

А. И. ХРИСТО, аспирант, ИИПТ НАН Украины, Николаев

МАГНИТНО-ТРАНЗИСТОРНЫЙ ГЕНЕРАТОР ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСОВ СУБМИКРОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

Описан магнитно - транзисторный генератор высоковольтных импульсов, разработанный для формирования газового разряда субмикросекундной длительности. Генератор преобразует постоянное напряжение 500 В в последовательность импульсов напряжения с амплитудой 10 кВ и частотой следования 2 кГц. Представлены результаты экспериментального исследования процесса формирования рабочего и перемангничивающего импульсов в высоковольтных каскадах магнитного сжатия. Реализован импульсный тлеющий разряд в атмосфере разреженного воздуха, получены электрические характеристики разряда, по результатам исследования сделаны выводы.

Ключевые слова: генератор высоковольтных импульсов, импульсный трансформатор, звено магнитного сжатия, искусственная формирующая линия, переключающий дроссель, газовый разряд, вакуумная камера.

Введение. В технике физического эксперимента и электрофизических установках нужны высоковольтные импульсы субмикросекундной длительности, амплитудой десятки и сотни киловольт. С развитием экспериментальной физики потребителями мощных кратковременных импульсов напряжения стали генераторы сверхвысоких колебаний, электронно-лучевые пушки, газовые лазеры, газоразрядные промежутки [1] и т.д.

Для получения таких импульсов широко используются генераторы с разрядом формирующей линии напрямую на нагрузку либо через импульсный трансформатор, коммутируемой газоразрядным управляемым прибором. К наиболее часто используемым газоразрядным приборам можно отнести управляемый трехэлектродный разрядник в атмосфере сжатого газа и импульсный водородный тиратрон.

Основным преимуществом управляемого разрядника по сравнению с тиратроном является возможность получения крутых перепадов напряжения за время порядка 1 нс и менее. Однако схемы с накопителями и искровыми разрядниками используются, в основном, для получения одиночных импульсов, так как в случае формирования периодически повторяющихся импульсов сказывается значительная нестабильность времени срабатывания искрового разрядника.

К достоинствам тиратронов как коммутаторов можно отнести: возможность управления моментом и частотой коммутации; возможность работы в довольно широком диапазоне анодных напряжений. Основными недостатками тиратрона являются: ограничения по коммутируемому току и напряжению, частоте (из-за процесса деионизации газа) и потребление мощности для нагрева.

В последние годы совместно с газоразрядными коммутаторами приме-

няются магнитные ключи, принцип действия которых основан на использовании нелинейности петли гистерезиса [2]. На их основе строятся тиратронно-магнитные и магнитно-полупроводниковые генераторы высоковольтных импульсов. Одна из основных областей применения генераторов на магнитных ключах возникла в связи с совершенствованием линейных ускорителей электронов волноводного типа, в которых магнитный генератор используется для питания катода электронной пушки. Магнитные генераторы применяют в качестве импульсных источников питания мощных модуляторных ламп, установок волнового разряда в плазме, а также лазеров на парах металлов [3].

К достоинствам магнитных ключей следует отнести высокую стабильность срабатывания, долговечность и малое время восстановления.

Таким образом, если необходимо повысить надежность работы генератора, стабильность следования импульсов, увеличить частоту срабатывания, то для коммутации высоких напряжений и больших токов лучше использовать магнитные ключи, к которым предъявляются требования только по допустимым тепловым потерям. Недостатком является невозможность получения идеально прямоугольного импульса.

Целью работы является разработка схемы, создание и испытание магнитно-транзисторного генератора для формирования газового разряда пониженного давления субмикросекундной длительности.

В качестве исходных данных для разработки генератора взяты следующие параметры: амплитуда импульса – 10 кВ, длительность – 0,3 мкс, частота следования до – 2 кГц. Генератор предполагается использовать для синтеза углеродных наноматериалов в результате газофазного разложения углеводорода в плазме импульсного тлеющего разряда субмикросекундной длительности.

Описание схемы магнитно-транзисторного генератора

Для выполнения поставленной цели разработан и сконструирован магнитно – транзисторный генератор высоковольтных наносекундных импульсов, принципиальная схема которого представлена на рис. 1.

В данной схеме генератора происходит поэтапное увеличение напряжения, а звенья магнитного сжатия расположены между двумя импульсными высоковольтными трансформаторами Тр1 и Тр2 с разными коэффициентами усиления.

