

УДК 621.32

ОГРАНИЧЕНИЕ КРАТНОГО СНИЖЕНИЯ ПОРОГА ПРОБОЯ КОММЕРЧЕСКОЙ ЛАМПЫ-ВСПЫШКИ ЛАЗЕРА ПРИ kHz НАКАЧКЕ

А. М. Вальшин¹, С. М. Першин³, Г. М. Михеев²

Впервые, насколько нам известно, экспериментально обнаружено кратное (до фактора 3) снижение порога пробоя коммерческой цилиндрической лампы-вспышки лазера при емкостной (через электроды лампы) высокочастотной (ВЧ) накачке (19–3000 kHz) по сравнению с пробоем постоянным током. При работе на частоте 400 kHz обнаружено пропорциональное снижение порога ВЧ-пробоя при двукратном увеличении диэлектрической проницаемости (ϵ) при замене охлаждающего агента: воздух ($\epsilon = 1$) на конденсаторное масло ($\epsilon = 2$). Увеличение ϵ до 21 в ацетоне сопровождалось 30% снижением порога пробоя и его последующей стабилизацией при возрастании ϵ до 81 (в воде). Установлено, что дисперсия порога пробоя имеет две стадии: резкое снижение с большим (0.1–0.2 kV/kHz) градиентом на первых 0–19 kHz и плавным (~30%) снижением при увеличении частоты до 3000 kHz.

Ключевые слова: ВЧ-накачка, порог ВЧ-пробоя, снижение порога ВЧ-пробоя лампы-вспышки.

Известно, что резонансная диодная накачка твердотельных лазеров позволила создать компактные эффективные генераторы наносекундных импульсов. Так разработаны лазеры с массой менее килограмма с энергией импульса (~10 ns) более 0.1 J [1]. Однако накачка широкоапертурных выходных каскадов больших лазерных комплексов,

¹ Башкирский государственный университет, 450074 Россия, Уфа.

² Институт механики, Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, 426067 Россия, Ижевск; e-mail: mikheev@udman.ru.

³ ИОФ РАН, 119991 Россия, Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: pershin@kapella.gpi.ru.

таких как NIF (National Ignition Facility) в США [2] или УФЛ-2М в России [3], а также в других задачах, которые решаются с привлечением мощных импульсных лазеров [4], осуществляется только цилиндрическими лампами-вспышками. Физически ясно, что создание активных сред в виде диска с диодной накачкой [4] может снять эту проблему в будущем. Известно также, что поджиг ламп-вспышек для разряда емкостных накопителей обеспечивается импульсами пробоя с амплитудой десятки киловольт (kV), которые производят большие электрические помехи при одновременном пробое несколько сотен ламп. Режим дежурной дуги для повышения частоты повторения импульсов и средней мощности лазеров поддерживает канал разряда емкостных накопителей без периодического поджига ламп, но также требует импульса пробоя лампы для запуска дежурной дуги. Несомненно, что проблема снижения напряжения порога пробоя лампы остаётся весьма актуальной в настоящее время.

Целью данной работы являлось изучение физики зажигания разряда и факторов снижения порога пробоя цилиндрических ламп-вспышек лазера при емкостной [5] высокочастотной (ВЧ) накачке через электроды лампы при вариации частоты в килогерцовом (19–3000 kHz) диапазоне цугом (пачкой) биполярных высоковольтных гармонических колебаний. Имеющийся задел и наши предварительные результаты [6, 7], а также ранние работы по ВЧ-накачке разряда в газе [5, 8] дают нам основание ожидать снижения порога ВЧ-пробоя коммерческих ламп-вспышек без изменения их конструкции.

Эксперимент. Для проверки этой гипотезы был собран экспериментальный стенд и проведены систематические измерения величины порога пробоя двух серийных (коммерческих, ДРКТВ-3000-1 и AQL 4512) цилиндрических ламп-вспышек лазера с диаметром трубки d , значительно меньшим её длины L ($d < L$).

