

УДК 621.378

ВЫСОКОЧАСТОТНОЕ (МГц) ЗАЖИГАНИЕ КОММЕРЧЕСКИХ ЛАМП-ВСПЫШЕК ДЛЯ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЛАЗЕРОВ

© 2022 г. А. М. Вальшин¹, член-корреспондент РАН С. В. Гарнов²,
С. А. Бельков³, С. М. Першин^{2,*}

Поступило 16.11.2021 г.

После доработки 26.11.2021 г.

Принято к публикации 29.11.2021 г.

Обнаружено кратное (с 20 кВ до 3 кВ) снижение порога зажигания коммерческих ламп-вспышек для твердотельных лазеров при ВЧ-накачке на частоте несколько МГц. Выявлено, что при охлаждении лампы водой катодное свечение при ВЧ-накачке развивается на обоих электродах в отличие от импульсного поджига для разряда емкости, поскольку оба электрода попеременно выполняют роль анода и катода. При этом на стадии развития зажигания в средней части лампы наблюдается фарадеевское темное пространство, размер которого уменьшается с увеличением напряжения ВЧ-накачки вплоть до зажигания лампы уединенным стримером между электродами. Установлено, что снижение порога полного зажигания лампы определяется двумя основными факторами: амплитудой высокочастотного поля и импедансом охлаждающей жидкости, а также интервалом зажигания. Осуществлен ВЧ-поджиг лампы с разрядным промежутком до 60 см (порог зажигания ~5 кВ), который показал универсальность разработанного режима зажигания.

Ключевые слова: ВЧ-накачка, порог зажигания, газовый разряд

DOI: 10.31857/S2686740022010151

Известно, что резонансная диодная накачка твердотельных лазеров позволила создать компактные эффективные генераторы. Однако накачка выходных каскадов больших лазерных комплексов осуществляется только цилиндрическими лампами-вспышками. При этом поджиг ламп-вспышек для разряда емкостных накопителей обеспечивается импульсами пробоя с амплитудой десятки киловольт, которые производят большие электрические помехи, особенно при пробое нескольких ламп одновременно. Несомненно, что проблема снижения напряжения порога пробоя лампы-накачки твердотельных лазеров остается весьма актуальной, особенно для лидаров при длительном мониторинге аэрозолей в условиях повышенной влажности.

Ранее [1] мы выявили монотонное снижение порога высокочастотного (ВЧ) зажигания разряда цилиндрической лампы-вспышки лазера при

увеличении диэлектрической проницаемости охлаждающего агента: воздух—конденсаторное масло—ацетон—этиловый спирт—глицерин—вода.

Имеющийся задел и наши предварительные результаты [1], а также ранние работы по ВЧ-накачке разряда в газе [2] дают нам основание ожидать снижения порога ВЧ-пробоя коммерческих ламп-вспышек без изменения их конструкции. Целью данной работы являлось изучение физики высокочастотного зажигания разряда и механизма снижения порога пробоя цилиндрических ламп-вспышек лазера при непрерывной высокочастотной накачке через электроды лампы, а также жужом (пачками) биполярных высоковольтных гармонических колебаний.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Ранее [1] снижение порога ВЧ-зажигания ламп-вспышек мы объясняли вариацией диэлектрической проницаемости хладоагента (воздуха и жидкостей). Однако этого было недостаточно для обоснования наблюдаемого многократного снижения порога и требовало детального изучения физики процесса на разных стадиях развития зажигания лампы.

