

## ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО ОСВЕТИТЕЛЯ НА РАДИАЛЬНЫЙ ПРОФИЛЬ ЯРКОСТИ РАЗРЯДА ИМПУЛЬСНОЙ ЛАМПЫ НАКАЧКИ

В. Н. Макаров и Ю. Г. Басов

Экспериментально исследовано влияние лазерного осветителя тесной конструкции на радиальный профиль яркости разряда и спектральные характеристики импульсной лампы накачки. Обнаружено контрагирование разряда под влиянием осветителя. Влияние осветителя на интенсивность излучения ослабевает с уменьшением длины волны, усиливается с ростом удельной мощности разряда, происходит через максимум и затем уменьшается.

Вопрос о влиянии лазерного осветителя на характеристики источника накачки исследовался в нескольких работах [1-6]. В [1] теоретически предсказано увеличение температуры и яркости разряда под влиянием осветителя, а в [2, 3] проведена количественная оценка роста этих величин, причем показано, что яркость при определенных условиях увеличится в несколько раз.

В [4] приведены результаты экспериментальных исследований радиального распределения яркости разряда по сечению лампы. При помещении источника света с размерами разрядного промежутка  $\varnothing 18 \times 200$  мм и начальным давлением ксенона 200 или 400 мм рт. ст. в зеркальный осветитель происходило более чем двукратное увеличение яркости разряда на длинах волн 250 и 490 нм. С ростом  $\lambda$  влияние осветителя на рост яркости ослабевало и для  $\lambda=800$  нм уже не сказывалось, что объяснено повышением черноты плазмы с увеличением длины волны. Измерения, проведенные при средней за время вспышки мощности разряда  $P_{уд}=60 \div 200$  кВт/см<sup>3</sup>, дали примерно одинаковые результаты. Вывод об уменьшении прироста яркости разряда с ростом  $\lambda$  на основе теоретического рассмотрения делается и в работе [2]. В то же время в исследованиях спектрально-временных характеристик импульсной лампы, помещаемой в различные типы осветителя [5], не обнаружено изменение энергии излучения. Воздействие осветителя проявилось лишь на уменьшении фронта нарастания импульса излучения (на 15-20%) и на увеличении длительности вспышки на уровнях 0.35 и 0.1 от пикового значения силы света (на 15%). При этом различие конструкций использованных в работе осветителей сказывалось одинаковым образом.

Заметное увеличение энергии излучения лампы при помещении ее в осветитель подтверждается результатами работы [6], полученными, как и в [4], при фотометрировании узкой щели на боковой поверхности лампы.

При удельной мощности разряда в момент максимума тока, равной  $\sim 300$  кВт/см<sup>3</sup> (лампы ИФП-800), с увеличением коэффициента отражения ( $\rho$ ) осветителя с 32 до 45 и 80% наблюдалось повышение энергии излучения соответственно на  $\sim 20$  и 50%. Грубая экстраполяция этих результатов на  $\rho=0$  дает увеличение энергии излучения в 1.5-2 раза. Увеличение средней мощности разряда (начиная со 100 кВт/см<sup>3</sup>) уменьшало относительный прирост энергии излучения лампы в осветителе

при  $\rho=0.80$  до 10% при  $P_{уд} \approx 1.5$  МВт/см<sup>3</sup> (в условиях [6] с малой индуктивностью в контуре  $L=3$  мкГ при  $C=600$  мкФ средняя за вспышку удельная мощность разряда в 2.5÷3 раза меньше удельной мощности в момент максимума тока).

Поскольку результаты цитированных работ несколько противоречивы, было интересным определить причины расхождения полученных данных и провести более полные исследования влияния осветителя на характеристики излучения источника накачки.

