

Промышленно выпускается только один базовый образец под маркой Solar 1000 с потребляемой из сети мощностью 1,4 кВт, световым потоком  $135 \div 140$  кдм,  $T_{II} = 6000$  К,  $R_a \sim 79$ , диаметром горелки — 28–30 мм.

Основные достоинства «серных» ламп ВД:

- сплошной квазисолнечный спектр с максимумом спектральной плотности излучения, совпадающим с максимумом кривой относительной спектральной чувствительности глаза (рис. 3.103);
- высокая световая отдача устройства (90–95 лм/Вт);
- высокий срок службы (до 45 тыс. ч);
- малогабаритность и равномерность светящегося тела, облегчающие оптимизацию оптической системы;
- возможность регулирования яркости.

Открытие уникальных световых и эксплуатационных характеристик безэлектродной СВЧ «серной» плазмы ВД безусловно знаменует новый этап в развитии светотехники. Созданные на этой основе ламповые системы делают еще только первые практические шаги. Фактически они открывают путь в еще недостаточно изученную область взаимодействия ВЧ и СВЧ электромагнитных колебаний с плазмой как источником оптических излучений. Можно надеяться на развитие исследований в этом направлении. Но уже и сейчас можно указать области, в которых исключительные достоинства «серных» ламп делают их применение весьма эффективным. Следует также иметь в виду, что безэлектродные лампы с другими наполнителями, являясь весьма эффективными источниками оптического излучения в разных областях спектра, например, в УФ-области, могут оказаться вне конкуренции во многих промышленных фотопроцессах.

Однако наряду с перечисленными выше достоинствами «серные» лампы ВД имеют серьезные недостатки. Для обеспечения работы ламп необходимо применение блока магнетронной накачки, состоящего из генератора СВЧ с системой принудительного воздушного охлаждения магнетронов, а также специальной волноводной конструкции, обеспечивающей эффективный подвод и «закачку» энергии в разрядный объем, и системы надежной защиты окружающего пространства от распространения СВЧ-излучения. По сути, срок службы комплекта обусловлен сроком службы магнетронов, который, как правило, не превышает 15 тыс. ч.

В результате мощная «серная» лампа превращается в сложный агрегат, состоящий из разнородных блоков и узлов, обеспечивающих стабильную работу самого светящегося разрядного объема. Это приводит к существенному снижению общего КПД установки (до 37% подводимой мощности), снижению ее надежности, значительно усложняются условия эксплуатации, а, следовательно, ограничиваются области применения. При этом надо учесть весьма высокую стоимость ряда агрегатов, входящих в систему блоков и узлов. Поэтому вопрос об экономической целесообразности применения «серных» ламп в данное время нуждается в уточнении. Ведущая фирма по разработке «серных» ламп временно приостановила работы по их созданию.

### 3.4. ИМПУЛЬСНЫЕ ЛАМПЫ

Одним из видов преобразования электрической энергии в высокоинтенсивное оптическое излучение является мощный импульсный разряд в газе. Источники света на основе такого разряда используются для накачки различных типов лазеров, для освещения при фотографировании, для оптической связи на небольших расстояниях, для возбуждения спектров анализируемых веществ и т.п. [3.35–3.37].

Импульсной лампой (ИЛ) называется РЛ, рассчитанная на мощные импульсные электрические разряды, сопровождающиеся интенсивным ОИ [3.10]. Лампы имеют герметичный баллон из стекла или кварца, наполненный химически неактивным газом (чаще ксеноном). Зажигание ИЛ осуществляется с помощью третьего, расположенного внутри или на внешней поверхности лампы, электрода при подаче на него высоковольтного импульса. В некоторых случаях ИЛ не имеет управляющего электрода и зажигается кратковременным увеличением напряжения на основных электродах.

Для получения микросекундных импульсов созданы специальные типы ламп с малыми емкостью и индуктивностью [3.38].

Питание ИЛ осуществляется от источника, способного обеспечить в течение короткого времени большой ток, чаще всего от конденсатора, заряжаемого до рабочего напряжения  $U_p$ . Особенность ИЛ заключается в возможности их эффективного использования при значительном варьировании амплитуды тока, длительности и частоты разрядов при небольших изменениях КПД и спектрального состава излучения. Для ИЛ с длительностью разряда в сотни мкс это расширяет ассортимент доступных ламп [3.39] при ограниченном числе выпускаемых промышленностью типов. В настоящее время с ИЛ получены следующие наибольшие значения параметров: пиковая электрическая мощность  $2 \cdot 10^8$  Вт, световой поток  $10^{10}$  лм, яркость  $10^{11}$  кд/м<sup>2</sup>. Диапазон длительности вспышек ИЛ, выпускаемых промышленностью, —  $10^{-7} \div 10^{-2}$  с.

Классификация ИЛ по конструктивным признакам позволяет выделить *трубчатые* и *шаровые ИЛ*. У первых разрядный объем ограничен стенками трубки, у вторых разряд не ограничен в пространстве — расширяющаяся плазма за время разряда не достигает стенок колбы. Терминология, относящаяся к ИЛ, дана в [3.40], а система условных обозначений отечественных ИЛ установлена в [3.41].

Основные конструктивные и эксплуатационные особенности ИЛ определяются областью их применения и характером оптической задачи. Прежде всего, делается выбор вида импульсного разряда (ИР) (ограниченного стенками или свободно расширяющегося), а затем конструкции лампы: трубчатой или шаровой. Когда основным требованием является получение минимального светящегося объема с высокой пиковой яркостью и малой длительностью разряда, преимущество имеют шаровые лампы, которые могут рассеять значительно большую мощность, чем канильярные лампы с тем же расстоянием между электродами. Они предпочтительны также, когда требуется высокая час-

тога повторения вспышек при небольшой энергии одной вспышки.

Трубчатые лампы предпочтительны при требовании строгой локализации светящего объема. Они более выгодны, когда произведение радиуса канала на энергию разряда, отнесенную к  $1 \text{ см}^3$  канала, превосходит  $2 \text{ Дж/см}^2$ , а длительность импульса составляет десятки и более мкс. При этом один из пространственных размеров светящего объема составляет десятки и более мм.

В зависимости от требований к пространственному распределению светового потока трубчатые лампы подразделяются на лампы с прямой цилиндрической разрядной полостью и на лампы с полостью сложной конфигурации: спиральной, U-образной, панельной, коаксиальной. Шаровые лампы могут существенно различаться элементами конструктивного исполнения (число и расположение в разрядном промежутке электродов зажигания; конструкции токовыводов, оболочки, цоколей и др.).

Следующим признаком является режим работы лампы, на который она рассчитана: частотный (стробоскопический) или одиночных импульсов. Хотя любые ИЛ работают в обоих режимах, этот признак важен, потому что для повышения экономичности и эффективности ламп в определенном режиме должны быть применены специальные материалы и конструкторские решения.

В качестве дополнительных классификационных признаков следует отметить индуктивность ламп, интенсивность создаваемых ими магнитных полей, рабочий напряжения, материал — стекло или кварц.

*Конструкции ламп, материал и технология изготовления.* Основные конструктивные элементы ИЛ:

- баллон и газовое наполнение;
- электродные узлы: катодный (включающий в себя катод, газопоглотитель, ввод в стекло и внешний вывод); анодный (анод, ввод, внешний вывод), управляющий электрод (электрод зажигания);
- элементы внешнего оформления: цоколь, защитный баллон, приспособления для принудительного охлаждения, блокировки и т.п.

Баллоны светосигнальных и фотоосветительных ламп изготавливаются из стеклянных или кварцевых трубок разных размеров.

Баллон из стекла предпочтителен для фотоосветительных и сигнальных ламп, если при этом обеспечиваются необходимые размеры светящего объема и напряжения зажигания. Только специфические требования малых размеров светящего объема, обуславливающих высокие энергетические нагрузки на стенку трубки или высокую среднюю мощность, делают обоснованным использование кварцевой разрядной трубки.

