

когда 50% наблюдателей не замечают слепящего действия. Чем меньшее число наблюдателей ( $\eta$  %) ощущает слепящее действие, тем более комфортной является установка.  $S$  и  $\eta$  связаны линейной зависимостью, которая графически представлена на рис. 3.

Ниже приводятся рекомендуемые величины  $S$  для различных условий:

1. Больницы (в поле зрения лежащих больных)  $S=10$ .

2. Административные помещения, школы, мастерские (в поле зрения работающего)  $S=-25$ .

3. Административные помещения, школы, мастерские (в поле зрения при любом направлении линии зрения)  $S=70$ .

4. Цехи с грубой зрительной работой, склады, котельные и т. п.  $S=150$ .

Для быстрого определения ослепленности в повседневной практике удобно пользоваться номограммой, приведенной на рис. 4. Способ использования номограммы для величин  $B=-1000$  нт,  $\omega=1$  стер,  $B_{\phi}=100$  нт,  $K=0,5$  указывает

зан пунктирной линией. Результирующее значение ослепленности  $S=50$ . Определение  $S$  включено в государственный стандарт Чехословакии «Ослепленность, ее определение и предотвращение».

## Литература

1. Commission Internationale de l'Éclairage, Compte rendu des séances, 1928.
2. Fischer Dr. D., Lichttechnik, 1958, № 10; Hopkinson R. G., Bradley R. C., III. Eng., 1958, № 53.
3. Ferguson H. M., Stevens W. R., Trans IES, London, 1956, № 21; Ferguson H. M., Reeves J., Stevens W. R., Gen. El. Journ., 1953, июль; Кравков С. В., Глаз и его работа, АН СССР, 1950; Schöber H., Das Sehen, Markewitz, Mühlhausen Thür., 1950.
4. Netušil Ja., Problematika oslnění, Energetický ústav, Praha, 1956.
5. IES Lighting Handbook, III. Eng. Soc., New York, 1952.
6. Commission Internationale de l'Éclairage, Compte rendu des séances, 1955.
7. Guth S. K., III. Eng., 1955, № 50.

## РОЛЬ ЛИНИИ 1850 Å В СВЕТОВОЙ ОТДАЧЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ЛАМП

Канд. техн. наук Ф. А. БУТАЕВА

Всесоюзный светотехнический институт

В большинстве работ, посвященных люминесцентным лампам, утверждается, что люминофор возбуждается практически только линией 2537 Å [Л. 1]. В противоположность этому в ранее опубликованных работах указывалось на существенную роль линии 1850 Å в возбуждении люминофоров [Л. 2]. В этих работах определялись относительные чувствительности люминофоров к линиям 1850 и 2537 Å и косвенно рассчитывались квантовые выходы люминесценции. Было показано, что чувствительность ряда люминофоров к линии 1850 Å более чем в 2 раза превышает их чувствительность к линии 2537 Å [Л. 3].

В настоящей работе проведены прямые абсолютные измерения квантового и энергетического выхода для ряда применяемых в лампах люминофоров при возбуждении их линиями 1850 и 2537 Å\*. Люминофоры, кроме

циркония, изготавливались на заводе Красный химик. Для каждого люминофора определялась световая отдача, для чего измерялась абсолютная величина светового потока и в абсолютных единицах при помощи термостолбика измерялась энергия излучения, возбуждающего люминофор. Для галофосфата кальция (ГФК) по спектральным кривым рассчитаны квантовое отношение<sup>1</sup> и средняя относительная видность. Коэффициенты поглощения и отражения резонансного излучения взяты из литературных данных [Л. 4]. Рассчитанные квантовые выходы люминесценций представлены в табл. 1.

Данные табл. 1 находятся в удовлетворительном согласии с данными, полученными косвенным методом, и подтверждают выводы о возможности получения квантовых выходов, превышающих единицу [Л. 3].

Для вычисления ожидаемой световой отдачи ламп, изготовленных с люминофорами, для которых получены квантовые выходы,

\* Квантовый выход — отношение числа квантов люминесценции к числу квантов возбуждающего излучения. В определении квантового выхода люминофоров принимала участие инж. Е. П. Дьякова.

<sup>1</sup> Квантовое отношение — отношение энергии усредненного кванта люминесценции к энергии кванта возбуждающего излучения.

