

## ИСТОЧНИКИ ПАРАЗИТНЫХ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В СИСТЕМЕ ПИТАНИЯ ЛАЗЕРОВ НА ПАРАХ МЕТАЛЛОВ

Приведены результаты экспериментальных исследований по определению энерговклада источника питания лазера на парах металлов в коммутатор и газоразрядную трубку (ГРТ) лазера. Приводятся простые соотношения для определения плазменных емкостей в коммутаторе и ГРТ, формируемых объемными зарядами при поляризации плазмы, а также для определения амплитудно-временных параметров газоразрядного импульса.

Указано на существование импульсно-частотных кривых Пашена (ИЧКП) для импульсно-периодического разряда, различающихся между собой, при прочих равных условиях, в зависимости от частоты повторения и скорости нарастания напряжения на газоразрядном промежутке. Экспериментально установлены повышенная плотность энерговклада в приэлектродных зонах ГРТ и температурный перепад между электродами в зависимости от давления газа, напряжения и других параметров.

Исследовалась типичная схема питания лазера на парах металлов со средствами измерения амплитудных и средних значений тока и напряжения  $U_c$  на рабочем конденсаторе  $C_p$ , высоковольтном выпрямителе  $U_{ист}$ ,  $I_{ист}$  и вдоль столба газоразрядной плазмы в газоразрядной трубке (ГРТ) лазера [1]. Измерения проводились при включении параллельно газоразрядному каналу шунтирующей индуктивности  $L_{ш}$ , расположенной как вне, так и внутри разрядного канала ГРТ, в виде спирали из молибденовой проволоки, образующей «распределенный электрод» [2]. Исследовалась также схема без  $L_{ш}$ .

На рис. 1 приведены зависимости плазменной емкости коммутатора  $C_k$  от напряжения на рабочей емкости  $U_c$  для разных частот повторения  $f$ .

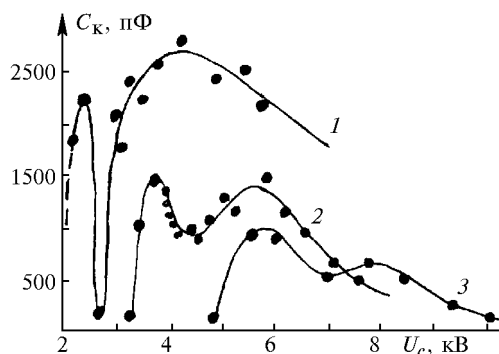


Рис. 1. Зависимость  $C_k$  от  $U_c$  при различных  $f$ : кривая 1 – 10 кГц, 2 – 5 кГц, 3 – 3 кГц, рассчитанных по формуле (6). ГРТ с апертурой 20 мм,  $d = 80$  см,  $P_{Nc} = 200$  Торр, коммутатор ТГИ1000/25,  $C_p = 7920$  пФ. Включена внешняя шунтирующая индуктивность  $L_{ш}$

Первый максимум в зависимостях (см. рис. 1) соответствует разряду рабочей емкости через шунтирующую индуктивность  $L_{ш}$ , когда величина  $U_c$  недостаточна для пробоя газоразрядного промежутка ГРТ. Поэтому через тиратрон коммутируется длинный импульс при большом значении добротности разрядного контура, что обеспечивает высокую остаточную ионизацию в коммутаторе. Незначительное

напряжение и высокая остаточная ионизация обуславливают малый радиус дебаевского экранирования, что увеличивает значение плазменной емкости.

Второй максимум формируется при напряжении  $U_c$ , достаточном для пробоев газоразрядного промежутка ГРТ. Такой же вид с двумя максимумами имеет зависимость  $C_k$  от  $U_c$  и для режима работы с распределенным электродом.

Следует отметить, что увеличение длины межэлектродного промежутка и давления газа, уменьшение частоты повторения  $C_p$  и  $L_{ш}$  сдвигает зависимости  $C_k$  от  $U_c$  в сторону увеличения  $U_c$ .