Выбор материала баллона шаровых импульсных ламп, в основном работающих в частотном режиме, основывается на допустимой средней мощности, отнесенной к  $1 \text{ см}^2$  внутренней поверхности баллона как для режимов в установившемся тепловом равновесии, так и для работы короткими сериями, когда в лампе не успевает устанавливаться стационарный тепловой режим. Конструкции шаровых ламп показаны на рис. 3.104.

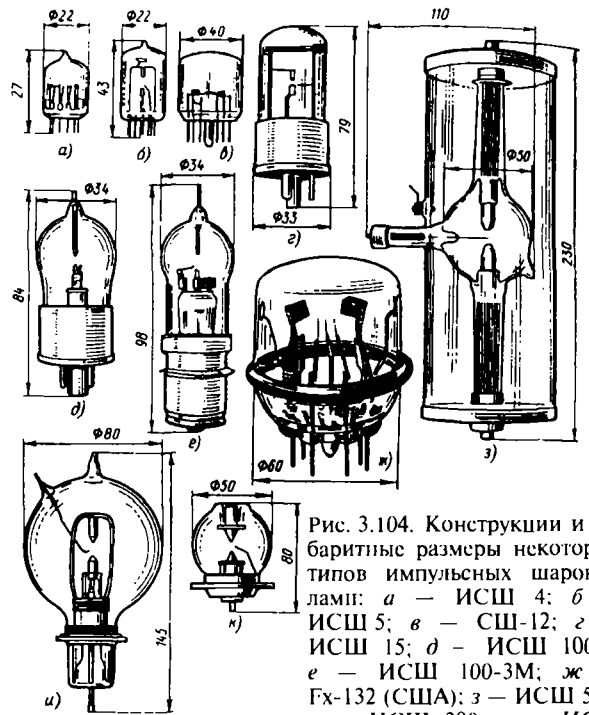


Рис. 3.104. Конструкции и габаритные размеры некоторых типов импульсных шаровых ламп: а — ИСШ 4; б — ИСШ 5; в — СШ-12; г — ИСШ 15; д — ИСШ 100-5; е — ИСШ 100-3М; ж — Гх-132 (США); з — ИСШ 500; и — ИСШ 300; к — ИСШ

Лампы с повышенным УФ-излучением имеют баллон из специальных сортов кварца или стекла. Кроме того, в них могут впаиваться окна с хорошим пропусканием УФ-излучения.

Шаровые ИЛ обычно наполняются Хе или смесью Хе с Ag или молекулярными газами ( $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$ , реже  $\text{O}_2$  и др.) до давления  $0,09 \text{ МПа}$ . Недостаток ксенонового наполнения — увеличение длительности светового импульса, особенно в условиях колебательного разряда.

Электродные узлы являются одними из важнейших элементов ламп. Для трубчатых стеклянных ламп применяются металлические стержневые вводы из пружков W, Mo или специальных сплавов. В шаровых стеклянных лампах с торцевым выходом излучения применяются дисковые вводы или многостержневые, выполненные в виде плоских или гребешковых пожек.

В промышленных типах кварцевых импульсных ламп применяют следующие токовыводы: плоские фольговые, цилиндрические фольговые, стержневые на переходных стеклах, колпачковые с уплотнением мягкими припоями. В экспериментальных лампах применяют клееные вводы колпачкового или стержневого вида с уплотнением полимерными компаундами, а также разборные вводы из специальных резин или мягких металлов — свинца, меди и др. Каждый тип токовывода имеет преимущества и недостатки. Достоинствами фольговых токовыводов являются: вакуумная надежность, теплостойкость, позволяющая производить высокотемпературный нагрев деталей ламп для их очистки от газов; механическая прочность электродного узла. Однако фольговый ввод ограничивает пропускаемый ток, весьма трудоемок в изготовлении и имеет низкую коррозионную устойчивость. Другие типы токовыводов пропускают большие токи при сравнительно

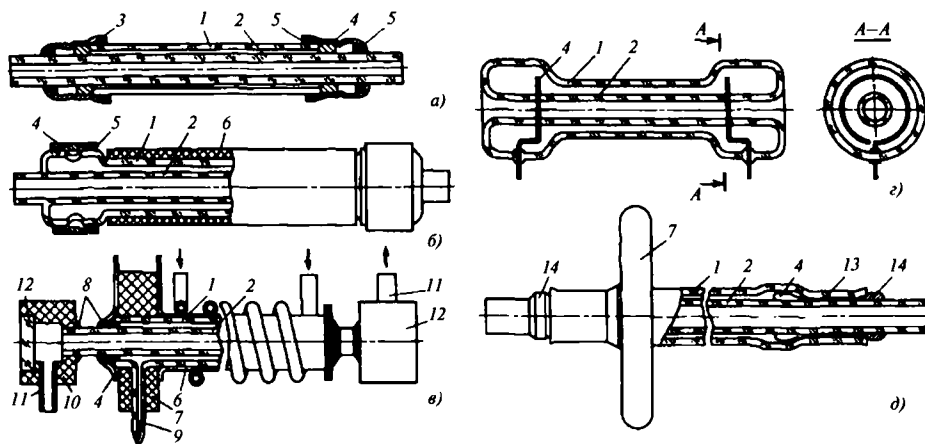


Рис. 3.105. Варианты конструктивного исполнения импульсных коаксиальных ламп (а-д): 1 и 2 — кварцевые трубки; 3 — колпачок; 4 — электрод; 5 — металлический обратный; 6 — металлический обратный токопровод-отражатель; 7 — изолятор; 8 — органический клей; 9 — штентель; 10 — насадка; 11 — штуцер; 12 — окло кюветы; 13 — молибденовая фольга; 14 — вывод

меньшей длине. Однако токоввод на переходных стеклах чувствителен к резким перепадам температур и обладает меньшей механической прочностью по сравнению с фольговым вводом. Для механизированного производства наиболее удобными являются колпачковые вводы, основанные на припайвании к металлизированной поверхности кварцевой трубки металлического колпачка или диска припоем олово-титан.

Таким образом, фольговые цилиндрические вводы целесообразно применять в импульсных частотных лампах с высокой средней мощностью, а плоские — в маломощных частотных лампах. Лампы с колпачковыми токовводами и на переходных стеклах предпочтительны для режимов работы с одиночными импульсами. Если эксплуатировать такие лампы в частотных режимах, то их нужно интенсивно охлаждать.

Коаксиальные импульсные лампы были созданы для исследований импульсного фотолитза газов и жидкостей, а затем они стали применяться и для накачки лазеров: химических, фотодиссоционных и на красителях. Варианты конструкций коаксиальных импульсных ламп показаны на рис. 3.105. Они выполняются с кольцевыми (рис. 3.105, а-в, д) и стержневыми электродами (рис. 3.105, з), у которых герметичное соединение металла с кварцем осуществляется с помощью металлических припоев (а, б), органических компаундов (в), через переходные стекла (з) и ввариванием тонкой молибденовой фольги между двумя кварцевыми трубками (д).

При использовании стержневых токовводов две коаксиальные трубки спаиваются между собой на концах. Вольфрамовые прутки впаиваются через переходные стекла во внешнюю кварцевую трубку перпендикулярно осевой линии лампы и направлены в одну сторону (рис. 3.105, з). В разные стороны направлены электродные стержневые узлы с фольговыми вводами в лампах типа ИФПП7000, предназначенных для работы с импульсами длительностью сотни мкс.

Усовершенствование кольцевых электродных узлов в колпачковых токовводах привело к созданию в них балластных объемов, расположенных за рабочей частью электродов.

В качестве диффузных отражателей используются порошки из  $MgO$ ,  $BaSO_4$  или аморфная двуокись крем-

ния, впекаемая в поверхность внешней трубки (рис. 3.105, б). Зеркальные отражатели в виде трубок или фольги из серебра, алюминия или меди одновременно служат обратным токопроводом, уменьшающим индуктивность разрядного контура.

