

**ТС**вето  
**Техника**

**10**

**ЭНЕРГИЯ 1968**

79

## КСЕНОНОВЫЕ ТРУБЧАТЫЕ ЛАМПЫ «ХОЛОДНОГО» СВЕТА

Инж. Ю. Н. ФИЛИППОВСКИЙ, д-р техн. наук И. С. МАРШАК,  
канд. техн. наук А. Я. ШТАРКЕР, канд. биол. наук В. Е. СЕМЕНЕНКО,  
д-р биол. наук А. А. НИЧИПОРОВИЧ и инж. Л. М. ПЯЦКАЯ

Появившиеся в последнее десятилетие у нас и за рубежом дуговые ксеноновые трубчатые источники света представляют большой интерес для техники освещения, космической биологии, фотобиологии и других областей науки и техники.

В космической и фотобиологии для получения высокой продуктивности фотосинтеза необходимы высокие плотности лучистых потоков фотосинтетически активной части спектра (380—700 нм) \*.

Однако все известные дуговые ксеноновые трубчатые лампы, в том числе и лампы с применением водяного охлаждения, работающие при повышенных нагрузках на единицу поверхности кварцевой разрядной трубки, обладают существенным недостатком: доля ближнего ИК излучения ламп по отношению к ФАР очень велика. Она значительно выше, чем в спектре излучения Солнца, для которого отношение энергий этих излучений близко к единице [Л. 1].

ИК излучение создает большие, зачастую непреодолимые трудности в случае необходимости высоких облученностей от ФАР, приводя к перегреву облучаемых объектов, значительно усложняя конструкцию термостатируемых систем и вызывая большие градиенты температуры в них. Для сред, имеющих экстремальный характер температурной зависимости, последнее обстоятельство нежелательно, так как значительные объемы среды уводятся от температурного оптимума и производительность установки в целом понижается (например, реакторы для культивирования одноклеточных фотосинтезирующих организмов-микроводорослей). Кроме того, кондиционирование лабораторий и установок, содержащих подобные источники лучистой энергии, обходится дорого и ведет к необходимости высоких, часто недопустимых, кратностей обмена воздуха ввиду большой тепловой мощности, выделяемой в окружающее пространство.

В практике светокультуры растений для снятия избытка инфракрасных лучей обычно используется экран со слоем проточной воды толщиной 50—100 мм. Для лабораторных

установок применяются  $\text{CuSO}_4$ , фильтр Пфунда [Л. 2, 3], а также плоские интерференционные теплофильтры, применяемые в кинотехнике [Л. 4]. Все перечисленные способы в той или иной мере вызывают необходимость в дополнительном к самой лампе устройстве, часто довольно громоздком.

В работе излагаются результаты эксперимента, направленного на устранение избытка ИК излучения в лучистом потоке ксеноновой лампы с помощью интерференционных светофильтров — оболочек, которые не изменяют габаритов источника и не вносят каких-либо требований или ограничений при его эксплуатации. Нанесение подобных покрытий на кварцевую колбу ксеноновой лампы непрерывного горения с воздушным охлаждением неудобно из-за высокой температуры колбы, которая может исказить спектральную характеристику фильтра. Кроме того, как показывают расчеты [Л. 5], большая часть отраженного интерференционным покрытием излучения должна выйти наружу вследствие многократных отражений в слабо поглощающей плазме дугового разряда с низким градиентом напряжения. В связи с этим в качестве лампы — базиса была взята дуговая ксеноновая трубчатая лампа с водяным охлаждением [Л. 6]. Для этого источника были проведены измерения кривых силы излучения в фотосинтетически активной и ИК частях спектра, а также для интегрального излучения. Измерения производились с помощью термоэлемента, закрепленного в зачерненном изнутри специальном тубусе. Облученность от интегрального потока под различными углами к оси лампы измерялась непосредственно термоэлементом, проградуированным в  $\text{вт}/\text{м}^2$ . Облученность от ИК излучения лампы измерялась термоэлементом, закрытым стеклом КС-19 толщиной 3 мм, причем отсчет умножался на поправочный множитель. Последний был определен экспериментально как частное от деления отсчета прибора, закрытого одним стеклом КС-19, на отсчет прибора, закрытого двумя одинаковыми стеклами КС-19, и оказался равным 1,11. Облученность от ФАР определялась дифференциальным способом. На лампе поддерживалось напряжение 220 в, при этом потребляемая мощность составила 5,9 кВт.

