

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР С ЛАЗЕРНОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ ДЛЯ ПИТАНИЯ СПЕЦИАЛЬНОГО ФОТОЭЛЕМЕНТА СВЧ-ГЕНЕРАТОРА

А. А. Зубков, Н. В. Купырин, Н. Н. Хавронин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. акад. Е. И. Забабахина», г. Снежинск Челябинской обл.

Введение

Источник импульсного питания фотоэлемента представляет собой генератор, собранный по схеме Введенского на основе разрядника с лазерным поджигом. Он предназначен для подачи короткого высоковольтного импульса напряжения на фотокатод специального фотоэлемента (ФЭК) СВЧ-генератора в момент его облучения лазерным пучком ультракороткой длительности, создающим сверхсветовую бегущую волну фотоэлектронной эмиссии.

Основные технические характеристики ФЭК [1] (нагрузка генератора):

- диаметр фотокатода 5 см;
- зазор фотокатод-анод 2...4 мм;
- волновое сопротивление 75 Ом;
- емкость 20...50 пф.

Основные параметры импульса лазерного поджига генератора:

- длина волны пускового импульса лазерного излучения 1053 нм;
- длительность пускового лазерного импульса 150 пс;
- энергия пускового лазерного импульса ≈ 1 мДж;
- диаметр пучка в фокусе объектива 200 мкм;
- максимальная частота следования импульсов 0,3 Гц.

Требования к характеристикам генератора:

- полярность импульса напряжения отрицательная;
- амплитуда импульса напряжения ≤ 100 кВ;
- длительность импульса напряжения на полувысоте ≤ 10 нс;
- длительность фронта импульса напряжения на уровне 0,1–0,9 < 2 нс;
- задержка срабатывания генератора при запуске лазерным импульсом < 50 нс;
- нестабильность задержки срабатывания $\leq \pm 2$ нс.

Конструкция генератора

На рис. 1 представлена схема генератора.

Отработка схемы генератора и конструкции его разрядника была проведена на макете, рассчитанном на выходное напряжение до 60 кВ [2].

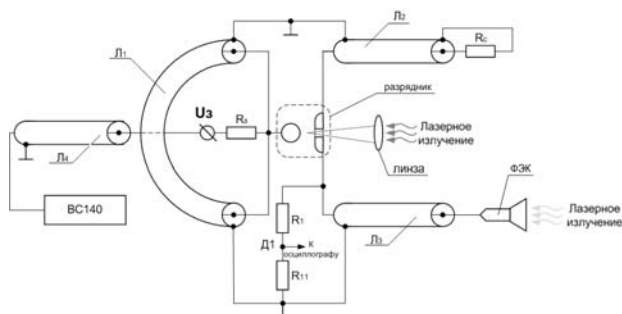


Рис. 1. Схема генератора импульсного питания ФЭК: Л₁ – формирующий кабель; Л₂ – согласующий кабель; Л₃ – передающий кабель; Л₄ – зарядный кабель; R₃ – зарядное сопротивление; R_c – согласующее сопротивление; Д1 – омический делитель напряжения

Отличие данной конструкции генератора от его макета состоит в следующем:

- увеличены все зазоры от элементов, находящихся под постоянным и импульсным напряжением, до заземленного корпуса генератора (по маслу – до 50 мм, по поверхности изоляторов – до 85 мм);
- уменьшена длительность импульса напряжения до 7 нс (длина формирующего кабеля ≈ 1 м) для уменьшения вероятности пробоя вакуумного промежутка ФЭКа при увеличении подаваемого на него напряжения до 100 кВ;

– изменена конструкция корпуса разрядника для возможности его использования на напряжения до 100 кВ и давления до 25 ати;

– конструктивно изменен ввод газа в разрядник для возможности регулировки зазора без разборки самого разрядника.

Доработанная конструкция генератора и его составных частей позволила в несколько раз сократить время и усилия при перестройке генератора с одного напряжения на другое, расширить диапазон рабочих напряжений для одного зазора в разряднике.

В качестве формирующего и согласующего кабелей используется кабель марки КВИ-120 длиной порядка 1 и 1,5 м соответственно, в качестве передающего – кабель марки РК75-7-21 длиной 3 м со специальным разъемом для подключения к ФЭК (предоставлен ФГУП-ВНИИОФИ). Зазор в разряднике регулируется от 0 до 8,5 мм, а давление в нем – от 0 до 25 ати. В качестве рабочего газа в разряднике используется азот высокой очистки.