Питание схемы осуществляется от автотрансформатора, с которого синусоидальное напряжение подается на диодный мост U1, выпрямляется и заряжает батарею электролитических конденсаторов С1. С этих конденсаторов достаточно большой емкости (1000 мкФ) и производится импульсный отбор энергии для формирования рабочего импульса.

Импульс напряжения, приходящий на затвор транзистора VT1 от схемы управления, заставляет транзистор практически мгновенно открыться и коммутировать заряженную батарею электролитических конденсаторов через

дроссель L1 на импульсный конденсатор C2 намного меньшей емкости (1 мкФ). В создавшемся колебательном контуре C1-L1-C2 возбуждается импульс синусоидального тока и часть энергии отбирается в конденсатор C2, который заряжается до большего напряжения, чем напряжение на C1. После заряда конденсатора C2 транзистор закрывается и отсоединяет цепь источника питания от разрядной цепи. Далее с небольшой временной задержкой насыщается дроссель Др1 и разряжает конденсатор C2 на высоковольтный C3. Энергия из низковольтного конденсатора передается в высоковольтный через импульсный трансформатор Тр1, коэффициент усиления которого $k = 20$. Полная передача энергии возможна только при равенстве запасаемых энергий, поэтому $C3 = C2/k^2 = 2,5$ нФ.

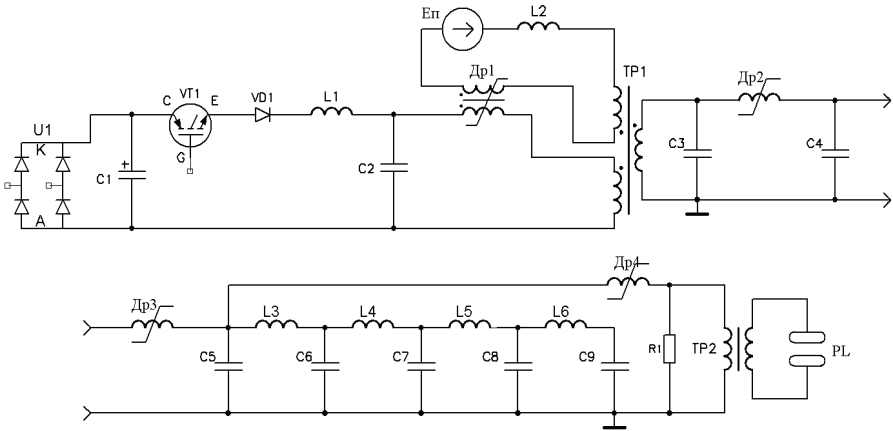


Рисунок 1 – Принципиальная схема магнитно-транзисторного генератора высоковольтных наносекундных импульсов для питания газоразрядной нагрузки

Допустимое прикладываемое обратное напряжение между эмиттером-коллектором у IGBT транзистора составляет всего лишь $U_{ЭК} = 17$ В, поэтому для защиты транзистора последовательно с ним стоит быстродействующий диод (время обратного восстановления – 40 нс). Применение диода увеличивает обратное прикладываемое напряжение на 600 В. При предельном напряжении 500 В на конденсаторе C2 и его емкости 1 мкФ максимальная запасаемая энергия составит 0,12 Дж. Так как емкости конденсаторов C1 и C2 существенно различаются, то на последнем конденсаторе напряжение будет выше примерно в 1,4 раза.

Особенность работы генератора состоит в том, что основная компрессия импульса происходит в высоковольтной части схемы после повышающего трансформатора Тр1. Сжимать импульс в низковольтной части схемы нецелесообразно, так как с увеличением коэффициента сжатия количество витков первичной обмотки трансформатора может быть очень малым, но вместе с тем конструктивные особенности трансформатора должны обеспечивать ми-

нимальные индуктивности рассеивания его обмоток.

В высоковольтной части генератора импульсов располагаются три звена сжатия. Компрессия импульса в каждом звене обеспечивается за счет того, что каждая последующая индуктивность L_i насыщенного дросселя Dp_i меньше предыдущей $L_2 > L_3 > L_4$, в результате становится возможным формирование импульсов наносекундной длительности. В последнем звене сжатия вместо конденсатора располагается искусственная формирующая линия (ИФЛ). Коэффициент усиления оконечного трансформатора Tr_2 равен единице. Если пересчитанное к первичной обмотке импульсного трансформатора Tr_2 сопротивление нагрузки равно волновому сопротивлению искусственной формирующей линии (лестничный тип), то разряд линии происходит в виде одиночного импульса, форма которого близка к прямоугольной. В качестве нагрузки рассматривается газоразрядный промежуток PL , который имеет нелинейную зависимость тока от напряжения и не может быть идеально согласован. Процесс формирования основного импульса сопровождается намагничиванием сердечников звеньев генератора в положительном направлении. В интервале между основными импульсами сердечники магнитных элементов должны перемагнититься в обратном направлении.