В исследованиях использовались импульсные лампы, наполненные ксеноном до давления 300 и 500 мм рт. ст., со следующими размерами разрядного промежутка:  $\varnothing 6.5 \times 80$  мм (ИФП 800),  $\varnothing 11.5 \times 130$  мм (ИФП 2000),  $\varnothing 6.5 \times 120$  мм и  $\varnothing 17 \times 105$  мм. Лампы двух последних типов имели П-образную форму с плоскими торцевыми окнами из оптически прозрачного кварцевого стекла. В качестве зеркального осветителя использовалась серебряная фольга с  $\rho \approx 80\%$ , плотно обернутая вокруг лампы. Регистрация излучения проводилась как с боковой поверхности всех

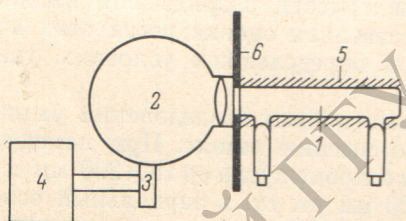


Рис. 1. Оптическая схема измерения энергии излучения, исходящего из торцевого окна П-образных ламп.

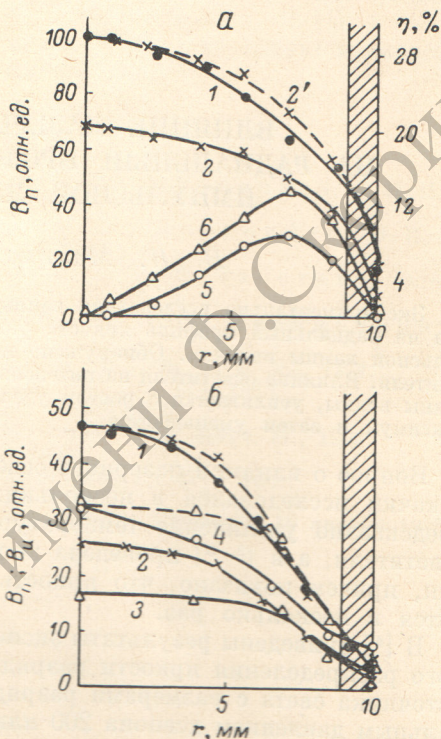


Рис. 2. Радиальное распределение интеграла яркости излучения  $V_{II}$  и пиковой яркости  $V_{II}$  излучения П-образной лампы.

*a* — для торцевого окна, *b* — для боковой поверхности. Сплошные линии: 1 — лампа в осветителе, 2 — лампа открытая; штриховые линии — приведенная яркость для открытой лампы; 3 и 4 —  $V_{II}$  соответственно для открытой лампы и лампы в осветителе; 5 и 6 — распределение величины  $\eta$  при энергии разряда 800 и 500 Дж. Заштрихованный участок определяет толщину стенки лампы.

четырех типов ламп, так и с торцов П-образных источников света. При фотометрировании боковой поверхности ламп, размещенных в осветителе, в последнем делалось отверстие в виде кольцевой полоски шириной 2 мм по всему диаметру. Использовался разрядный контур с параметрами:  $C=700$  мкФ,  $L=50$  мкГ,  $U=0.5 \div 2$  кВ. Длительность вспышки менялась от 350 до 550 мкс.

Распределение яркости разряда по сечению лампы исследовалось с помощью фотометра ФИЛ-М, оптическая схема которого позволяла выделять поток излучения с площадкой диаметром 0.5 мм на поверхности лампы при расстоянии ее до объектива 100 мм, что при размере объектива  $\varnothing 30$  мм определяет достаточно малый телесный угол фотометрируемой зоны разряда [7]. В этом случае разрешающая способность прибора возрастает с уменьшением толщины слоя разряда. Для ламп открытых и в осветителе было снято распределение яркости по радиусу со стороны торцевых окон и со стороны боковой поверхности ламп.

Зависимость энергии излучения от удельной мощности разряда в различных спектральных интервалах определялась на оптической установке,

описанной в [6]. В качестве приемников излучения использовались фотоэлементы Ф 7, Ф 13 и Ф 5 с фильтрами СС-4 и КС-18, с помощью которых исследованы характеристики излучения ламп в спектральных интервалах 200–270 нм, 400–650 нм и 700–1100 нм. Измерение энергии излучения с торца П-образных ламп осуществлялось по схеме, приведенной на рис. 1. Торце лампы 1 приставлялся к входному окну калориметрического шара 2 с термоэлементом 3 и микроампервольтметром 4 типа Ф 116/1. Для исключения засвечивания от боковой поверхности лампы при отсутствии осветителя 5 перед входным окном шара помещалась диафрагма 6. Рассчитанные погрешности измерения распределения яркости по сечению лампы и сравнительных значений энергии излучения лампы в различных спектральных интервалах не превышали 5%, а энергии излучения с торца П-образных ламп — 10%.

