

**ЭЛЕКТРОНИКА
И РАДИОТЕХНИКА**

УДК 621.373.54

**ГЕНЕРАТОР ИМПУЛЬСОВ НА ЛАВИННОМ ТРАНЗИСТОРЕ С
НИЗКИМ НАПРЯЖЕНИЕМ ПИТАНИЯ СХЕМЫ**

©2025 г. М. И. Кулиш^а

*^аФедеральный исследовательский центр проблем химической физики
и медицинской химии Российской академии наук*

*Россия, 142432, Черноголовка, Московская обл., просп. Академика Семенова, 1
e-mail: kulishm@icp.ac.ru*

Поступила в редакцию 29.01.2025 г.

После доработки 11.03.2025 г.

Принята к публикации 08.03.2025 г.

Представлено описание генератора наносекундных импульсов. Импульсы формируются при лавинном пробое транзистора, который также участвует в формировании напряжения, необходимого для лавинного пробоя коллекторного перехода. В результате схема компактна и работоспособна уже при питающем напряжении 1.1 В. Схема весьма проста, не требует наладки, применяемые детали доступны. Амплитуда формируемых импульсов составляет примерно 40 В при нагрузке 50 Ом.

1. ВВЕДЕНИЕ

При формировании наносекундных импульсов часто применяется лавинное включение транзистора [1, 2]. Для лавинного пробоя необходимо повышенное напряжение питания схемы величиной порядка 100 В. Если включить эмиттер вместо коллектора, а коллектор вместо эмиттера в инверсном включении, то можно получить эффект пробоя уже при напряжениях порядка 10 В, однако инверсное включение сильно проигрывает обычным схемам с лавинным транзистором по временным параметрам, обеспечивая время нарастания сигнала порядка 100 нс.

Для практического применения генератора наносекундных импульсов в таких схемах, как драйвер коротких токовых импульсов лазерного диода, схемах точной временной привязки событий в ряде электронных блоков, для рефлектометрии во временной области, удобно использовать низковольтное, в том числе батарейное, питание. Лавинный генератор с питанием от одного гальванического элемента с напряжением 1.5 В описан в указаниях по

применению AN47 [3], где приведена схема, в которой применялись специализированная микросхема преобразователя напряжения, диодный умножитель напряжения и специализированный лавинный транзистор. В коллекторной цепи поддерживается постоянное напряжение 90 В. Однако нет необходимости питать коллекторную цепь высоким напряжением постоянно. Достаточно подать в коллекторную цепь импульс длительностью приблизительно 1 мкс с амплитудой, превышающей напряжение пробоя, и этого будет достаточно, чтобы зарядилась небольшая разрядная емкость и произошел лавинный пробой.

В настоящей статье предлагается реализация устройства на одном маломощном кремниевом транзисторе, объединяющем функции и преобразователя напряжения, и лавинного элемента. В устройстве используется импульсное питание коллекторной цепи. Идея применить транзистор, выполняющий одновременно две функции в схеме, изложена также в работе [1] как "генератор импульсов с питанием от LC-контура с ударным возбуждением", но, в отличие от конструкции, описываемой в данной статье, в работе [1] применялось большее напряжение питания схемы и получена меньшая мощность выходного импульса, и эта схема не является автогенераторной.

2. СХЕМА УСТРОЙСТВА

Схема устройства показана на рис. 1. Необходимыми элементами схемы являются трансформатор TV , транзистор VT и резистор R_1 . Резистор R_1 и цепь нагрузки, параллельная ему, с сопротивлением величиной примерно 33 Ом включены в эмиттер транзистора VT . Величина сопротивления задает величину тока открытого транзистора, а в момент лавинного пробоя на эмиттерном сопротивлении формируется импульс напряжения.

Рис. 1. Схема устройства.

