

ЭЛЕКТРОНИКА
И РАДИОТЕХНИКА

УДК 621.373.5

**ГЕНЕРАТОР МОЩНЫХ НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ
КВАЗИПРЯМОУГОЛЬНОЙ ФОРМЫ**

© 2024 г. С. В. Коротков^{а,*}, А. Л. Жмодиков^а, Д. А. Коротков^а

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Россия, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

**e-mail: korotkov@mail.ioffe.ru*

Поступила в редакцию 15.05.2024 г.

После доработки 16.05.2024 г.

Принята к публикации 03.07.2024 г.

Разработан генератор мощных наносекундных импульсов, содержащий накопительный конденсатор, отрезок коаксиального кабеля, а также замыкающий и размыкающий полупроводниковые ключи. При напряжении зарядки накопительного конденсатора генератор с напряжением 12 кВ позволяет коммутировать в нагрузку 75 Ом квазипрямоугольные импульсы напряжения с амплитудой около 26 кВ, фронтом длительностью примерно 4 нс и спадом длительностью примерно 6 нс. Длительность импульсов по полувывоте составляет около 45 нс, “джиттер” относительно внешнего запускающего сигнала менее 2 нс. Показана возможность увеличения выходной мощности генератора и длительности импульсов выходного напряжения.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время высоковольтные импульсы наносекундной длительности используются во многих областях науки и техники, например, для создания высоковольтных электрических разрядов в технологических и экспериментальных устройствах. Высокая надежность электроразрядных устройств может быть обеспечена, когда высокое напряжение прикладывается к межэлектродному промежутку в течение достаточно длительного времени, которое определяется разбросом моментов пробоя. В устройствах с большим межэлектродным расстоянием оно может составлять десятки нс.

Для создания мощных наносекундных разрядов широко применяются генераторы на основе емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) и замыкающего ключа, способные формировать медленно спадающие импульсы высокого напряжения с длительностью десятки и сотни нс. Их основным недостатком является то, что величина входного напряжения, определяемая напряжением зарядки ЕНЭ, должна превышать амплитуду

выходного импульса напряжения. В этой связи определенным преимуществом обладают генераторы на основе индуктивного накопителя энергии (ИНЭ) и прерывателя тока, в которых амплитуда выходных импульсов напряжения может быть существенно больше величины входного напряжения.

Хорошо известны генераторы высоковольтных наносекундных импульсов с прерывателями тока в виде блоков последовательно соединенных диодов с временем выключения порядка наносекунд. В качестве таких диодов используются диоды DSRD [1], а также SOS-диоды [2], которые способны эффективно работать при более высокой, по сравнению с DSRD, плотности тока, но которые имеют несколько большее время выключения.

В генераторе с диодным прерывателем тока коммутируемая в нагрузку энергия исходно накапливается в сравнительно низковольтном накопительном конденсаторе. Когда происходит разряд конденсатора, то через диодные структуры прерывателя в прямом направлении протекает ток с принципиально малой длительностью (не более 300–400 нс), который позволяет накопить заряд вблизи эмиттеров диодных структур. Затем по цепи, содержащей диодный прерыватель и ИНЭ, пропускается быстро нарастающий ток с противоположной полярностью. При этом из диодных структур выносятся накопленный заряд, они выключаются и протекающий через диодный прерыватель ток I_D коммутируется в параллельную цепь нагрузки.

Определенным недостатком генераторов с ИНЭ является то, что после достижения максимального значения выходной импульс напряжения экспоненциально убывает с постоянной времени $T=L/Z$ (L – индуктивность ИНЭ, Z – сопротивление нагрузки). Таким образом, медленный спад выходного напряжения, требуемый для обеспечения надежного разряда при нестабильной задержке пробоя межэлектродного промежутка, может быть получен только при большой индуктивности L . В результате при формировании мощного импульса тока I_D сложным становится обеспечение его принципиально малой длительности, необходимой для быстрого выключения диодов.

Этот недостаток устранен в разработанном генераторе.

2. ОПИСАНИЕ УСТРОЙСТВА

Электрическая схема разработанного генератора приведена на рис. 1. Она построена на основе схемы, рассмотренной в работе [3]. Формирование наносекундных импульсов квазипрямоугольной формы осуществляется с помощью накопительного конденсатора C_1 , замыкающего ключа SID в виде блока последовательно соединенных динисторов с

ударной ионизацией [4], формирующей линии в виде отрезка коаксиального кабеля (КК) и прерывателя тока в виде блока DSRD.