Наиболее распространенные промышленные ИЛ показаны на рис. 3.106 и 3.107. Кроме представленных, имеется также более трех десятков типов трубчатых

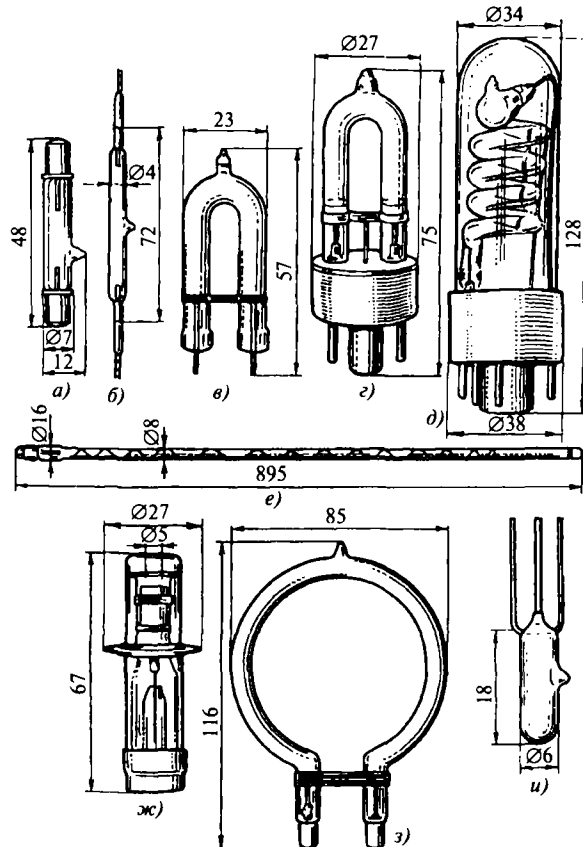


Рис. 3.106. Варианты конструкций импульсных стеклянных ламп для фотографии: а, б, е — линейчатые трубчатые; в, з, ж — U-образные; д — спиральная; з — кольцевая трубчатая; и — трехэлектродная

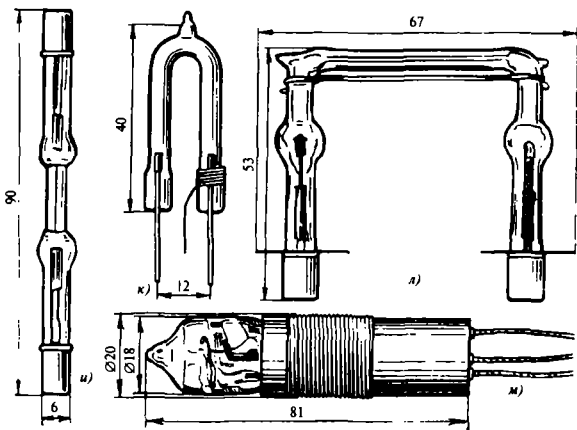
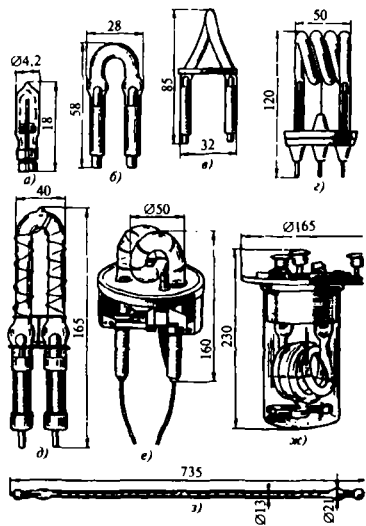


Рис. 3.107. Варианты конструкций импульсных кварцевых ламп для фотографии и сигнализации: а, б, д, к — U-образные; в, г, е, ж — трубчатые спиральные; з, и — трубчатые линейные; л — П-образная; м — со спиральным каналом разряда, вырезанном на поверхности кварцевого монолита

кварцевых ИЛ, предназначенных для накачки лазеров и импульсного фотолиза [3.10, 3.38].

Схемы включения и питания ИЛ с разрядом длительностью в сотни мкс содержат накопитель, заряжаемый от источника постоянного тока, и устройства управления, синхронизации и защиты, регулирующие работу зарядного устройства, генератора зажигающих импульсов и разрядного контура (рис. 3.108). Приблизительно ИЛ можно рассматривать как ключ с односторонним управлением: прохождение тока через лампу прекращается, когда энергия накопителя  $W_p$  почти полностью иссякает, или срабатывает выключатель в разрядном контуре, или гасящее устройство уменьшает напряжение на ИЛ до напряжения погасания.

Диапазон напряжений между основными электродами, в пределах которого возможно управляемое зажигание ламп, ограничивается напряжениями зажига-

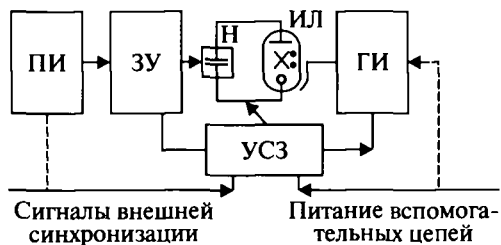


Рис. 3.108. Функциональная схема питания лампы: ИЛ — импульсная лампа; Н — накопитель электрической энергии; ЗУ — зарядное устройство; ПИ — первичный источник энергии; ГИ — генератор зажигающих импульсов; УСЗ — блок управления, синхронизации и защиты

ния и самопробоя. Методы измерения напряжений зажигания и самопробоя стандартизованы [3.42, 3.43].

Самым распространенным и простым способом питания ИЛ является подключение ее к накопительному конденсатору, при разряде которого генерируется импульс тока (см. рис. 3.108). Накопитель заряжается через зарядное устройство от первичного источника постоянного тока.

Несколько иначе питаются «микросекундные» ИЛ (рис. 3.109). Поскольку напряжение, до которого заряжают разрядный контур, всегда выше напряжения самопробоя лампы, то используют управляемый разрядник, который разряжает электрическую цепь. В нужный момент на управляющий электрод разрядника подается напряжение, происходит разряд сначала между ним и одним из основных электродов, а затем и между двумя основными электродами. При этом на электроды лампы подается высоковольтное напряжение, межэлектродный промежуток пробивается, и вся энергия выделяется в газовом объеме. Управляемость ИЛ зависит от условий разряда в лампе, которые характеризуются несколькими параметрами. Это диапазон управляемости (напряжение между рабочими электродами лампы, в пределах которого обеспечивается надежное зажигание разряда), мощность и энергия в канале зажигающего (вспомогательного) разряда, время запаздывания импульса излучения относительно импульса зажигания. Время запаздывания имеет важное значение в световой сигнализации. Например, в космиче-

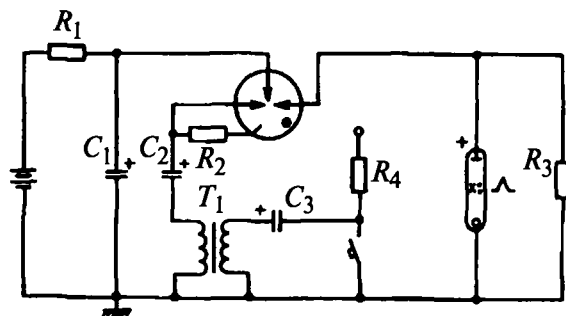


Рис. 3.109. Схема включения ламп с разрядником:  $R_1 - R_4$  — сопротивления;  $C_1 - C_3$  — емкости;  $T_1$  — трансформатор

ских маяках, используемых в геодезических целях. импульсная вспышка света должна следовать в строго заданное время (когда спутник пролетает над измерительной станцией). Разброс времени запаздывания светового импульса относительно управляющего сигнала, предназначенного для инициирования вспышки, приводит к ошибкам в измерении координат местности. В связи с этим рассмотрим подробно процессы, происходящие в лампе при зажигании разряда.

Электрический пробой газовых промежутков характеризуется процессом создания высокой проводимости между электродами с помощью двух основных механизмов: механизма образования большого числа электронных лавин (таунсендовский) и стримерного, или канального, механизма, когда уже первая лавина приводит к образованию токовой перемычки. В реальных условиях существуют переходные формы, являющиеся комбинацией этих двух механизмов с разным статистическим весом.