Первый насыщающий дроссель имеет дополнительную обмотку подмагничивания, через которую от источника питания E с последовательно включенным развязывающим дросселем L_2 пропускается постоянный ток. Этот ток обеспечивает перезарядку конденсатора C_1 напряжением отрицательной полярности, которое вызывает насыщение дросселя Dp_1 и передачу импульса перемагничивания по остальным звеньям сжатия, точно так же, как и основного в сторону нагрузки.

Перемагничивание сердечников магнитных ключей является обязательным процессом, который происходит сразу же после формирования рабочего импульса на нагрузке. Восстановление исходного состояния сердечников насыщающихся дросселей Dp_1 - Dp_4 и импульсных трансформаторов Tr_1 - Tr_2 необходимо для того, чтобы увеличить рабочий перепад индукции каждого сердечника и подготовить схему к формированию очередного импульса. Так как нагрузка имеет нелинейный характер, то импульс обратного перемагничивания не будет рассеиваться на ней. Для поглощения энергии этих импульсов в схеме на рис.1 используется шунтирующее сопротивление R_1 , включенное параллельно первичной обмотке трансформатора Tr_2 .

Экспериментальное исследование электрических процессов

На первом этапе исследования производился эксперимент, в котором магнитно-транзисторный генератор нагружался на согласованное активное сопротивление. При рассмотрении такого идеального случая можно выполнить следующие действия: протестировать надежность работы генератора, исследовать электрические процессы в высоковольтных каскадах сжатия, а также зафиксировать форму высоковольтного импульса на идеальной нагрузке. В качестве накопителя энергии в последнем звене сжатия генератора

(см. рис. 1) использовалась ИФЛ, которая разряжалась напрямую на согласованное сопротивление через насыщающийся дроссель. В качестве активного сопротивления использовались резисторы марки ТВО. Резисторы соединялись последовательно, а общее суммарное сопротивление составило 48 Ом.

Для постановки эксперимента была сконструирована однородная ИФЛ, состоящая из пяти звеньев, конденсаторы которой крепятся на широкую медную шину. Для ИФЛ выбраны следующие параметры ячейки: индуктивность – $L_{я} = 1$ мкГн, емкость – $C_{я} = 470$ пФ. По техническим причинам конденсатор ячейки ИФЛ выбран номиналом 500 пФ, поэтому суммарная емкость линии равна – 2,5 нФ, что на 0,15 нФ больше емкости конденсатора соседнего звена. Емкость одной ячейки ИФЛ представляет собой два последовательно соединенных конденсатора КВИ-3 номиналом 1000 пФ/10 кВ. При максимальном зарядном напряжении ИФЛ 10 кВ в нагрузке формируется половина этого напряжения.

Дроссель ячейки ИФЛ изготовлен на кольце из магнитоэлектрического материала, на котором располагаются 2 витка из провода с пленочной фторопластовой изоляцией. Материал имеет небольшую остаточную индукцию, растянутую петлю гистерезиса и достаточно стабильную магнитную проницаемость в широком диапазоне изменения напряженности поля. Изложенные характеристики материала должны обеспечить неизменную индуктивность элементов ИФЛ в процессе ее разряда. Количество витков дросселя определялось по формуле для расчета индуктивностей тороидальных катушек на основании заданной индуктивности ячейки ИФЛ. Но для уточнения результатов расчета индуктивность сконструированного дросселя измерялась косвенно, на основании периода свободных колебаний в последовательном RLC контуре.

Расчет параметров формирующей линии выполнен на основании формул, представленных в работе [5]. Волновое сопротивление искусственной линии – $R = \sqrt{L/C} = 46$ Ом, длительность импульса – $t_u = 2,2\sqrt{LC} = 240$ нс, длительность фронта импульса – $t_f = 0,61\sqrt{LC} = 13,2$ нс.