Характеристики генератора

Под характеристиками генератора понимаются параметры импульса напряжения на нагрузке (амплитуда, длительности фронта на уровне 0,1–0,9 и импульса на полувысоте), а также время задержки срабатывания генератора и его разброс при различных комбинациях зазора и давления в разряднике в зависимости от зарядного напряжения.

Нагрузку генератора ФЭК, можно представить как вакуумный промежуток с бесконечно большим сопротивлением. Т. к. волновое сопротивление передающего кабеля 75 Ом (Z_3 на рис. 1), то в качестве имитации вакуумного промежутка ФЭК можно использовать высокоомное сопротивление порядка единиц килоом. В экспериментах в качестве нагрузки генератора использовался высокоомный ($R_2 = 2,95$ кОм) омический делитель напряжения ($K_{дел} = 2306$), размещенный непосредственно в корпусе ФЭК.

В экспериментах зазор в разряднике изменялся от 0,25 до 2,25 мм, а давление в нем – от 0 до 20 ати.

Типичные осциллограммы импульсов напряжения на делителе Д1 и на высокоомной омической нагрузке представлены на рис. 2.

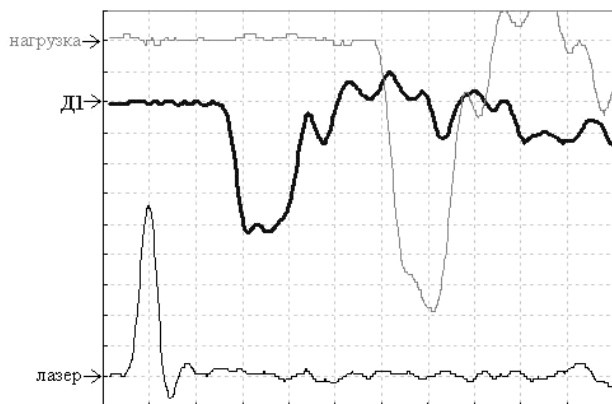


Рис. 2. Типичные осциллограммы импульсов напряжения на делителе Д1 и на высокоомной омической нагрузке: лазер – пусковой импульс лазерного излучения. Зарядное напряжение генератора – 80 кВ, зазор в разряднике – 2,25 мм, давление в разряднике – 12,5 ати. Масштаб напряжения – 10 кВ/деления, масштаб времени – 5 нс/деление

В ходе экспериментов были получены следующие характеристики генератора:

- амплитуда импульса напряжения на нагрузке регулируется в диапазоне (10–100) кВ;
- длительность импульса напряжения на нагрузке на полувысоте 7 нс;
- длительность фронта импульса напряжения на нагрузке на уровне 0,1–0,9 2 нс;
- частота следования импульсов напряжения на нагрузке 0,3 Гц.

Частота следования импульсов напряжения на нагрузке, в данных экспериментах, определялась только частотными возможностями лазера. Частота, с которой может работать данный генератор, определяется мощностью источника питания и количеством одновременно подключенных нагрузок. Максимальная частота при подключенных четырех нагрузках может составлять порядка 100 Гц.

Далее были проведены эксперименты по определению времени задержки срабатывания генератора и его разброс при различных комбинациях зазора и давления в разряднике в зависимости от зарядного напряжения.

Результаты этих экспериментов представлены в таблице, где время указано в наносекундах как среднее арифметическое значение плюс/минус среднеквадратичное отклонение по 5 экспериментам. В качестве результатов представлены только те значения, которые удовлетворяют требованиям к характеристикам генератора: задержка срабатывания генератора при запуске лазерным импульсом не более 40 нс (за исключением задержки передающего кабеля не менее 10 нс), нестабильность задержки срабатывания менее 4 нс.

Так же были проведены эксперименты по отработке генератора, когда в качестве нагрузки использовался коаксиальный фотоземлет (ФЭК). В экспериментах фиксировались показания датчика Д1 при подаче основного лазерного импульса излучения на ФЭК и без его подачи. Расположение датчика Д1 позволяет регистрировать не только основной импульс напряжения (импульс напряжения бегущей волны к нагрузке), но и отраженный от нее.

На рис. 3 представлены типичные осциллограммы двух этих экспериментов.