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) источника питания лазера в области максимумов (см. рис. 1) претерпевает разрыв в сторону уменьшения среднего тока источника или приобретает  $N$ -образный характер, проявляя отрицательную крутизну (кривая 1 рис. 2).

При работе с молибденовым распределенным электродом характеристика разогрева ГРТ в области нелинейности вольт-амперной характеристики имеет вид кривой 2 на рис. 2.

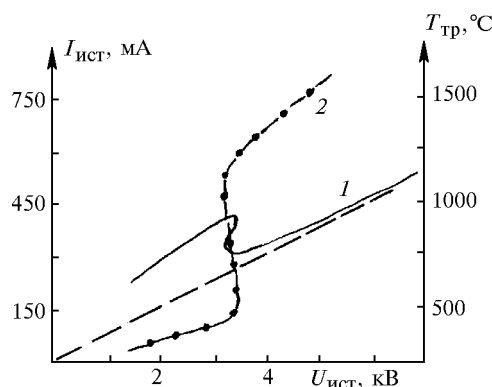


Рис. 2. Вольт-амперная и температурная зависимости работы источника и ГРТ. Параметры ГРТ те же, что и для рис. 1. Внутри ГРТ – «распределенный электрод» в виде молибденовой спирали с активным сопротивлением холодной спирали 0,2 Ом (внутренняя  $L_{ш}$ ),  $f = 3$  кГц. 1 – ВАХ источника питания; 2 – зависимость температуры активного объема ГРТ от  $U_{ист}$

Расчет  $C_k$  проводился с помощью экспериментально определенных значений  $U_c$ ,  $I_{ист}$ ,  $U_{ист}$ ,  $f$  (частота повторения) и измеренного значения  $C_p$  следующим образом.

При резонансной зарядке  $C_p$  через зарядную индуктивность источника  $L_z \gg L_{ш}$  имеем

$$U_c = 2 U_{ист} - \Delta U_c, \quad (1)$$

где  $\Delta U_c$  – остаточное напряжение на рабочей емкости после ее разряда через коммутатор и весь разрядный контур.

При учете только рабочей емкости  $C_p$  находим расчетный ток источника

$$I_p = (U_c - \Delta U_c) C_p f. \quad (2)$$

Из (1) имеем

$$\Delta U_c = 2 U_{ист} - U_c. \quad (3)$$

Подставляем (3) в (2) и с учетом реально измеренного тока источника находим величину токовой добавки  $\Delta I_k$ , возникающей за счет зарядки плазменной емкости коммутатора  $C_k$ , которая заряжается параллельно рабочей емкости  $C_p$ , поэтому

$$\Delta I_k = I_{ист} - I_p. \quad (4)$$

Подставляя (2) в (4) и учитывая, что  $C_\Sigma = C_p + C_k$ , где  $C_\Sigma$  – суммарная емкость параллельно заряжаемых  $C_p$  и  $C_k$ , получаем

$$C_k = \Delta I_k / [(U_c - \Delta U_c) f], \quad (5)$$

откуда величина плазменной емкости коммутатора находится по формуле

$$C_k = I_{ист} / [2 (U_c - U_{ист}) f] - C_p. \quad (6)$$

Результаты данных исследований позволяют сделать следующие выводы.

1. При зарядке рабочей емкости на высоких частотах повторения в газоразрядном коммутаторе и в ГРТ (в их приэлектродных зонах) в процессе продольной поляризации столба плазмы формируются плазменные емкости, величина которых может достигать одного порядка с номинальным значением рабочей емкости. В то же время под действием поперечной поляризации плазменный столб ГРТ приобретает потенциал одного знака с высоковольтным незаземленным электродом (в нашем случае положительным).

Разряд плазменной емкости приводит к протеканию в газоразрядном промежутке ГРТ межимпульсных токов, снижающих эффективность накачки активного объема лазера.

2. При срабатывании тиратрона энергия, запасенная в плазменной емкости коммутатора, поглощается в его собственном объеме, что снижает коэффициент полезного действия источника питания лазера по энергокладу в ГРТ.