Переключающиеся дроссели генератора сконструированы на сердечниках из высокопроницаемого магнитомягкого материала. В первых трех звеньях магнитного сжатия использован нанокристаллический материал с округлой петлей гистерезиса с коэффициентом прямоугольности 0,5. В окончном звене сжатия использован аморфный кобальтовый сплав, который имеет петлю гистерезиса, близкую к прямоугольной (коэффициент прямоугольности 0,84).

На рис. 2, а-г представлены осциллограммы импульсов напряжения в узлах сжатия магнитно-транзисторного генератора, измеренные емкостным делителем.

Передний фронт импульса напряжения длительностью до 5 мкс, изображенного на рис. 2, а, соответствует процессу зарядки высоковольтного

конденсатора С3, задний, более резкий, фронт соответствует его разряду на следующий конденсатор С4. Аналогичную картину можно изложить и для импульса напряжения, изображенного на рис. 2, б, в котором передний фронт соответствует процессу заряда конденсатора С4 длительностью до 1 мкс, а задний фронт соответствует разряду этого конденсатора на ИФЛ. На рис. 2, в, передний фронт импульса напряжения длительностью 0,4 мкс соответствует процессу заряда первого конденсатора ИФЛ, задний фронт 0,3 мкс – процессу его разряда.

Таким образом, на основании полученных осциллограмм процесс формирования рабочего импульса можно охарактеризовать следующим образом: в первом каскаде сжатия (С2-Др1-Тр1-С3) импульс тока сжимается до 5 мкс; во втором каскаде (С3-Др2-С4) – до 1,4 мкс; в третьем каскаде (С4-Др3-ИФЛ) – до 0,4 мкс; в четвертом каскаде (ИФЛ-Др4-Тр2-Р) формирующая линия разряжается на согласованную активную нагрузку за 0,3 мкс.

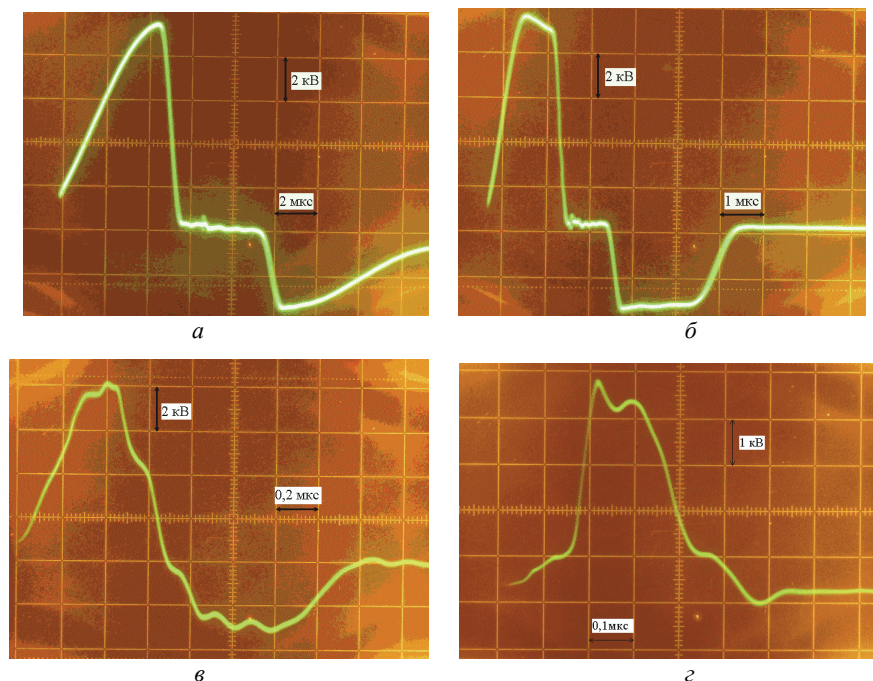


Рисунок 2 – Осциллограммы импульсов напряжения в высоковольтных каскадах сжатия: а – на конденсаторе С3; б – на конденсаторе С4; в – на первом конденсаторе ИФЛ; г – импульс напряжения наносекундной длительности на активной нагрузке

Время заряда низковольтного конденсатора С2 зависит от величины индуктивности дросселя L1 и при значении индуктивности, равной – 32 мкГн, длительность зарядного тока составляет – 18 мкс. Индуктивность переключо-

чающего дросселя Др4 в насыщении рассчитана равной индуктивности ячейки формирующей линии. Если формирующую линию заменить конденсатором емкостью номиналом 2,35 нФ, то длительность разрядного тока последнего звена сжатия составит 0,11 мкс. Отношение длительностей заряда первого конденсатора к длительности разряда последнего определяет суммарный коэффициент сжатия. Таким образом, общий коэффициент сжатия составил 165, а средний коэффициент сжатия, приходящийся на один переключающийся дроссель, – 3,6.