Рис. 1. Электрическая схема генератора наносекундных импульсов квазипрямоугольной формы

Принцип работы генератора заключается в следующем. В исходном состоянии накопительный конденсатор C_1 заряжен до напряжения питания U_0 . После включения блока SID он перезаряжается. Ток перезарядки протекает через индуктивность L_1 , а также по цепи DRSD-КК- C_2 . Длительность этого процесса значительно превышает время пробега электромагнитной волны по кабелю КК, поэтому основное влияние на процесс перезарядки C_1 оказывает индуктивность кабеля. Протекающий через DSRD и КК ток обеспечивает зарядку конденсатора C_2 и накопление заряда в диодных структурах блока DSRD. Затем через выходную цепь, содержащую кабель КК и блок DSRD, протекает ток разряда конденсаторов C_1, C_2 , который выносит из диодных структур накопленный заряд. Когда блок DSRD выключается, в нагрузку Z через коаксиальный кабель КК₁ коммутируется энергия, накопленная в кабеле КК и в монтажных индуктивностях элементов выходной цепи. При этом на нагрузке формируется квазипрямоугольный импульс напряжения.

Для включения блока SID используется описанная в работе [5] цепь управления ЦУ. Она выполнена аналогично основной цепи генератора и содержит маломощный диодный прерыватель тока, замыкающий ключ в виде тиристора и накопительный конденсатор, исходно заряженный до напряжения 2 кВ. ЦУ формирует импульс запускающего напряжения с фронтом длительностью примерно 3 нс, амплитуда которого существенно (примерно в 2 раза) превышает величину напряжения, приложенного к блоку SID. При этом в динисторных структурах этого блока инициируется процесс ударной ионизации, обеспечивающий их переключение в хорошо проводящее состояние за время менее 1 нс. Затем высокая проводимость динисторных структур поддерживается благодаря инжекции носителей из эмиттерных областей.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 2 приведены осциллограммы тока I_D через блок DSRD и напряжения U_D на блоке DSRD, полученные при подключении к выходу кабеля КК₁ резистора $Z=75$ Ом. На рис. 3 приведена осциллограмма импульса напряжения U_Z на резисторе Z . Колебания на кривой I_D обусловлены волновыми свойствами кабеля КК. Всплески напряжения на

кривых U_D , U_Z определяются влиянием монтажных индуктивностей элементов выходной цепи генератора.

Рис. 2. Осциллограммы тока I_D через блок DSRD и напряжения U_D на этом блоке.

Рис. 3. Осциллограмма напряжения U_Z на нагрузке $Z=75$ Ом.

Как следует из осциллограмм, амплитуда и длительность прямого тока через блок DSRD составляют соответственно примерно 400 А и примерно 270 нс. Блок DSRD выключается примерно через 200 нс после коммутации в него обратного тока при амплитуде этого тока примерно 550 А. Амплитуда импульса напряжения на нагрузке составляет около 26 кВ, длительность фронта примерно 4 нс, длительность спада примерно 6 нс, длительность импульса по полувысоте около 45 нс.

Представленные осциллограммы были получены при зарядке конденсатора C_1 до напряжения $U_0=12$ кВ с помощью цифрового осциллографа Tektronix TDS3052C с полосой 500 МГц. Для измерения тока использовался пояс Роговского, который был калиброван с помощью датчика тока, полученного от Pearson Electronics, Inc. (модель 410). Для измерения напряжения использовался пробник Tektronix P6015A. Нагрузка была выполнена в виде сборки малоиндуктивных резисторов типа ТВО, обеспечивающих возможность работы генератора на частоте 500 Гц.

В процессе экспериментов была определена нестабильность фронта импульса напряжения на нагрузке относительно фронта импульса управления замыкающего ключа цепи ЦУ. При 5-процентной точности установки напряжений зарядки конденсатора C_1 и накопительного конденсатора цепи ЦУ разброс моментов приложения к нагрузке импульсов высокого напряжения не превышал 2 нс.

На рис. 4, 5 приведены осциллограммы, иллюстрирующие работу альтернативного генератора, в котором вместо коаксиального кабеля КК использовалась индуктивность, эквивалентная индуктивности этого кабеля.

Рис. 4. Осциллограммы тока I_D через блок DSRD и напряжения U_D на этом блоке при замене кабеля на индуктивность

Рис. 5. Осциллограмма напряжения U_Z на нагрузке $Z=75$ Ом при замене кабеля на индуктивность

При сравнении осциллограмм на рис. 3, 5 видно, что использование коаксиального кабеля позволяет увеличить длительность импульса U_Z по полувысоте с 25 нс до 45 нс.

На рис. 6, 7 приведены осциллограммы напряжений U_D на блоке DSRD и напряжения U_K на конце кабеле KK_1 , полученные, когда нагрузка Z была отключена.

Рис. 6. Осциллограмма напряжения U_D на блоке DSRD при отключенной нагрузке.

Рис. 7. Осциллограмма напряжения U_K на конце кабеля KK_1 при отключенной нагрузке.

На рис. 8, 9 показаны осциллограммы напряжения U_D на блоке DSRD и напряжения U_Z на нагрузке, полученные при использовании в качестве нагрузки искрового разрядника, заполненного атмосферным воздухом.