На рис. 2 приведено распределение яркости по радиусу со стороны торцевого окна и со стороны боковой поверхности через щель в осветителе для энергии разряда 800 Дж ( $P_{\text{уд.}} = 30 \text{ кВт/см}^2$ ) лампы с размерами разрядного промежутка  $\varnothing 17 \times 105 \text{ мм}$  и ксеноновым наполнением 300 мм рт. ст. Под воздействием осветителя яркость разряда возрастает по всему сечению трубки. При этом для торцевого излучения пиковая яркость на оси возрастает в 1.4 раза, а для бокового в 1.8 раза вследствие различия оптической толщины слоя разряда при фотометрировании лампы с торца и с боковой поверхности. Штриховые линии, полученные путем приведения яркости открытой лампы к этой же величине лампы в осветителе (при умножении на величину, равную отношению яркостей на оси лампы), показывают наличие контрагирования столба разряда. При одинаковых параметрах разряда контрагирование в меньшей степени проявляется для пиковой яркости ( $B_{\text{п}}$ ), чем для интеграла яркости ( $B_{\text{и}}$ ). На рис. 2 приведено распределение величины  $\eta$ , определяемой отношением разницы в значениях  $B_{\text{п}}$  для кривых 1 и 2' к данным кривой 2' для двух энергий разряда 500 Дж (кривая 5) и 800 Дж (кривая 6). По кривым 5 и 6 можно условно говорить о том, что степень контрагирования увеличивается с уменьшением энергии разряда. Яркость имеет определенные значения по толщине стенки как за счет свечения пристеночной зоны разряда, попадающей в телесный угол при фотометрировании стенки, так и вследствие свечения оболочки за счет люминесценции кварца и рассеяния им излучения разряда. Очевидно, что помещение лампы в осветитель эквивалентно увеличению вкладываемой в нее мощности [1, 3]. При этом должен, в частности, наблюдаться рост температуры в разряде, увеличение его оптической толщины и связанное с этим заострение температурного профиля в связи с переходом к условиям лучистой теплопроводности [8]. Указанные выводы подтверждаются полученными нами результатами.

Для проведения экспериментов по влиянию осветителя на характеристики излучения в более широком интервале удельной мощности разряда была использована П-образная лампа с размерами разрядной зоны  $\varnothing 6.5 \times 120 \text{ мм}$ , наполненная ксеноном до 300 мм рт. ст., и лампы ИФП-800 и ИФП-2000, имеющие повышенную прочность по сравнению с предыдущей лампой. На рис. 3 показаны результаты измерений яркости на оси лампы в виде отношения яркости лампы в осветителе ( $B_{\text{осв.}}$ ) к яркости открытой лампы ( $B_{\text{отк.}}$ ). Измерения проводились в областях длин волн 350–600 и 500–600 нм с использованием светофильтров самого фотометра. Как видно из рис. 3, прирост яркости разряда на оси лампы в осветителе более существен для малых удельных мощностей разряда и уменьшается с ростом  $P_{\text{уд.}}$ . Ход зависимостей для двух спектральных интервалов примерно одинаков. Более высокий прирост яркости для бокового излучения объясняется различной глубиной оптического слоя и влиянием показателя поглощения плазмы на интенсивность излучения, выходящего сбоку или из торца лампы. Для пояснения этого используем формулу яркости объемного излучателя [7]

$$B = B^0 (1 - e^{-kl}), \quad (1)$$

где  $B^0$  — яркость абсолютного черного тела при температуре объемного излучателя,  $k$  — показатель поглощения плазмы,  $l$  — глубина излучающего объема. По данным работы [6], для нашего случая при средней удельной мощности разряда 200 кВт/см<sup>3</sup> (что соответствует пиковой удельной мощности разряда в [6] 560 кВт/см<sup>3</sup>) температура плазмы открытой лампы и в осветителе составляет порядка 13.5·10<sup>3</sup> и 14.4·10<sup>3</sup> К соответственно. Это приводит к росту показателя поглощения плазмы [6] с 1.07 до 1.22 см<sup>-1</sup>.