Рис. 3. Типичные осциллограммы импульсов напряжения на делителе Д1 при подаче основного лазерного импульса на фотокатод ФЭКа (Д1) и без его подачи (Д1*): лазер – пусковой импульс лазерного излучения. Зарядное напряжение генератора – 30 кВ, зазор в разряднике – 1,75 мм, давление в разряднике – 5,5 ати. Масштаб напряжения Д1, Д1* – 2 кВ/деление, масштаб времени – 5 нс/деление

Задержки срабатывания * генератора при различных зазорах в разряднике (h),
в зависимости от давления в разряднике (P) и зарядного напряжения (U) генератора

$h = 0,75$ мм						
U , кВ/ P , ати	10	20	30	40		
3,0	5,1±0,3					
3,5	7,6±0,3					
4,0	15,7±0,4					
4,5	34,9±1,9					
8,0		5,8±0,3				
8,5		9,1±0,3				
9,0		15,6±0,7				
11,5			6,9±0,1			
12,0			11,2±0,5			
12,5			18,2±0,5			
15,0				7,4±0,7		
15,5				10,7±0,9		
16,0				11,9±1,2		
$h = 1,25$ мм						
U , кВ/ P , ати	20	30	40	50	60	
5,0	10,2±0,4					
5,5	19,7±0,7					
7,0		6,1±0,5				
7,5		9,0±0,3				
8,0		15,4±0,3				
10,5			9,9±0,3			
11,0			16,0±0,4			
11,5			15,7±1,1			
13,0				8,9±0,3		
13,5				14,9±1,4		
15,5					13,0±0,3	
16,0					13,0±0,4	
$h = 1,75$ мм						
U , кВ/ P , ати	30	40	50	60	70	80
5,5	11,6±0,4					
6,0	24,8±1,8					
7,5		10,7±0,3				
8,0		23,1±0,8				
9,0			11,1±0,5			
9,5			19,7±1,5			
11,5				8,9±0,5		
12,0				18,2±1,0		
13,0					9,3±0,3	
13,5					11,8±0,6	
15,5						12,2±0,5
16,0						15,4±1,1

* среднеарифметическое значение плюс/минус среднеквадратичное отклонение по 5 измерениям, указанное в наносекундах.

$h = 2,25 \text{ мм}$							
$U, \text{ кВ/Р, ати}$	40	50	60	70	80	90	100
5,5	$11,3 \pm 0,6$						
6,0	$26,2 \pm 0,5$						
7,0		$9,9 \pm 0,3$					
7,5		$12,6 \pm 0,6$					
8,0		$29,8 \pm 1,6$					
9,0			$11,8 \pm 0,3$				
9,5			$14,0 \pm 0,3$				
10,5				$10,6 \pm 0,6$			
11,0				$25,0 \pm 1,4$			
12,5					$11,7 \pm 0,5$		
13,0					$17,4 \pm 1,0$		
14,0						$10,5 \pm 0,4$	
14,5						$18,2 \pm 1,1$	
15,5							$12,0 \pm 0,7$
16,0							$22,1 \pm 1,3$

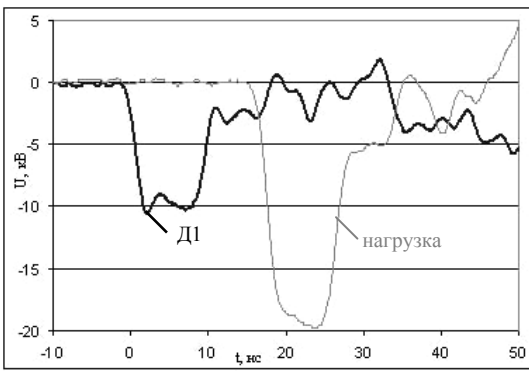
По осциллограммам на рис. 3 задержка срабатывания генератора с учетом передающего кабеля (задержка кабеля 17 нс) составила 29 нс (задержка между пусковым и основным лазерным импульсом была выставлена 28,5 нс). По отраженному от нагрузки сигналу на осциллограмме Д1 виден момент, когда происходит замыкание катод-анодного промежутка ФЭКа (срыв напряжения на Д1 – точка А на рис. 3), по времени этот момент соответствует моменту подачи основного импульса лазерного излучения на фотокатод ФЭКа. Из сравнения отраженных сигналов на осциллограммах Д1 и Д1* получаем, что основной лазерный импульс излучения подается на фотокатод в момент, когда на нем формируется максимальная амплитуда напряжения.