В случае электрического пробоя в длинных газовых промежутках ориентировочно выделяют три стадии развития разряда, качественно отличающиеся друг от друга и характеризующиеся временами:  $t_{ст}$  — статистического запаздывания;  $t_p$  — рабочего времени развития разряда;  $t_\phi$  — формирования разряда, по времени соответствующего росту тока до максимального значения. Время запаздывания разряда  $t_3$  определяется от момента подачи напряжения на трубку до начала резкого нарастания тока и складывается из  $t_{ст}$  и  $t_p$ . Время  $t_{ст}$  зависит от случайных событий, хотя на его среднее значение влияет ряд факторов (длина промежутка, геометрия и напряженность поля, внешние условия). Для импульсных ламп, использующих вспомогательный разряд для зажигания основного,  $t_{ст} = 0$  и  $t_3 = t_p$ .

Вспомогательный разряд образует в газе сравнительно узкий токопроводящий слой с высокой температурой, хотя мощность его мала, а действие кратковременно. С течением времени токопроводящий слой может либо леонизоваться, либо начать расширяться. В первом случае выделяемая мощность разряда недостаточна для компенсации тепловых потерь, а во втором — значительно их превосходит.

Импульс зажигания подается на лампу двумя способами. При первом из них, называемом последовательным или внутренним, вторичная обмотка импульсного трансформатора вводится в цепь разряда, а при втором, называемом параллельным или внешним, импульс подается на вспомогательный электрод в виде проволоки, навитой на колбу лампы. При внутреннем зажигании, которое образует вспомогательный канал разряда по осевой линии лампы, развитие основного разряда происходит симметрично и однородно. В случае внешнего зажигания геометрия вспомогательного разряда повторяет геометрию внешнего электрода, а основной разряд вследствие этого в течение некоторого времени развивается несимметрично. Это ухудшает излучательные характеристики ламп. При внутреннем зажигании излучение распределено более равномерно по всему сечению трубки. В то же время введение обмотки трансформатора в цепь разряда увеличивает ее индуктив-

ность и затягивает импульс излучения. В течение времени, соответствующего  $t_a$ , существуют предпробойные токи (примерно  $10^{-2} + 1$  А), а излучение у электродов более слабое, чем в середине разрядной трубки. Такое распределение излучения напоминает аномальный тлеющий разряд. Зависимость времени запаздывания от начального давления  $p_0$  наполняющего газа имеет U-образный вид: с ростом  $p_0$  вначале наблюдается уменьшение  $t_3$ , а затем его рост. Время запаздывания существенно сказывается на синхронной работе ИС в многоламповых системах.

После образования канала вспомогательного разряда в нем происходит выделение энергии основного разряда. Для разрядного контура, создающего основной разряд.

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int i dt = U_0, \quad (3.22)$$

где  $U_0$  — начальное напряжение;  $i$  — ток;  $R$  — активное сопротивление;  $L$  — индуктивность контура;  $C$  — емкость конденсатора.

При напряжении, равном напряжению зажигания (которое обычно определяется с 95%-ной вероятностью осуществления основного разряда),  $U_0 = U_3$ , мощность, выделяемая в канале вспомогательного разряда, равна энергетическим потерям. Она полностью расходуется на поддержание стационарного состояния. При этом время запаздывания стремится к бесконечности ( $t_3 \rightarrow t_3^\infty$ ). Для стационарного режима  $di/dt = 0$ , а  $Ri \ll iR/C$ . Тогда из (3.22) имеем

$$t_3^\infty = U_3 C / I. \quad (3.23)$$

При  $U_0 > U_3$  выделяемая мощность больше потерь, и  $t_3$  уменьшается. Его снижение пропорционально разности выделяемой и теряемой мощностей. В (3.23) это выразится заменой  $i$  на  $i_0 - i_3$ , где  $i_0$  — ток в канале вспомогательного разряда при напряжении  $U_0$ , а  $i_3$  — при  $U_3$ .

Время запаздывания

$$t_3 = \frac{U_3 RC}{U_0 - U_3} = \frac{RC}{U_0/U_3 - 1}. \quad (3.24)$$

Здесь величина  $U_0/U_3$  принимается по аналогии  $U_0/U_c$ , где  $U_c$  — напряжение самопробоя при отсутствии вспомогательного разряда, она называется перенапряжением. Соотношение (3.24) позволяет выяснить физический смысл влияния на  $t_3$  различных факторов.

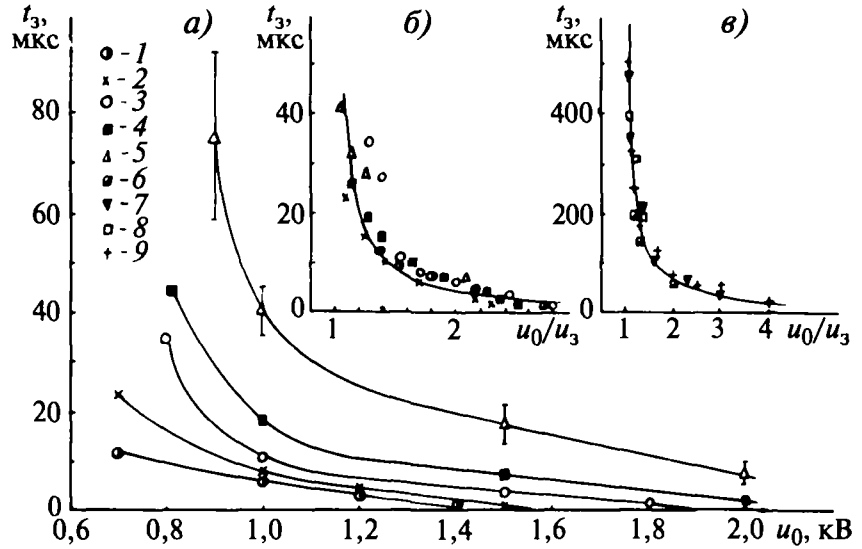
Поскольку  $RC = \text{const}$ , из (3.24) дифференцированием можно получить

$$\Delta t / t = \Delta U_0 / U_3 : (U_0 / U_3 - 1). \quad (3.25)$$

Соотношение (3.25) говорит о том, что относительный разброс времени запаздывания увеличивается при  $U_0/U_3 \rightarrow 1$ .

На рис. 3.110 показаны зависимости  $t_3$  от  $U_0$  и перенапряжения. Из рис. 3.110, б. в видно, что с ростом отношения  $U_0/U_3$ , когда вкладываемая во вспомогательный разряд мощность значительно превышает мощность тепловых и излучательных потерь, время запаздывания быстро уменьшается. Увеличение емкости конденсатора ведет к задержке развития основного разряда.

Рис. 3.110. Зависимость времени запаздывания разряда от начального напряжения (а) и перенапряжения (б, в): а и б — лампы размером 7×120 мм,  $C = 25$  мкФ,  $r_0 > 13$  (1), 27 (2), 40 (3), 53 (4) и 67 кПа Хе (5); в — лампы диаметром 1,7 см и длинами 1,7 (б), 27 (7, 8) и 84 см (9),  $r_0 = 40$  (6, 7, 9) и 93 кПа (8). На рис. а —  $r_0 = 27$  (Δ), 80 (○) и 134 кПа (×),  $C = 106$  мкФ [3.38]



На время запаздывания  $t_3$  оказывает влияние начальная ионизация газа во вспомогательном разряде, зависящая от формы и амплитуды импульса зажигающего напряжения.

Импульсные лампы с длительностью разряда в сотни мкс могут работать в широком диапазоне частот повторения импульсов. Возникающие при этом сбои регулярной работы ламп бывают трех видов — переход в стационарный режим горения, самопробой межэлектродного промежутка и пропуски вспышек. В лампах с разрядами длительностью порядка нескольких мкс таких сбоев нет.

Характеристики излучения трубчатых ИЛ определяются параметрами лампы и разрядного контура.