Оконечный сердечник дросселя Др4 имеет форму петли гистерезиса, близкую к прямоугольной, и в отличие от округлой петли относительная магнитная проницаемость в начале гистерезисного цикла имеет значения порядка 10^3 , а в конце основной кривой намагничивания с приближением к излому может достигать порядка 10^6 . Поэтому, когда магнитная проницаемость достаточно мала, ток через обмотку дросселя заметно нарастает, и перед основным импульсом появляется продолжительная подставка (см. рис. 2, з). По мере увеличения магнитной индукции ток через дроссель становится очень малым, однако дроссель насыщается полностью не сразу. Напряжение на нагрузке продолжает плавно нарастать и на уровне приблизительно в 1 кВ дроссель Др4 полностью насыщается, формируется резкий фронт длительностью около 40 нс. Полка напряжения не имеет особо выраженных пульсаций. Задний фронт импульса оказывается сильно затянутым по сравнению с идеальными характеристиками. Это не удивительно, так как фронт затягивает индуктивность дросселя Др4, которая несколько увеличивается в конце разрядного процесса. В сердечнике с округлой петлей гистерезиса излом кривой наступает при больших напряженностях поля и не является четко выраженным. Экспериментально установлено, что сердечник с округлой петлей гистерезиса не пригоден к применению в конечном звене сжатия, так как коммутирующий дроссель не формирует резких перепадов напряжения и на нем рассеивается значительное количество тепла.

Процесс восстановления исходного состояния магнитных элементов генератора осуществляется за счет неизрасходованной энергии рабочего импульса. Использование импульсного трансформатора Тр2 в окончательном звене сжатия для разряда ИФЛ на согласованную нагрузку способствует перезаряду конденсаторов ИФЛ отрицательной полярности. Результаты математического моделирования и эксперимента показывают, что при разряде ИФЛ через импульсный трансформатор на согласованной нагрузке появляется отрицательный импульс. В результате численного моделирования [6] получены временные зависимости импульсов напряжения, изображенные на рис. 3.

В математической модели рассматривались переходные электрические процессы, возбуждаемые после коммутации идеального ключа. По результатам математического моделирования сделан вывод, что амплитуда отрицательного импульса увеличивается при использовании трансформатора с меньшими индуктивными коэффициентами. Именно колебательный процесс

разряда ИФЛ заставляет сердечник переключающего дросселя Др4 насытиться в обратном направлении и зарядить конденсаторы ИФЛ отрицательной полярностью (см. рис. 2, в). Остаток энергии рабочего импульса устремляется в сторону первого звена сжатия, переключая в последовательном порядке дроссели Др3 – Др1. Процесс распространения импульса отрицательной полярности иллюстрируется на осциллограммах напряжений, снятых в высоковольтных узлах магнитного сжатия (рис. 2, а-в).

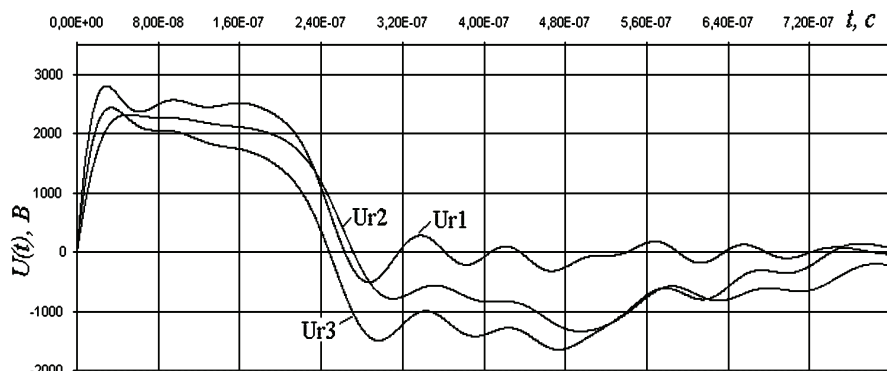


Рисунок 3 – Совмещенные характеристики высоковольтных импульсов напряжения наносекундной длительности, получаемые при разряде однородной формирующей линии на согласованную нагрузку посредством импульсного трансформатора с разными индуктивными параметрами ($Ur2$, $Ur3$) и без трансформатора ($Ur1$)