Рис. 8. Осциллограмма напряжения U_D на блоке DSRD при использовании разрядника.

Рис. 9. Осциллограмма напряжения на разряднике, подключенном к концу кабеля KK_1 .

4. ВЫВОДЫ

Таким образом, разработанный генератор на основе малогабаритных блоков SID и DSRD позволяет формировать на нагрузке 75 Ом импульсы напряжения квазипрямоугольной формы с амплитудой около 26 кВ и длительностью по полувысоте примерно 45 нс. Длительности фронта и спада импульсов составляют соответственно примерно 4 нс и примерно 6 нс, нестабильность фронта относительно внешнего запускающего сигнала не превышает 2 нс.

Принципы построения разработанного генератора обеспечивают возможность увеличения выходной мощности и длительности импульсов выходного напряжения.

Выходная мощность генератора может быть увеличена при увеличении выходного тока путем увеличения напряжения зарядки накопительного конденсатора C_1 . Возникающая при этом задача разработки более мощных блоков SID и DSRD может быть решена при использовании в этих блоках большего количества последовательно соединенных диодных и динисторных структур, а также при увеличении рабочей площади этих структур и при использовании параллельного соединения блоков.

Длительность импульсов выходного напряжения может быть увеличена путем увеличения длины кабеля KK . Поскольку при этом увеличивается его индуктивность, принципиально малая длительность тока через блок DSRD может быть достигнута при уменьшении емкости конденсатора C_1 .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Grekhov I.V., Efanov V.M, Kardo-Sysoev A.F., Shenderey S.V. // Solid-State Electron. 1985. V. 28. P. 597.
2. Рукин С.Н. // ПТЭ. 1999. № 4. С. 5.
3. Korotkov S.V., Aristov Yu.V., Zhmodikov A.L. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2022. V. 50. P. 954. [https://doi.org/ 10.1109/TPS.2022.3156386](https://doi.org/10.1109/TPS.2022.3156386).
4. Korotkov S.V., Yu.V. Aristov, Korotkov D.A., Zhmodikov A.L. // Rev. Sci. Instr. 2020. V. 91. P. 084704. [https://doi.org/ 10.1063/5.0015284](https://doi.org/10.1063/5.0015284).
5. Коротков С. В., Арустов Ю.В., Козлов К.А. // ПТЭ. 2023. № 4. С. 70. [https://doi.org/ 10.31857/S0032816223040134](https://doi.org/10.31857/S0032816223040134)

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Электрическая схема генератора наносекундных импульсов квазипрямоугольной формы. КК: РК75-7-11, длина 4 м; SID: диаметр структур 16 мм, 6 шт. последовательно; DSRD: диаметр структур 20 мм, 48 шт. последовательно.

Рис. 2. Осциллограммы тока I_D через блок DSRD и напряжения U_D на этом блоке.

Рис. 3. Осциллограмма напряжения U_Z на нагрузке $Z=75$ Ом.

Рис. 4. Осциллограммы тока I_D через блок DSRD и напряжения U_D на этом блоке при замене кабеля на индуктивность.

Рис. 5. Осциллограмма напряжения U_Z на нагрузке $Z=75$ Ом при замене кабеля на индуктивность.

Рис. 6. Осциллограмма напряжения U_D на блоке DSRD при отключенной нагрузке.

Рис. 7. Осциллограмма напряжения U_K на конце кабеля КК₁ при отключенной нагрузке.

Рис. 8. Осциллограмма напряжения U_D на блоке DSRD при использовании разрядника.

Рис. 9. Осциллограмма напряжения на разряднике, подключенном к концу кабеля КК₁.

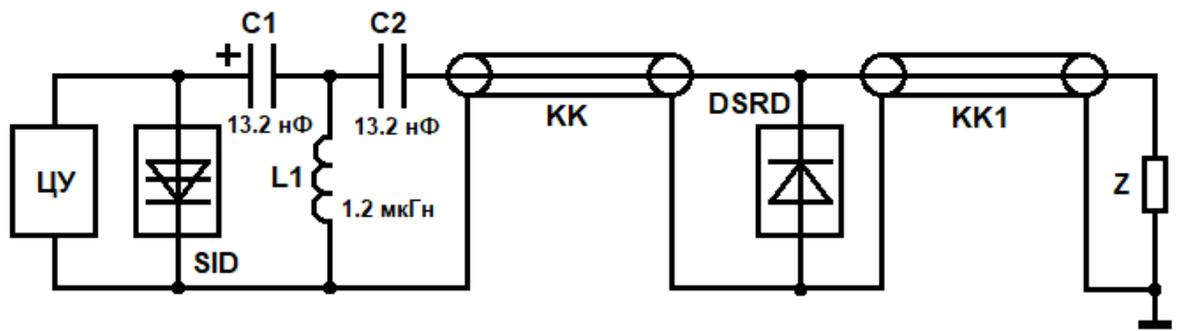


Рис.1.

