фокусного расстояния эквивалентной системы и положением эквивалентного фокуса относительно вершины первого зеркала.

Применяя предложенный принцип построения двухзеркальных композиций для различных значений k в каждой характерной зоне (I — III) расположения второго зеркала при постоянном первом можно аналогичным образом найти все возможные варианты конструкций и выделить из них типовые для любого значения k .

Авторами настоящей статьи найдены типовые конструкции двухзеркальных композиций как с первым вогнутым зеркалом, так и с первым выпуклым при различных значениях k и β_0 . Эти типовые конструкции включены в каталог исходных вариантов двухзеркальных композиций.

В качестве примера на рис. 2 представлены 12 типовых конструкций фокусирующих систем (для варианта с удаленным объектом), найденных по предложенной методике в рамках практических ограничений для значения коэффициента экранирования k ($-5 \leq k \leq 5$) и приведенного значения кривизны первого зеркала $f'_{\text{экв}}/r_1$ ($-5 \leq f'_{\text{экв}}/r_1 \leq 5$). При этом не рассматривались следующие частные случаи:

$f'_{\text{экв}}/r_1 = -0,5$, второе зеркало — плоское;

$f'_{\text{экв}}/r_1 = 0,5$, увеличение второго зеркала равно -1 .

$k=-1$ и $k=+1$, второе зеркало полностью перекрывает первое зеркало.

Из анализа рис. 2 видно, что среди полученных типовых конструкций имеются как известные (все типы объективов), так и редко встречающиеся, например композиции с мнимым фокусом при $k > 1$ или $-1 < k < 0$.