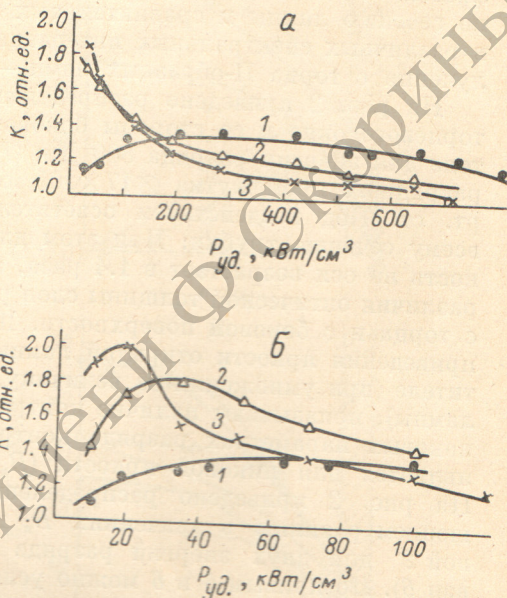
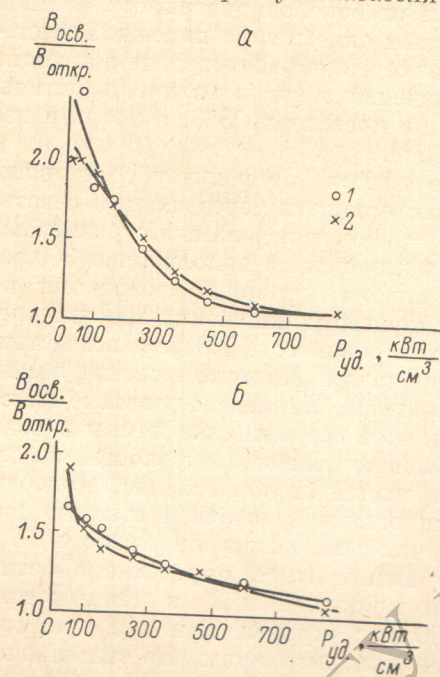


Рис. 3. Зависимость отношения  $V_{осв.}/V_{откр.}$  от средней удельной мощности разряда для торцевого окна (б) и для боковой поверхности (а).

1 — яркость излучения в области 350—600 нм, 2 — в области 500—600 нм.

Рис. 4. Зависимость отношения  $K$  энергии излучения ламп ИФП-800 (а) и ИФП-2000 (б) в осветителе и вне его для бокового излучения в спектральных интервалах длин волн от удельной мощности разряда.

1 — 220—270, 2 — 400—650, 3 — 700—1100 нм.

Глубина излучающего слоя  $l_0=0.65$  см,  $l_t=12$  см (знак «б» для бокового излучения, а «т» для торцевого). Расчет отношения

$$\gamma = \left( \frac{V_{осв.}}{V_{откр.}} \right)_б / \left( \frac{V_{осв.}}{V_{откр.}} \right)_т \quad (2)$$

с использованием формулы (1) и указанных выше данных дает значение  $\gamma=1.1$ , что хорошо согласуется с этим отношением ( $\gamma=1.14$ ), которое можно получить из рис. 3.