Таблица 1

Люминофор	Энергетический выход		Квантовый выход	
	1850 Å	2537 Å	1850 Å	2537 Å
Виллемит (217) . . . . .	0,95	0,40	2,60	0,83
Галоfosфат-кальция № 34 . . . . .	0,73	0,31	2,20	0,74
Магний-вольфрамат . . . . .	0,31	0,35	0,82	0,70
Цинк-бериллий-силикат . . . . .	0,34	0,20	1,10	0,50

надо знать абсолютные интенсивности обеих резонансных линий. При помощи термостолбика, градуированного в абсолютных единицах, были определены интенсивности линий 1850 и 2537 Å в лампе<sup>1</sup>. На основании этих измерений было установлено, что в люминесцентных лампах на резонансное излучение приходится 55% от подводимой мощности. В лампе мощностью 15 вт это составляет 8,2 вт. При этом на линию 1850 Å приходится 1,9 вт, а на линию 2537 Å — 6,3 вт. Для линии 2537 Å полученные результаты хорошо согласуются с литературными данными [Л. 1]. Несмотря на небольшой процент энергии, приходящейся на линию 1850 Å (всего около 13% от подводимой к лампе мощности), роль этой линии в возбуждении люминофоров весьма существенна благодаря большой чувствительности к ней люминофоров.

Зная квантовые выходы люминофоров и интенсивность резонансных линий, можно рассчитать ожидаемую световую отдачу люминесцентных ламп по излучаемому световому потоку [Л. 1]:

$$F = 683 \cdot CR \alpha \eta I;$$

$$IR\eta = (I_1 R_1 \eta_1)_{1850\text{Å}} + (I_2 R_2 \eta_2)_{2537\text{Å}},$$

где  $\alpha$  — коэффициент, учитывающий неполное поглощение резонансного излучения; (значения  $\alpha$  для линии 2537 Å взяты из литературных данных [Л. 4], для линии 1850 Å значения  $\alpha$  приняты такими же, так как в литературе их нет и нами они не измерялись);

$C$  — средняя относительная видность;

$I_1, I_2$  — интенсивность резонансных линий, вт;  $R_1, R_2$  — квантовые отношения, соответствующие линиям 1850 Å и 2537 Å;

$\eta_1, \eta_2$  — квантовые выходы люминесценции.

<sup>1</sup> В определении абсолютных интенсивностей резонансных линий принимал участие инж. Г. Е. Голубков.

Подставив численные значения указанных величин для лампы мощностью 15 вт с применением люминофора ГФК и учитывая возбуждение двумя резонансными линиями, получим световой поток:  $F = 683 \cdot 0,53 \cdot 0,9 \times [(1,9 \cdot 0,033 \cdot 2,2)_{1850\text{Å}} + (6,3 \cdot 0,45 \cdot 0,74)_{2537\text{Å}}] = 450 + 670 \text{ лм}$ . Световая отдача будет равна  $H = \frac{450 + 670}{15} = 75 \text{ лм/вт}$ .

К полученному таким образом значению световой отдачи 75 лм/вт надо прибавить примерно 5 лм/вт за счет видимого излучения [Л. 5]. Таким образом, рассчитанное значение световой отдачи люминесцентной лампы мощностью 15 вт составляет 80 лм/вт, а измеренное — с тем же люминофором в лучшем случае равно 49 лм/вт. Таким образом, измеренная величина световой отдачи случайно согласуется с рассчитанной при учете одной только линии 2537 Å (45+5) лм/вт, но в 1,5 раза меньше рассчитанной при учете возбуждения двумя линиями. Это случайное совпадение и явилось основанием для заключений о несущественной роли линии 1850 Å.

Все зависит от того, какие значения квантовых выходов используются при расчете световой отдачи ламп. Обычно используются квантовые выходы, измеренные для образцов люминофоров, помещенных в кювету до их подготовки к нанесению на стенки лампы. На самом деле надо использовать квантовые выходы слоя люминофора, нанесенного на стенки лампы, для которой измерена световая отдача. В этом случае будут учтены все потери яркости люминофора, связанные с нанесением, вакуумной обработкой и влиянием тренировки лампы разрядом. Мы будем называть первичными образцы люминофоров, не подвергшиеся обработке и нанесению.

Для сравнения квантовых выходов первичных образцов люминофоров и люминофорных слоев на стенках лампы достаточно измерить даваемые ими световые потоки при одной и той же энергии возбуждения. Эти измерения легче всего провести для линии 2537 Å, возбуждая люминофор в светомерном шаре излучением от мощной кварцевой лампы с соответствующими фильтрами.

Применялся светомерный шар диаметром 150 мм. В одно из отверстий шара вставлялся держатель с кюветой или с частью стенки трубки от лампы с нанесенным люминофором тех же размеров, что и кювета. Облучаемая поверхность люминофора в обоих случаях была равна 10×20 мм<sup>2</sup>.