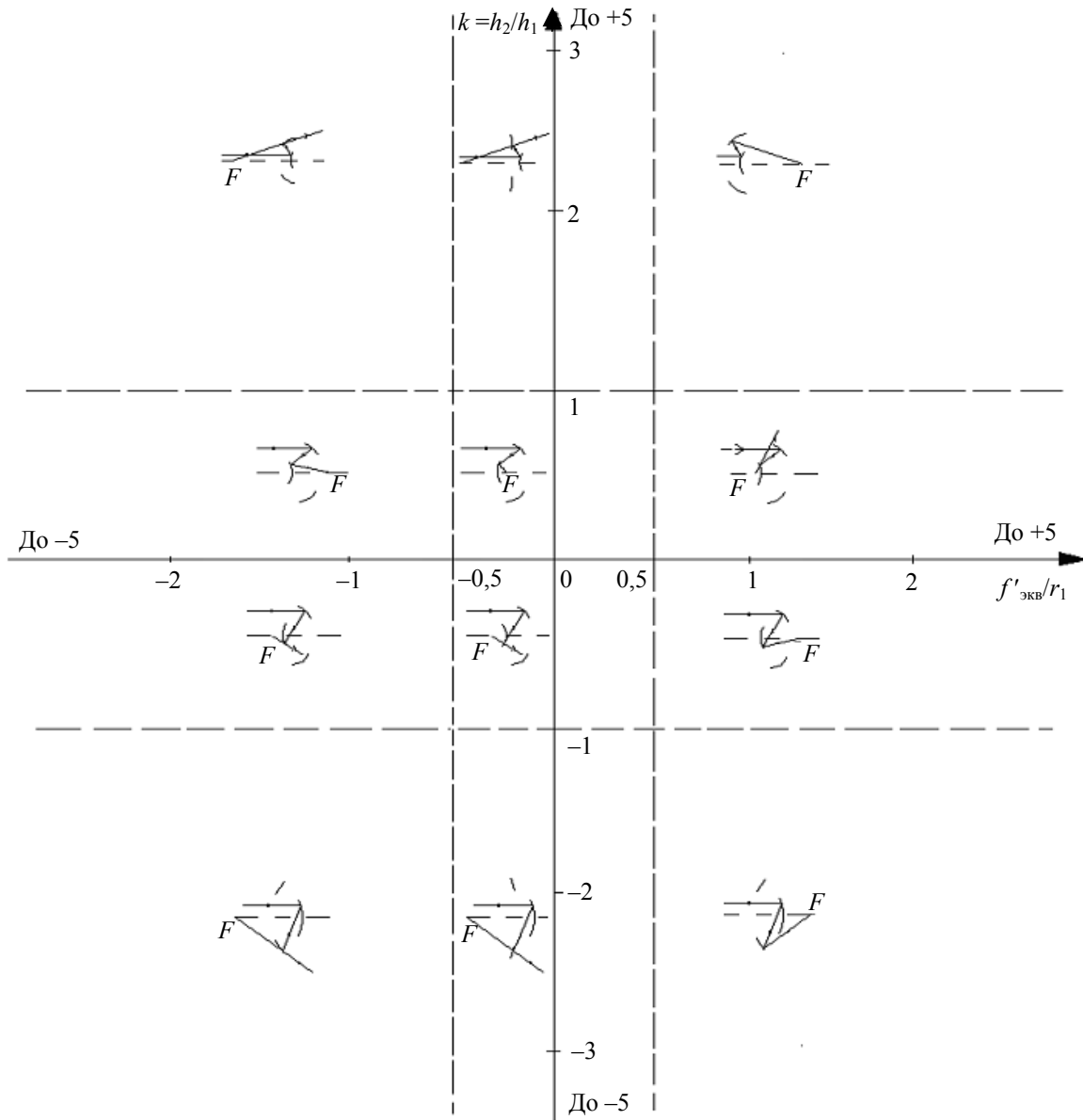


Рис. 2

Для выбора исходных вариантов и сравнения их различных характеристик конструктивные параметры должны быть приведены к единому масштабу, принятому, например, для значений координат параксиальных лучей [1, 2].

Обобщенный метод габаритного расчета двухзеркальных композиций. Задачами габаритного расчета являются не только определение параметров r_1 , r_2 , d всех возможных вариантов конструкций двухзеркальных композиций, но и выделение вариантов с заданными характеристиками.

Габаритный расчет основан на уравнениях параксиальных лучей в условиях принятой нормировки координат этих лучей ($\alpha'_k = +1,0$, $h_1 = +1,0$ и $\beta_1 = +1,0$) [1, 2]. Для расчета следует выбрать исходные данные, отражающие как конструктивные особенности двухзеркальных композиций, так и предложенный принцип их построения, а именно: $f'_{\text{экв}}$, k и δ .

В этом случае приведенные значения конструктивных параметров вычисляются по следующим формулам:

$$r_{1\text{пр}} = \frac{2}{\beta_0 + \alpha_2}; \quad r_{2\text{пр}} = \frac{2k}{\alpha_2 + 1}; \quad d_{\text{пр}} = \delta_{\text{пр}} - k; \quad (1)$$

$$k = \frac{h_2}{h_1}, \quad \alpha_2 = \frac{1-k}{d_{\text{пр}}}.$$

С использованием уравнений параксиальных лучей и уравнения (1) были рассчитаны основные конструктивные параметры двухзеркальных композиций в широком диапазоне изменения k и δ . Результаты этого расчета сведены в таблицы, где для каждого значения k указаны: радиусы кривизны зеркал и расстояние между ними (r_1, r_2, d); передний и задний фокальные отрезки (s_F, s'_F); положение плоскости изображения (s'); удаление плоскости изображения относительно вершины первого зеркала (δ); положение и размер выходного зрачка при заданном входном ($s'_p, D'_{\text{вых}}$); увеличение в зрачках (β_{0p}); увеличение второго зеркала (β_{02}); длина конструкции двухзеркальной композиции (L) и значения сумм Зейделя (S_I-S_V) для различных положений входного зрачка (s_p). Таким образом, в виде таблиц создан массив исходных данных двухзеркальных композиций для различных значений β_0 .

Для выбора исходных вариантов двухзеркальных композиций предлагается выделять из всего массива отдельные конструкции с отличительными признаками, например, наиболее часто встречающиеся при разработке оптических систем, а именно:

- двухзеркальные композиции с заданным положением плоскости изображения относительно вершины первого зеркала δ (см. таблицу, № 1);
- двухзеркальные композиции с заданным расстоянием между зеркалами d (см. таблицу, № 2);
- двухзеркальные композиции с равными радиусами кривизны зеркал $r_1=r_2$ (см. таблицу, № 3);
- двухзеркальные композиции с равными оптическими силами зеркал $r_1=-r_2$ (см. таблицу, № 4);
- концентрические двухзеркальные композиции при $r_1=r_2+d$ (см. таблицу, № 5);
- двухзеркальные композиции, для которых $\delta=0$ (см. таблицу, № 6);
- двухзеркальные композиции с исправленной сферической аберрацией третьего порядка $S_I=0$ (см. таблицу, № 7);
- двухзеркальные композиции с исправленной комой третьего порядка $S_{II}=0$ при заданном положении входного зрачка (см. таблицу, № 8).

Для каждого случая при изменении значения коэффициента экранирования в определенном интервале (например, $k=(-5; +5)$) можно выделить все конструкции с одним отличительным признаком, к примеру, исходя из условия исправления сферической аберрации $S_I=0$.