В эксперименте использовали серийную коммерческую цилиндрическую лампу-вспышку

¹ Башкирский государственный университет, Уфа, Россия

² Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия

³ Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Россия

*E-mail: pershin@kapella.gpi.ru

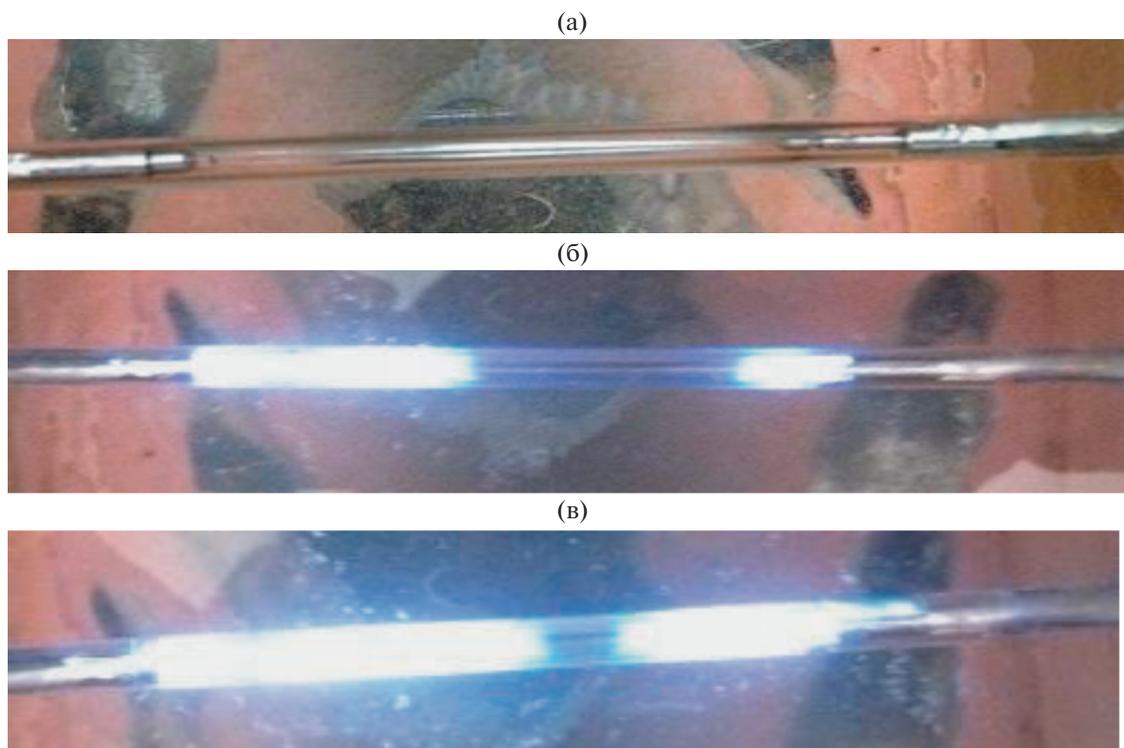


Рис. 1. Фотографии зажигания импульсной лампы при плавном увеличении амплитуды ВЧ-колебаний с частотой 3 МГц в воде в непрерывном режиме: а – 0 В, б – 2500 В, в – 2900 В.

ДНП6/90 с диаметром трубки 6 мм и расстоянием между электродами 90 мм для накачки неодимовых лазеров. Лампа наполнена криптоном с давлением 350 Торр. Поджиг лампы для зажигания дежурной дуги или разряда накопительной емкости рекомендовано проводить высоковольтным импульсом с напряжением до 20 кВ. Лампа размещалась в контейнере-кювете из поливинилхлорида (ПВХ) без верхней крышки, что позволяло менять охлаждающие жидкости и наблюдать развитие разряда по длине лампы.

Для ВЧ-накачки лампы мы разработали высокочастотный и высоковольтный генератор тока с перестраиваемой частотой 1–3 МГц и амплитудой синусоиды до 5000 В. Генератор обеспечивал режим накачки лампы непрерывной синусоидой колебаний, а также в форме пачек, заполненных синусоидой, длительность пачек и интервал между ними варьировалась. Схема эксперимента оставалась прежней, детали которой описаны в работах [1, 2].

На рис. 1 приведены фотографии лампы в воде до зажигания разряда (а), на начальной стадии зажигания (б) и следующей стадии (в) при увеличении амплитуды до 2900 В непрерывных ВЧ-колебаний с частотой 3 МГц.