Если подать на схему напряжение питания, то вначале транзистор окажется в режиме насыщения. Потенциал базы больше потенциала плюсовой шины питания на величину $U \approx 0.3$ В. Потенциал коллектора меньше потенциала плюсовой шины питания на ту же величину. Если при насыщении напряжение коллектор–эмиттер $U_{кэ} \approx 0.2$ В, то ток эмиттера $I_э = (U_п - U - U_{кэ})/R$, где $U_п$ – напряжение питания. В начальный момент токи базы и коллектора равны половине тока эмиттера: $I_б = I_к = I_э/2$. В трансформаторе токи базы и коллектора складываются в противофазе и энергия магнитного поля сердечника равна нулю. Далее ток коллектора растет со скоростью $dI_к/dt = U/L/2$, а ток базы уменьшается со скоростью $dI_б/dt = -U/L/2$, где L – индуктивность каждой из обмоток трансформатора. Увеличивающаяся разность коллекторного и базового токов намагничивает сердечник

трансформатора, трансформатор запасает энергию, как дроссель. Коллекторный ток растет до I_3 , а ток базы падает до I_3/h_{21} , где h_{21} – коэффициент усиления по току. Расте более I_3 ток коллектора не может, транзистор, вышедший из режима насыщения, резко закрывается. ЭДС самоиндукции формирует растущее напряжение узла c (рис.1), которое может достигать уровня лавинного пробоя. При возникновении пробоя в эмиттерной цепи формируется короткий импульс положительного напряжения. Далее энергия магнитного поля трансформатора расходуется при закрытом транзисторе, и описанный цикл повторяется.

Конденсатор C_2 разряжается при лавинном пробое в нагрузку и формирует треугольный выходной импульс с коротким передним фронтом. Для формирования П-образного импульса параллельно конденсатору C_2 подключался отрезок кабеля RG-58 длиной 50 см, обозначенный на схеме L_3 . Схема работоспособна и без подключенных емкости C_2 и линии L_3 . В этом случае в нагрузку разряжаются конструкционные емкости величиной порядка 1 пФ. Резистором R_2 ограничивается ток транзистора при коротком замыкании выхода. От схемы выходной сигнал подавался во внешнюю цепь по 50-омному кабелю (RG-58) к 50-омной нагрузке, подключаемой к разъему "Вых".

Компоновка платы достаточно произвольна, и ее вариант показан на рис. 2.

Рис. 2. Элементы схемы и печатная плата.

Был применен двухсторонний фольгированный стеклотекстолит толщиной 1.5 мм. Нижняя сторона – сплошная фольга, не подключенная к схеме, C_1 , C_2 и R_2 – SMD-компоненты, R_1 – выводной резистор. Конструкция трансформатора не критична. Схема работает с трансформаторами, параметры которых лежат в широких пределах. Опробованы трансформаторы с индуктивностью коллекторной обмотки в пределах 5–30 мГн. В описываемом варианте использовался готовый индуктивный элемент. В качестве трансформатора применен фильтр подавления электромагнитных помех PLA10AN1030R7R2 с двумя одинаковыми обмотками на ферритовом сердечнике с индуктивностью одной обмотки 20 мГн на частоте 1 кГц.

На рис. 3 показаны кривые напряжения коллектора транзистора (узел c на рис. 1) при различных напряжениях питания. Сигналы записаны с помощью щупов с полосой пропускания 500 МГц.

Рис. 3. Напряжение коллектора транзистора V_{T1} ...

Генерация в схеме возникает уже при напряжении питания около 0.5 В. Как следует из рис. 3, колоколообразный выброс напряжения на коллекторе транзистора достигает примерно 110 В при питающем напряжении 3 В. При повышении напряжения питания до 4 В и более возникает лавинный пробой, наблюдаемый на рис. 3 как резкое падение напряжения

коллектора в области $t \approx 0$. При этом в эмиттерной цепи возникает короткий положительный импульс.

Схема, показанная на рис. 1, – работоспособная, но ее недостатком является то, что при выключении транзистора VT и формировании на коллекторной обмотке (узел c на рис. 1) импульса положительного напряжения на базовой обмотке формируется импульс отрицательного напряжения (узел a на рис. 1). Переход база–эмиттер пробивается, подобно стабилитрону, при достижении на нем напряжения около -10 В, и возникает шунтирующий ток, препятствующий росту напряжения на коллекторе, так как базовая и коллекторная обмотки индуктивно связаны. В результате лавинный пробой может возникать только на начальном положительном выбросе коллекторного напряжения. Остальная часть импульса (плато на кривой напряжения коллектора на вставке к рис. 3) вызвана шунтирующим током базы. Таким же недостатком обладает близкая по структуре схема из патента [4], на которой шунтирующий ток протекает через диод, включенный встречно-параллельно переходу эмиттер–база и через цепь запуска, подключенную к базе транзистора. Шунтирующий ток заметно снижает функциональность схемы.