Для вычисления сумм Зейделя S_I и S_{II} в двухзеркальной композиции были получены следующие формулы:

$$S_I = -\frac{1}{4}[(2\rho_1 - \beta_0)^2 - \beta_0^2][(2\rho_1 - \beta_0) - \beta_0] + \frac{k}{4}[1 - (2\rho_1 - \beta_0)^2][1 - (2\rho_1 - \beta_0)], \quad (2)$$

$$S_{II} = \left(\frac{1-k}{2\rho_1 - \beta_0}\right) \frac{1}{4}[1 - (2\rho_1 - \beta_0)^2][1 - (2\rho_1 - \beta_0)] + 0,5(1 - \beta_0^2). \quad (3)$$

Для определения значений конструктивных параметров перечисленных конструкций были получены формулы, частные случаи которых приведены в таблице.

№ п/п	Заданные параметры	r_{1np}	r_{2np}	d_{np}
1	k, δ_{np}	$2(\delta_{np} - k) / [\beta_0(\delta_{np} - k) + 1 - k]$	$2k(\delta_{np} - k) / (1 + \delta_{np} - 2k)$	$\delta_{np} - k$
2	k, d	$2d_{np} / (1 - k + d_{np}\beta_0)$	$2kd_{np} / [(1 - k) + d_{np}]$	d_{np}
3	$k, r_1=r_2$	$2(k - 1) / (1 - \beta_0)$	$2(k - 1) / (1 - \beta_0)$	$-(1 - k)^2 / (1 - k\beta_0)$
4	$k, r_1=-r_2$	$-2(k + 1) / (1 - \beta_0)$	$2(k + 1) / (1 - \beta_0)$	$(k^2 - 1) / (1 + k\beta_0)$
5	$k, r_1=r_2+d$	$2 / (\alpha_2 + \beta_0)$	$2k / (\alpha_2 + 1)$	$(1 - k) / \alpha_2$
6	$k, \delta = 0$	$2k / (k - 1 + k\beta_0)$	$2k^2 / (2k - 1)$	$-k$
7	$k, S_I=0$	$1/\rho_1$, где ρ_1 — решение уравнения $S_I=0$ (2)	$2kr_{1np} / (2 + r_{1np} - r_{1np}\beta_0)$	$r_{1np}(1 - k) / (2 - r_{1np}\beta_0)$
8	$k, S_{II}=0$	$1/\rho_1$, где ρ_1 — решение уравнения $S_{II}=0$ (3)	$2kr_{1np} / (2 + r_{1np} - r_{1np}\beta_0)$	$r_{1np}(1 - k) / (2 - r_{1np}\beta_0)$

Результаты расчета вариантов конструкций двухзеркальных композиций с отличительными признаками также сведены в таблицы, которые совместно с таблицами общего массива составляют каталог исходных вариантов.

Однако при выборе исходных вариантов, когда не только уточняются конструктивные параметры найденной конструкции, но осуществляется поиск самой конструкции, пользоваться таблицами затруднительно. Поэтому авторами настоящей статьи предложен новый графический способ одновременного представления многообразия двухзеркальных композиций и их отличительных признаков.

Графическое представление конструкций двухзеркальных композиций. Если все конструктивные параметры двухзеркальных композиций вычисляются при $h_1 = +1$ для любых значений β_0 и s_1 , то многообразие двухзеркальных композиций для каждого значения β_0 графически можно отобразить на плоскости (на „странице“) с координатами k и h_1/r_1 .

Рассмотрим вариант с удаленным объектом ($h_1 = f'_{эКВ} = +1$). Для графического представления результатов расчета установим практические ограничения: $k = \pm 5$ — в этом случае диаметр второго зеркала, по меньшей мере, в 5 раз больше диаметра первого зеркала; $f'_{эКВ}/r_1 = \pm 5$ — тогда при относительных отверстиях каждого зеркала не более 1/1 относительное отверстие всей системы при $|f'_{эКВ}/r_1| > 5$ меньше 1/10.

Для выделения композиций с отличительными конструктивными признаками требуется установить зависимость между k и ρ_1 : для конструкций с исправленной сферической аберрацией была получена формула

$$k = \frac{(2\rho_1 + 2)^3 + 2(2\rho_1 + 2)^2 - 4(2\rho_1 + 2) - 8}{(2\rho_1 + 2)^3 - (2\rho_1 + 2)^2 - (2\rho_1 + 2) + 1}, \quad (4)$$

а для конструкций с одинаковым расстоянием между зеркалами — формула

$$k = -2d_{np}\rho_1 + 1. \quad (5)$$

При этом для графического представления конструкций не всегда требуются вычисления, иногда достаточно установить аналитическую зависимость (см., например, формулу (5)): все конструкции с одинаковым расстоянием между зеркалами лежат на прямой, проходящей через точку ($k=1, \rho_1=0$) под углом γ , $\text{tg } \gamma = -2d_{np}$.