Во-первых, насколько нам известно, мы обнаружили ряд особенностей на стадии зажигания разряда. В отличие от разряда постоянным током

с катодным свечением [3], здесь подобное свечение возникает одновременно на обоих электродах (рис. 1б). Во-вторых, на начальной стадии разряда области свечения разделены темным (фарадеевским) пространством разрыва тока разряда, длина которого уменьшается при повышении амплитуды ВЧ-накачки (рис. 1в). Физически ясно, что разрыв тока внутри трубки лампы замыкается током смещения через стенку трубки по ее внешней поверхности внутри воды. Последующее повышение амплитуды сопровождается сближением областей свечения до полного контакта и замыканием тока разряда внутри лампы.

Оставалось неясным, как начинает формироваться разряд в приэлектродных областях на начальной стадии. С целью изучения деталей развития свечения мы изменили режим ВЧ-накачки лампы с непрерывного на “импульсно-периодический”, последовательностью пачек, заполненных ВЧ-колебаниями с частотой 3 МГц и амплитудой 2500 В. Длительность пачек составляла 1 мс, которые следовали с частотой 12 Гц.

На рис. 2 представлено изображение свечения лампы на начальной стадии разряда при ВЧ-накачке последовательностью пачек.

Из рис. 2 видно, что процесс зажигания разряда сохраняет особенности, которые наблюдали ранее (см. рис. 1) при непрерывной ВЧ-накачке лампы: одновременное зажигание катодного све-

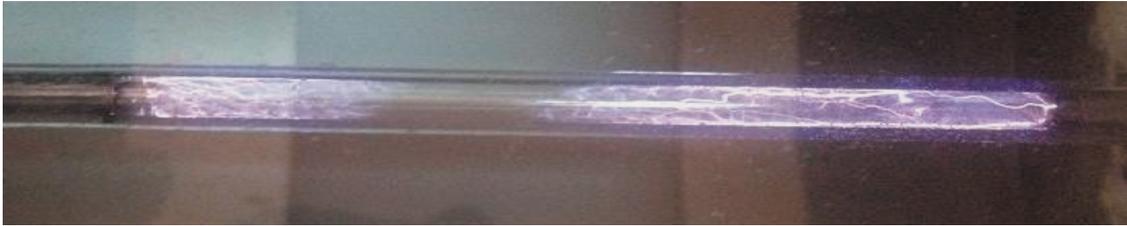


Рис. 2. Фотография свечения лампы при ВЧ-накачке последовательностью пачек длительностью 1 мс с высокочастотным (3 МГц, 2500 В) наполнением и частотой следования 12 Гц.



Рис. 3. Фотография стримера разряда лампы в воде при ВЧ-накачке (3 МГц) с амплитудой выше порога зажигания последовательностью пачек длительностью 1 мс, следующих с частотой 12 Гц.

чения у обоих электродов и темный промежуток (разрыв тока в лампе) между ними. Кроме того, накачка пачками визуализирует начальную стадию развития зажигания лампы. На рис. 2 отчетливо видны отдельные нитевидные стримеры-разряда, которые заполняют область свечения. Счетное число (3–4 шт.) протяженных линий разряда от 3–4 последовательных максимумов синусоиды накачки с периодом 300 нс позволяет оценить время жизни стримера как ~ 1 мкс, учитывая частоту накачки 3 МГц.

Увеличение длительности пачки сопровождается увеличением вклада диффузного свечения и повышением его интенсивности, что экранирует нитевидные стримеры. Характерно, что свечение заполняют все поперечное сечение трубки лампы (рис. 1, 2) до контакта с внутренней поверхностью. На рис. 2 хорошо видно, что протяженные стримеры разряда также локализованы вдоль поверхности внутри лампы. Короткий стример от острия правого электрода уходит к поверхности лампы, при этом основание электрода окружено светящимся кольцом. Это колечко указывает на формирование тока смещения в воде по всему периметру внешней поверхности трубки лампы. Увеличение амплитуды ВЧ-колебаний в пачке до 3000 В сопровождается сокращением длины темного пространства до его исчезновения и контакта областей свечения, как и в случае непрерывной ВЧ-накачки. При этом картина разряда кардинально меняется. Из объемного разряда областей свечения формируется один устойчивый стри-

мер, типичный вид которого для обоих режимов накачки показан на рис. 3.