Различие в излучении светового потока от части стенки трубки и от кюветы было в том, что в случае тонкого слоя (трубка) люминофор излучал и на просвет и на отражение, в толстом слое (кювета) — только на отражение, но в обоих случаях измерялся полный световой поток, создаваемый люминофором.

Источником ультрафиолетового излучения была кварцевая лампа ПРК-2. Люминофор облучался отраженным от внутренней поверхности шара рассеянным ультрафиолетовым излучением. Линия 2537 Å отфильтровывалась комбинированным фильтром (Шотта UG-5 и раствор Бекшрема  $\text{CoSO}_4 + \text{NiSO}_4$  в кварцевой кювете). В том случае, когда измерялась яркость внутренней поверхности шара, применялся тубус-фотометр.

Световой поток измерялся корригированным висмутовым фотоумножителем. На рисунке представлена схема измерения светового потока.

Опыты проводились с первичными образцами люминофора ГФК в кювете с тем же люминофором на куске трубы, вырезанной из лампы, для которой была измерена световая отдача, и, наконец, с тем же люминофором, снятым с этой же лампы и помещенным в кювету. Результаты измерений сведены в табл. 2.

Таблица 2

Значение светового потока, %

Метод измерения	Люминофор в кювете			Люминофор на трубке	
	первичный образец	с лампы до вакуумной обработки	с лампы после 3 ч горения	с лампы до вакуумной обработки	с лампы после 3 ч горения
ФЭУ ...	100	90	63	90	60
Тубус-фотометр .	100	—	—	—	59

Данные табл. 2 свидетельствуют о резком спаде светового потока, излучаемого люминофором на трубке всего лишь после 3 ч горения лампы по сравнению с первичным образцом. Отметим, что световые потоки от тонкого и толстого слоев оказались практически одинаковыми. Поскольку энергия возбуждения одна и та же во всех случаях, то можно считать, что квантовый выход люминофора снижается во столько же раз, во сколько снижается световой поток, т. е. примерно в 1,6 раза. Квантовый выход первичного образца ГФК определялся по отношению к эталонному образцу люминофора и оказался равным 0,71. Тогда световая отдача лампы при воз-

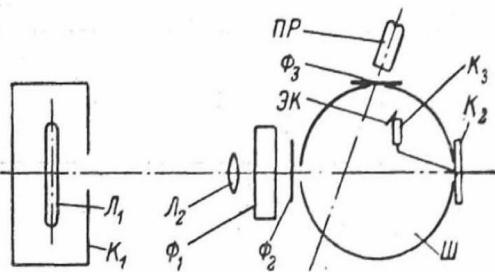


Схема измерения светового потока.

$L_1$  — лампа ПРК;  $K_1$  — кожух;  $L_2$  — кварцевая линза;  $\Phi_3$  — фильтр, не пропускающий ультрафиолетовое излучение;  $\Phi_1\Phi_2$  — комбинированный фильтр, выделяющий линию 2537 Å;  $W$  — светомерный шар;  $K_2$  — держатель для кюветы;  $K_3$  — кювета или кусок трубы;  $ЭК$  — экран;  $PR$  — приемник излучения (измерительный прибор ФЭУ или тубус-фотометр).

буждении люминофора только одной линией 2537 Å будет равна:

$$H = \frac{683 \cdot 0,53 \cdot 0,9 \cdot 6,3 \cdot 0,45 \cdot 0,45}{15} = 27 \text{ лм/вт.}$$

Надо иметь в виду, что подсчитанная световая отдача несколько завышена, так как не учтены потери при многократных отражениях в лампе. Если добавить к 27 лм/вт еще 5 лм/вт за счет видимого излучения разряда, мы получим 32 лм/вт, что на 16 лм/вт, или на 30%, ниже измеренной световой отдачи ламп. Указанное расхождение нельзя объяснить, если не учитывать влияние линии 1850 Å. Нами была сделана попытка рассчитать ожидаемое увеличение световой отдачи за счет линии 1850 Å в тех же условиях.

Применить светомерный шар для измерения светового потока люминофора, возбужденного линией 1850 Å, практически невозможно из-за отсутствия мощного источника линии 1850 Å и фильтров, выделяющих эту линию. Поэтому подсчеты велись по аналогии с линией 2537 Å, основываясь на яркостях люминофоров, измеренных на отражение, в вакуумном монохроматоре, выделяющем линии 1850 и 2537 Å каждую в отдельности.

В табл. 3 приведены результаты измерения яркости люминофора, проведенные при помощи вакуумного монохроматора. Данные табл. 3 свидетельствуют о резком спаде яркости люминофора в лампе для обеих линий.