Исходя из принципа работы и конструкции генератора имеется возможность поднятия его выходного напряжения без увеличения зарядного напряжения, за счет рассогласования волновых сопротивлений в контуре генератора (при полном согласовании волновых сопротивлений в контуре его выходное напряжение равно зарядному). Это возможно увеличив количество подключаемых формирующих кабелей (Л₁ на рис. 1) или отключая согласующий кабель (Л₂ на рис. 1). Увеличивая число формирующих кабелей до 4 штук (количество ограничено конструкцией генератора), мы тем самым уменьшаем их суммарное волновое сопротивление (кабели подключаются параллельно), а отключая согласующий кабель, мы увеличиваем «выходное» волновое сопротивление («выходное» волновое сопротивление складывается из волновых сопротивлений параллельно подключенных формирующего и передающего кабелей).

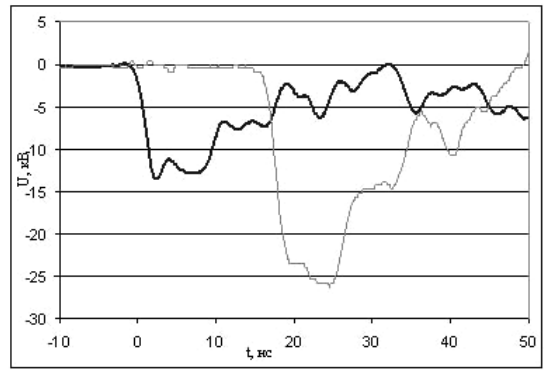
Исследование данной возможности было проведено на макете генератора импульсного питания фотоэлемента, в качестве нагрузки генератора использовался высокоомный делитель напряжения. Эти эксперименты проводились в два этапа. На первом этапе изменялось количество формирующих линий без отключения согласующего кабеля. На втором этапе проводились аналогичные эксперименты, но с отключенным согласующим кабелем. В экспериментах запуск генератора осуществлялся не лазерным импульсом, а в режиме самопробоя разрядника, при этом зазор в разряднике выставлялся 0,9 мм, а давление – 5,8 ати, напряжение самопробоя составило 20 кВ.

На рис. 4 представлены осциллограммы импульсов напряжения на внутреннем делителе Д1 и на нагрузке генератора для первого этапа экспериментов, а на рис. 5 – для второго этапа.

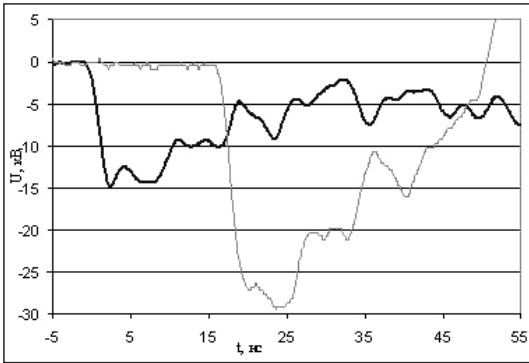
Из осциллограмм на рис. 4 и 5 видно, что при увеличении числа формирующих кабелей до 4 штук амплитуда напряжения на нагрузке генератора возрастает до значения 1,5 от зарядного, аналогичная ситуация (увеличение напряжения на нагрузке генератора) наблюдается и при отключении согласующего кабеля. Максимальная амплитуда напряжения на нагрузке генератора (1,7 от зарядного) достигается при использовании 4 формирующих кабелей и отключенном согласующем (осциллограммы на рис. 5 г). Также из осциллограмм видно, что при изменении числа формирующих кабелей и/или отключении согласующего меняется форма импульса напряжения на делителе Д1 и на нагрузке генератора (без изменения фронта). Это связано с появлением отражений в контуре генератора за счет его рассогласования.