В начальной стадии разряда рабочей емкости, в приэлектродных зонах ГРТ, за счет поляризации плазмы во внешнем поле заряжаются плазменные емкости, а также плазменный столб в ГРТ (в этом случае до отрицательного потенциала относительно заземленного электрода).

Зарядка плазменных емкостей в приэлектродных зонах ГРТ в процессе продольной поляризации плазмы приводит к значительному снижению амплитуды напряжения на газоразрядном промежутке и к уменьшению энергоклада в основной объем ГРТ. Это также снижает эффективность накачки лазера.

Поперечная поляризация плазменного столба, наоборот, приводит к некоторому увеличению энергоклада в ГРТ за счет того, что разряд «поперечной» плазменной емкости происходит в основном объеме активной зоны ГРТ, а не на ее концах, как в первом случае.

С учетом поляризации остаточного ионизованного газа в ГРТ [1], а также принимая во внимание то, что нарастание проводимости и тока в плазме происходит преимущественно на спаде импульса напряжения на ГРТ, начиная с его амплитудного значения  $U_{тр}$ , после прохождения первых волн ионизации [1], результирующую плазменную емкость  $C_{тр}$  можно найти из простого соотношения

$$U_c C_p = U_{тр} (C_{тр} + C_p), \quad (7)$$

Откуда

$$C_{тр} = C_p (U_c / U_{тр} - 1). \quad (8)$$

Если нарастание проводимости плазмы (пробойная стадия разряда) начинается в процессе нарастания напряжения на ГРТ, то значение  $U_{тр}$  в формулах (7), (8) находится при одновременном осциллографировании импульсов тока и напряжения на ГРТ и соответствует моменту перехода от медленного к быстрому нарастанию тока на осциллограмме импульса тока. Другими словами, в общем случае  $U_{тр}$  – это значение напряжения на ГРТ в начале разрядной стадии или в конце стадии задержки разряда, т.е. в момент пробоя газоразрядного промежутка под действием высокой напряженности электрического поля, сформированного пространственными зарядами у эмиттирующей поверхности катода в процессе прохождения волн перезарядки (ионизации) [1].

Температурные измерения с помощью термпар (рис. 3) показали, что потери на электродах и перепад температур между катодом и анодом, при прочих равных условиях, растут с уменьшением давления буферного газа и ростом частоты повторения газоразрядных импульсов. При этом растет доля энергоклада в ГРТ, расходуемая в приэлектродных зонах в пределах  $\sim 10\%$ . Этот результат следует также и из формулы (8), поскольку экспе-

риментально установлено экспоненциальное уменьшение  $U_{тр}/U_c$  с падением давления газа, с ростом частоты повторения и напряжения  $U_c$ . Остальная часть энергоклада в ГРТ расходуется в основном ее объеме в процессе прохождения волн перезарядки (ионизации) и в разрядной фазе, когда ток эмиссии с катода достигает значений, намного превышающих ток, формируемый объемными зарядами в приэлектродных зонах поляризованного столба плазмы [1]. При температурных измерениях ГРТ имела нагреватель, намотанный на внешнюю стенку керамической трубки с активным сопротивлением холодной спирали из вольфрама-рений 0,4 Ом, со специальным источником нагрева.

Из вышеизложенного следует, что для обеспечения более равномерного энергоклада в ГРТ и снижения относительных потерь на электродах необходимо уменьшать отношение площади электродов на концах активного объема к рабочей площади внутренней поверхности ГРТ за счет увеличения длины газоразрядного промежутка; увеличения апертуры ГРТ; уменьшения площади рабочих электродов на концах ГРТ; использования распределенного электрода [2], замыкающего весь газоразрядный промежуток ГРТ и обеспечивающий более равномерную электронную эмиссию, а значит, и энергоклад в плазму разряда по всей длине активного объема лазера; секционирования рабочего объема ГРТ [5].