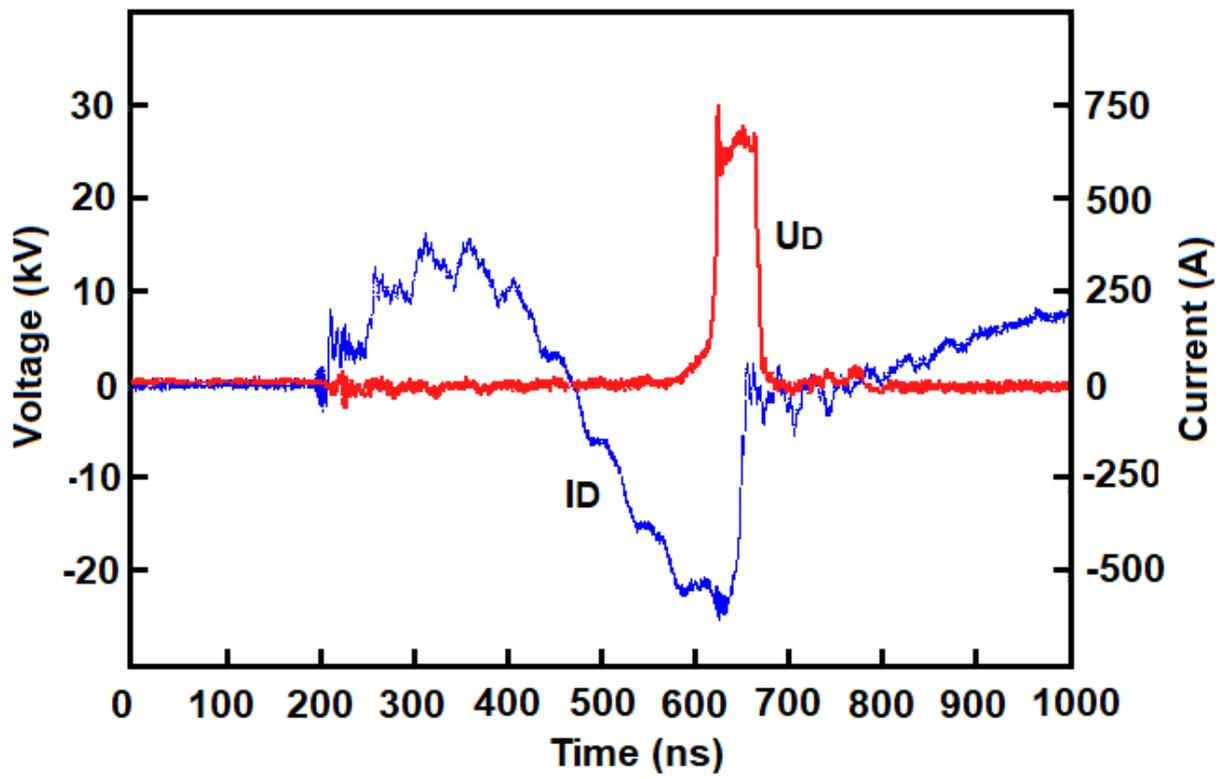


Рис.2.