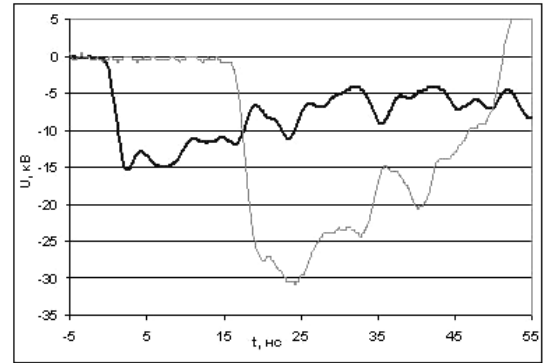
а) один формирующий кабель



б) два формирующих кабеля

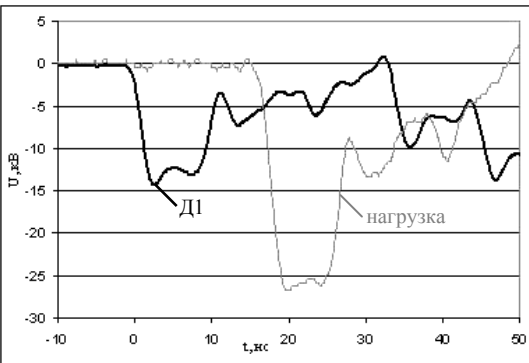


в) три формирующих кабеля

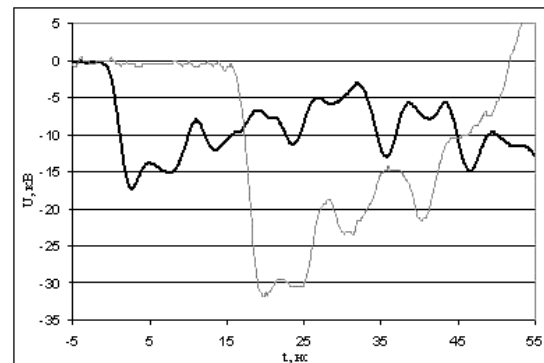


г) четыре формирующих кабеля

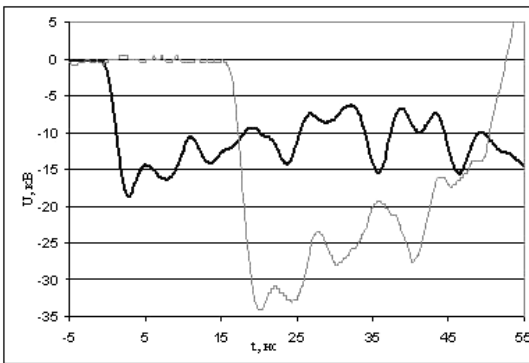
Рис. 4. Осциллограммы импульсов напряжения на делителе Д1 и на нагрузке при разном количестве подключенных формирующих и согласующем кабеле



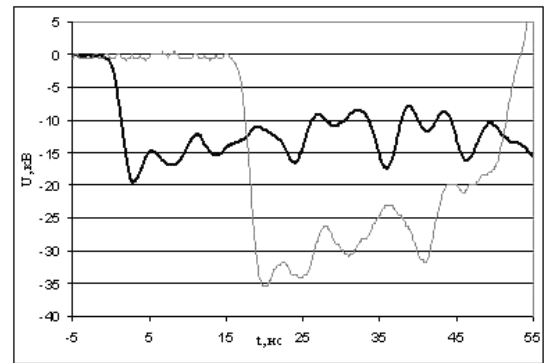
а) один формирующий кабель



б) два формирующих кабеля



в) три формирующих кабеля



г) четыре формирующих кабеля

Рис. 5. Осциллограммы импульсов напряжения на делителе Д1 и на нагрузке при разном количестве подключенных формирующих кабелей и отключенном согласующем кабеле

Заключение

Описанный в работе генератор имеет следующие параметры:

- амплитуда импульса напряжения на нагрузке регулируется в диапазоне (10–100) кВ;
- длительность импульса напряжения на нагрузке на полувысоте 7 нс;
- длительность фронта импульса напряжения на нагрузке на уровне 0,1–0,9 2 нс;
- задержка срабатывания генератора при запуске лазерным импульсом < 40 нс;
- нестабильность задержки срабатывания $\leq \pm 2$ нс;
- частота следования импульсов напряжения 0,3 Гц.

Так же в работе была показана возможность увеличения напряжения на нагрузке относительно зарядного напряжения генератора (до 1,7 раза) без измене-

ния его конструкции. Увеличение напряжения на нагрузке относительно зарядного напряжения приводит к изменению формы импульса напряжения на нагрузке без изменения его фронта.

Литература

1. Брюхневич Г. И., Воронкова Н. П., Пекарская Л. З., Шрамко Ф. Ф. Научно-технический отчет ФГУП-ВНИИОФИ по НИР «Разработка макета фотоэмиссионного элемента для широкополосного СВЧ-генератора». 15.12.2006 г.
2. Зубков А. А., Купырин Н. В., Хавронин Н. Н. Высоковольтный генератор импульсного питания фотоэлемента // Становление и развитие научных исследований в высшей школе: Сборник трудов. Т. 2. Томск, 2009. С. 293–300.