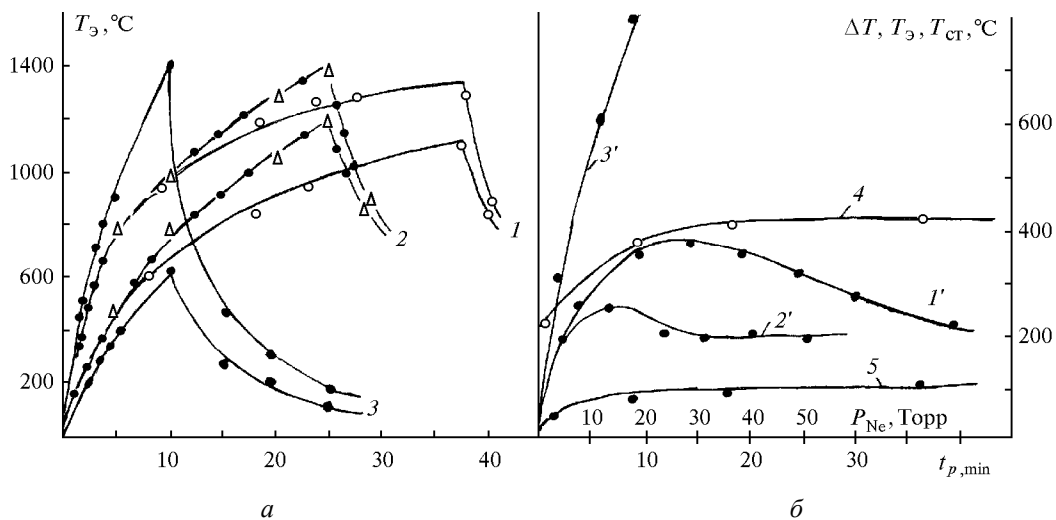


Рис. 3. Температурные зависимости работы ГРТ с апертурой 20 мм,  $d = 80$  см; *a* – кривые 1, 2, 3 – зависимости температуры электродов ( $T_3$ ) (катод – верхняя кривая, анод – нижняя) от времени разогрева ( $t_p$ ) ГРТ импульсно-периодическим разрядом. Спад температуры соответствует остыванию электродов после отключения разряда; *б* – кривые 1', 2', 3' – зависимости температурного перепада между электродами ( $\Delta T$ ) от времени разогрева ( $t_p$ ) ГРТ импульсно-периодическим разрядом; кривые 4, 5 – зависимости, соответственно, температуры электродов ( $T_3$ ) и внешней стенки ( $T_{ст}$ ) кварцевого кожуха с теплоизолятором из двуоксида циркония от давления неона ( $P_{Ne}$ ) при разогреве керамической трубки от спирального нагревателя до 1000 °С с помощью специального источника нагрева. Параметры системы накачки ГРТ при импульсно-периодическом разряде:  $f = 15,4$  кГц,  $I_{ист} = 500$  мА; 1, 1' –  $C_p = 2350$  пФ,  $P_{Ne} = 35$  Торр,  $U_{ист} = 4,1$  кВ,  $P_{ист} = 2$  кВт; 2, 2' –  $C_p = 1566$  пФ,  $P_{Ne} = 35$  Торр,  $U_{ист} = 6$  кВ,  $P_{ист} = 3$  кВт; 3, 3' –  $C_p = 2350$  пФ,  $P_{Ne} = 3$  Торр,  $U_{ист} = 3,7$  кВ,  $P_{ист} = 1,85$  кВт

В экспериментах использовалась также схема Блюмляйна, позволяющая при данном напряжении на источнике поддерживать неизменной скорость нарастания напряжения в газоразрядном промежутке ГРТ  $dU_{тр}/dt$ , независимо от начальных условий разряда [3].

Величина рабочих емкостей в схеме Блюмляйна составляла 400 пФ, диаметр канала ГРТ 10 мм, длина газоразрядного промежутка 300 мм, частота повторения 7,7 кГц, напряжение на источнике питания  $U_{ист} = 5$  кВ.

На рис. 4 приведены зависимости среднего тока источника питания  $I_{ист}$  (кривая 1) и длительность спада напряжения на газоразрядном промежутке ГРТ ( $\tau_\phi$ ) (кривая 2) от давления неона ( $P_{Ne}$ ).