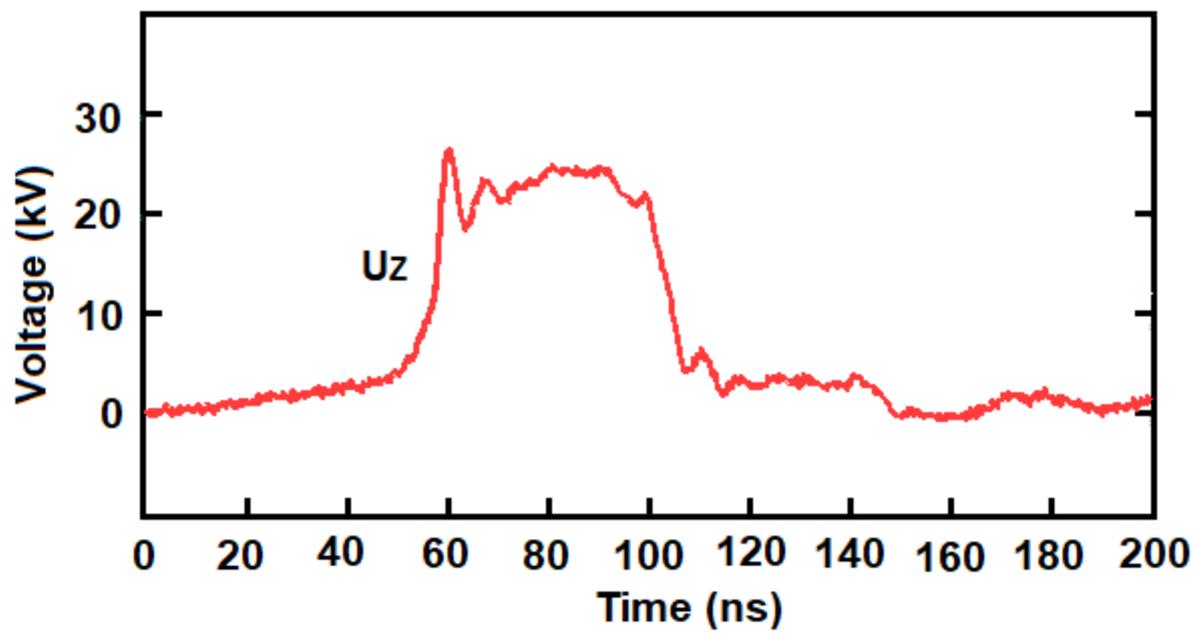


Рис.3.

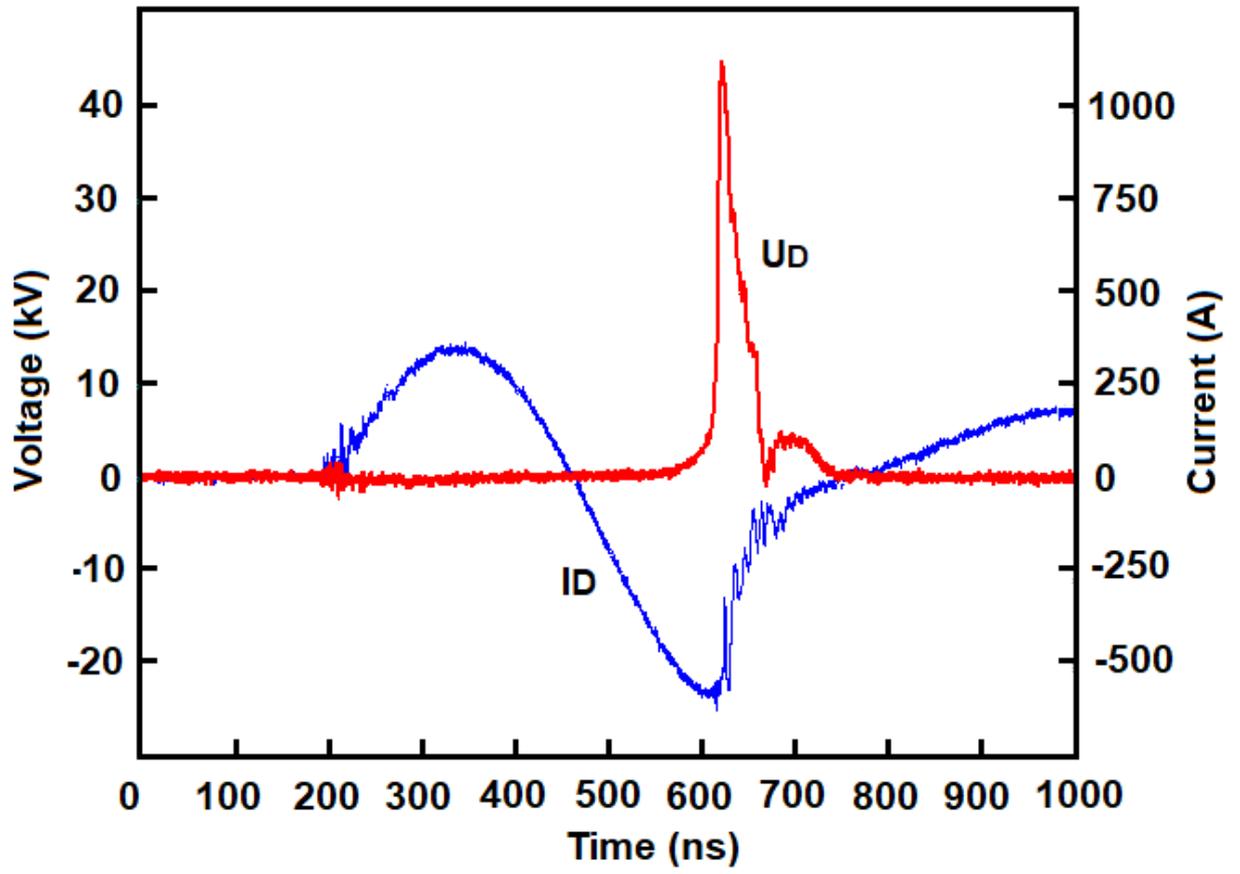


Рис.4.

