

СХЕМА ВОЗБУЖДЕНИЯ ОДНОРОДНОГО БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА С ПОВЫШЕННЫМ УДЕЛЬНЫМ ЭНЕРГОВКЛАДОМ

© 2022 г. А. А. Юркин^{а,*}

^а Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН
Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., 53

*e-mail: yurkinaa@lebedev.ru

Поступила в редакцию 09.03.2022 г.

После доработки 04.04.2022 г.

Принята к публикации 04.04.2022 г.

Представлена схема питания, способная возбуждать мощный однородный барьерный разряд в газах различного состава и давления. Схема содержит генератор высоковольтных импульсов напряжения ~10 кВ с крутым фронтом, работающий на согласованную нагрузку на частотах до ~10 кГц. Для согласования генератора с барьерным разрядом применены дополнительные элементы, позволившие зажечь однородный разряд на частотах до ~7 кГц.

DOI: 10.31857/S003281622205010X

Барьерный разряд (БР) в газе, т.е. разряд в присутствии диэлектрика между электродами, — это востребованный способ создания низкотемпературной неравновесной плазмы [1]. Плазма БР используется для решения многих задач, таких, например, как очистка, модификация поверхности, напыление, синтез химических соединений, разнообразные медико-биологические применения [2–4]. Обычно БР осуществляют в газовом зазоре миллиметрового диапазона при использовании в качестве диэлектрика стекла, кварца, керамики. Конструкция и геометрия разрядного узла выбираются в зависимости от решаемой задачи.

Характеристики плазмы БР зависят от параметров разрядного узла, состава и давления газа и существенным образом — от схемы возбуждения. Для питания БР обычно используют переменное или однополярное частотно-импульсное напряжение достаточно высокого уровня для пробоя газоразрядного промежутка. Если не создавать специальных условий, то, как правило, БР в газах атмосферного и более высокого давления загорается в виде множества распределенных по поверхности электрода микроразрядов длительностью несколько наносекунд. Особенно этот режим горения разряда характерен для газов с высокими скоростями ухода электронов в процессах диссоциативной рекомбинации и прилипания, к коим относятся и атмосферный воздух, с которым работают во многих случаях применения БР. Связано это с тем, что плазма, созданная высоковольтным импульсом, практически полностью нейтрализуется к моменту прихода следу-

ющего импульса. Отсутствие же электронов, распределенных в объеме газоразрядной области в достаточном количестве, затрудняет формирование однородного БР.

Важным параметром для режима горения разряда является крутизна нарастания напряжения питания. В ряде работ было отмечено, что фронты импульса питания наносекундного диапазона длительности способствуют реализации режима однородного горения БР [5, 6]. Существует обратная зависимость между E/P и $P\tau$, где E — напряженность электрического поля в газовом зазоре в момент возникновения импульсного пробоя, P — давление газа, а τ — время формирования пробоя. Например, для воздуха $E/P \sim 100 \text{ В} \cdot \text{см}^{-1} \cdot (\text{мм рт. ст.})^{-1}$ при $P\tau \sim 10^{-6} (\text{мм рт. ст.}) \cdot \text{с}$ [7]. При наносекундных фронтах, атмосферном давлении и миллиметровом и менее газоразрядном промежутке $E \sim 100 \text{ кВ/см}$. При таких больших полях можно ожидать наличия в плазме электронов с энергией несколько десятков электронвольт, что расширяет возможности применения БР, но усложняет физику разряда. При бомбардировке такими электронами поверхности диэлектрика возможно выбивание вторичных электронов и возникновение положительного заряда на поверхности диэлектрика, способного частично сохраниться к приходу следующего импульса питания БР и повлиять на формирование пробоя. Высокое поле приводит к высокой импульсной мощности разряда, а высокая частота импульсов позволяет реализовывать повышенные удельные энергоклады, что заметно интенсифицирует процессы, происходящие в плазме,