\* Это излучение в дальнейшем будем сокращенно называть ФАР — фотосинтетически активная радиация.

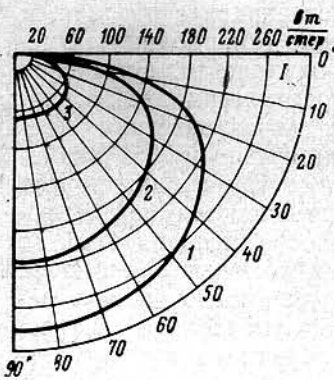


Рис. 1. Кривые силы интегрального 1, инфракрасного 2 и фотосинтетически активного 3 излучений для дуговой ксеноновой трубчатой лампы с водяным охлаждением.

ностью между электрической мощностью и интегральным лучистым потоком лампы.

Из приведенных данных видно, что лучистый поток лампы составляет примерно половину электрической мощности, потребляемой лампой, и что поток ИК излучения больше потока ФАР в 3 раза.

Уместно отметить, что использование спектров излучения трубчатых источников света, обычно приводимых в литературе, для определения лучистых потоков или облученностей в некоторых спектральных интервалах, вообще говоря, неправомерно. Действительно из уравнения Гершуна зависимости силы излучения от угла к оси источника [Л. 7] следует, что если поглощение в светящем объеме селективно, то спектры излучения будут зависеть от угла фотометрирования. Обычно же спектральный состав измеряется для направления, перпендикулярного оси источника. Очевидно, это положение справедливо и для ламп с водяным охлаждением, поскольку разнонаправленные излучения будут проходить в селективно поглощающей воде различные пути. Например, вычисления, выполненные по спектру ксеноновой лампы с водяным охлаждением, дали отношение потоков в областях 700—1 200 нм и 380—700 нм равное 4, а на самом деле, оно составило 3, согласно представленным выше измерениям.

Лампа «холодного» света (рис. 2) представляет собой дуговую ксеноновую трубчатую лампу с водяным охлаждением, имеющую следующие конструктивные элементы: кварцевую колбу 1, светящий объем 2, электроды 3, рубашку водяного охлаждения 4, воду 5, флан-

Результаты измерений представлены на рис. 1. Рассчитанные по этим данным лучистые потоки интегрального и инфракрасного излучений, а также ФАР составили соответственно 3,2; 2,4 и 0,8 квт. Мощность, отводимая водой, фиксировалась с помощью двух термометров (на входе и выходе воды из рубашки водяного охлаждения) и расхода домера и составила 2,6 квт. Как видно, это с точностью до 3% совпадает с раз-

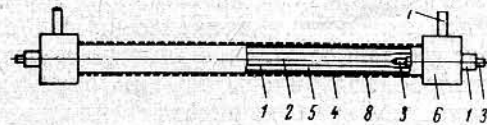


Рис. 2. Общий вид ксеноновой лампы «холодного» света.