Импульсы силы света  $I(t)$  характеризуются освещением

$$0 = \int I(t) dt, \quad (3.26)$$

амплитудой силы света  $I_{\Pi}$  и длительностью вспышки  $\tau$ . Варьируя форму и длительность импульса выделяющейся в ИЛ электрической мощности, можно изменять форму и параметры импульсов излучения, получать импульсы силы света, близкие к прямоугольным. Однако при питании от конденсатора кривая  $I(t)$  имеет характерную форму (рис. 3.111). Длительность вспышки

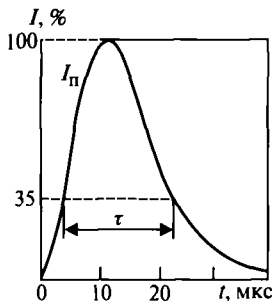


Рис. 3.111. Типичная зависимость силы света  $I(t)$  от времени  $t$  ( $I_{\Pi}$  — амплитудная сила света;  $\tau$  — длительность импульса)

ки  $\tau$  при заданном внутреннем диаметре  $d_i$  разрядной трубки определяется произведением  $Cl$  ( $C$  — емкость конденсатора,  $l$  — длина разрядной трубки). При сравнительно больших длительностях разряда, когда плазма практически равномерно заполняет все внутреннее сечение разрядной трубки, можно рассчитать амплитудную габаритную яркость и интеграл яркости

$$\int L_0(t) dt = 0 / (ld_i) \quad (3.27)$$

(для ламп с изогнутыми трубками  $ld_i$  заменяется на соответствующую площадь проекции светящего объема).

Световая отдача трубчатых ксеноновых ИЛ достигает 60 лм/Вт. Пространственное распределение световой энергии характеризуется индикатрисами освещивания (рис. 3.112). Связанной с пространственным распределением излучения величиной является эквивалентный телесный угол  $\Omega_3$ , равный отношению световой энергии к освещиванию  $\theta$  в направлении излучения, принято за основное. Для прямых трубчатых ИЛ — это направление нормали к оси лампы. Эквивалентные телесные углы прямых трубчатых ИЛ лежат в пределах 10,4–11,6 ср. Теоретические крайние значения  $\Omega_3$  равны 9,6 и 11,7 ср. Для ламп типа ИФК  $\Omega_3 = 10,1$ –12,1 ср.

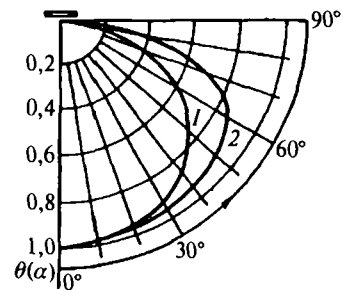


Рис. 3.112. Максимально различающиеся по форме индикатрисы освещивания ИЛ: 1 — ИФП1200 ( $U_0 = 1100$  В;  $C = 200$  мкФ;  $L = 10$  мкГн;  $\tau = 350$  мкс); 2 — ИФП2000 ( $U_0 > 1500$  В;  $C = 1800$  мкФ;  $L = 50$  мкГн;  $\tau = 840$  мкс)

Спектры излучения трубчатых ИЛ с разрядом длительностью в сотни мкс (температура плазмы 8000–12000 К) охватывает диапазон длин волн 155–4500 нм при кварцевой колбе и 290–3000 нм при стеклянной. Спектры излучения состоят из спектральных линий и сплошного фона. В обобщенном и схематизированном виде (без подробного изображения множества спектральных линий излучения ксенона) спектральные характеристики для различных значений пиковой электрической мощности  $P_n$ , рассеиваемой в  $1 \text{ см}^3$  плазмы, представлены на рис. 3.113. При увеличении  $P_n$  температура плазмы возрастает, доля УФ увеличивается, а ИК уменьшается. Спектры ИЛ практически не меняются при изменении частоты следования разрядов.

В оптимальном режиме при  $P_n = 0,5 \cdot 10^6 \text{ МВт/м}^3$  обций КПД несколько возрастает с увеличением диаметра разрядной трубки (примерно до  $d_i = 7 \text{ мм}$ ), а при дальнейшем увеличении  $d_i$  остается практически неизменным, достигая 80%. У трубчатых ИЛ КПД в ИК-области (700–2700 нм) достигает 40% в режимах, близких к дуговым, 20% при увеличении  $P_n$  до  $(0,5-1) \cdot 10^6 \text{ МВт/м}^3$  и около 10% при  $(2-10) \cdot 10^6 \text{ МВт/м}^3$ .

Основная доля излучения импульсных ламп с разрядом длительностью порядка нескольких мкс, как это видно из рис. 3.113, соответствует УФ-области. Поэтому такие лампы применяются для импульсного фотолиза жидкостей и газов, накачке различного типа лазеров и могут быть использованы как УФ бактерицидные излучатели [3.41]. При этом варьированием удельной мощности разряда можно менять положение максимума спектрального распределения излучения и выход УФ.

За счет увеличенной мощности импульсные разряды в кварцевых трубках с инертным газом характеризуются интенсивным испарением материала оболочки, диссоциацией двуокиси кремния и появлением линий излучения кремния в УФ-области спектра 185–245 нм.

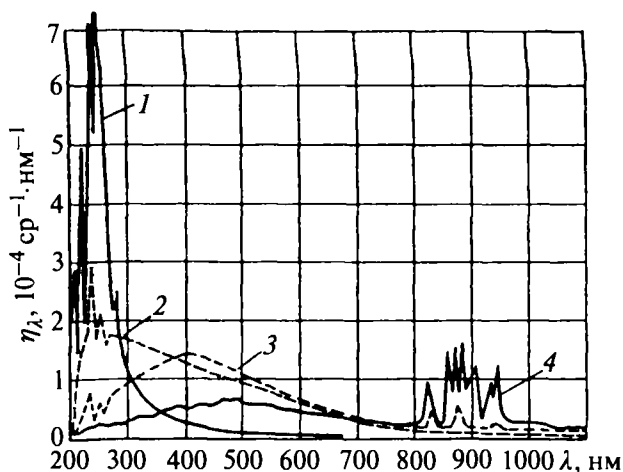


Рис. 3.113. Спектральные распределения КПД в единичном телесном угле в направлении, перпендикулярном оси трубки, для трубчатых ксеноновых ламп. (Объемная плотность мощности  $10^4 \text{ МВт/м}^3$ : 1 — 5; 2 — 1; 3 — 0,2; 4 — 0,04). Графики пересчитаны для ламп большой длины с пренебрежимо малыми приэлектродными потерями

Мощными источниками, дающими вклад в УФ-излучение ИЛ, являются радиальные ударные волны, образованные быстрым расширением канала разряда после пробоя межэлектродного промежутка, интенсивно излучающие во все фазы импульса.

Характеристики излучения шаровых ИЛ имеют особенности, обусловленные существенно меньшей продолжительностью и меняющейся от импульса к импульсу формой светящего канала разряда в неограниченном стенками разрядном промежутке малой длины. Из-за низкого сопротивления канала такие разряды чаще всего бывают колебательными. Непрерывное изменение диаметра канала разряда, плотности газа, электрического сопротивления и мощности, расходуемой на расширение канала, обуславливает большое различие временных зависимостей силы света  $I_v(t)$  и яркости  $L_v(t)$  (рис. 3.114).

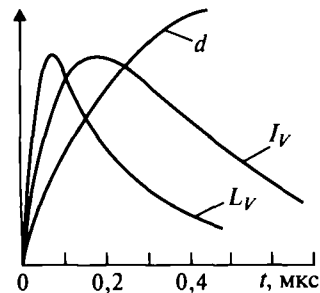


Рис. 3.114. Пример временных зависимостей параметров шаровых ламп

Отношение выделяющейся в шаровой ИЛ электрической энергии  $W_d$  к энергии, запасаемой в конденсаторе,

$$W_p = CU_p^2 / 2, \quad (3.28)$$

называемое КПД разрядного контура  $\eta_k$ , изменяется в более широких пределах, чем у трубчатых ИЛ, и сильно зависит от свойств контура. При неизменном балластном сопротивлении  $\eta_k$  существенно зависит от  $W_p$ , определяющей диаметр и эффективное сопротивление канала разряда. Невоспроизводимость формы канала разряда, вызывающая повышенный разброс световых параметров от импульса к импульсу, особенно сильно проявляется, начиная с некоторой зависящей от  $W_p$  частоты повторения вспышек.