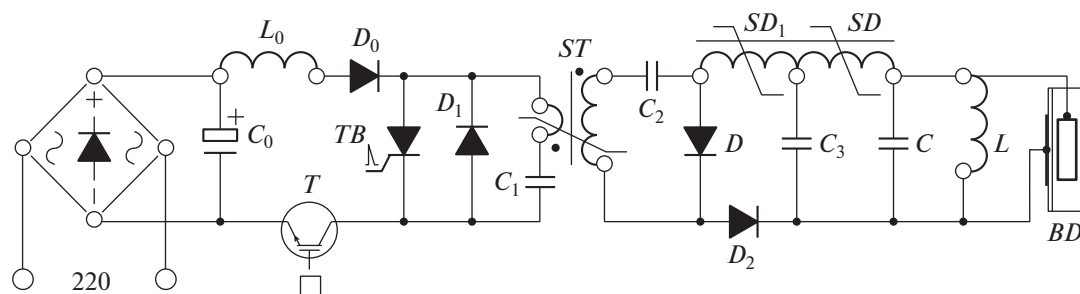


Рис. 1. Принципиальная схема питания барьерного разряда. *BD* – разрядный узел БР; *SD*, *C*, *L* – элементы согласования (*SD* – насыщающийся дроссель (20 витков, сердечник – ферритовое кольцо М1000НН, 20 × 12 × 6 мм), *C* = 100 пФ, *L* = 2.2 мкГн); *SD*₁ – насыщающийся дроссель (15 витков, сердечник – ферритовое кольцо М1000НН, 20 × 12 × 6 мм); *D* – последовательная цепочка из 12-ти диодов КД203Г; *TB* – блок из 12-ти параллельно включенных тиристоров КУ221А(Б); *T* – транзистор IRG4PH50UD; *ST* – сборка из пяти насыщающихся трансформаторов (соотношение витков 1/2, сердечник – 14 ферритовых колец М2000НМ, 18 × 8 × 5 мм), первичные витки соединены параллельно, вторичные – последовательно; *D*₀, *D*₁, *D*₂ – диоды FR607; *L*₀ = 200 мкГн; *C*₁ = 0.47 мкФ; *C*₂ = 4.7 нФ; *C*₃ = 165 пФ.

и, тем самым, сильно повышает эффективность применения БР. Однородность же плазмы повышает ее качество. Поэтому однородный БР с высоким удельным энерговыделением в газах атмосферного давления весьма востребован, но трудно реализуем.

В настоящей работе в экспериментах использовалась коаксиальная конструкция разрядного узла БР со стеклянной трубкой с внешним диаметром 15 мм, а внутренним – 12.3 мм, поверх которой располагался внешний электрод. Диаметр внутреннего цилиндрического электрода выбирался в соответствии с желаемым размером газоразрядного зазора. Разрядный узел размещался в откачиваемой камере в случае работы с газами различного состава и давления.

При подаче на электроды импульса напряжения V в момент пробоя газоразрядного промежутка, согласно граничным условиям, соблюдается равенство электрической индукции на переходе газ–диэлектрик: $D_g = D_d$. Соответственно, для напряженности поля в газе и диэлектрике имеем $E_g = \epsilon E_d$, где ϵ – диэлектрическая проницаемость диэлектрика. Отсюда несложно получить, что:

$$E_g = V / (h_g + h_d / \epsilon), \quad (1)$$

где h_g – величина газоразрядного зазора, а h_d – толщина диэлектрика.

При достижении E_g статического уровня пробоя и дальнейшем росте начинается ускоряющееся по времени формирование нарастающего тока разряда, заряжающего емкость диэлектрического барьера. Из формулы (1) следует, что чем круче фронт нарастания импульса напряжения V , тем больше превышение E_g над статическим уровнем по истечении времени формирования τ пробоя. Если это превышение достаточно большое и достигается за время, меньшее, чем характерное время длительности микроразрядов при неодно-

родном разряде, то некоторые различия условий пробоя в разных точках газоразрядного промежутка нивелируются и можно ожидать зажигания однородного разряда. Таким образом, ключевым параметром импульсного источника питания БР для реализации режима однородного горения является крутизна импульса напряжения. При этом нужно обеспечить достаточно высокие уровни напряжения и тока, а также высокую частоту импульсов для достижения высоких удельных энерговыделений.

В данной работе для питания БР был применен высоковольтный генератор импульсов с крутым фронтом, подобный генератору, использованному для питания лазера на парах меди из работы [8]. Он удовлетворяет изложенным выше требованиям, но предполагает хорошее согласование с нагрузкой для работы на высоких частотах. Связано это с тем, что генератор, по сути, является индуктивным генератором, выдающим в импульсе заданную порцию энергии. И если она не полностью потребляется, то происходит отражение импульса от нагрузки, что сбивает работу генератора. БР же является емкостной нагрузкой и, помимо энергии, выделенной в разрядном промежутке, примет лишь энергию заряда небольшой емкости диэлектрического барьера, что в сумме, как правило, значительно меньше энергии импульса. Для решения этой проблемы были применены элементы согласования генератора с БР.

Принципиальная схема питания БР показана на рис. 1.