цы 6 и патрубки 7 водяного охлаждения. По всей наружной поверхности рубашки 4 нанесено интерференционное покрытие — теплофильтр 8, который пропускает видимое и отражает ИК излучение. Последнее, участвуя в многократных отражениях, может быть в какой-то мере поглощено. Экспериментальные образцы ламп имели покрытие, состоящее из семи чередующихся слоев ZnS и MgF<sub>2</sub> с наружным слоем TiO<sub>2</sub>. Указанные вещества были нанесены на трубку методом испарения в вакууме, причем для равномерности покрытий трубкам было придано вращательное движение в продольной и поперечной плоскостях. Кривые силы интегрального и ИК излучений, а также ФАР «холодной» лампы приведены на рис. 3, а зависимость спектрального коэффициента пропускания теплофильтра от длины волны при нормальном падении лучей, измеренная для плоского контрольного образца, — на рис. 4. Как видно из рис. 1 и 3, интенсивность ИК излучения значительно уменьшилась. Измерения были проведены для семи экспериментальных образцов «холодных» ламп по той же методике в одинаковых условиях. Полученные параметры «холодных» ламп приведены в таблице. Для сравнения там же даны характеристики обычной дуговой трубчатой ксеноновой лампы с водяным охлаждением (типа ДКСТВ-6000). Из таблицы видно, что лучистый поток ФАР для некоторых образцов «холодных» ламп меньше потока обыч-

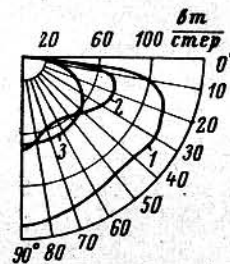


Рис. 3. Кривые силы интегрального 1, инфракрасного 2 и фотосинтетически активного 3 излучений для ксеноновой лампы «холодного» света.

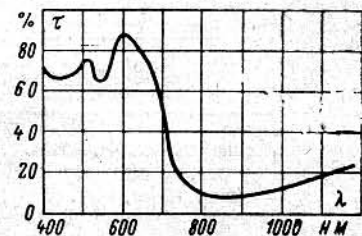


Рис. 4. Зависимость спектрального коэффициента пропускания плоского контрольного образца интерференционного покрытия при нормальном падении лучей от длины волны.

ных ксеноновых ламп на 12%, для других же образцов эти потоки практически совпадают. Однако указанное отличие заметно меньше того, которое получилось бы при однократном падении излучения на интерференционные покрытия. В этом случае поток ФАР определен бы уравнением

$$F_{\text{ФАР}}^* = N \int_{380}^{700} \varphi(\lambda) \tau_{\text{и}}(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

где  $F_{\text{ФАР}}^*$  — поток лампы с интерференционным покрытием в случае полного поглощения излучения сразу же после первого отражения от фильтра и при условии, что коэффициент пропускания покрытия  $\tau_{\text{и}}(\lambda)$  не зависит от угла падения излучения;  $\varphi(\lambda)$  — спектральная плотность излучения ксеноновой лампы в относительных единицах;  $N$  — коэффициент перехода от относительных единиц к абсолютным, определенный по результатам фотометрирования ксеноновой лампы.

Отличие  $F_{\text{ФАР}}^*$  от потока ФАР лампы без покрытия служит мерой качества нанесенного фильтра в пропускаемой им области спектра. В нашем случае, как видно из таблицы, качество самих фильтров было далеко от идеального. Таким образом, в области полосы пропускания в случае фильтра оболочки характеристика фильтра может измениться только в лучшую сторону, т. е. такой фильтр будет пропускать больше, чем может само покрытие. Это же обстоятельство, но уже отрицательно, оказывает влияние на эффективность спектральной коррекции в области полосы отражения фильтра. Тем не менее коррекция в ИК области была довольно эффективна. Так, для образцов 5, 7 и 8 спектральный состав стал таким, что отношение лучистых потоков ИК излучения и ФАР близко к единице, т. е. уменьшилось почти в 3 раза, а вообще говоря,

возможно получение источников с различным содержанием ИК в потоке (см. таблицу). Оценить по этим данным влияние толщины слоя охлаждающей воды практически нельзя, поскольку спектральные характеристики контрольных образцов различных трубок значительно отличаются друг от друга и имеющиеся различия в слое воды не являются определяющими. Отличия в мощности, потребляемой от сети, для «холодных» и обычных ламп были не более 1,5%, что вполне могло явиться результатом погрешностей измерения. Очевидно, отражение излучения обратно в плазму ряда практически не изменяет его электрических характеристик.