Световая отдача шаровых ИЛ обычно не превышает 15 лм/Вт. Увеличение расстояния между электродами сопровождается приблизительно линейным ростом световой отдачи. Амплитудная сила света  $I_n$  в широком диапазоне изменения параметров слабо зависит от  $U_p$  и  $C$  при постоянной энергии разряда  $W_p$  и растет примерно пропорционально  $\sqrt{W_p}$ .

Длительность импульса силы света  $\tau$  определяется продолжительностью процессов выделения электрической энергии в канале разряда и временем высвечивания нагретого газа;  $\tau$  примерно пропорционально  $\sqrt{W_p}$ , независимо от изменения  $U_p$  и  $C$ . Включение в разрядный контур небольшого балластного сопротивления сокращает  $\tau$  приблизительно в 2 раза.

Пространственное распределение излучения шаровых ИЛ обычно близко к изотропному в области пространства, не затененного электродами. Эквивалентные телесные углы  $\Omega_3$  для лампы типа ИСШ равны 10,2–10,8 ср. Для приближенных расчетов можно рекомендовать  $\Omega_3 = 11$  ср.

Спектральные характеристики плазмы шаровых ИЛ (ее температура составляет десятки тысяч К) имеют максимум спектральной плотности излучения в области вакуумного УФ (100–200 нм). Ультрафиолетовое излучение плазмы частично поглощается наполняющим колбу газом и стеклом колбы (рис. 3.115). При прозрачной для УФ колбе наблюдается резкое возрастание спектрального КПД при  $\lambda < 250$  нм, обусловленное не только сплошным фоном, но и пакетом мощных линий ксенона. В ИК области излучение зарегистрировано до 1700 нм.

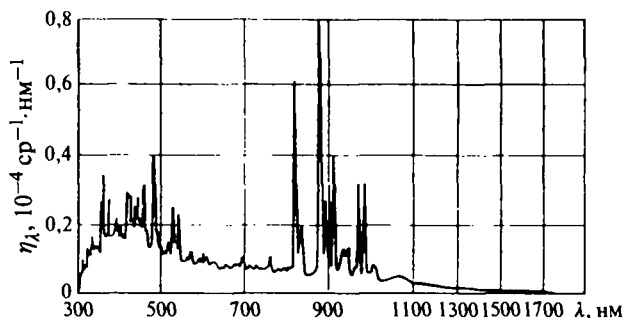


Рис. 3.115. Спектральное распределение КПД в единичном телесном угле для импульсной частотной шаровой лампы (ксенон; 0,22 МПа;  $l = 2,5$  мм; 1000 В; 6800 нФ;  $\tau = 0,35$  мкс;  $f = 2$  кГц,  $I_{ср} = 4,8$  кл)

Так же как световая отдача, КПД шаровых ИЛ в несколько раз меньше, чем трубчатых, и в видимой области составляет несколько процентов. Общий КПД лампы типа ИСШ7 равен только 9% из-за поглощения УФ-излучения колбой. Так, КПД разряда в интервале 220–250 нм составляет половину КПД в интервале 220–1050 нм. С учетом вакуумного УФ-излучения общий КПД мощных неограниченных разрядов, вероятно, может достигать 0,5.

Интервал напряжений между основными электродами, в пределах которого возможно управляемое зажигание лампы, ограничивается напряжениями зажигания и самопробоя. Методы измерения напряжения зажигания и напряжения самопробоя стандартизованы [3.42, 3.43].

**Нагрузочные характеристики.** К основным нагрузочным параметрам ИЛ относятся наибольшая допустимая энергия одного импульса, рассеиваемая в лампе в режиме редких импульсов, а в режиме часто повторяющихся импульсов — наибольшая допустимая средняя мощность. Под предельной энергией  $W_{пр}$  ИЛ понимается наименьшее значение электрической энергии разряда, при которой лампа выходит из строя на первом импульсе (чаще всего из-за разрушения оболочки), либо в серии импульсов. Предельная энергия является

одним из важнейших параметров ИЛ, так как характеризует диапазон ее энергетической нагрузки и служит для оценки ресурсной наработки.

На  $W_{пр}$  влияет форма импульса тока. При одинаковой длительности импульса для RC-разряда, характеризующегося крутым фронтом импульса тока и экспоненциальным спадом,  $W_{пр}$  на 35–40% больше, чем для LC-разряда, форма импульса тока которого близка к синусоидальной, и на 60% выше, чем для импульса разряда прямоугольной формы.

Физический механизм разрушения ИЛ рассмотрен в [3.38]. За разрушение ответственны давление разряда, меняющее свое значение в зависимости от условий, при которых происходит разрушение, и термические растягивающие напряжения на внешней поверхности оболочки. Не равномерный по толщине стенки лампы нагрев подтверждается измерениями температуры и эффектом окрашивания кварцевого стекла. Кроме того, непосредственно наличие разрушающих термических напряжений экспериментально показано в [3.38].

Термические напряжения зависят от длительности разряда в лампе. При разряде длительностью в несколько мкс термические напряжения, вероятно, отсутствуют, и разрывное давление в лампе, например, с размерами трубки 7 × 120 мм и толщиной стенки 1,5 мм достигает 18 МПа. С увеличением длительности разряда и появлением термических напряжений разрушающее давление уменьшается. Термические напряжения исчезают при нагреве лампы (например, в печи), и тогда разрывное давление снова увеличивается до 18 МПа.

Предельной мощностью ИЛ, работающих в частотном режиме, считается наименьшая мощность, которая приводит к выходу лампы из строя в течение первой минуты ее функционирования.

**Долговечность.** На процесс износа ИЛ влияет много факторов и, в частности, распыление электродов, которое однозначно связано с изменением освещивания (рис. 3.116). Чем интенсивней эрозия электродов, зави-

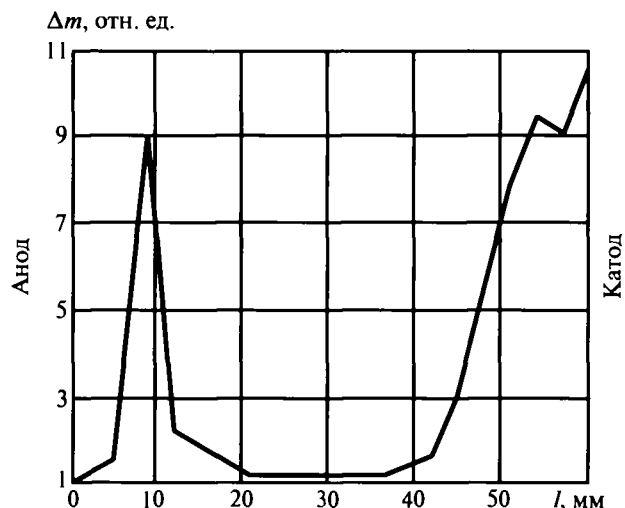


Рис. 3.116. Распределение массы эрозионного вольфрама по длине разрядной части лампы с размерами разряда  $\varnothing 5 \times 60$  мм, обработавшей  $7 \cdot 10^5$  импульсов [3.39]



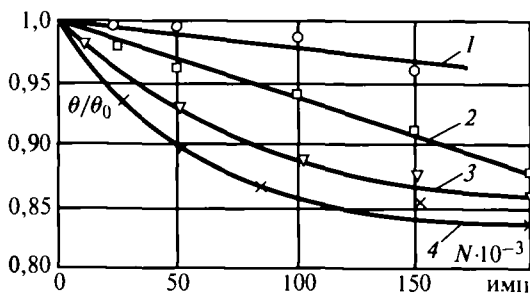


Рис. 3.117. Относительное снижение освещивания импульсных ламп с размерами разряда  $\varnothing 7 \times 120$  мм (1 и 2) и  $\varnothing 12 \times 250$  мм (3 и 4). Точки — эксперимент, линии — зависимость [3.39]

сущая от материала и средней температуры нагрева, тем быстрее снижается освещивание (рис. 3.117). Под влиянием интенсивного теплового потока на стенку лампы наблюдается испарение кварцевого стекла и унос его в наиболее холодные места лампы. В плазме разряда  $\text{SiO}_2$  диссоциирует на оксид кремния и кислород. Последний способствует окислению материала электродов. Оксиды достаточно легко покидают поверхность электродов и практически полностью разлагаются в плазме разряда с восстановлением металлов. Эрозия оболочки лампы уменьшает ее механическую прочность. Затенение оболочки, покрытой эрозийными металлическими частицами, увеличивает энергию, поглощаемую стенкой лампы.