Генератор, формирующий на выходе, на емкости C_3 , импульсы напряжения ~ 10 кВ с крутым фронтом, работает следующим образом. При коммутации транзистора T на время $\pi(L_0 C_1)^{1/2}$ происходит зарядка емкости C_1 до удвоенного выпрямленного сетевого напряжения. На фронте выключения T открывается блок тиристоров TB ,

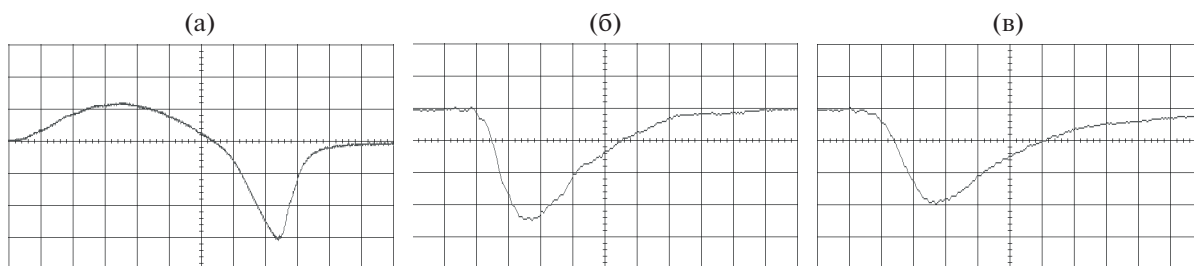


Рис. 2. а – ток вторичной обмотки ST при $C_2 = 4.7$ нФ, масштаб: по горизонтали – 100 нс/деление, по вертикали – 50 А/деление; б, в – ток генератора в нагрузке 82 Ом при $C_2 = 4.7$ нФ (б) и 8.0 нФ (в), масштаб: по горизонтали – 20 нс/деление, по вертикали – 25 А/деление.

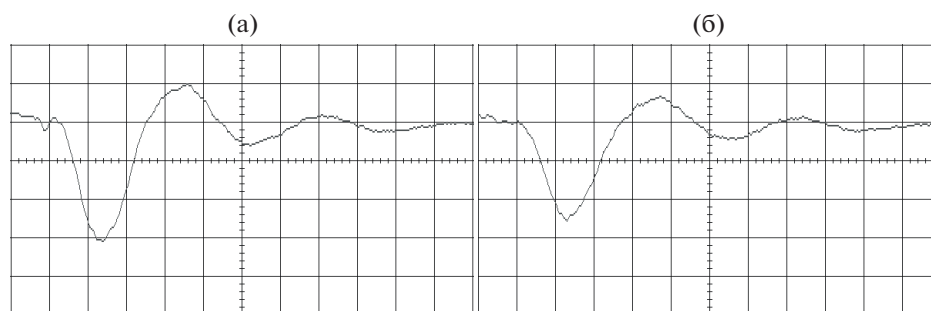


Рис. 3. Ток схемы питания в нагрузке 82 Ом при $C_2 = 4.7$ нФ (а) и 8.0 нФ (б), масштаб: по горизонтали – 20 нс/деление, по вертикали – 25 А/деление.

и C_1 разряжается на первичную обмотку трансформатора ST . При этом происходит зарядка емкости C_2 с одновременным насыщением сердечника ST . Далее идет быстрая разрядка C_2 через насыщенную индуктивность вторичной обмотки ST . Для формирования высоковольтного импульса с крутым фронтом используется явление резкого восстановления проводимости диодов при прохождении обратного тока [9]. При резком восстановлении проводимости диодов D энергия, накопленная в индуктивности вторичной обмотки, поступает через насыщающийся дроссель SD_1 на емкость C_3 . Следует отметить, что оптимальной емкостью является резонансная емкость $C_2 = C_1/n^2$, где n – коэффициент трансформации ST . При этом во вторичную цепь ST передается 50% энергии емкости C_1 . При увеличении C_2 количество передаваемой энергии возрастает, но уменьшаются крутизна фронта и амплитуда импульса напряжения генератора. Это позволяет регулировать параметры выходного импульса под решаемые задачи, что оказалось полезным в экспериментах с БР. Осциллограммы тока вторичной обмотки ST и выходного тока генератора при нагрузке 82 Ом, снятые с помощью трансформатора тока – пояса Роговского, показаны на рис. 2. Генератор может работать на согласованную нагрузку на частотах до ~ 10 кГц.

Схема питания БР, т.е. генератор с элементами согласования, работает на БР без перегрева элементов генератора на частотах до ~ 7 кГц. Осциллограммы тока в нагрузке 82 Ом, подключенной к выходу схемы питания вместо БР, приведены на рис. 3.

Выбор элементов согласования определялся следующими соображениями. Насыщение SD должно происходить с задержкой относительно SD_1 , чтобы ослабить влияние L и C на формирование выходного импульса генератора. Величины L и C выбираются такими, чтобы четверть периода колебаний контура LC была не больше времени насыщения SD . Емкость C меньше или порядка емкости C_3 . При этих условиях отражение импульса от нагрузки на генератор сильно ослабевает, а энергия потребляется нагрузкой и излучается LC -контуром. Колебательный контур LC совместно с индуктивностью контура подключения схемы питания к электродам БР и емкостью диэлектрического барьера определяют вольт-амперные характеристики разряда.