Включение дополнительного диода VD в разрыв плюсовой шины питания (показано стрелкой на рис. 1) позволяет потенциалу узла (b на рис. 1) принимать значения, превышающие потенциал положительной шины питания, и исключает шунтирование базовой обмотки. В результате напряжение, достаточное для лавинного пробоя транзистора, возникает уже при питании схемы напряжением 1.4 В, а при использовании в качестве диода – диода Шоттки, генерация лавинного импульса начинается уже при напряжении питания 1.1 В. В качестве диода применимы маломощные диоды с максимальным обратным напряжением более 100 В.

Импульсы, записанные на выходе схемы, показаны на рис. 4. Выход схемы подключался 50-омным кабелем (обозначенным как RG-58) к ослабителю величиной 20 дБ и далее ко входу осциллографа MSO56 (Tektronix). Входное сопротивление канала осциллографа устанавливалось равным 50 Ом. Полоса пропускания осциллографа и ослабителя составляет 2 ГГц, что должно обеспечивать регистрацию фронта нарастания примерно до 180 пс.

Рис. 4. Выходные сигналы схемы...

В то время, когда транзистор открыт, выходной сигнал, снимаемый с эмиттера транзистора, приблизительно равен половине напряжения питания. В интервале времени, приведенном на рис. 4, к базе транзистора уже приложено отрицательное напряжение базовой обмотки, переход баз–эмиттер пробит, подобно стабилитрону, и на эмиттерном

резисторе присутствует небольшое отрицательное напряжение. Поэтому импульсы на рис. 4 начинаются от напряжения, близкого к нулю.

Для приведенных сигналов (табл.1) были рассчитаны максимальные скорости нарастания сигнала и время нарастания сигнала по уровням (0.1–0.9).

Таблица 1. Параметры сигналов, приведенных на рис. 4, нумерация кривых соответствует рис. 4

№	Скорость нарастания, В/нс	Время нарастания, нс	Подключенные элементы	Напряжение питания $U_{п}$, В
1	21.3	0.72	C_2	4
2	20.2	0.8	C_2	5
3	20.0	0.96	C_2, VD	1.4
4	21.6	1.12	$C_2, VD, Лз$	1.4

При включенном в схему диоде VD при напряжении питания 2 В наблюдается цуг импульсов, так как энергия магнитного поля, запасаемая в трансформаторе в то время, когда ток коллектора нарастает, достаточна для нескольких лавинных пробоев подряд после его закрытия. На рис. 5 показаны коллекторный и выходной сигналы при напряжении 2.0 В.

Рис. 5. Цуг импульсов при напряжении питания 2.0 В...

При выборе типа транзистора для схемы предпочтительны транзисторы с низким допустимым напряжением пробоя коллектор–эмиттер. При замене транзистора VT на S9013 с напряжением пробоя коллектор–эмиттер 25 В схема формирует лавинный импульс амплитудой 15 В уже при напряжении питания 1 В. Если применить VT типа 2N2222 с напряжением пробоя коллектор–эмиттер 30 В, то схема формирует лавинный импульс амплитудой 20 В при напряжении питания 6.3 В.

Схема уверенно работала с различными трансформаторами. При использовании трансформатора на ферритовом кольце с индуктивностью коллекторной обмотки примерно 5 мГн и при отношении числа витков базовой обмотки трансформатора к числу витков коллекторной обмотки около 1:5 работоспособность схемы также сохранялась.

3. ДРАЙВЕР ЛАЗЕРНОГО ДИОДА

Приведенная схема была опробована как драйвер лазерного диода с быстрым фронтом импульса излучения. Был применен модуль лазерного диода с мощностью в непрерывном режиме около 5 мВт и длиной волны излучения $\lambda \approx 650$ нм. Схема подключения модуля к драйверу показана на рис. 6.

Рис. 6. Схема подключения генератора импульсов как драйвера лазерного диода

Излучение лазерного модуля U_1 фокусировалось встроенной линзой L на фотодиод PD типа S5973 (Hamamatsu). Выходной кабель, обозначенный как RG-58, нагружен на входное сопротивление осциллографа, равное 50 Ом. Сигнал на выходе фотодетектора показан на рис. 7.

Рис. 7. Сигналы фотодетектора

Кривые 1, 2 записаны при питании схемы драйвера от одной батарейки 1.4 В. Величина мощности излучения, попадающего на фотодиод, определена по известной спектральной чувствительности фотодиода.