Для ламп ИФП-800 и ИФП-2000 с давлением ксенона 500 мм рт. ст. были получены зависимости относительного прироста яркости лампы в осветителе и вне его от удельной мощности для УФ, видимого и ИК спектральных интервалов (рис. 4). Представленные результаты позволяют увидеть общие для двух типов ламп и трех спектральных интервалов закономерности, которые могут быть частично объяснены ростом коэффициента поглощения плазмы с увеличением длины волны излучения и мощности разряда [2, 3, 6], а также неравномерным по сечению прогревом плазмы разряда под воздействием осветителя. При малых удельных мощностях разряда (менее 10 кВт/см<sup>3</sup>) влияние осветителя на характеристики излучения разряда несущественно вследствие высокой прозрачности плазмы [2, 3]. С ростом удельной мощности разряда прирост яркости

в первую очередь наблюдается для ИК излучения, затем для видимого и в последнюю очередь для УФ. В той же последовательности достигается максимум и последующий спад прироста, связанный с «почернением» плазмы разряда при высоких мощностях. При этом максимум прироста уменьшается с длиной волны и достигает  $\sim 2$  раз для ИК излучения,  $\sim 1.8$  — для видимого и  $1.3 \div 1.4$  — для УФ. Наблюдаемое явление может быть объяснено тем, что УФ излучение исходит из всего объема плазмы, а ИК излучение с поверхностных слоев, толщина которых в пределе стремится к длине свободного пробега фотона. Поверхностные слои плазмы сравнительно холодны и относительный подогрев их за счет осветителя более высок, чем у внутренних слоев плазмы.

При постоянной удельной мощности разряда с увеличением толщины фотометрируемого участка плазмы уменьшается роль поверхностных слоев плазмы в излучении всего объема. При изменении диаметра разрядного промежутка ламп должны наблюдаться изменения в ходе зависимостей прироста яркости разряда от удельной мощности в лампе. Данные рис. 4 свидетельствуют, что при увеличении диаметра ламп с 6.5 до 11.5 мм наблюдается смещение указанных зависимостей в сторону меньших мощностей. Так, для лампы ИФП-800 ( $\varnothing 6.5$  мм) влияние осветителя на прирост энергии излучения разряда становится несущественным для ИК излучения при  $P_{уд.} \approx 500$  кВт/см<sup>3</sup>, а для видимого — при  $P_{уд.} = 600 \div 700$  кВт/см<sup>3</sup>. Для лампы ИФП-2000 ( $\varnothing 11.5$  мм) это явление наблюдается при существенно меньших мощностях. Прирост яркости разряда в УФ области спектра сохраняется вплоть до разрушения лампы, составляя для ИФП-800 15  $\div$  20% при  $P_{уд.} \sim 800$  кВт/см<sup>3</sup> и 30  $\div$  35% для ИФП-2000 при  $P_{уд.} \sim 120$  кВт/см<sup>3</sup>.

Увеличение давления рабочего газа сопровождается ростом показателя поглощения плазмы разряда и следует ожидать, что это будет сказываться на приросте яркости разряда так же, как и при изменении показателя поглощения с ростом длины волны, т. е. максимум прироста яркости и его последующий спад должны наблюдаться при меньших  $P_{уд.}$  для ламп с большим давлением рабочего газа. Анализ зависимостей прироста яркости от  $P_{уд.}$  для лампы МФП 800 с давлением рабочего газа 300 мм рт. ст. (рис. 3, а) и 500 мм рт. ст. (рис. 4, а) показывает, что с ростом давления газа наблюдается смещение зависимости в сторону меньших  $P_{уд.}$ , вследствие чего при  $P_{уд.} \approx 300$  кВт/см<sup>3</sup> прирост яркости составляет приблизительно 60% для давления 300 мм рт. ст. и 30% — для 500 мм рт. ст. Значение прироста в максимуме примерно одинаково.

Исследования прироста яркости в зависимости от длины волны позволили ориентировочно выделить три мощностных диапазона работы лампы. При удельной мощности разряда менее 50 кВт/см<sup>3</sup> (рис. 4, б) прирост энергии излучения лампы под влиянием осветителя растет с длиной волны, а при мощности разряда более 200 кВт/см<sup>3</sup> зависимость носит обратный характер. В диапазоне  $P_{уд.} = 50 \div 200$  кВт/см<sup>3</sup> ход указанных зависимостей определяется конструктивными параметрами ламп (например, диаметром разрядной зоны и давлением газа) и говорить о каких-либо общих тенденциях в их поведении затруднительно.