В качестве примера на рис. 3 графически представлены отдельные характеристики двухзеркальных композиций: прямыми 1, 2 показаны конструкции с одинаковыми расстояниями между

зеркалами ($d_{\text{пр}}=+1$ и $d_{\text{пр}}=-1$), кривыми 3—5 — конструкции с исправленной сферической аберрацией ($S_I=0$), кривыми 6, 7 — концентрические конструкции двухзеркальных композиций.

Эффективность графического представления многообразия двухзеркальных композиций заключается в том, что оно позволяет одновременно и наглядно продемонстрировать возможности и отличительные признаки многих конструкций, это, в свою очередь, позволяет осуществить многосторонний анализ и выбрать исходный вариант.

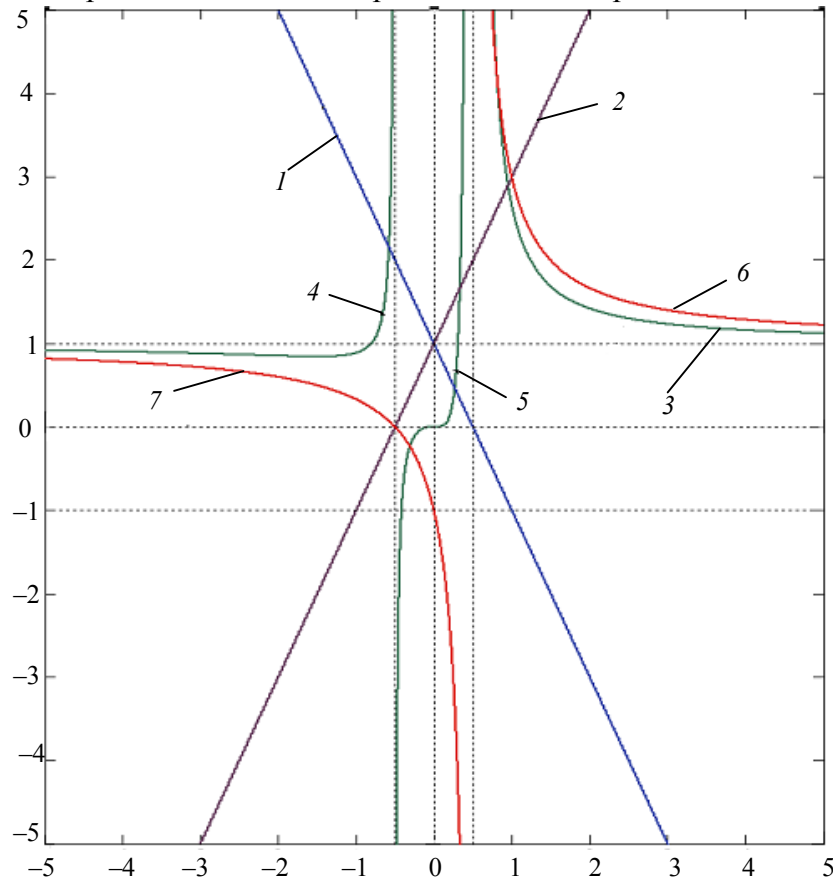


Рис. 3

На основе проведенных авторами исследований двухзеркальных композиций разработаны принцип построения и методика их расчета, а по результатам расчета создан каталог, состоящий из таблиц и графиков, для выбора исходных вариантов [4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Русинов М. М. Композиция оптических систем. Л.: Машиностроение, 1989.
2. Запрягаева Л. А., Свешникова И. С. Расчет и проектирование оптических систем. М.: Логос, 2000.
3. Справочник по инфракрасной технике / Под ред. У. Волфа, Г. Цисуса. М.: Мир, 1998. Т. 2, 4.
4. Каталог исходных вариантов двухзеркальных композиций различного назначения / К. Х. Нгуен, Т. И. Якушенкова // Сб. трудов „ПО—2006“. 2006. Т. 3. С. 163—167.

Сведения об авторах

Нгуен Куанг Хиен

— аспирант; Московский энергетический институт (Технический университет), кафедра светотехники; E-mail: hiermpei_79@mail.ru

Татьяна Ивановна Якушенкова

— канд. техн. наук, доцент; Московский энергетический институт (Технический университет), кафедра светотехники

Рекомендована кафедрой
светотехники

Поступила в редакцию
25.03.08 г.