Ток потребления схемы равен примерно 18 мА. Частота генерации порядка 5 кГц. Для сигнала детектора 1 время нарастания примерно равно 300 пс, а для сигнала детектора 2 время нарастания примерно равно 270 пс.

Примененный фотоприемник S5973 обладает полосой пропускания около 1.5 ГГц при обратном смещении 18 В, что соответствует времени нарастания сигнала 230 пс. Время нарастания собственно осциллографа 180 пс. Фотоприемник и осциллограф вместе обладают временем нарастания $(230^2+180^2)^{0.5} \approx 290$ пс и, следовательно, фронт светового излучения лазера заметно короче регистрируемого значения 270 пс. С применением описанных выше приборов провести надежное измерение фронтов нарастания, меньших, чем примерно 300 пс, не удастся.

4. ВЫВОДЫ

Предложенная схема генератора весьма просто и эффективно выполняет функцию формирования коротких импульсов тока амплитудой порядка 1 А в нагрузке порядка 50 Ом при напряжении питания схемы более 1.1 В. При питании схемы напряжением 1.2 В происходит генерация одиночных импульсов с частотой около 7.5 кГц. При питании напряжением 2.2 В в схеме формируются цуги из восьми импульсов с частотой следования цугов 1.9 кГц и интервалами между импульсами в цуге примерно от 495 нс до 1100 нс. Устройство применимо при измерении скорости отклика фотоприемников, измерении времен задержек сигналов в кабелях, проверке полосы пропускания осциллографических щупов, для лазерных дальномеров и для формирования импульсов временной привязки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дьяконов В.П.* Лавинные транзисторы и тиристоры. Теория и применение. Серия "Компоненты и технологии". М.: Солон-Пресс, 2014.
2. *Дьяконов В.П.* Генерация и генераторы сигналов. Москва: ДМК Пресс, 2009. С. 106.
3. *Williams J.* High speed amplifier techniques // Linear Technology Corporation. Application Note 1991. Т. 47. Р. 35
4. *Пуцин Е.Л.* Релаксационный генератор импульсов на лавинном транзисторе с низким напряжением питания. РФ Патент 2 595 937 С1, 2016.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Схема устройства.

Рис. 2. Элементы схемы и печатная плата. Левый вывод транзистора – эмиттер, правый – коллектор. Серые прямоугольники – фольга, серые круги и эллипсы – места пайки.

Рис. 3. Напряжение коллектора транзистора VT_1 : кривые 1, 2, 3, 4, 5 соответствуют напряжениям питания 1, 2, 3, 4, 5 В. Вставка – общий вид импульса коллектора (К) и базы (Б) при напряжении питания схемы 3 В.

Рис. 4. Выходные сигналы схемы: 1 – сигнал при напряжении 4 В (без диода VD), 2 – сигнал при напряжении 5 В (без диода VD), 3 – сигнал при напряжении 1.4 В и при подключенном диоде VD_1 , 4 – сигнал при напряжении 1.4 В и при подключенных диоде VD_1 и отрезке кабеля L_3 . Сигналы приведены с учетом действия ослабления аттенюатора.

Рис. 5. Цуг импульсов при напряжении питания 2.0 В: 1 – коллекторный сигнал, 2 – выходной сигнал.

Рис. 6. Схема подключения генератора импульсов как драйвера лазерного диода. Резистор R_5 входит в конструкцию модуля U_1 .

Рис. 7. Сигналы фотодетектора: 1 – в генераторе установлен конденсатор C_2 , 2 – в генераторе установлены конденсатор C_2 и разрядная линия L_3 . Правая ось – мощность излучения.