Из пластмассовых пластин была изготовлена ванна $150 \times 60 \times 50 \text{ mm}^3$, в которую была вмонтирована цилиндрическая лампа. Электроды лампы выступали из торцов ванны, а разрядный промежуток между электродами был внутри объема ванны. Охлаждение импульсной лампы осуществлялось либо воздухом, либо последовательным наполнением ванны охлаждающими жидкостями, которые отличались диэлектрической проницаемостью и поляризуемостью. В разных охлаждающих агентах: в воздухе, конденсаторном масле, ацетоне, спирте, глицерине и воде исследовали зависимость напряжения пробоя межэлектродного промежутка лампы от частоты высокочастотных колебаний. Исследовался, для сравнения, также пробой постоянным током. Заметим, что диэлектрическая проницаемость ε в этом ряду увеличивалась почти на два порядка: $\varepsilon = 1; 2,$

21, 26, 42 и 81. Визуальные наблюдения развития разряда проводили через открытую поверхность ванны.

Выбор агентов охлаждения был обусловлен поиском максимального коэффициента снижения напряжения порога зажигания лампы при ВЧ-накачке, а также корреляции этого снижения с диэлектрическими свойствами вещества агента, поскольку ранее [8] при переходе к ВЧ-разряду в газонаполненной трубке было достигнуто снижение порога зажигания до $\sim 30\%$ при охлаждении воздухом. Первые наши эксперименты при замене воздуха (диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 1$) на конденсаторное масло ($\varepsilon = 2$) показали более чем двукратное снижение порога зажигания. Причём, при ВЧ-накачке (400 kHz) коэффициент снижения порога пробоя при замене хладоагента, как будет показано ниже, был существенно больше, чем при пробое постоянным током. При смене охлаждающей жидкости, например, конденсаторного масла, ванна тщательно промылась ацетоном и высушивалась потоком воздуха с подогревом промышленным феном.

В экспериментах использовались высоковольтные ВЧ генераторы собственной разработки, которые перекрывали диапазон частот от 19 kHz до 3000 kHz. При этом для получения высокого напряжения выход ВЧ генератора подключали к резонансному колебательному контуру, в цепь которого лампа-вспышка была включена параллельно. В случае зажигания лампы постоянным током высокое выходное переменное напряжение выпрямляли ВЧ диодным мостом и далее подавали на лампу. Амплитуду напряжения зажигания лампы измеряли киловольтметром HVP-40DM. Здесь следует отметить, что из-за высокой нестабильности зажигания разряда при питании постоянным током [9] разброс напряжений порога зажигания достигал величины 1 kV. Большой разброс наблюдался только при постоянном токе, а при ВЧ-накачке разброс напряжений порога пробоя не превышал $\pm 10\%$. Согласно работе [9] напряжение, при котором развитие пробоя при постоянном токе начинается непосредственно со стримера, является пробивным напряжением и соответствует теории стримерного механизма разряда с весьма большим (~ 1 kV) разбросом измеренных значений напряжения пробоя. Этот разброс обусловлен флуктуациями границы перенапряжений, при переходе через которую исчезает стадия развития ионизации [9]. В случае зажигания разряда переменным током выходное напряжение генератора непосредственно подавали на электроды лампы и обеспечивали ВЧ-емкостной разряд [5].

Известно, что особенностью емкостного разряда является существование приэлектродных слоев объёмного заряда, в которых рождается много быстрых электронов, а также формируется среднее по времени падение потенциала, ускоряющего ионы в на-

правлении электрода [5, 8]. Это явление, бомбардировка электрода ускоренными ионами, проявляется в распылении металла электрода на поверхность трубки лампы над ним, что видно на всех лампах, долго работавших в лазерах в режиме импульсного поджига разряда накопительных конденсаторов. Физически ясно, что количество быстрых электронов ограничено эффективностью ионизации газа и можно ожидать проявление эффекта насыщения тока в динамике развития пробоя.

В эксперименте мы использовали две коммерческие лампы, наполненные инертным газом Хе с давлением 350 Torr [10], которые выпускаются для накачки твердотельных лазеров. Лампа № 1 – AQL 4512, расстояние между электродами в лампе составляло $L = 40$ mm, внутренний диаметр трубки $d \sim 4$ mm и лампа № 2 – ДКРТВ 3000-1, $L = 62$ mm, $d \sim 6$ mm.

