

# Лавинные транзисторы вчера, сегодня и завтра

Владимир ДЬЯКОНОВ,  
д. т. н., профессор  
vpdyak@yandex.ru

**Весьма интересна и поучительна судьба поистине уникальных приборов — лавинных транзисторов (avalanche transistors). Они не только сочетают возможности обычных транзисторов с возможностями негатронов с S- и N-образными управляемыми ВАХ, но и имеют большие рабочие напряжения и токи в импульсе с предельно малым временем включения. Применение их, как и обычных транзисторов в лавинном режиме работы, в том числе в сочетании с другими высокоскоростными активными приборами, позволяет упростить наносекундные импульсные генераторы и получить уникальные параметры импульсов. Однако возможности лавинных транзисторов все еще малоизвестны. Им и их перспективам развития посвящена данная статья.**

## Немного истории

Обычным биполярным транзисторам понадобилось почти полвека, чтобы преодолеть «барьер» во времени включения в 1 нс. Лишь к концу 1970-х годов, к примеру, в СССР был разработан транзисторный генератор наносекундных импульсов Г5-78, обеспечивающий получение импульсов с амплитудой до 5 В на нагрузке 50 Ом (амплитуда тока 0,1 А) с временем нарастания 1 нс. Он был создан в Вильнюсском НИИ радиоизмерительных приборов. Позже (уже в 1980-е годы) там же был разработан генератор Г5-85, обеспечивший, с применением специализированных гибридно-пленочных микросхем, получение на нагрузке 50 Ом импульсов со временем нарастания до 0,3 нс, но при уменьшенной до 2 В амплитуде.

Медленное развитие скоростной импульсной техники может показаться странным на фоне появления в эти годы мощных СВЧ-биполярных (а затем и полевых) транзисторов с частотами в единицы и даже десятки гигагерц и уровнями рабочих напряжений в десятки вольт. Причины медленного роста быстродействия и импульсной мощности импульсных устройств носят фундаментальный характер. Дело в том, что генераторы синусоидальных сигналов всегда имели резонансные и согласующие цепи, позволявшие нейтрализовать паразитные емкости и индуктивности их активных компонентов и монтажа, но в узкой области частот. Такие цепи встраиваются в СВЧ-транзисторы, и это сильно затрудняет их применение в принципиально широкополосных импульсных устройствах. К тому же фундаментальным свойством обычного режима работы биполярных транзисторов была потеря быстродействия и усилительных способностей с ро-

стом рабочего тока из-за известного эффекта Кирка [5]. А токи в импульсных устройствах обычно намного больше, чем в усилителях и генераторах синусоидальных сигналов.

Лавинными называют транзисторы, полезное использующие эффект лавинного умножения носителей в коллекторном переходе. Это позволяет в несколько раз увеличить рабочие напряжения и во много раз — импульсные токи и придает лавинным транзисторам новые свойства негатронов S- и N-типа.

В качестве лавинных транзисторов в середине прошлого века применялись германиевые сплавные, а затем диффузионно-сплавные транзисторы. В начале 1970-х годов в НИИ «Пульсар» (Москва) был разработан первый советский специальный лавинный диффузионно-сплавной меза-эпитаксиальный транзистор ГТ338, обеспечивший получение импульсов с амплитудой 5–20 В на нагрузке 50 Ом и преодолевший барьер времени их нарастания в 1 нс ( $10^{-9}$  с) [1–3]. Прибор предназначался для работы в генераторах стробирующих импульсов скоростных стробоскопических осциллографов и других применений. За рубежом его реклама дважды появлялась на сайте [www.ebay.co.th](http://www.ebay.co.th) (по цене \$38 за штуку).

Вскоре были созданы кремниевые планарные и меза-эпитаксиальные транзисторы с большей стабильностью параметров, в том числе лавинных. За рубежом появились первые типы серийных кремниевых лавинных транзисторов. Число публикаций по применению транзисторов в лавинном режиме во всем мире достигло многих тысяч. В 1973 г. вышла первая монография по лавинным транзисторам и их применениям [3]. Достижения в разработке теории и схемотехники лавинных транзисторов и тиристоры в последующие годы обобщены в новой монографии [4].