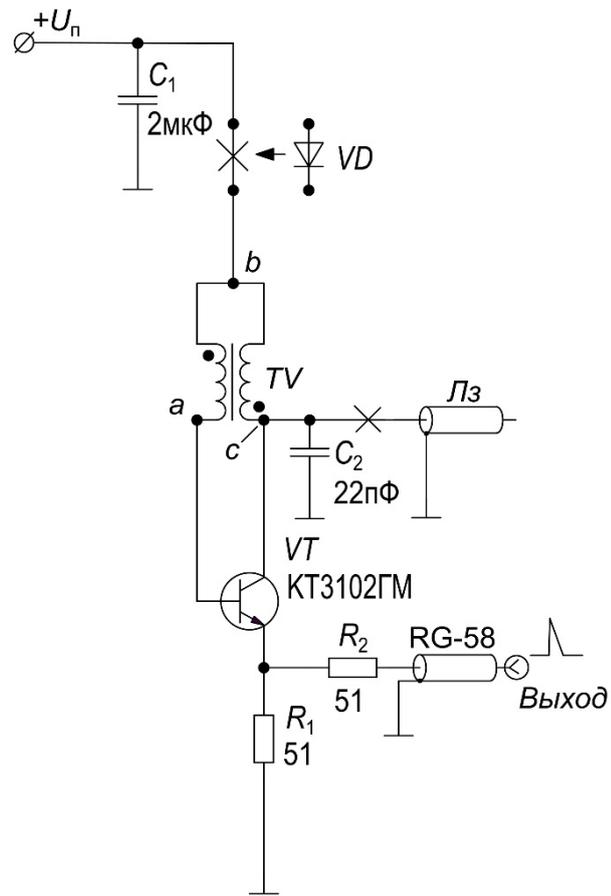


Рис. 1.

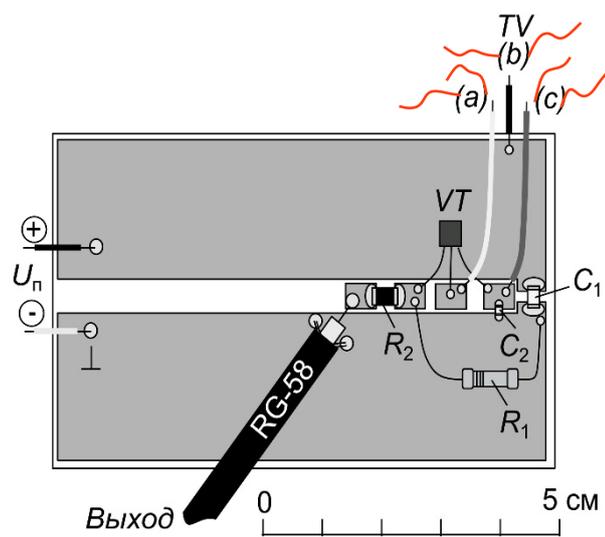


Рис. 2.