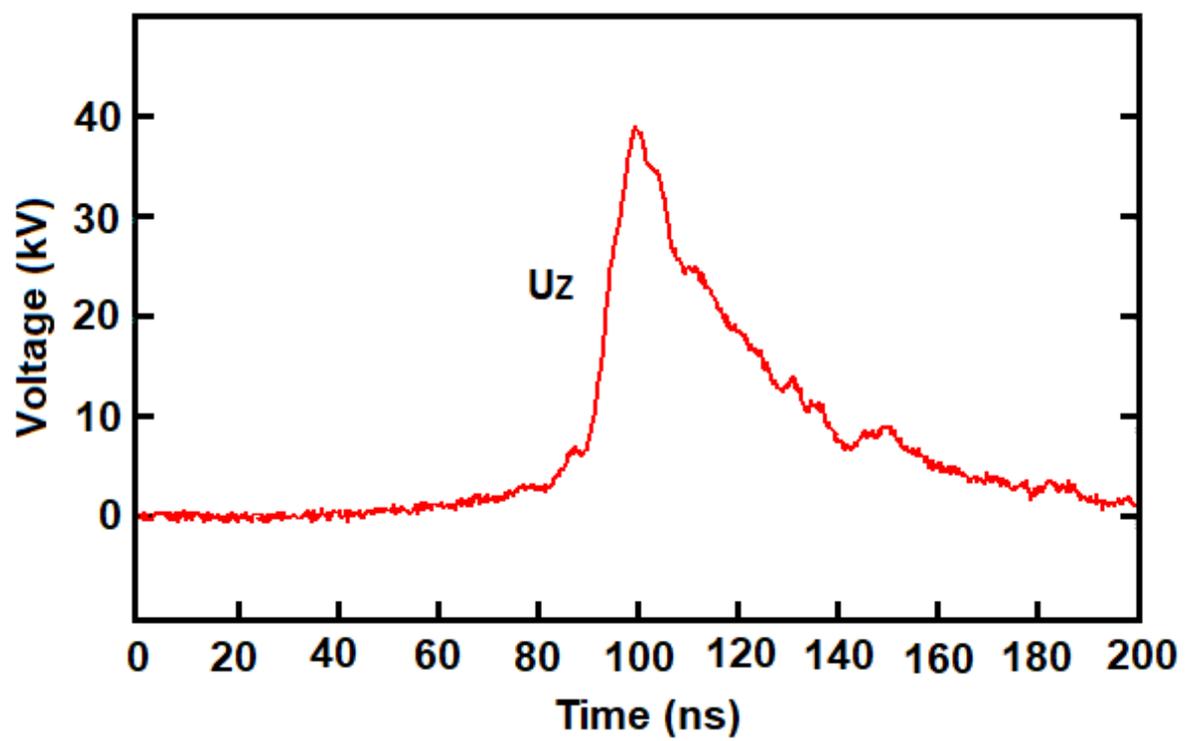


Рис.5.

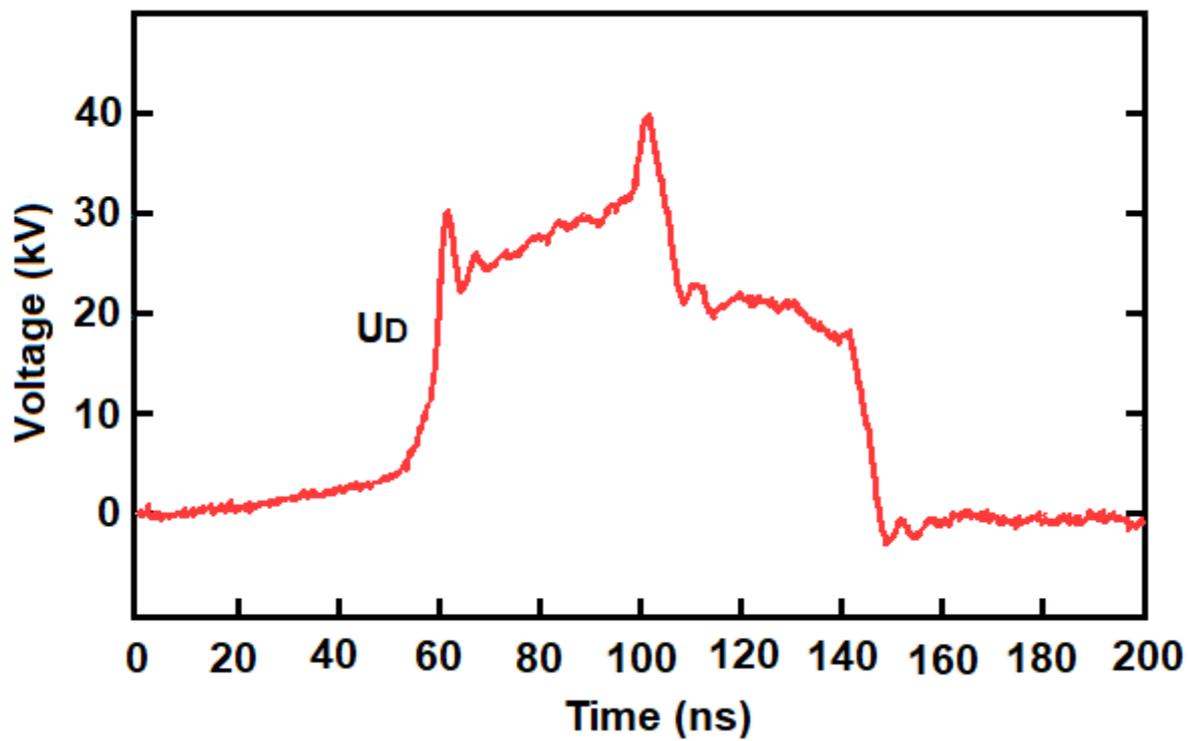


Рис.6.