Следует отметить влияние сдвига спектральных характеристик интерференционного теплофильтра с изменением угла падения света на формирование спектрально-пространственного распределения излучения «холодной» лампы, точный расчет которого является весьма трудной задачей [Л. 5]. По кривым интенсивности излучения образцов 2, 5, 7 и 8 были построены зависимости отношений потоков ИК излучения и ФАР в малых телесных углах  $\Delta F_{\text{ИК}}/\Delta F_{\text{ФАР}}$  от угла к оси лампы  $\alpha$ , представленные на рис. 5. Как видно из рисунка, эти отношения в пределах  $\alpha$  от 45 до 90° имеют отклонения от соответствующих средних значений не более чем на 20%. При дальнейшем уменьшении угла эти отношения сильно возрастают. Однако потоки интегрального излучения, заключенные в телесном угле в пределах 45—90°, составляют 0,7—0,8 от потоков «холодных» ламп, что было рассчитано по их кривым силы излучения. Таким образом, разнонаправленные излучения, составляющие основную часть лучистого потока, с точностью до 20% оказываются одинаково спектрально скорригированными.

Параметры	Номер образца							
	ДКСТВ-6000	2	3	4	5	6	7	8
Мощность лампы, <i>квт</i> . . . . .	5,9	6,0	5,9	6,0	5,9	6,0	6,0	6,0
Внутренний диаметр рубашки водяного охлаждения, <i>мм</i> . . . . .	21	20	22	16	25	22	25	21
Разность температур охлаждающей воды на входе и выходе, °С . . . . .	3,5	5,2	4,6	4,5	5,5	5,0	5,4	5,1
Мощность, отдаваемая водой, <i>квт</i> . . . . .	2,6	4,3	3,8	3,8	4,6	4,2	4,5	4,2
Интегральный лучистый поток, <i>квт</i> . . . . .	3,2	1,6	2,1	2,2	1,4	2,0	1,5	1,6
Разность мощности лампы и интегрального потока, <i>квт</i> . . . . .	2,7	4,4	3,8	3,8	4,5	4,0	4,5	4,4
Поток ИК излучения, <i>квт</i> . . . . .	2,4	0,9	1,4	1,4	0,8	1,3	0,8	0,9
Поток ФАР, <i>квт</i> . . . . .	0,8	0,7	0,7	0,8	0,7	0,8	0,7	0,8
Отношение потока ИК излучения к потоку ФАР . . . . .	3,0	1,3	2,0	1,8	1,1	1,6	1,1	1,1
Поток ФАР для идеальных условий, <i>квт</i> . . . . .	—	—	0,5	—	0,5	—	0,5	0,5

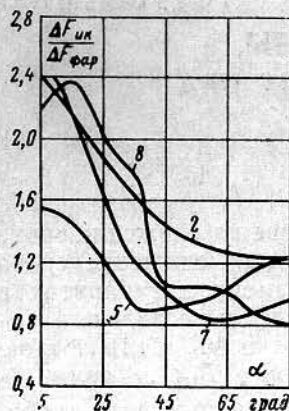


Рис. 5. Зависимость экспериментально полученных отношений  $\Delta F_{ИК}/\Delta F_{ФАР}$  от угла  $\alpha$  для нескольких образцов ламп «холодного» света (2, 5, 7, 8).

Проведенные эксперименты показали целесообразность промышленной разработки ксеноновых ламп со спектральной коррекцией с помощью интерференционных фильтров-оболочек. При создании таких ламп можно рекомендовать следующий возможный способ оценки надбавки прозрачности  $\Delta\tau$  [Л. 5] интерференционного фильтра-оболочки в случае, когда внутри него находятся излучающий, но не поглощающий цилиндрический объем  $I$  и поглощающая среда  $2$  (рис. 6, вариант III).