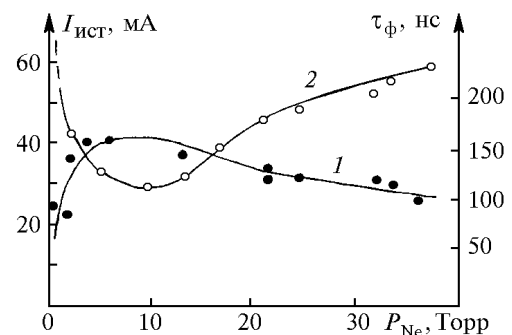


Рис. 4. Зависимости среднего тока  $I_{ист}$  (кривая 1) и времени спада напряжения  $\tau_\phi$  на ГРТ (кривая 2) от  $P_{Ne}$  в ГРТ. Схема Блюмляйна

Из эксперимента видно, что на высоких частотах повторения, при прочих равных условиях, зависимости длительности фронта и импульса накачки от давления буферного газа имеют значение давления, при котором эти длительности импульса накачки минимальны. Для зависимости среднего тока источника питания от давления буферного газа существует значение давления, при котором достигается максимальное значение среднего тока источника. При этом давления газа, при которых достигается экстремальное значение среднего тока и длительности фронта газоразрядного импульса накачки, практически совпадают.

На рис. 5 приведен типичный ход ВАХ источника питания для разрядного контура. Уменьшение крутизны коммутационной ВАХ с ростом  $U_{ист}$  указывает на увеличение активного сопротивления коммутатора, а значит, и на увеличение доли мощности источника, поглощаемой коммутатором. Это подтверждается измерением длительности импульса тока через коммутатор в процессе снятия коммутационной ВАХ. А именно, с ростом напряжения  $U_{ист}$  возрастает как амплитуда импульса тока, так и его длительность. Таким свойством обладают газоразрядные приборы, в том числе и водородный тиратрон, работающие на левой ветви кривой Пашена, что подтверждается также и ходом зависимости  $\tau_{\phi}(P_{не})$  на рис. 4 в области малых давлений неона.

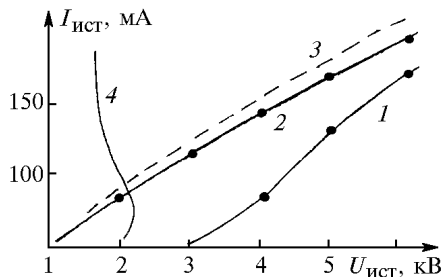


Рис. 5. ВАХ источника питания: 1 – для разрядного контура с последовательным включением тиратрона, рабочей емкости ( $C_p$ ) и ГРТ (без шунтирующей индуктивности  $L_{ш}$ ), т.е.  $I_{ист} = f(U_{ист})$ ; 2 – ВАХ для разрядного контура, где ГРТ заменена идеальным проводником той же индуктивности и длины, что и ГРТ – коммутационная ВАХ, т.е.  $I_{ист} = f(U_{к.ист})$ ; 3 – сдвинутая коммутационная ВАХ при работе источника с включенной ГРТ; 4 – нагрузочная ВАХ ГРТ, т.е.  $I_{ист} = f(U'_{тр})$ ;  $C_p = 733$  пФ;  $f = 12$  кГц; диаметр трубки 22 мм,  $Pd = 1000$  Торр · см при вариациях  $d$  в пределах 10 ÷ 70 см