Известные причины, приводящие к износу ИЛ, можно разделить на следующие группы:

- возрастание тепловых потерь на стенках;
- уменьшение прочности материала оболочки;
- уменьшение толщины стенки лампы из-за постоянной эрозии кварца в разряде;
- возрастание давления газа за счет испарения  $\text{SiO}_2$  в предыдущих импульсах;
- снижение температуры кипения кварцевого стекла.

Модель износа ИЛ [3.38] состоит в том, что под действием плазмы из оболочки лампы происходит испарение и диссоциация  $\text{SiO}_2$ . Продукты ее диссоциации  $\text{O}_2$  и  $\text{O}$  взаимодействуют с электродами и снижают их эрозионную стойкость. Кремний и его оксиды в реакциях с примесными в ксеноне молекулярными газами образуют непрозрачные соединения, которые вместе с эрозионными электродными частицами уменьшают прозрачность оболочки и снижают прочность кварцевого стекла из-за появления дефектов в местах оседания палетов. Коэффициент пропускания излучения уменьшается и из-за объемного радиационного окрашивания кварцевого стекла. Все эти эффекты действуют одновременно. Снижение прочности оболочки и предельной энергии ИЛ происходит до тех пор, пока  $W_{\text{нр}}$  не сравняется с энергией разряда, при которой лампа эксплуатируется. Тогда и происходит ее разрушение.

Вопросам долговечности ИЛ посвящено много исследований, обобщенных в [3.10, 3.35]. Предложено не-

сколько формул для расчета их ресурса. Одной из первых формул является выражение

$$\lg N = a(1 - v), \quad (3.29)$$

где  $a$  — коэффициент пропорциональности, а  $v = W / W_{\text{нр}}$  — фактор нагрузки, т.е. отношение энергии разряда, при которой эксплуатируется лампа, к ее предельной энергии. Например, для лампы с фольговыми тоководами, эксплуатируемыми в режиме редких импульсов, формула справедлива при  $v = 0,4-0,7$ . Другие формулы также основаны на зависимости  $N$  от  $v$ . Например,

$$N = \exp[m(S_{\text{ТУ}} - 1)], \quad (3.30)$$

где  $m$  — эмпирический коэффициент,  $S_{\text{ТУ}}$  — сопротивление тепловому удару, которое определяется отношением  $\sigma_0 / \sigma$ . Здесь  $\sigma$  — термическое напряжение, возникающее при воздействии на образец тепловых ударов постоянной интенсивности,  $\sigma_0$  — предельное значение этого напряжения для конкретного материала. Величину  $S_{\text{ТУ}}$ , по-видимому, можно отождествлять с величиной, обратной фактору нагрузки.

Эмпирическая зависимость в виде

$$N = (1/v)^{8,58} \quad (3.31)$$

использована для расчетов ИЛ накачки твердотельных лазеров.

Для разрядов длительностью в несколько мкс предложена формула расчета числа импульсов наработки в виде

$$N = [3 / (1 + 2v)^5 v]^A. \quad (3.32)$$

На рис. 3.118 кривая 1 построена по этому соотношению для одиночных импульсов; кривая 2 — при  $f = 3$  Гц и  $A = 3,86$ ; кривая 3 при  $f = 10$  Гц и  $A = 4,3$ . Эмпирический коэффициент  $A$  зависит от частоты повторения импульсов (для  $\tau = 2-5$  мкс) в диапазоне  $f = 0,1-25$  Гц:

$$A = 3 + 0,5\sqrt{f}.$$

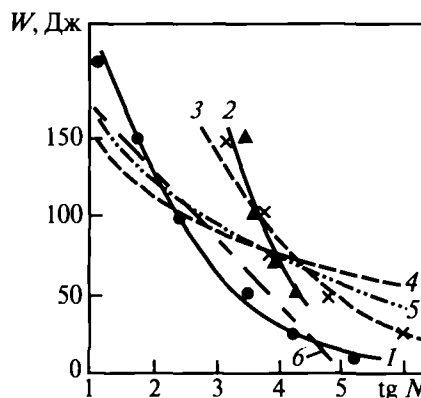


Рис. 3.118. Увеличение ресурса импульсных ламп с размером колбы  $\varnothing 7 \times 120$  мм со снижением энергии разряда: 1 — редкие импульсы, естественное охлаждение; 2 —  $f = 4$  Гц; 3 —  $f = 10$  Гц, воляное охлаждение. Точки — эксперимент, линии — зависимость (3.32). Кривые 4–6 построены по зависимостям (3.29–3.31) соответственно

*Эксплуатационные свойства.* Конструкции ИЛ являются весьма жесткими и выдерживают значительные механические нагрузки (вибрации, удары, постоянное ускорение). У кварцевых ламп имеются существенные преимущества в отношении механической прочности цилиндрических фольговых тоководов по сравнению с колпачковыми или вольдами на переходных стеклах.

Температура окружающей среды влияет на нагрузочную характеристику и диапазон управляемости лампы. Низкая температура вплоть до точки кипения наполняющего газа ( $-108^{\circ}\text{C}$  для Хе) сказывается мало. При эксплуатации ламп в закрытых камерах с ограниченным объемом следует учитывать суммарное воздействие на лампу температуры окружающей среды и температуры, создаваемой рассеиваемой в лампе мощностью.

Понижение давления окружающего воздуха сказывается на зажигании ламп: при давлении ниже 4 кПа (но выше 0,001 Па) управляющий импульс высокого напряжения внешнего зажигания шунтируется разрядом по поверхности, и лампа может потерять способность к управлению. В этом случае применяют внутреннее зажигание. В глубоком вакууме (например, в космосе) достаточно надежное зажигание осуществляют и с помощью внешнего электрода. При этом снижается допустимая средняя нагрузка лампы, так как рассеяние энергии происходит лишь за счет излучения. Для кварцевых ламп с допустимой температурой до  $850^{\circ}\text{C}$  максимальную среднюю рассеиваемую мощность оценивают, исходя из мощности серого излучателя (с интегральным коэффициентом излучения около 0,5) при доле тепловых потерь разряда 0,2–0,9. Эксплуатация ламп в жидких средах меняет их нагрузку и напряжения зажигания и самопробоя.

При повышенной влажности шенная часть тоководов и цоколи ржавеют. Наиболее подвержены этому фольговые тоководы. Имеются различные способы защиты этих узлов от влаги с применением герметиков, нанесением коррозионно-стойкого покрытия на токовод или использованием специальных конструкций.

*Области применения.* В настоящее время ИЛ применяются в приборах, относящихся к разнообразным отраслям науки и техники, а импульсный разряд помогает изучать явления, связанные с кратковременными посылками излучения оптического диапазона длин волн. Кроме того, в связи с широким развитием квантовой электроники большое распространение получили источники возбуждения лазерных сред различных типов. Для каждого типа лазеров существует оптимальный диапазон длительностей импульсов накачки. В качестве источников возбуждения микросекундных лазеров применяют устройства на основе сильноточных разрядов и ИЛ с длительностями всплесков порядка мкс. Физические и эксплуатационные характеристики последних в значительной степени отличаются от ламп с длительностью разряда в сотни мкс, используемых для накачки твердотельных лазеров. Эти отличия заключаются в разной динамичности плазменных процессов, сильном испарении оболочки лампы, изменении развития и протекания ИР и т.д. Такие лампы

применяются для накачки лазеров на красителях, химических и фотодиссоционных лазеров.

Для накачки твердотельных лазеров созданы и серийно выпускаются сотни типов ИЛ с тоководами на основе металлической фольги, колпачков и переходных стекол. Проведено также много работ по определению (зная параметры внешней электрической цепи и свойства разрядного промежутка) временного хода мощности излучения в определенном спектральном интервале. Решены многие варианты обратной задачи: выбор параметров цепи и разрядного промежутка лампы в соответствии с данными ИС.