Напряжение отрицательной полярности на высоковольтном конденсаторе С3 создает ток в обмотках трансформатора, который замыкается через дроссель Др1 и конденсатор С1, заряжает последний отрицательным напряжением, и размагничивает сердечник трансформатора. Под действием линейно нарастающего напряжения на конденсаторе С1 индукция в сердечнике дросселя Др1 изменяется в противоположном направлении. Так как дроссель имеет дополнительную обмотку подмагничивания, то к моменту возврата остатка энергии конденсатор С2 будет немного заряженным линейно нарастающим напряжением, вызванным протеканием тока подмагничивания. Дополнительно поступивший заряд только увеличит скорость перемагничивания дросселя Др1, что способствует переключению его сердечника в обратном направлении и появлению импульса перемагничивания. Импульс отрицательной полярности окончательно перемагнитит сердечник трансформатора Тр1 к исходному состоянию и далее распространится по остальным звеньям сжатия в сторону нагрузки подобно рабочему импульсу. На рис. 4, а, б изображены осциллограммы импульса отрицательной полярности, образующегося на конденсаторе С1.

Из полученных осциллограмм напряжения следует, что использование дополнительного подмагничивания постоянным током переключающегося

дросселя Др1 уменьшает время перемагничивания дросселя и устраняет положительную пульсацию. Таким образом, подмагничивание дросселя Др1 постоянным током выполняет важную функцию. Во-первых, сердечник удерживается в состоянии отрицательного насыщения, а во-вторых, устраняется перезаряд накопительного конденсатора С2 положительной полярностью во время образования импульса перемагничивания, и соответственно исключается повторное появление положительного тока, способного намагнитить сердечники трансформатора Тр1 и дросселя Др1.

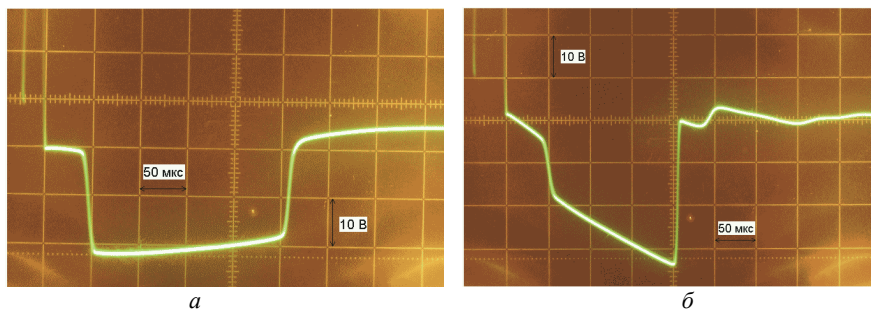


Рисунок 4 – Осциллограмма импульса перемагничивания на низковольтном конденсаторе: *а* – без подмагничивания дросселя; *б* – с подмагничиванием дросселя Др1 постоянным током

Во второй части экспериментального исследования производился разряд ИФЛ через импульсный трансформатор с единичным коэффициентом усиления на газоразрядный промежуток. Схема генератора в поставленном эксперименте изображена на рис. 1. Разряд загорелся в вакуумной камере в атмосфере разреженного воздуха [7].

Вакуумная камера имеет цилиндрический обечаек, изготовленный из толстой нержавеющей стали. В конструкцию электроразрядной камеры входят: два профилированных электрода, расположенных вертикально; смотровое окно из кварцевого стекла для фиксирования газового разряда; два штуцера для подключения вакуумных устройств. К штуцерам электроразрядной камеры дополнительные устройства подсоединяются через вакуумные резиновые шланги. Для измерения разреженного давления в камере использовался стрелочный вакуумметр с грубой ценой деления, равной 38 мм. рт. ст. Для понижения давления в камере использовался пластинчато-роторный насос, который при хорошей герметизации камеры может создавать вакуум до 10^{-2} мм. рт. ст. Последовательно с вакуумным насосом ставился запорный газовый кран. После создания в камере нужного понижения давления клапан закрывался, чтобы образовавшийся вакуум не всасывал в камеру масло из цилиндра вакуумного насоса. В поставленном эксперименте давление в камере опускалось ниже 40 мм. рт. ст.