Следует отметить, что при включении ГРТ в последовательный контур коммутационная ВАХ сдвигается в сторону меньших значений  $U_{ист}$  (кривая 3, рис. 5), что необходимо учитывать при определении энерговыклада в ГРТ по ее нагрузочной характеристике (см. рис. 5, кривая 4). Среднее напряжение на ГРТ ( $U'_{тр}$ ) находится из соотношения

$$U'_{тр} = U_{ист} - U_{к.ист} \quad (9)$$

для данных значений  $I_{ист}$ . Здесь  $U_{к.ист}$  находится по сдвинутой ВАХ – кривая 3, рис. 5. Мощность энерговыклада в ГРТ ( $P_{тр}$ ) находится из соотношения

$$P_{тр} = U'_{тр} I_{ист}. \quad (10)$$

Анализ экспериментальных данных позволил получить эмпирические зависимости для нахождения длительности импульса разрядного тока по полувысоте  $\tau_n$  и его  $I_n$  в области давлений газа  $P$  и размеров газоразрядных промежутков  $d$ , соответствующих рабочим давлениям в ГРТ (правой ветви кривой Пашена). Зависимости связывают индуктивность  $L$ , емкость  $C$  разрядного контура и частоту повторения  $f$  при  $f > 1/\tau_{пл}$  ( $\tau_{пл}$  – время рекомбинации плазмы в ГРТ):

$$\tau_n = K_1 \sqrt{LC} + K_2 (Pd)/(U_c f); \quad (11)$$

$$I_n = K_3 U_c \sqrt{C/L} - K_4 (Pd)/(U_c f), \quad (12)$$

где  $K_1, K_3$  – эмпирические коэффициенты, зависящие в основном от конструкции и типа коммутатора, а  $K_2, K_4$  – от конструкции ГРТ и рода газа. Так, для тиратрона ТГИ1000/25 при  $f > 5$  кГц и  $U_c > U_{пр}$  (напряжение пробоя газоразрядного промежутка) формулы (11), (12) конкретизируются в формулы

$$\tau_n = 2,2 \sqrt{LC} + Pd/(U_c f); \quad (13)$$

$$I_n = 0,6 U_c \sqrt{C/L} - Pd/(U_c f), \quad (14)$$

где  $\tau_n$  измеряется в нс,  $I_n$  в А,  $P$  в Торр;  $L$  в мкГн;  $C$  в пФ;  $d$  в см;  $U_c$  в кВ;  $f$  в кГц. Точность формул (13), (14) не менее 10%.

При  $f \leq 1/\tau_{пл}$  (режим одиночных импульсов) формулы для нахождения  $\tau_n$  и  $I_n$  сохраняют вид (11), (12) без  $f$  в знаменателе. Для левой ветви кривой Пашена (в области малых значений  $Pd$ ) (см. выше)  $\tau_n$  уменьшается с ростом  $Pd$  и растет с увеличением  $U_c$ . При этом растет  $I_n$ .

Исходя из вышеизложенного, результатов работы [4] и из дополнительных экспериментальных данных, можно утверждать следующее:

- наблюдается корреляция зависимости длительности газоразрядного импульса и напряжения пробоя газоразрядного промежутка ГРТ от величины  $Pd$ ;

- причиной существования минимального значения времени спада напряжения на ГРТ (см. рис. 4, кривая 2) является существование в данной области условий для достижения максимальной проводимости газоразрядного промежутка за счет ионизации газа (максимальный коэффициент газового усиления  $\alpha$  – коэффициент Таунсенда);

- для импульсно-периодического разряда на высоких частотах повторения, так же как и для режима одиночных импульсов [4], существуют импульсно-частотные кривые Пашена (ИЧКП), при прочих равных условиях различающиеся в зависимости от час-

тот повторения импульсов и скорости нарастания напряжения на газоразрядном промежутке ГРТ;

– при увеличении частоты повторения пробойное напряжение газоразрядного промежутка уменьшается, а значение  $(Pd)_{\min}$  на ИЧКП увеличивается;

– при увеличении скорости нарастания напряжения на газоразрядном промежутке ГРТ пробойное напряжение увеличивается, а  $(Pd)_{\min}$  на ИЧКП уменьшается.

### Заключение

В результате проделанной работы установлены зависимости величин плазменных емкостей, формируемых в процессе поляризации плазмы объемными зарядами, от начальных условий импульсно-периодического разряда в газоразрядном контуре, содержащем более одного газоразрядного промежутка (ГРТ, коммутатор).

Найдены простые соотношения для определения плазменных емкостей в коммутаторе и ГРТ, исходя из минимума экспериментальных данных.