Лавинный режим для обычных транзисторов многие годы рассматривался как вредный и способствующий выходу приборов из строя. И действительно, в обычных схемах возникновение лавинного пробоя вело к практически мгновенной последующей гибели приборов из-за теплового или вторичного пробоя необратимого характера. При заходе в лавинную область работы в условиях низкой технологической культуры производства первых транзисторов снижался процент выхода годных изделий.

Остроту проблемы создания коротких импульсов с субнаносекундными фронтами в какой-то мере сняло появление диодов с режимом восстановления и накоплением заряда (ДНЗ) [6], а позже СВЧ кремниевых и арсенид-галлиевых полевых транзисторов [7, 8]. Однако для запуска этих довольно дорогих приборов требовались импульсы, которые сами по себе с трудом удавалось получить от обычных серийных биполярных транзисторов. Зато их легко было получить от транзисторов, используемых в лавинном режиме. Но у нас развитие лавинных транзисторов прекратилось в связи с распадом СССР в 1990-е годы и прекращением производства многих типов транзисторов и измерительных генераторов импульсов.

На фоне этого интерес к лавинным транзисторам к началу 1990-х годов резко упал. Отражение данной тематики в Интернете практически отсутствовало. Между тем во всем мире после 1990-х годов появился ряд новых и весьма перспективных областей применения нано- и даже пикосекундных импульсов. Это запуск скоростных лазерных полупроводниковых излучателей, управление оптическими коммутаторами на ячейках Поккельса и Керра, контроль параметров антенн во временной области, возбуждение

пьезоизлучателей в ультразвуковых толщиномерах, разработка сверхскоростных и сверхширокополосных (UBW) линий связи, создание видеопульсных локаторов высокого разрешения и георадаров для поиска объектов под землей и в закрытых помещениях, контроль новых скоростных цифровых осциллографов и анализаторов спектра, запуск новых типов сверхскоростных активных приборов и т. д. и т. п.

Разработчиков таких устройств не могли удовлетворить скромные параметры появившихся в изобилии логических, цифровых и импульсных схем в части формирования импульсов с субнаносекундными фронтами с большой амплитудой. Не спасло положение и появление в начале этого века сверхскоростных больших микросхем на гетеропереходных гигагерцевых и даже терагерцевых интегральных полевых транзисторах: по уровню рабочих напряжений и токов они оказались совершенно неприемлемыми для большинства указанных выше применений. В таких условиях снова стал расти интерес к лавинным транзисторам, особенно к высоковольтным, с рабочими напряжениями в сотни вольт.

К этому времени технология изготовления транзисторов существенно обновилась и улучшилась. В огромных количествах стали выпускаться кремниевые планарные, эпитаксиальные и меза-эпитаксиальные транзисторы малой, средней и большой мощности. При исследовании этих приборов в лавинном режиме работы обнаружился ряд непонятных и тонких эффектов, показавших возможности получения субнаносекундных импульсов большой амплитуды — до сотен вольт.

В 1980-х годах появились высокоскоростные осциллографы, позволившие изучить эти эффекты, в частности, аномально малое время включения эпитаксиальных транзисторов в лавинном режиме в схеме обычного ключа. Стало возможным использовать эти явления на практике и создать принципиально новые типы полупроводниковых приборов — лавинных *S*-диодов, дрейфовых диодов и транзисторов с резким восстановлением, SOS отключающих диодов и др. Стало окончательно ясно, что никаких принципиальных отличий между специальными лавинными транзисторами и обычными, используемыми в лавинном режиме, просто нет.

И как результат всего этого, резко вырос интерес к лавинному режиму и лавинным транзисторам в начале XXI века. В [4] отмечается, что уже в 2007 г. в поисковой системе Google можно было найти около полумиллиона интернет-ссылок по данной тематике. Сегодня (июль 2010 г.) по теме “Avalanche transistors” в той же системе дается уже 2,38 млн интернет-страниц. Конечно, лишь часть из них относится прямо к контексту данной статьи. В одной из них — народной энциклопедии Wikipedia, в статье, посвященной лавинным транзисторам, по достоинству оценен наш вклад в развитие данного направления.