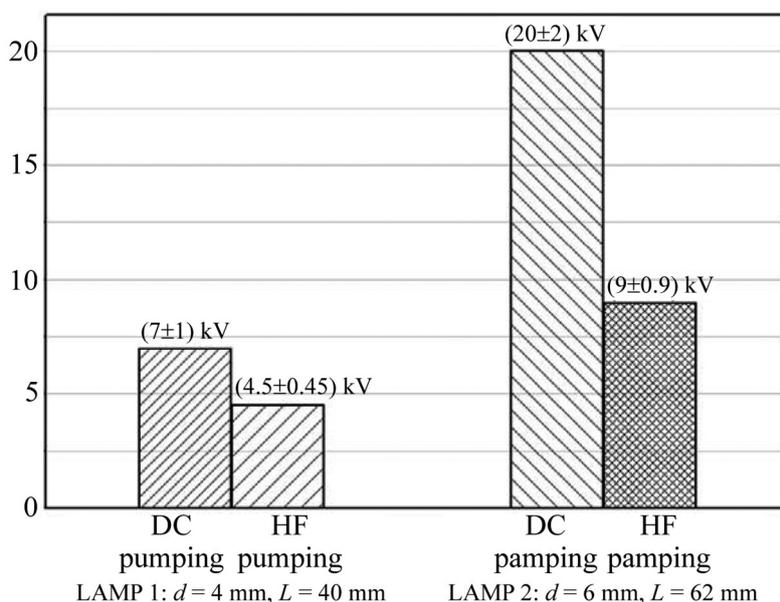


Рис. 1: Снижение (до ~ 2 крат) напряжения зажигания импульсных ламп (№ 1 и № 2) для твердотельных лазеров при высокочастотной (HF pumping, 400 kHz, разброс $\sim 10\%$) накачке относительно порога зажигания лампы постоянным током накачки (DC pumping, разброс ~ 1 kV) при охлаждении воздухом.

Результаты и обсуждения. На рис. 1 представлены значения напряжения порога пробоя лампы № 1 (слева) и № 2 (справа) в воздухе при переходе от разряда постоянным током (левые столбики) к ВЧ-накачке на частоте 400 kHz (правые столбики). Из рис. 1 видно, что порог пробоя при ВЧ-накачке снижается для обеих ламп. Так, для лампы № 1 порог падает с 7 kV до 4.5 kV, а в лампе № 2 – с 20 kV до 9 kV. Таким образом,

переход к ВЧ-накачке позволяет кратно уменьшить пороговое напряжение зажигания разряда лампы при охлаждении лампы воздухом. Как отмечалось выше, при емкостном ВЧ-разряде в окрестности электродов формируются особые условия распределения ионов и быстрых электронов [5, 8], которые приводят к снижению порога пробоя. Отсюда следует, что размерные параметры лампы L , d и их отношение L/d определяют порог пробоя лампы. Как видно из рис. 1, порог пробоя лампы № 2 ($L = 62$ mm, $d = 6$ mm) выше, чем лампы № 1 ($L = 40$ mm, $d = 4$ mm) при питании как постоянным, так и ВЧ током из-за отличия межэлектродных промежутков при одинаковом параметре $L/d \approx 10$. При переходе к ВЧ-накачке отличия порога зажигания ламп остаются, но с уменьшением разницы величины их отношения с ~ 3 -х крат (20 и 7 kV) до 2-х – (9 и 4.5 kV).

Из физики газовых разрядов [11, 12] известно, что тлеющий разряд постоянного тока, который наиболее изучен к настоящему времени [13], имеет выраженную асимметрию анодной и катодной областей разряда: быстрые и медленные электроны соответственно, а также разноименно заряженные объемные заряды с диффузией электро-