Экспериментально установлено, что с ростом давления газа (неона) в ГРТ вынос тепла из активного объема возрастает, имея тенденцию к насыщению для неона в районе 60–100 Торр (см. кривые 4, 5, рис. 3,б), вследствие чего перепад температур между катодом и анодом ГРТ с импульсно-периодическим разрядом сначала возрастает, затем по мере разогрева основного объема и вытеснения газа к электродам спадает (см. кривые 4', 5', рис. 3,б) и стремится при дальнейшем разогреве ГРТ к постоянной величине.

Экспериментально также установлено, что с разогревом ГРТ при  $U_c = \text{const}$  увеличивается амплитудное значение напряжения на ГРТ ( $U_{\text{тр}}$ ). Это является следствием увеличения плотности газа в приэлектродных зонах за счет вытеснения его по мере разогрева из внутренней межэлектродной части ГРТ

и уменьшения результирующей плазменной емкости газоразрядной трубки ( $C_{\text{тр}}$ ) [см. формулу (8)].

Разработана простая методика определения энерговклада в элементы системы возбуждения импульсно-периодического разряда при высоких частотах повторения (в том числе в ГРТ и газоразрядный коммутатор) с помощью средних значений напряжения и тока высоковольтного источника.

Установлена корреляция временных характеристик импульсного разряда и пробойных напряжений в газоразрядном промежутке в зависимости от начальных условий разряда (в том числе от величины  $Pd$ ) – наличие импульсно-частотных кривых Пашена. Найдены соотношения для определения амплитудно-временных параметров импульсно-периодического разряда при накачке лазеров на парах металлов.

Следует отметить, что значение плазменной емкости коммутатора  $C_k$  определяется исходя из величины токовой добавки  $\Delta I_k$  [см. формулы (5), (6)]. При этом в  $\Delta I_k$  суммируются составляющие, обусловленные поляризационными, ионизационными и рекомбинационными процессами в приэлектродных и пристеночных частях газоразрядных промежутков, а также составляющей тока разряда емкости высоковольтного выпрямителя через зарядную индуктивность и коммутатор в течение времени коммутации энергии рабочей емкости  $C_p$  через ГРТ. Определение соотношения указанных составляющих для различных условий разряда, в том числе и в ГРТ, является предметом дальнейших исследований.

1. Кухарев В.Н. // ЖТФ. 1984. № 10. С. 1910–1915.
2. А.с. № 640621. СССР. 1978. Газоразрядная трубка лазера на парах металлов / Кухарев В.Н., Солдатов А.Н.
3. Кириллов А.Е. и др. // Изв. вузов. Физика. 1977. № 10. С. 146.
4. Винокуров Н.И. и др. // ЖТФ. 1977. Т. 47. Вып. 12. С. 2512–2516.
5. Кириллов А.Е., Кухарев В.Н., Солдатов А.Н. Исследования импульсного Рb-лазера на  $\lambda = 722,9$  нм с двухсекционной газоразрядной камерой // Квантовая электроника. 1979. Т. 6. С. 473–478.

Институт оптики атмосферы СО РАН,  
Томск

Поступила в редакцию  
1 декабря 1997 г.

#### *V.N. Kukharev. Sources of Power Parasitic Losses in the Metal-Vapor Laser Pumping System.*

The paper presents the results of the experimental investigations determining the power contribution of a metal-vapor laser power source to a pulse thyatron and a gas-discharge laser tube (GDLT). The simple relationships are given to define the plasma capacitances in the pulse thyatron and GDLT formed by plasma charges in the plasma polarization as well as to define the gas-discharge pulse amplitude-time parameters.

The paper describes the pulse-frequency Paschen curves (PFPC) for a pulse-periodic discharge, being different, under other equal conditions, depending on the pulse repetition rate and the pulse rise rate on the gas-discharge gap. The increased power contribution density has been found experimentally in the GDLT adjacent to electrodes parts as well as the temperature difference between electrodes depending on gas pressure, voltage potential, and other parameters.