Оставалось неясным, почему стример формируется по длинному пути между основаниями электродов (см. рис. 3) из точек прилегания основания электродов к внутренней поверхности трубки, тогда как более короткий путь между вершинами электродов остается свободным. Скорее всего, это следствие того, что катодное свечение формировалось от основания электродов (см. светящееся колечко на основании электрода на рис. 2). В такой геометрии плотный контакт основания электрода со стенкой лампы (в отличие от острия электрода, отдаленного от стенки) обеспечивал минимальный импеданс для тока смещения по воде от электродов через стенку лампы. Мы предположили, что замена воды с диэлектрической восприимчивостью $\epsilon = 81$ на другой хладагент, например, трансформаторное масло ($\epsilon = 2$), будет проявляться в формировании стримера разряда.

На рис. 4 показан стример разряда лампы, охлаждаемой трансформаторным маслом при ВЧ-накачке (3 МГц) последовательностью пачек с амплитудой выше порога зажигания длительностью 1 мс и частотой следования 12 Гц.

Из рис. 4 видно, что стример разряда формируется между остриями электродов по минимальному расстоянию в отличие от случая охлаждения водой (рис. 3), когда стример соединял основания электродов и был длиннее на 2–3 см. Более того, этот стример формируется при достижении ам-

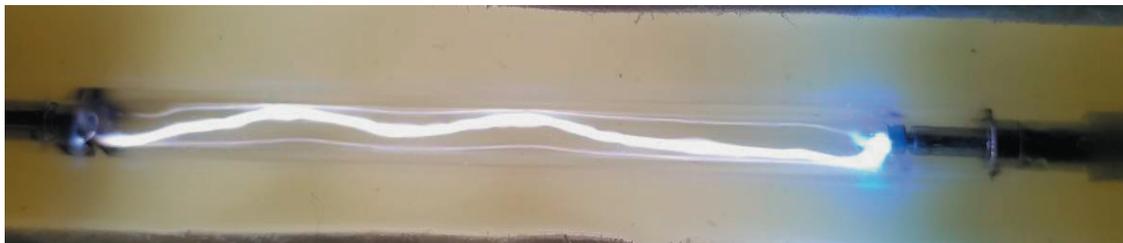


Рис. 4. Фотография стримера разряда лампы, охлаждаемой конденсаторным маслом при ВЧ-накачке (3 МГц) с амплитудой выше порога зажигания последовательностью пачек длительностью 1 мс, следующих с частотой 12 Гц.

плитуды синусоиды порогового значения 4500 В без катодного свечения и темного пространства (рис. 1).

Заметим, что отсутствие катодного свечения мы наблюдали и при непрерывной ВЧ-накачке лампы, охлаждаемой маслом, а также в других жидкостях-хладоагентах: ацетон, этиловый спирт и глицерин. Таким образом, катодное свечение на обоих электродах с темным пространством в средней части при ВЧ-накачке лампы формируется на начальной стадии зажигания только при ее охлаждении водой.

Визуальное сравнение рис. 3 и рис. 4 показывает, что в одинаковых условиях ВЧ-накачки диаметр стримера при охлаждении лампы маслом в два раза больше, чем при охлаждении водой. Кроме того, при охлаждении водой большая часть траектории стримера контактирует в окрестности электродов с внутренней стенкой лампы. Наблюдаемые отличия дают основание заключить, что ток разряда разветвляется у основания электродов. При этом большая часть тока замыкается стримером внутри лампы, а меньшая — током смещения через стенку лампы около основания электродов и вдоль стримера, прилегающего к внутренней поверхности трубки, а также через воду по всей внешней поверхности лампы (см. рис. 3).