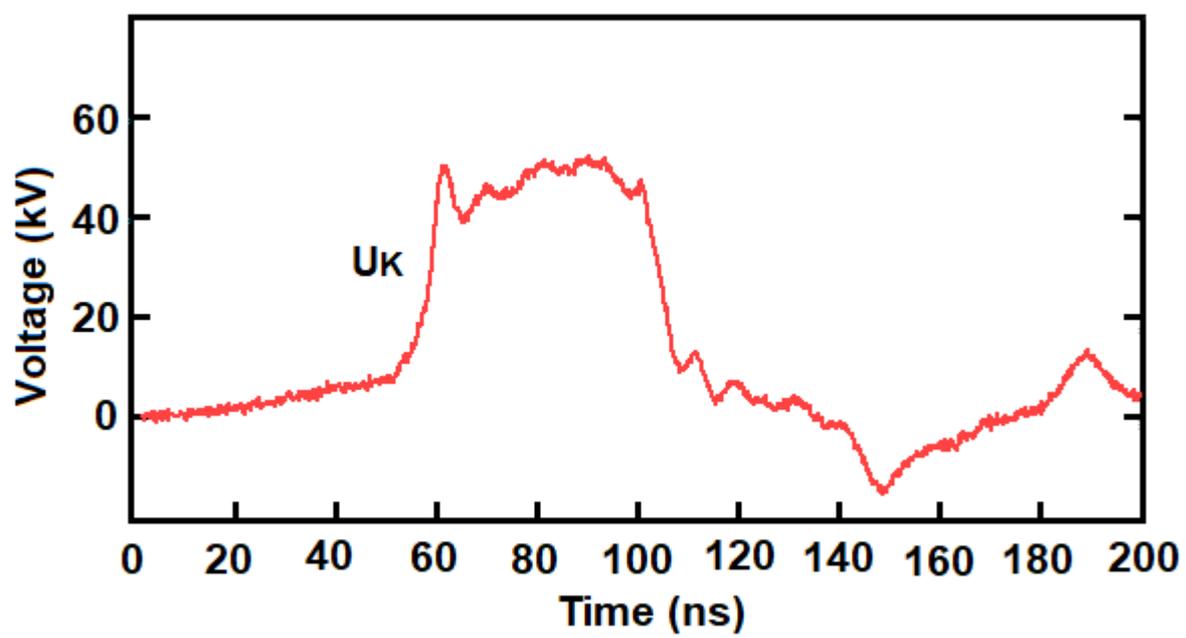


Рис.7.