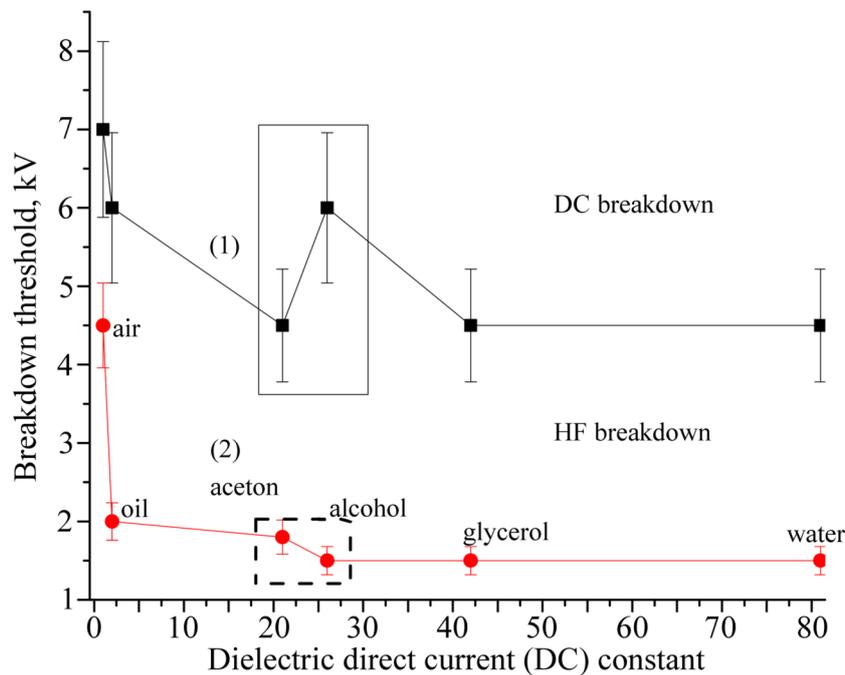


Рис. 2: Зависимость напряжения порога пробоя лампы № 1 от диэлектрической проницаемости охлаждающей среды при постоянном напряжении (1) и при накачке с частотой 400 kHz (2).

нов на стенки лампы и другие особенности. При этом принципиальными отличиями физики ВЧ-пробоя в нашем случае от пробоя постоянным током и тлеющего разряда [13] является быстрая смена полюсов анод/катод на электродах. Особо следует отметить многократное переключение направления тока смещения на удвоенной частоте питания в отличие от однократного нарастания тока смещения на стадии увеличения потенциала пробоя постоянным током. Физически ясно, что величина тока смещения и снижение порога пробоя будут чувствительны к диэлектрической проницаемости вещества, предназначенного для охлаждения трубки снаружи, которая входит в импеданс участка цепи до развития канала разряда внутри лампы.

На рис. 2 приведены зависимости порога пробоя лампы № 1 от ε вещества охладителя как постоянным током (рис. 2, квадраты), так и при ВЧ-накачке (рис. 2, сплошные круги) на частоте 400 кГц при её охлаждении разными хладоагентами. Из рис. 2 видно, что при замене воздуха на жидкости (конденсаторное масло, ацетон, этиловый спирт, глицерин и вода) наблюдается устойчивое снижение порога пробоя лампы с увеличением диэлектрической проницаемости ε среды охлаждения (здесь значения диэлектрической проницаемости измерены при постоянном токе) в обоих режимах поджига. При этом, несмотря на различия абсолютных значений напряжения пробоя (\sim трехкратное снижение порога ВЧ-пробоя), обе зависимости практически подобны. Кроме того, они имеют характерные особенности: резкое снижение порога в области малых значений диэлектрической проницаемости ($\varepsilon < 3$) и режим “насыщения” при $\varepsilon = 30 - 81$ (см. рис. 2). Некоторое различие в зависимости порога в окрестности значений $\varepsilon = 20 - 30$ (выделено контуром на рис. 2) может быть следствием большого разброса данных порога пробоя при постоянном токе, как упоминалось выше [9].

Меньший разброс значений порога ВЧ-пробоя (рис. 2, круги) позволил выявить скачок снижения порога ВЧ-пробоя при переходе от неполярных (ацетон, $\varepsilon = 21$) к полярным жидкостям охлаждения (спирт, $\varepsilon = 26$). Последующая стабилизация пробоя на его минимальном значении, несмотря на кратное увеличение диэлектрической проницаемости до 81 (вода), указывает на наличие фактора, ограничивающего ток в цепи в обоих режимах развития пробоя, что препятствует снижению порога.