Далее, мы с помощью цифрового осциллографа измерили длительность интервала, за время которого развивается зажигание лампы с охлаждением водой при ВЧ-накачке в окрестности порога и с превышением порога зажигания лампы на 20%. Длительность определялась по резкому снижению амплитуды (~ 3000 В) ВЧ-напряжения с одновременным повышением силы тока разряда при образовании стримера между электродами. Так, при пороговой ВЧ-накачке длительность интервала зажигания лампы составила 90 мкс, которая сократилась более чем в три раза (до 27 мкс) при превышении амплитуды ВЧ-накачки на 20% до ~ 3600 В.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Совокупность полученных данных показывает, что физика ВЧ-пробоя принципиально отличается от пробоя постоянным током. Из физики газовых разрядов [3–5] известно, что тлеющий разряд постоянного тока, который наиболее изучен к настоящему времени, имеет выраженную асимметрию анодной и катодной областей разряда: быстрые и медленные электроны и разноименно заряженные объемные заряды с диффузией электронов на стенки лампы и другие особенности.

Поскольку ВЧ-поле периодически меняет направление на противоположное по геометрической оси лампы, то вероятность выхода зарядов из объема свечения на стенки уменьшается. Потери заряженных частиц уменьшаются, что поддерживает рост ионизации и формирование стримера между электродами при небольшой амплитуде ВЧ-поля. Полученные нами результаты показывают существенное (до порядка величины) снижение порога пробоя (~ 3 кВ) при ВЧ-зажигании лампы по сравнению с амплитудой однополярного импульса (20 кВ) пробоя лампы для накачки твердотельного лазера вспышкой лампы от разряда емкости.

Принимая во внимание кривую Пашена [3–6], зависимости потенциала зажигания от произведения давления газа на длину разрядного промежутка, можно ожидать двукратного снижения потенциала зажигания при ВЧ-накачке из-за катодного свечения у обоих электродов лампы в воде (рис. 1, 2). Здесь вода визуализирует присутствие электронов в областях свечения, которых не видно при использовании других хладоагентов из-за снижения тока смещения, как мы полагаем. На рис. 5 приведен схематический разрез лампы-вспышки и эквивалентная электрическая схема протекания тока смещения между электродами через охлаждающую среду при ВЧ-зажигании.

Из рис. 5 видно, что ток смещения протекает от одного электрода через стенку кварцевой трубки лампы по всему внешнему периметру до жидкости охлаждения, затем через слой жидкости охлаждения по внешней поверхности трубки до

второго электрода и через стенку трубки ко второму электроду. Емкости этих участков, стекло–жидкость–стекло, условно обозначили как C_1 – C_2 – C_1 соответственно.

Величина тока смещения определяется следующим соотношением:

$$I(\text{смещения}) = \omega \times C_z \times U, \quad (1)$$

где C_z – общая емкость между электродами ($1/C_z = 1/C_2 + 2/C_1$), U и ω – амплитуда напряжения и частота ВЧ-накачки на электродах. Отметим, что $C_1 = \epsilon_G \times C_A$ и $C_2 = \epsilon_L \times C_A$, где C_A – емкость в воздухе, ϵ_G и ϵ_L – диэлектрическая проницаемость стекла и охлаждающей жидкости. Из (1) следует, что ток смещения пропорционально нарастает с увеличением частоты, суммарной емкости участков цепи и потенциала ВЧ-накачки. Зависимость от диэлектрической проницаемости хладагента не является явным, но ее увеличение также повышает ток смещения. Поэтому вода, как хладагент, с ее большой диэлектрической восприимчивостью ($\epsilon_L = 81$) и большим током смещения (1) визуализирует катодное свечение в области электродов (рис. 1, 2), которое становится невидимым при уменьшении диэлектрической проницаемости хладагента (масло) до $\epsilon_L = 2$.

Мы измерили суммарную емкость C_z между электродами при заполнении кюветы водой прибором MS-508. Ее величина составила 18 пФ. Тогда расчет тока смещения по формуле (1) до стадии зажигания стримера при напряжении $U = 2500$ В дает величину 1 А, что совпадает с измеренной силой тока смещения до формирования разряда. После замены воды на масло ток смещения уменьшился в 18 раз и его влиянием на разряд в этом случае можно пренебречь. Рисунки 3 и 4 подтверждают влияние диэлектрической проницаемости хладагента и тока смещения на геометрию стримера и диаметр его шнура. Отметим, что меньший диаметр стримера при охлаждении водой обеспечивает меньший износ электродов из-за распыления в режиме дежурной дуги перед разрядом емкостей накачки твердотельных лазеров.