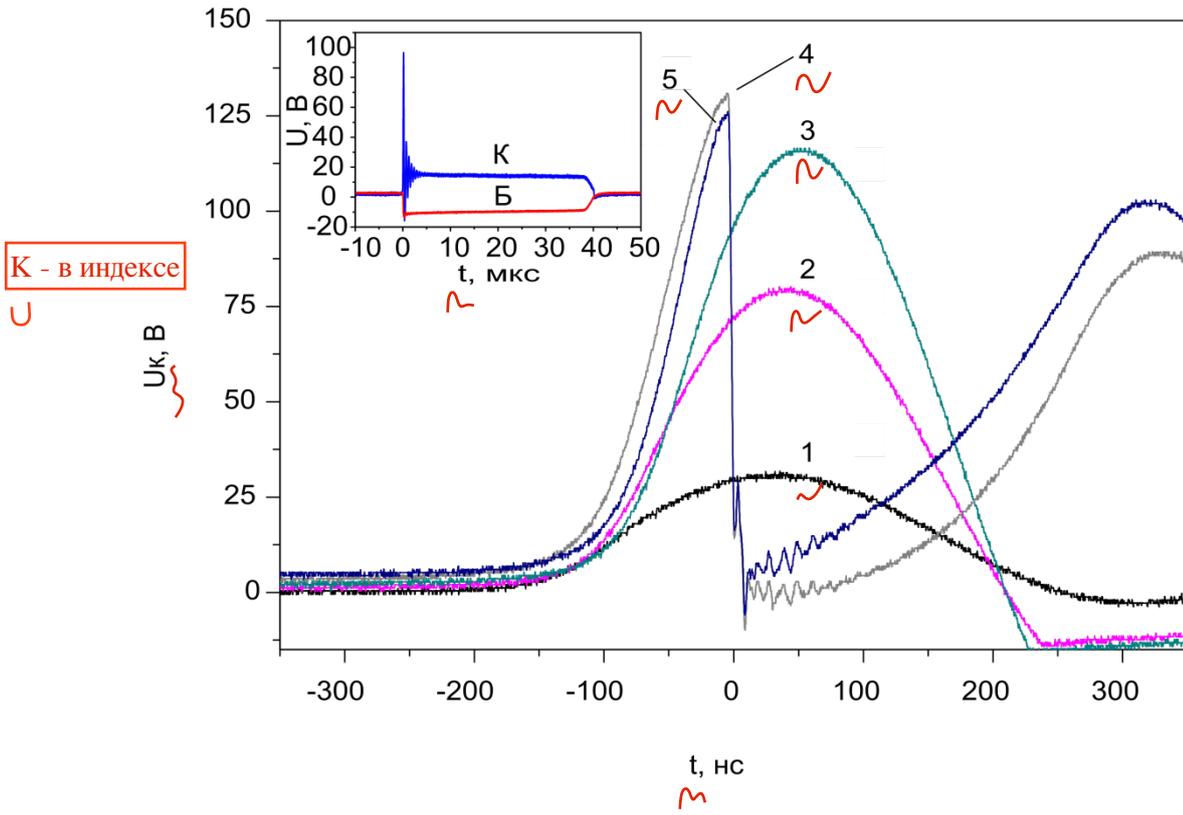


Рис. 3.

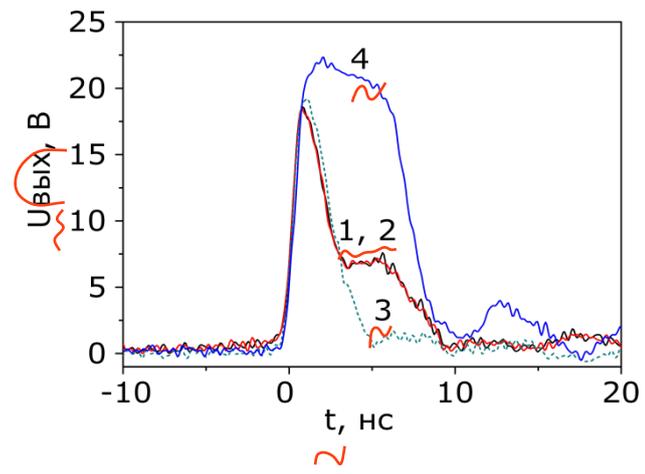


Рис. 4.