Сопоставляя данные на рис. 2, мы обратили внимание на то, что порог ВЧ-пробоя на фиксированной частоте 400 кГц (рис. 2, круги) при переходе от охлаждения воздухом ($\varepsilon = 1$) к конденсаторному маслу ($\varepsilon = 2$) снижается пропорционально, двукратно, и согласуется с определением импеданса при заданной частоте f и емкости C

$$Z = (2\pi f\varepsilon C)^{-1}. \quad (1)$$

Затем фактор снижения отклоняется от пропорционального закона (1) и темп его уменьшается, например, в ацетоне ($\varepsilon = 21$) снижение в 2.5 раза, а в этиловом спирте ($\varepsilon = 26$) достигается только трехкратное снижение порога пробоя. Оставалась неясной дисперсия порога ВЧ-пробоя, которая была измерена нами.

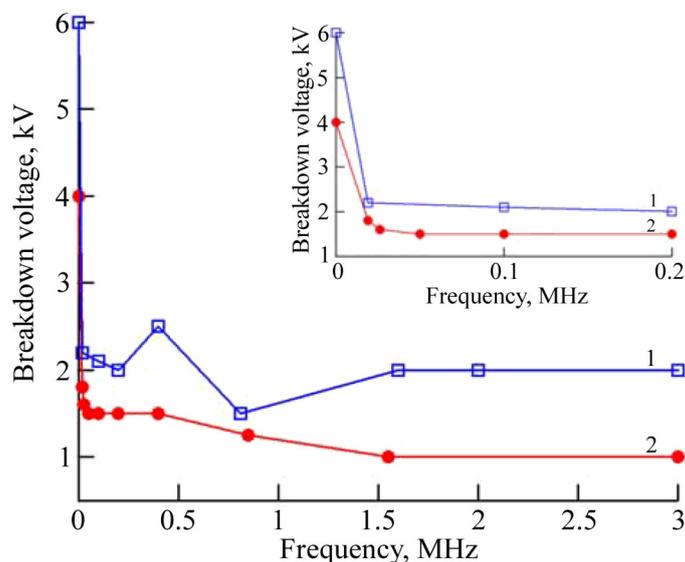


Рис. 3: Дисперсия порога пробоя лампы-вспышки № 1 лазера при вариации частоты до 3000 кГц и охлаждении лампы конденсаторным маслом (1) и водой (2). Разброс данных измерений в обоих случаях $\sim 10\%$.

На рис. 3 показана частотная зависимость порога ВЧ-пробоя при охлаждении лампы конденсаторным маслом (квадраты) и водой (круги). Обе зависимости проявляют одинаковую тенденцию, несмотря на разницу величины диэлектрической проницаемости в 40 раз, в виде двух стадий: резкого и плавного снижения (см. вставку на рис. 3). Порог пробоя при постоянном токе 6–7 кВ падает до величины 1.5–2 кВ на частоте 19 кГц. Затем фактор снижения уменьшается. Значение порога достигает минимальной величины ~ 1 кВ в окрестности частот 2–3 МГц и стабилизируется при увеличении частоты до 3000 кГц. Отклонение измеренных зависимостей от дисперсии импеданса (1) указывает на наличие ограничения тока в цепи развития пробоя.

Визуальное наблюдение разряда и данные рис. 3 показывают, что на низких частотах от 19 до 400 кГц канал разряда неустойчив с большими отклонениями от геометрической оси трубки лампы. Напротив, на более высоких частотах канал разряда стабилизируется вдоль оси трубки. Отметим, что при медленном повышении ВЧ напряжения до достижения порога пробоя и зажигания разряда происходит развитие

множества коротких боковых стримеров в промежутке электрод-кварцевая трубка лампы при охлаждении лампы водой. При превышении порога пробоя боковые стримеры затухают после формирования осевого канала-разряда. Наблюдаемый переходной процесс согласуется с динамикой развития ВЧ-пробоя с участием быстрых электронов [5], упомянутых выше.