На основании измерений яркости люминофора для двух линий примем приближенно, что световой поток, создаваемый линией 1850 Å, изменяется так же, как и поток, создаваемый линией 2537 Å. Соответственно

Таблица 3

Люминофор ГФК	$B 1 850 \text{ \AA}$ , %	$B 2 537 \text{ \AA}$ , %
В кювете		
Регенирированный эталон . . . . .	100	100
Снятый с трубки до изготовления лампы . . . . .	93	90
Снятый с лампы после 3 ч горения (измеренное значение световой отдачи составляет $H=49 \text{ лм/вт}$ ) . . . . .	54	50
Снятый с лампы после 100 ч горения . . . . .	47	40
На трубке		
До запайки . . . . .	70	60
Лампы после 3 ч горения ( $H=49 \text{ лм/вт}$ ) . . . . .	50	40

будем считать, что квантовые выходы люминесценции для обеих линий изменяются практически одинаково. Пользуясь данными табл. 1, получим, что квантовый выход для возбуждения линий  $1850 \text{ \AA}$  должен после обработки стать равным 1,3. Тогда световая отдача будет равна:

$$H = \frac{683 \cdot 0,53 \cdot 0,9 \cdot 1,9 \cdot 0,33 \cdot 1,3}{15} = 18 \text{ лм/вт.}$$

Таким образом, проведенные эксперименты и расчеты по-новому объясняют, чем определяется величина световой отдачи люминесцентных ламп. Как видно из расчета, световая отдача люминесцентной лампы мощностью 15 вт, равная  $49 \text{ лм/вт}$ , создается обеими линиями и видимым излучением разряда следующим образом:

1. За счет линии  $2,537 \text{ \AA}$   $H = 27 \text{ лм/вт}$ , что составляет  $55\%$ .
2. За счет линии  $1850 \text{ \AA}$   $H = 18 \text{ лм/вт}$ , что составляет  $37\%$ .
3. За счет видимого излучения  $H = 5 \text{ лм/вт}$ , что составляет  $8\%$ .

Итого:  $50 \text{ лм/вт}$   $100\%$

Измеренные и рассчитанные значения световой отдачи хорошо согласуются (результаты измерений  $48-49 \text{ лм/вт}$ ). Эти выводы подтвердили ранее высказанное нами предположение о существенной роли линии  $1850 \text{ \AA}$  в возбуждении люминофора в люминесцентных лампах. Результаты нашей работы резко отличаются от результатов аналогичной

работы Джерома [Л. 5]. В этой работе автор рассчитывает квантовый выход люминофора в лампе отношением величин измеренной световой отдачи к рассчитанной, принимая, что люминофор в лампе возбуждается только одной линией  $2 537 \text{ \AA}$ . В работе Джерома приведена таблица, где даны значения квантовых выходов для ряда смесей люминофоров. В ней представлены результаты измерений квантового выхода первичных образцов люминофоров и вычисленные значения квантовых выходов люминофора в лампе. Эти данные мало отличаются друг от друга, только для двух люминофоров расхождение доходит до  $15\%$ , причем для некоторых смесей люминофоров квантовый выход в лампе больше, чем для первичных образцов. Неясно, что может увеличить квантовый выход люминофора в лампе, если люминофор возбуждается только линией  $2 537 \text{ \AA}$ .

Результаты настоящей работы свидетельствуют об ошибочности метода, использованного Джеромом, и указывают на то, что яркость люминофора в лампе существенно снижается и что люминофор не используется в соответствии с его большим начальным квантовым выходом.

В настоящее время люминесцентные лампы, выпускаемые в СССР и других странах, имеют световую отдачу значительно ниже возможной и далекую от предельного значения. Для повышения световой отдачи выпускаемых ламп особое внимание необходимо обратить на технологию изготовления ламп, в том числе на способ нанесения слоя люминофора (однородность величины зерна, плотность размещения кристаллов на поверхности слоя).

Выражаю глубокую благодарность проф. В. А. Фабриканту за помощь и ценные советы при проведении работы.

#### Литература

1. Tayor R., Barnes B., JOSA, 1939, т. 29; Bitter F., Waymouth G., Journ. Appl. Phys. 1956, т. 27.
2. Meister G., Nagy R., JOSA, 1946, т. 36.
3. Бутаева Ф. А. и Фабрикант В. А., Изв. АН СССР, серия физики, 1949, т. XII, № 2.
4. Шкловер Д. А., ЖТФ, 1947, т. XVII, вып. II.
5. Jegome C. W., Journ. Electrochem. Soc., 1953, т. 100.