Как упоминалось выше, двукратное снижение порога ВЧ-зажигания обеспечивает включение катода попеременно на каждом электроде с инжекцией электронов в разрядный промежуток по оси лампы. Следующим фактором снижения потенциала зажигания является, по нашему мнению, протяженный интервал зажигания. Здесь, в соответствии с законом сохранения энергии, мы увеличиваем время (~90 мкс) ввода энергии в разряд при относительно малой (3000 В) амплитуде ВЧ-колебаний. При стандартном поджиге-пробое лампы ДНП6/90, напротив, используют один импульс амплитудой ~20000 В и длительностью ~10 мкс. Отсюда видно, что произведения этих величин (энергия) сопоставимы в соответствии с

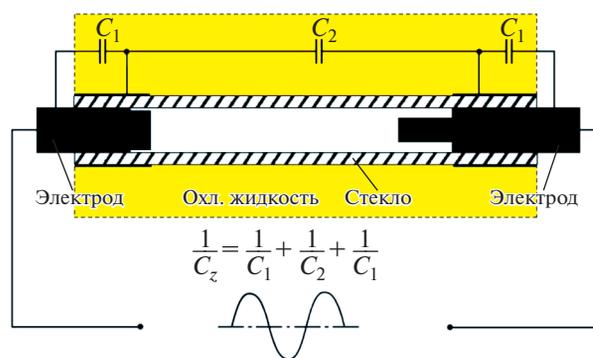


Рис. 5. Схематический разрез лампы-вспышки и эквивалентная электрическая схема протекания тока смещения между электродами через охлаждающую среду при ВЧ-зажигании.

законом сохранения энергии. В нашем случае мы рассматриваем произведение амплитуды на длительность импульса поджига или цуга ВЧ-накачки. В течение длительного интервала длина области катодного свечения увеличивается (из-за медленной диффузии электронов из приосевого объема на стенку лампы, т.е. малых потерь, и эффекта накопления электронов в разрядном промежутке) до момента замыкания темного пространства. Так, при пороговой (3 кВ) ВЧ-накачке (3 МГц) интервал составляет 90 мкс. Повышение потенциала накачки до 3.6 кВ сопровождается укорочением интервала зажигания до 27 мкс из-за увеличения длины пробега электрона в лампе и сокращения темного пространства (рис. 1, 2) в каждом периоде ВЧ-колебаний. Оставалась неясной возможность снижения порога ВЧ-разряда в лампах большого размера с разрядным промежутком в несколько десятков сантиметров.

Особый интерес здесь вызывает снижение порога ВЧ-поджига коммерческой лампы-вспышки ИНП24/590 с длиной разрядного промежутка лампы 59 см и внутренним диаметром 2.4 см на частоте 3 МГц. В предварительных экспериментах при охлаждении лампы водой мы наблюдали зажигание уединенного стримера между электродами при амплитуде ВЧ-колебаний ~5 кВ, тогда как в паспорте завода-изготовителя рекомендовано использовать для поджига лампы импульс с амплитудой до ~45 кВ.

ВЫВОДЫ

Экспериментально обосновано, что ВЧ-зажигание на частоте 3 МГц коммерческих ламп-вспышек (ДНП6/90 с диаметром трубки 6 мм и расстоянием между электродами 90 мм) для накачки твердотельных лазеров сопровождается кратным снижением порога (с 20 до 3 кВ). Установлено, что порог полного зажигания лампы

определяется двумя основными факторами: амплитудой высокочастотного поля и импедансом охлаждающей жидкости, а также интервалом зажигания. Снижение амплитуды поджига лампы-накачки компактных твердотельных лазеров особенно важно для лидаров при зондировании аэрозолей в условиях повышенной влажности, например, в протяженных тоннелях Баксанской нейтринной обсерватории [7, 8] для предотвращения пробоя и разряда емкости по поверхности.