Отсюда следует, что боковые стримеры фактически визуализируют быстрые электроны, которые вместе с током смещения замыкают цепь разряда на начальной, стартовой фазе динамики (развития) пробоя. На этой стартовой стадии нарабатывается критическая концентрация электронов в столкновительных процессах ионизации газа для последующего формирования приосевого стримера и канала разряда между электродами. Обнаруженное нами снижение порога пробоя при увеличении диэлектрической проницаемости агента охлаждения обусловлено уменьшением импеданса (1) и ростом тока смещения до величины насыщения, которая ограничена участком цепи боковых стримеров. Этим сценарием определяется подобие измеренных зависимостей на рис. 2. Наблюдаемое трехкратное уменьшение порога ВЧ-пробоя является результатом многократного переключения полярности электродов на удвоенной частоте, что эквивалентно подаче ступеньки потенциала пробоя постоянным током с такой же частотой. Кроме того, при ВЧ-пробое генерация быстрых электронов обеспечивается попеременно в окрестности обоих электродов, что сопровождается снижением порога ВЧ-пробоя.

Выводы. Впервые, насколько нам известно, экспериментально обнаружено трехкратное снижение порога пробоя коммерческой лампы-накачки лазера при емкостной (через электроды) ВЧ-накачке в диапазоне частот 19–3000 кГц по сравнению с пробоем постоянным током. Выявлена обратно пропорциональная зависимость порога зажигания разряда от величины диэлектрической проницаемости (ε) агента охлаждения в области малых значений $\varepsilon < 2$. При значениях $\varepsilon > 25$ ВЧ-пробой переходит в режим насыщения или ограничения, в котором порог уменьшается незначительно при увеличении диэлектрической проницаемости до $\varepsilon = 81$ в воде. При вариации частоты ВЧ-пробоя обнаружена нелинейная дисперсия снижения порога: более чем в два раза в области частот до 19 кГц с декрементом 0.1 кВ/кГц, затем – с существенно (в 600 раз) меньшим декрементом ~ 0.00017 кВ/кГц при частотах 20–3000 кГц. Предложен и обсужден физический механизм наблюдаемых особенностей.

Полученные результаты позволили успешно провести предварительный эксперимент по пробое коммерческой лампы ИФП20000 (разрядный отрезок 58 см) с большим размерным фактором $L/d \approx 80$ (на 20 кДж энергии разряда) для усилителей мощного лазера.

Порог ВЧ-пробоя в воздухе 22 kV был достигнут на частоте 3000 kHz. Полученные результаты данной работы дают основание ожидать кратного снижения порога ВЧ-пробоя при охлаждении лампы водой, что будет являться предметом следующей работы.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ-Бел_а № 18-52-00038.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] V. N. Lednev, A. E. Dormidonov, P. A. Sdvizhenskii, et al., *J. Anal. At. Spectrom.* **33**, 294 (2018); <https://doi.org/10.1039/C7JA00319F>
- [2] <http://www.lasers.llnl.gov>
- [3] V. B. Rozanov, S. Yu. Gus'kov, G. A. Vergunova, et al., *Journal of Physics: Conference Series* **688**(1), 012095 (2016); doi:10.1088/1742-6596/688/1/012095; <http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XXXIX/Re.html>
- [4] V. V. Apollonov, *High power/energy laser in our life* (New York, Nova, 2016).
- [5] Е. А. Кралькина, УФН **178**, 519 (2008).
- [6] А. М. Вальшин, С. М. Першин, Р. Ф. Тавлыкаев, Г. М. Михеев, *Phys. of Wave Phenomena* **23**(3), 199 (2015).
- [7] А. М. Вальшин, С. М. Першин, Г. М. Михеев, *Краткие сообщения по физике ФИАН* **44**(8), 18 (2017); DOI 10.3103/S1068335617080036.
- [8] Н. А. Капцов, *Электроника* (М., Государственное изд-во технико-теоретической литературы, 1956).
- [9] Г. А. Месяц, Ю. Д. Королев, *Физика импульсного пробоя газов* (М., Наука, 1991).
- [10] *Импульсные источники света*, под общей редакцией И. С. Маршака, 2 изд. (М., Энергия, 1978).
- [11] Ю. П. Райзер, *Физика газового разряда* (М., Интеллект, 2009).
- [12] Б. М. Смирнов, УФН **179**, 591 (2009).
- [13] А. А. Кудрявцев, С. У. Нисимов, Е. И. Прохорова, А. Г. Слышов, *ЖТФ* **82**, 8 (2012).

Поступила в редакцию 9 января 2019 г.

После доработки 22 мая 2019 г.

Принята к публикации 23 мая 2019 г.