Преимущества ИЛ проявляются в тех случаях передачи информации, когда используется малоинерционная регистрирующая аппаратура, либо когда сам процесс продолжается короткое время. Именно этим объясняется тенденция использования импульсных посылок излучения как способа улучшения параметров оптической системы с целью увеличения скорости, повышения точности, расширения диапазона и автоматизации процессов в новейшей технике.

Существуют ИЛ, основанные на использовании химической реакции горения (лампы одноразового действия). Эти лампы-вспышки заполнены металлической фольгой, сгорающей в атмосфере кислорода или фтора. В магниевых фотовспышках или фотобомбах металлический порошок мгновенно сгорает благодаря выделению кислорода из смешанной с ним богатой кислородом соли.

Во всех развитых странах в больших количествах выпускаются ИЛ с энергиями импульсов от долей Дж (для внутриполостной медицинской фотографии и портативных электронных фотовспышек) до сотен тысяч Дж для почтовых аэросъемок и накачки лазеров. В стробоскопах ИЛ работают с частотой повторения импульсов в несколько кГц, так же, как и в осветителях для скоростной киносъемки. Они используются в медицинской, биологической и других специальных видах фотографии. Устройства с ИЛ применяются в автоматике и телемеханике — приборах со световыми каналами управления и передачи информации. Это — оптические дистанционные контактирующие устройства, датчики «угол — число» ЭВМ, аппаратура светового ограждения, управление преобразователями на высоковольтных линиях постоянного тока, толщиномеры и т.п. Они находят также применение в оптической локации и связи (измерители высоты облачности, другие дальномеры, оптическая телефония). Создается много светосигнальных приборов: световые трассеры, маяки, бортовые огни самолетов, огни других транспортных средств. ИЛ используются для получения отметок времени, фоторегистрации, микрофильмирования, съемки, полиграфии, фотолитографии, фотометрии и т.п. Разрабатываются ИЛ для технологических применений.

Если ИЛ помещена в какое-либо светооптическое устройство, содержащее отражающие поверхности, часть собственного излучения может возвратиться в столб разряда и частично поглотиться плазмой. Поглощенное излучение эквивалентно дополнительной подводимой к разряду мощности, вызывающей повыше-

ние температуры плазмы, возрастание яркости столба плазмы, а также перегрев конструкции лампы, из-за которого снижаются ее предельно допустимая энергия и долговечность. Наибольшее проявление этого эффекта происходит в предельно малом отражателе, плотно окружающем колбу лампы. Амплитуда разрядного тока в трубчатой лампе возрастает при этом на 20%. Длительность импульса разрядного тока несколько уменьшается. Прирост спектральной яркости (420 нм) в тесном отражателе достигает 60%. В отражателе лампа имеет длительность фронта импульса на 15–20% меньшую, а длительность импульса на уровне 0,35 пикового значения на 15% большую, чем у этой же лампы в открытом пространстве. При уменьшении энергии разряда и давления газа различия во временном ходе излучения открытых ламп и ламп, помещенных в отражатель, уменьшаются.

У шаровых ИЛ такого действия отраженного излучения не наблюдается, т.к. отражатель практически не концентрирует его на канале разряда лампы.

### 3.5. СВЕТОДИОДЫ

Светодиоды (СД, в иностранной литературе — I.F.D., Lighting Emitting Diodes) — наиболее «молодые» источники света, принципиально отличающиеся от тепловых или разрядных излучателей. Принципы работы СД и история их развития подробно изложены в [3.44, 3.45, 3.46].

Впервые свечение на границе металла и полупроводникового материала — карбида кремния — наблюдал русский инженер О.В. Лосев в Нижегородской радиолаборатории в 1923 г. Позднее (в 1939 г.) он дал физическое объяснение этого свечения, получившего в литературе название «эффекта Лосева». Свечение было голубовато-зеленого цвета с очень малой яркостью, о практическом применении этого явления в те годы не могло быть и речи.

В начале 60-х годов XX века несколько зарубежных компаний начали производство СД с красным цветом излучения на основе полупроводниковых материалов III и V групп таблицы Менделеева — галлия, мышьяка, фосфора (Ga, As, P). Эти СД имели световую отдачу 0,1–0,2 лм/Вт, световой поток не более 0,02 лм и стали очень широко использоваться в различной аппаратуре как индикаторные элементы. В конце 60-х годов появились СД с зеленым, а затем и с желтым цветом излучения, созданные также на основе элементов III и V групп — арсенидов и фосфидов галлия, мышьяка, индия. Светотехнические параметры зеленых и желтых СД мало отличались от параметров красных.

Подлинная революция в производстве СД произошла в начале 90-х годов, когда, благодаря работам Ж.И. Алферова и других, были получены многопроходные двойные гетероструктуры (МДГС) — GaAlAs, AlInGaAs, AlInGaP. Световая отдача красных и зеленых СД увеличилась в 100 (!) раз и достигла значений 10–20 лм/Вт. В 1994 г. японской фирмой Nichia были созданы СД на основе нитрида галлия (GaN) и его твердых растворов (InGaN, AlGaN) с синим цветом излучения (470 нм). К 2004 году световая отдача СД на

основе МДГС достигла значений 30–50 лм/Вт, а на лабораторных образцах СД красного цвета (611 нм) была получена световая отдача 102 лм/Вт [3.47].

Появление СД с излучением в коротковолновой части спектра открыло пути для создания приборов с белым излучением за счет преобразования синего света в более длинноволновое с помощью люминофоров (аналогично процессам в люминесцентных лампах) или путем аддитивного смешивания красного, зеленого и синего цветов. Белые СД с люминофорами появились в 1996 году. Именно с этого времени СД превратились из индикаторных элементов в источники света в прямом смысле этого понятия. Во многих странах одновременно стали разрабатываться и выпускаться различные ОП с использованием СД.

К 2006 г. получены следующие значения параметров СД: цветность излучения — практически любая; световая отдача серийных СД — до 65 лм/Вт (цветных) и 45÷55 лм/Вт (белых); общий индекс цветопередачи белых СД — 85. По прогнозам специалистов фирмы Philips (Голландия) в ближайшие годы световая отдача красных СД может быть увеличена до 150, зеленых — до 135 и белых — до 50 лм/Вт [3.48]. Следует отметить, что жизнь опережает эти прогнозы: на выставке «Light+Building-2004» во Франкфурте-на-Майне уже демонстрировались белые СД с  $\eta_v = 57$  лм/Вт, а на лабораторных образцах получена световая отдача более 100 лм/Вт. По оценке А.Э. Юновича [3.48] к 2020 г.  $\eta_v$  белых СД может достигнуть 200 лм/Вт, а теоретический предел световой отдачи составляет 300 лм/Вт.

*Принцип работы и устройство СД.* Генерация света в СД происходит за счет энергии, выделяемой при рекомбинации носителей тока — электронов и дырок — на границе полупроводниковых материалов с разным характером проводимости. Характер проводимости определяется не только самим материалом, но и примесями (легирующими веществами), вводимыми в основной материал в строго дозированных количествах. Материал, у которого в результате легирования проводимость определяется, в основном, избытком электронов, называется «полупроводником типа *n*». Материал с недостатком электронов, т.е. с избытком положительно заряженных ионов (так называемых «дырок»), способных поглотить электрон и стать нейтральным атомом, называется «полупроводником типа *p*». На границе таких материалов образуется *p-n* переход. При подаче напряжения прямой полярности (минус — к материалу с электронной проводимостью *n*, плюс — к дырочной проводимостью *p*) через переход пойдет ток, а при рекомбинации электронов и дырок будет выделяться энергия. Величина энергии квантов, выделяемых при рекомбинации, зависит от разницы энергетических уровней электронов в возбужденном и нейтральном атомах, т.е. от ширины запрещенной зоны. При ширине запрещенной зоны от 1,7 до 3,4 эВ энергия излучаемых квантов соответствует видимому диапазону спектра с длинами волн от 700 до 400 нм.

Полупроводниковые материалы с различными типами проводимости и разной шириной запрещенной зоны делают на специальных установках методом эпитаксиального выращивания МДГС в жидкой или газообраз-