Нижний электрод диаметром 5 см имеет плоскую поверхность с за-

кругленным ободком, верхний электрод диаметром 4 см имеет полусферическую форму. Расстояние между электродами в камере выставилось равным 1,5 см.

Регулировка амплитуды высоковольтных импульсов напряжения на выходе генератора осуществлялась с помощью лабораторного автотрансформатора. Если напряжения на разрядном промежутке не будет достаточно для его пробоя, то энергия, запасенная в конденсаторах ИФЛ, будет рассеиваться на демпфирующем сопротивлении $R1$ (см. рис. 1). Номинал демпфирующего сопротивления выбран в 10 раз больше волнового сопротивления ИФЛ, тогда и после формирования газового разряда на сопротивлении $R1$ будет рассеиваться незначительная доля энергии от рабочего импульса.

При 120 В действующего значения на автотрансформаторе или при амплитуде высоковольтного импульса 2,4 кВ наступает пробой газоразрядного промежутка и зажигается импульсный тлеющий разряд. Разряд имеет объемную форму с несветящейся зоной, расположенной вблизи поверхности катода, в излучении преобладает фиолетовый цвет.

Для осциллографирования характеристик тока и напряжения импульсного разряда использован бифилярный шунт сопротивлением 0,16 Ом и емкостной делитель напряжения, высоковольтный конец которого заводился в металлическую оплетку для уменьшения электрических наводок. На рис. 5 представлены совмещенные осциллограммы тока и напряжения на газоразрядном промежутке и фотография тлеющего разряда, зафиксированные при напряжении на автотрансформаторе 180 В действующего значения.

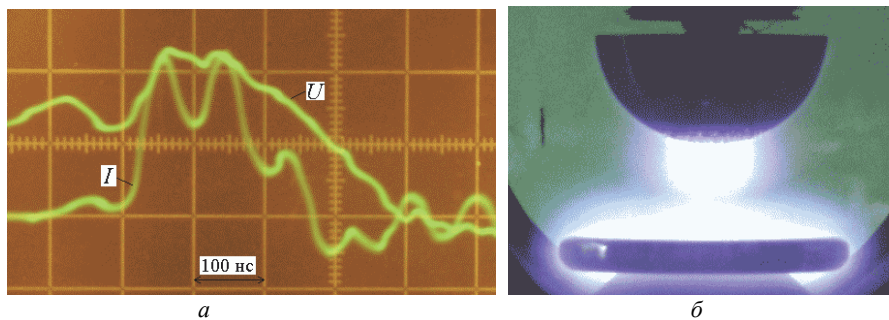


Рисунок 5 – Характеристики разряда: *а* – совмещенные осциллограммы импульсов тока I и напряжения U на газоразрядном промежутке (I – 62 А/дел, U – 1 кВ/дел);
б –фотография субмикросекундного газового разряда в воздухе

На основании осциллограммы, представленной на рис. 5, *а*, можно сделать вывод, что сопротивление разрядного промежутка согласовано с волновым сопротивлением формирующей линии, так как форма разрядного тока близка к прямоугольной, а амплитуда отрицательной пульсации незначительна. Насыщение переключающегося дросселя Др4 затрундается из-за низ-

кой начальной проводимости газового промежутка и перед разрядным импульсом формируется продолжительная подставка (см. рис. 5, а). Медленное нарастание напряжения в промежутке вызывает его статический пробой, за которым следует незначительная пульсация тока длительностью около 50 нс и соответствующий спад напряжения. Однако заметное увеличение проводимости газа, вызывает насыщение дросселя Др4. В результате чего происходит одновременное нарастание тока и напряжения в промежутке, и формирование разрядного импульса ИФЛ. Нарастающий характер тока и напряжения в разрядном промежутке, явно указывает на то, что полученный вид газового разряда занимает промежуточную форму между тлеющим и дуговым разрядами. Для улучшения условий коммутации переключающегося дросселя, газовый промежуток необходимо предварительно ионизировать, что бы увеличить начальную проводимость газа.