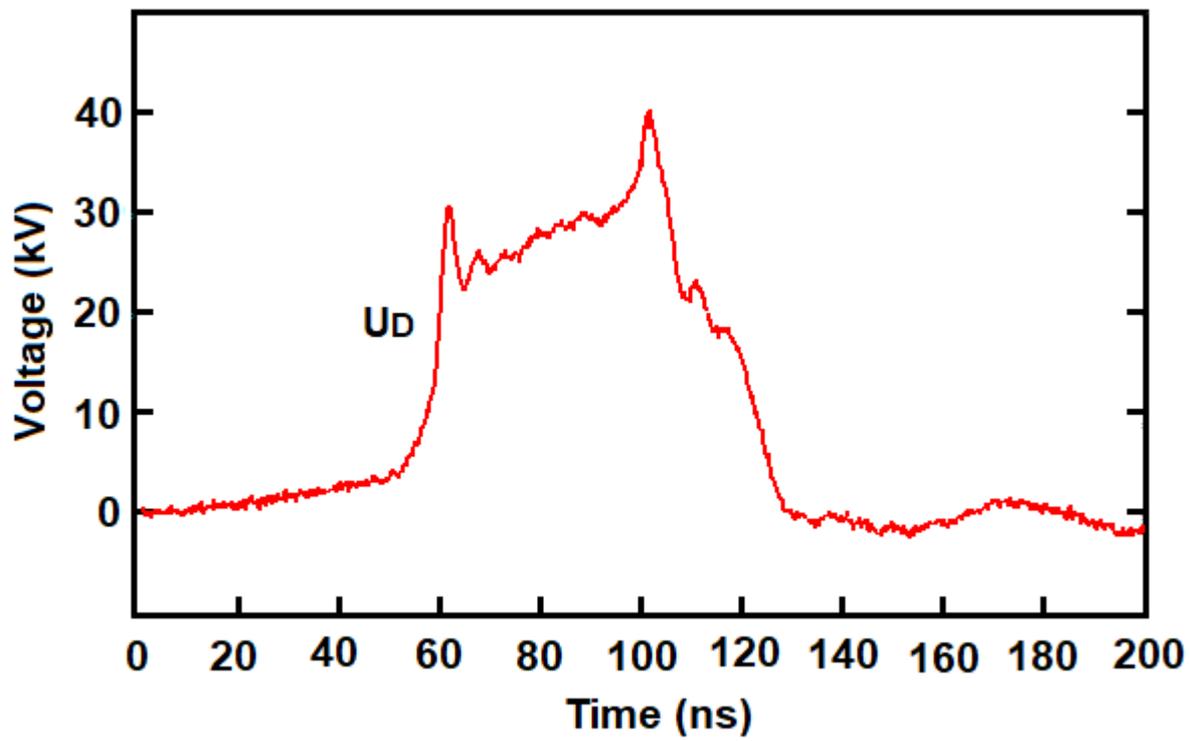


Рис.8.

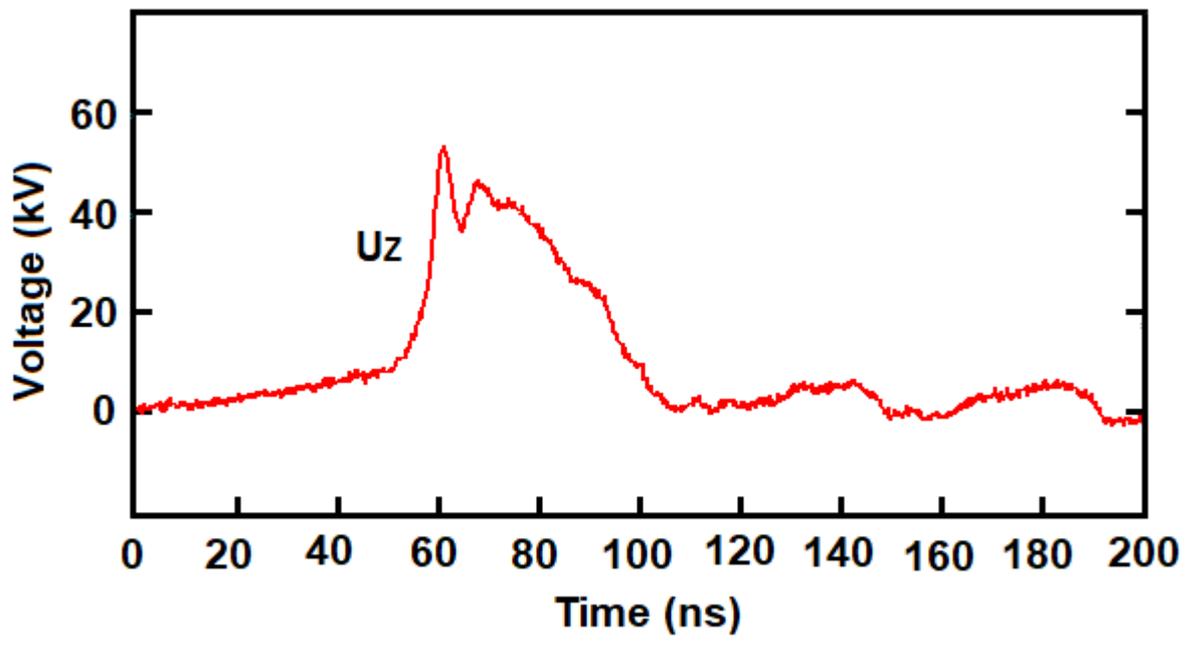


Рис.9.

Для связи с авторами:

Коротков Сергей Владимирович

(812)297-49-25 (сл.)

(812)297-10-01 (дом.)

8-901-305-84-71 (моб.)

E-mail: korotkov@mail.ioffe.ru

E-mail: korotkov.kara@yandex.ru

~~Для переводчика:~~

~~Generator of high-power nanosecond pulses of quasi-rectangular shape~~

~~A generator of powerful nanosecond pulses has been developed containing a storage capacitor, a piece of coaxial cable, as well as closing and opening semiconductor switches. With a storage capacitor charging voltage of 12 kV, the generator allows switching quasi-rectangular voltage pulses with an amplitude of ~26 kV, a rise time of ~4 ns and a fall time of ~6 ns into a Ohm load. The half maximum pulse duration is ~45 ns, the "jitter" relative to the external triggering signal is less than 2 ns. The possibility of increasing the output power of the generator and the duration of output voltage pulses is shown.~~