На рис. 6 изображены нормальные к оси ( $\alpha=90^\circ$ ) сечения трех цилиндрических систем. Первая представляет собой светящийся объем диаметром  $z$  с коэффициентом поглощения собственного излучения  $k$ . Вторая — цилиндр того же диаметра, заполненный только поглощающим веществом  $2$  с тем же  $k$  и имеющий прозрачную светящую ось  $1$ . Третья — интересующая нас система, характеризующая  $\Delta z$  и  $k\Delta z$ . Линиями во всех случаях изображены проекции лучей, имеющих один и тот же угол  $\alpha$ . Полагаем, как и в [Л. 5], что можно считать многократно отраженные лучи идущими по пути первичных лучей. Очевидно, что многократно отраженные лучи, проходящие через ось симметрии, во всех трех случаях будут проходить одинаковые оптические толщины:

$$(kz)_1 = (kz)_2 = (k\Delta z)_3. \quad (2)$$

Для первого случая все отраженные неосевые лучи будут проходить меньшие оптические толщины, чем осевые, и, следовательно, меньше поглощаться.

Во втором случае неосевых лучей нет. В третьем случае все неосевые лучи будут проходить большие оптические толщины, чем осевые, и будут больше поглощаться. Отсюда ясно, что при одинаковых  $\tau_H$

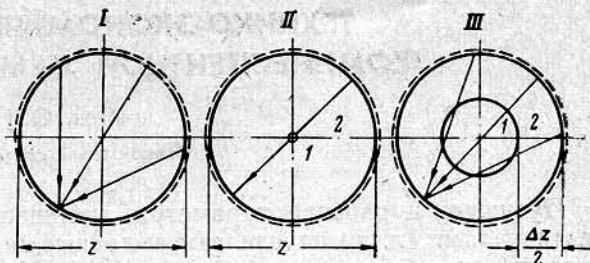


Рис. 6. Поперечные сечения трех цилиндрических светящихся систем. Пунктир — интерференционное покрытие.

вые, и будут больше поглощаться. Отсюда ясно, что при одинаковых  $\tau_H$

$$\Delta\tau_3 < \Delta\tau_2 < \Delta\tau_1, \quad (3)$$

т. е. система III будет иметь наименьшую надбавку прозрачности.

Для системы I  $\Delta\tau$  было определено в [Л. 5], а для системы II она выводится просто, поскольку отпадает необходимость интегрирования по углам в поперечной плоскости:

$$\Delta\tau_2(\alpha) = \frac{\tau_H}{\frac{1}{(1-\tau_H)} e^{kz/\sin\alpha} - 1}. \quad (4)$$

Имея  $(k\Delta z)_3$  и вычислив  $\Delta\tau_2(\alpha)$  при  $(kz)_2 = (k\Delta z)_3$ , можно утверждать, что фильтр в системе III окажется более эффективным, т. е. с меньшим  $\Delta\tau$ .

Авторы выражают благодарность Г. А. Чижик и Ф. А. Дойниковой за помощь в экспериментальной работе, а также В. М. Лебедеву за обсуждение результатов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Тооминг Х. Г., Гуляев Б. И. Методика измерения фотосинтетически активной радиации. М., «Наука», 1967.
2. Pfund A. M. JOSA, 1939, № 2.
3. Ильина А. А. УФН, 1946, вып. 3, 4.
4. George J. Koch. Патент США № 2552184 от 8 мая 1951 г.
5. Филипповский Ю. Н. «Светотехника», 1968, № 7.
6. Маршак И. С., Васильев В. И., Тохадзе И. Л. «Светотехника», 1963, № 11.
7. Гершун А. А. Избранные труды по фотометрии и светотехнике. М., Физматгиз, 1958.