Вплоть до максимально возможного напряжения 240 В на автотрансформаторе форма газового разряда не изменялась. Эксперимент производился на предельной частоте следования импульсов – 2 кГц. Устойчивость работы генератора оценивалась по характеристике тока, проходящего через транзисторный ключ. Во всем диапазоне питающего напряжения генератора импульсный ток имел стабильный характер и такую же форму, как и при работе генератора на активную согласованную нагрузку. Даже при атмосферном давлении воздуха и формировании дугового разряда между электродами с зазором 2 мм генератор вполне устойчиво работает на частоте 2 кГц вплоть до 240 В входного напряжения. Повысить частоту мешают предельные тепловые потери, возникающие в сердечниках переключающих дросселей с округлой петлей гистерезиса.

Таким образом, по итогам произведенного эксперимента можно утверждать, что разработанный генератор может успешно использоваться для формирования импульсного тлеющего разряда субмикросекундной длительности.

Выводы

Разработана и исследована схема магнитно-транзисторного генератора высоковольтных импульсов, предназначенная для формирования газового разряда субмикросекундной длительности.

Разработана математическая модель разряда ИФЛ через импульсный трансформатор на согласованную нагрузку и представлены временные зависимости импульсов напряжения. Показано, что амплитуда отрицательного импульса увеличивается при использовании трансформатора с меньшими индуктивными коэффициентами.

На основании результатов, полученных путем экспериментального исследования и математического моделирования, дается объяснение процесса формирования и распространения импульса перемагничивания в каскадах магнитного сжатия. Показано, что восстановление исходного состояния магнитных элементов осуществляется за счет части энергии рабочего импульса,

неизрасходованной в нагрузке.

Установлено, что использование дополнительного подмагничивания постоянным током переключающегося дросселя первого звена сжатия, устраняет перезаряд накопительного конденсатора положительной полярностью во время образования импульса перемагничивания.

Реализован импульсный тлеющий разряд в атмосфере разреженного воздуха и получены его электрические характеристики. Доказано, что сопротивление разрядного промежутка согласовано с волновым сопротивлением ИФЛ.

Список литературы: 1. *Месяц Г.А.* Генерирование мощных наносекундных импульсов. – М.: Сов. радио, 1974. – 256 с. 2. *Розенблат М.А.* Магнитные усилители и модуляторы. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 123 с. 3. *Дацук С.П., Потапов С.Е.* Магнитотристорный генератор импульсов возбуждения лазеров на парах металлов // Приборы и техника эксперимента. – 1983. – № 1. – С. 155-156. 4. *Шваб А.* Измерения на высоком напряжении: Измерительные приборы и способы измерения : 2-е изд. : пер. с нем. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 328 с. 5. *Ицхоки Я.С.* Импульсные и цифровые устройства. – М.: Сов. радио, 1972. – 592 с. 6. *Демидович Б.П. и др.* Численные методы анализа. – М.: Наука, 1967. – 368 с. 7. *Мик Дж., Крэгс Дж.* Электрический пробой в газах : пер. с англ. – М.: ИЛ, 1960. – 601 с.

Поступила в редколлегию 05.06.2012

УДК 621.373

Магнитно-транзисторный генератор для формирования высоковольтных импульсов субмикросекундной длительности / А.И. Христо // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2012. – № 52 (958). – С. 190-202. – Бібліогр.: 7 назв.

Описано магнітно-транзисторний генератор високовольтних імпульсів, розроблений для формування газового розряду субмікросекундної тривалості. Генератор перетворює постійну напругу 500 В у послідовність імпульсів напруги з амплітудою 10 кВ і частотою слідування 2 кГц. Представлено результати експериментального дослідження процесу формування робочого і перемагнічуючого імпульсів у високовольтних каскадах магнітного стиску. Реалізовано імпульсний тліючий розряд в атмосфері розрідженого повітря, отримані електричні характеристики розряду, за результатами дослідження зроблено висновки.

Ключові слова: генератор високовольтних імпульсів, імпульсний трансформатор, ланка магнітного стиснення, штучна формуюча лінія, перемикаючий дросель, газовий розряд, вакуумна камера.

Describes magnetic-transistor generator of high-voltage pulses, designed for the formation of a gas discharge sub-microsecond duration. The generator converts DC voltage 500 V in the sequence of voltage pulses with an amplitude of 10 kV and frequency of the 2 kHz. The results of experimental studies process of formation the working and remagnetizing pulses in high magnetic compression stages. Implemented pulse glow discharge in an atmosphere of thin air, received the electric characteristics of the gas discharge, the results of research drawn conclusions.

Keywords: high-voltage pulse generator, pulse transformer, link of magnetic compression, artificial forming line, switching throttle, gas discharge, vacuum chamber.