Несомненно, предварительные успешные эксперименты по ВЧ-поджигу на частоте 3 МГц коммерческой лампы-вспышки ИНП24/590 большого размера с длиной разрядного промежутка лампы ~60 см и внутренним диаметром 2.4 см показывают перспективность разрабатываемого режима. Многократное (почти на порядок) снижение порога зажигания с рекомендованных 45 кВ до зарегистрированных нами 5 кВ при охлаждении лампы водой является убедительным доказательством и стимулом для продолжения работ.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Авторы выражают благодарность Российскому научному фонду за финансовую поддержку исследований (проект РФФ №19-19-00712).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вальшин А.М., Першин С.М., Михеев Г.М. Ограничение кратного снижения порога пробоя коммерческой лампы-вспышки лазера при кГц-накачке //

Краткие сообщения по физике ФИАН. 2019. № 6. С. 8–16.

2. Valshin A.M., Pershin S.M., Mikheev G.M. Increase in the efficiency of energy injection into discharge plasma and the luminous efficiency of luminescent lamps during high-frequency pumping // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. 2017. V. 44. № 8. P. 228–231.
3. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Интеллект, 2009. 734 с.
4. Смирнов Б.М. Моделирование газоразрядной плазмы // УФН. 2009. Т. 179. № 6. С. 591–604.
5. Кудрявцев А.А., Нусимов С.У., Прохорова Е.И., Слышов А.Г. Распределение параметров плазмы в прикатодных областях тлеющего разряда в азоте // ЖТФ. 2012. Т. 82. С. 8–11.
6. Жданов С.К., Курнаев В.А., Романовский М.К., Цветков И.В. Основы физических процессов в плазме и плазменных установках / Под ред. В.А. Курнаева. М.: МИФИ, 2007. 368 с.
7. Першин С.М., Гришин М.Я., Завозин В.А., Кузьминов В.В., Леднев В.Н., Макаров В.С., Мясников А.В., Тюрин А.В., Федоров А.Н., Петков В.Б. Лидарное зондирование эволюции многослойных туманов в наклонном тоннеле Баксанской нейтринной обсерватории // Краткие сообщения по физике. ФИАН. 2019. Т. 46. № 10. С. 46–54.
8. Першин С.М., Собисевич А.Л., Гришин М.Я., Завозин В.А., Макаров В.С., Леднев В.Н., Федоров А.Н., Мясников А.В., Артемова Д.Г. Разнонаправленная модуляция сезонного сжатия коры Земли и сигнала аэрозольного лидара в тоннеле над очагом вулкана Эльбрус // Доклады РАН. Физика, технические науки. 2021. Т. 501. С. 20–24.

HIGH-FREQUENCY (MHz) IGNITION OF COMMERCIAL FLASH LAMPS FOR SOLIDSTATE LASERS

A. M. Valshin^a, Corresponding Member of the RAS S. V. Garnov^b,
S. A. Belkov^c, and S. M. Pershin^b

^a Bashkir State University, Ufa, Russian Federation

^b Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

^c All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Russian Federation

A multiple (from 20 kV to 3 kV) decrease in the ignition threshold of commercial flash lamps for solid-state lasers with HF pumping at a frequency of several MHz was detected. It is revealed that when the lamp is cooled with water, the cathode glow during HF pumping develops on both electrodes, in contrast to pulsed ignition to discharge the capacitance, since both electrodes alternately act as an anode and cathode. At the same time, at the stage of ignition development, a Faraday dark space is observed in the middle part of the lamp, the size of which decreases with increasing HF pumping voltage until the lamp is ignited by a solitary streamer between the electrodes. It is established that the threshold of full lamp ignition is determined by two main factors: the amplitude of the high-frequency field and the impedance of the coolant, which limits the bias current.

Keywords: HF pumping, ignition threshold, gas discharge