Схема питания БР была апробирована в работе с азотом, аргоном, водородом при атмосферном давлении газа, а также с атмосферным воздухом. Атмосферный воздух, содержащий, помимо основного набора элементов, пары воды, компоненты пыли, многократно ускоряющие уход электронов, является удобным тестовым газом

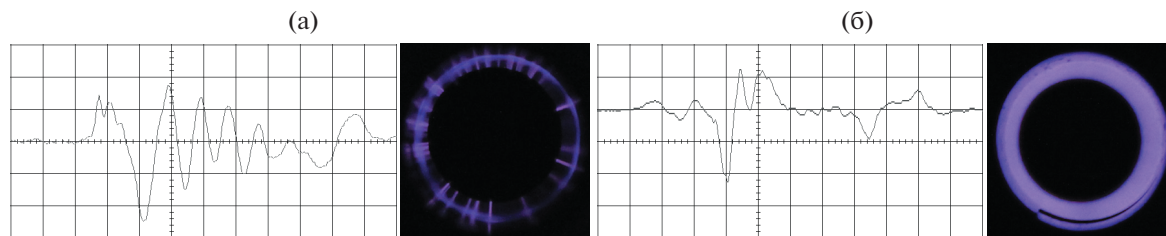


Рис. 4. Ток разряда в воздухе (слева) и фотография зоны разряда (справа) при $C_2 = 4.7$ нФ: **а** – питание без элементов согласования, **б** – с элементами согласования. Масштаб: по горизонтали – 20 нс/деление, по вертикали – 5 А/деление (**а**), 25 А/деление (**б**).

для проверки способности схемы к зажиганию однородного БР. В экспериментах надежно реализовывался мощный однородный разряд со всеми этими газами. При этом, например, при работе с водородом удобнее было использовать $C_2 = 8.0$ нФ, так как в этом газе при высоких полях часто возникали поверхностный пробой в узле БР и токи утечки на стенки камеры. В экспериментах с атмосферным воздухом использовался внутренний цилиндрический электрод длиной 18 мм, диаметром 10 мм, соответственно газоразрядный зазор $h_g = 1.15$ мм. Расчетная емкость диэлектрического барьера ~ 30 пФ. Осциллограммы тока разряда в воздухе и фотографии зоны БР при питании от генератора и от схемы питания с частотой импульсов 5 кГц показаны на рис. 4.

Хорошо видно, что применение элементов согласования переводит режим горения разряда из неоднородного с микроразрядами в однородное, при этом многократно увеличивается мощность БР. При питании БР от генератора на частоте 5 кГц возможна была лишь кратковременная работа из-за нарастающего разогрева элементов генератора.

Представленная схема питания позволяет осуществлять однородный БР с высоким удельным энерговыделением в газах различного состава и давления для решения широкого круга задач. Особенно ценна возможность зажигания однородного БР в газах высокого давления.

Работа выполнена в рамках Соглашения о сотрудничестве между Физическим институтом

им. П.Н. Лебедева и Сыктывкарским государственным университетом им. Питирима Сорокина.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Brandenburg R.* // *Plasma Sources Science and Technology*. 2017. V. 26. P. 053001. <https://doi.org/10.1088/1361-6595/aa6426>
2. *Wagner H., Brandenburg R., Kozlov K.V., Sonnenfeld A., Michel P., Behnke J.F.* // *Vacuum*. 2003. V. 71. P. 417. [https://doi.org/10.1016/S0042-207X\(02\)00765-0](https://doi.org/10.1016/S0042-207X(02)00765-0)
3. *Mikheyev P.A., Demyanov A.V., Kochetov I.V., Sludnova A.A., Torbin A.P., Mebel A.M., Azyyazov V.N.* // *Plasma Sources Science and Technology*. 2020. V. 29. P. 015012. <https://doi.org/10.1088/1361-6595/ab5da3>
4. *Daeschlein G., Scholz S., Arnold A., von Podewils S., Haase H., Emmert S., von Woedtke T., Weltmann K.-D., Junger M.* // *Plasma Process. Polym.* 2012. № 9. P. 380. <https://doi.org/10.1002/ppap.201100160>
5. *Tao S., Kaihua L., Cheng Z., Ping Y., Shichang Z., Ruzheng P.* // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2008. V. 41. P. 215203. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/41/21/215203>
6. *Ayan H., Fridman Gr., Gutsol A.F., Vasilets V.N., Fridman A., Fridman G.* // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2008. V. 36. № 2. P. 504. <https://doi.org/10.1109/TPS.2008.917947>
7. *Петер Г.* Электронные лавины и пробой в газах. М.: Мир, 1968. С. 341.
8. *Юркин А.А.* // *Квантовая электроника*. 2016. Т. 46. № 3. С. 201.
9. *Месяц Г.А.* Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004. С. 402.