С некоторым приближением можно считать, что энергия излучения, исходящего из торцевого окна П-образной лампы, эквивалентна энергии излучения, падающего на электрод в прямой трубчатой лампе. В связи с этим по схеме, приведенной на рис. 1, измерялась энергия излучения с торца П-образной лампы в осветителе и вне его. На рис. 5 приведены зависимости энергии излучения лампы в осветителе (кривая 2) и вне его (кривая 1) от энергии разряда. Если закрыть противоположное от термоэлемента торцевое окно отражающей фольгой (кривая 3), то энергия излучения возрастает. Относительное увеличение энергии излучения, исходящего из торцевого окна лампы при помещении ее в осветитель, составляет  $\sim 3$  раза. Это значительно больше, чем для данных рис. 3 и 4, и объясняется различием условий эксперимента. Оптическая схема, представленная на рис. 1, позволяет регистрировать излучение, исходящее из вну-

тренних областей лампы (как и для данных, приведенных на рис. 3 и 4), и излучение, отраженное от осветителя. Последнее обстоятельство равносильно увеличению телесного угла, под которым излучение попадает в термозлемент. Отношение энергии излучения, попадающего на электрод лампы, к энергии разряда составляет  $\sim 0.37\%$  для открытого источника света и  $\sim 1.1\%$  в осветителе. Таким образом, в осветителе на электроды лампы попадает в 3 раза больше энергии излучения, чем на электроды лампы вне осветителя. Это должно сказаться на долговечности источников света.

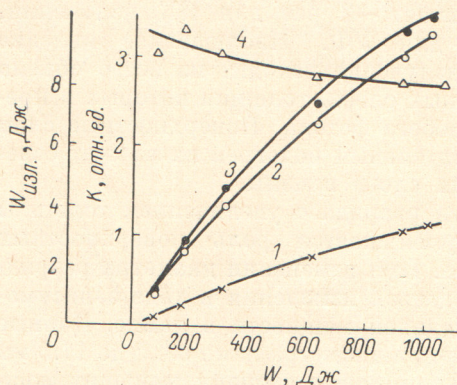


Рис. 5. Зависимость энергии излучения, исходящего из торца П-образной лампы, от энергии разряда.

1 — лампа открытая, 2 — лампа в осветителе, 3 — лампа в осветителе с закрытым торцевым окном, 4 — зависимость от энергии разряда отношения  $K$  по данным кривых 2 и 1.

волны, то это действительно обнаружено нами при повышенных мощностях разряда. В [4] не была замечена зависимость прироста яркости разряда его удельной мощности, что объясняется, по-видимому, слабым ходом указанной зависимости для лампы сравнительно большого диаметра (18 мм) в исследованном авторами [4] диапазоне мощностей.

Авторы благодарят Г. И. Нархову и В. М. Усову за помощь в работе, а И. И. Литвинова за полезные обсуждения.

#### Литература

- [1] I. E. Edwards. Appl. Opt., № 5, 837, 1967.
- [2] А. А. Мак, А. А. Щербakov. Квантовая электроника. Изд. «Советское радио», № 5, 68, М., 1973.
- [3] И. И. Литвинов, В. В. Подувальцев. Квантовая электроника, 1, № 4, 1074.
- [4] Е. В. Даниель, И. В. Колпакова. Ж. прикл. спектр., 10, 592, 1969.
- [5] В. Г. Игнатьев, А. Н. Токарева. Ж. прикл. спектр., 19, 632, 1973.
- [6] Ю. Г. Басов, В. В. Иванов, В. Н. Макаров, Г. И. Нархова, А. А. Щербakov. Опт. и спектр., 38, 608, 1975.
- [7] А. А. Волькенштейн, В. П. Ефремов, В. В. Кувалдин, О. К. Матвеев, В. М. Сазонов. Светотехника, № 6, 22, 1966.
- [8] И. И. Литвинов. ТВТ, 11, 695, 1963.

Поступило в Редакцию 10 февраля 1975 г.