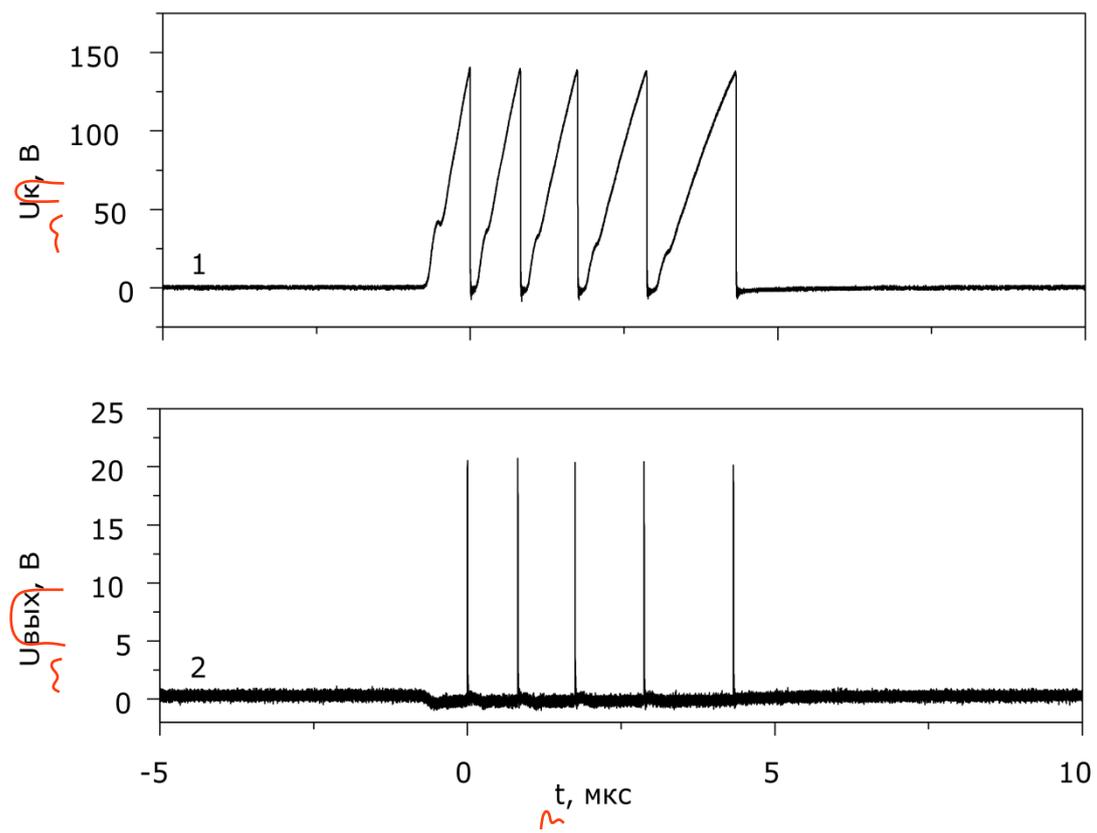


Рис. 5.

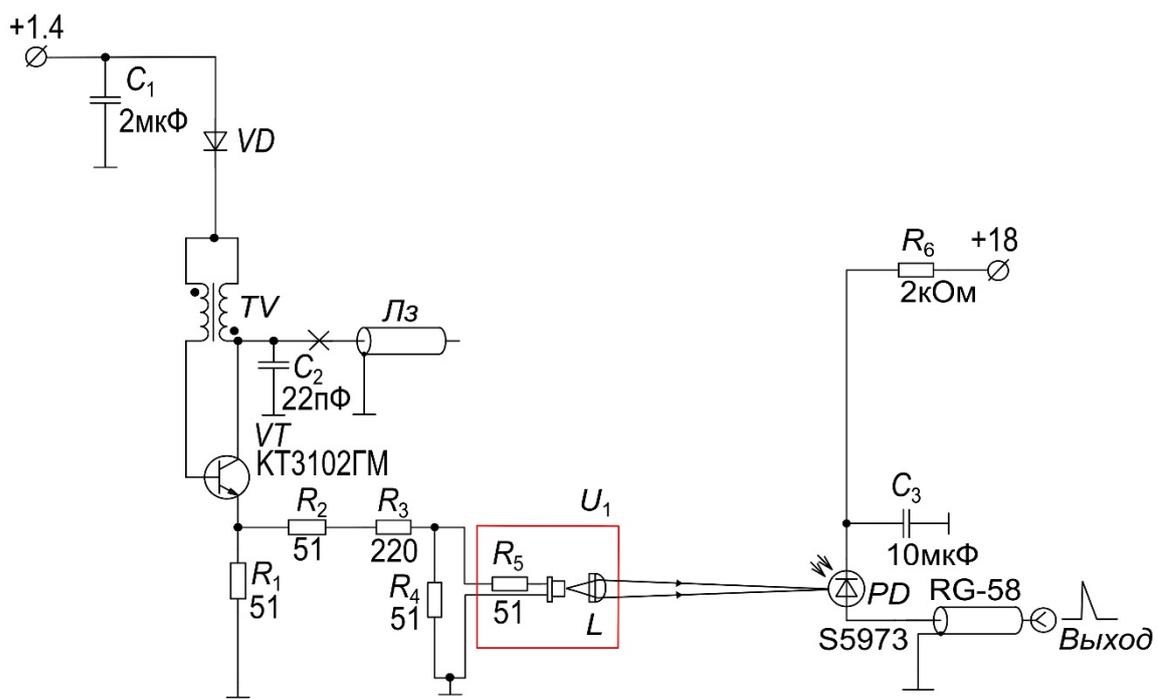


Рис. 6.

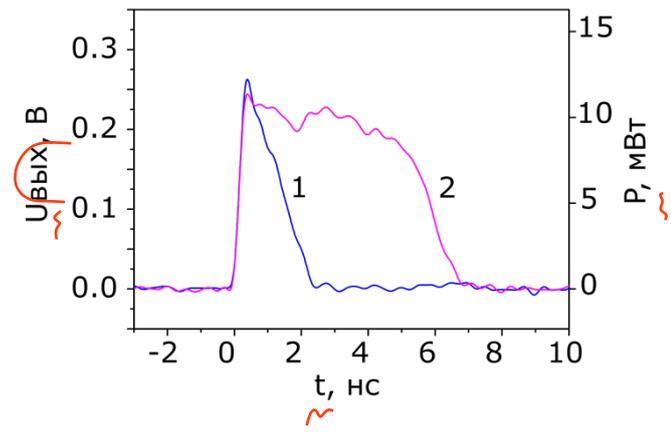


Рис. 7.