## Лавинно-инжекционные транзисторы

Далее для определенности рассмотрим *n-p-n*-транзисторы. Напомним, что работа биполярного транзистора основана на инжекции прямо смещенным эмиттерным переходом в базовую область первичных носителей (электронов у *n-p-n*-транзисторов). Пройдя с некоторыми потерями (вследствие рекомбинации) базовую область, они собираются коллектором и создают ток коллектора, который немного меньше тока эмиттера. Последнее отражает коэффициент передачи тока эмиттера  $\alpha < 1$ .

У лавинно-инжекционных транзисторов (ЛИТ) к этому добавляется механизм лавинного умножения первичных носителей в области объемного заряда (ООЗ) коллекторного перехода при больших обратных напряжениях на нем. Это происходит не по всей ООЗ, а лишь в ее области с максимальной напряженностью электрического поля. Попадая в эту область ООЗ, первичные носители расщепляются связи между электронами и дырками в кристаллической решетке и порождают вторичные электронно-дырочные пары. Вторичные электроны вместе с первичными переносятся в коллектор и создают коллекторный ток  $I_k = M(\alpha I_e + I_{k0})$ , который возрастает в  $M$  раз. Здесь  $M > 1$  — коэффициент лавинного умножения носителей.

Вторичные дырки переносятся полем ООЗ в базу и создают в ней избыточный заряд основных носителей. Он снижает потенциальный барьер эмиттерного перехода и усиливает инжекцию носителей в базовую область. Возникает своеобразный механизм малоинерционной внутренней положительной обратной связи по току. При больших напряжениях на коллекторе его ООЗ расширяется, а толщина базовой области уменьшается. Это наряду с повышенной скоростью движения носителей с сильным полем ООЗ повышает быстрое действие ЛИТ. У некоторых транзисторов наступает смыкание ООЗ-переходов, и время включения их резко возрастает. Но этот эффект нестабилен и присущ малому числу плоскостных транзисторов: их конструируют так, чтобы избежать смыкания даже при напряжении на коллекторе, близком к  $U_M$ .

При  $\alpha M > 1$  ЛИТ приобретают качественно новое свойство: они становятся негатронами, то есть приборами с управляемыми *S*- и *N*-образными вольт-амперными характеристиками (ВАХ), имеющими участки отрицательного дифференциального сопротивления и проводимости (в зависимости от схемы включения).

Для расчета  $M$  в *p-n*-переходе обычно используется эмпирическое выражение, известное как формула Миллера:

$$M = \frac{I(U)}{I_0} = \frac{1}{1 - \left(\frac{U}{U_M}\right)^n}. \quad (1)$$

Здесь  $n = 6$  для  $n^+-p$ -переходов;  $n = 3$  для германиевых  $p^+-n$ -переходов и  $n = 2$  и 3,5 для кремниевых  $n^+-p$ - и  $p^+-n$ -переходов. Из этого выражения вытекает, что  $M$  чуть больше 1 при малых  $U$ , но  $M \rightarrow \infty$  при напряжении  $U$ , стремящемся к напряжению лавинного пробоя коллекторного перехода  $U_M$  (рис. 1). Наибольшие значения  $M$  достигаются у германиевых *p-n-p*- и у кремниевых *n-p-n*-транзисторов. Они и используются в качестве лавинных. Рис. 1 получен с применением персонального компьютера с современной системой компьютерной математики Mathematica.

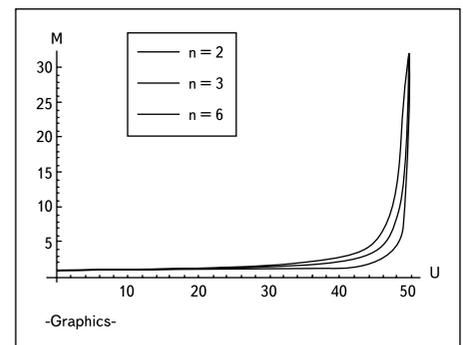


Рис. 1. Зависимость коэффициента лавинного умножения  $M$  от напряжения на коллекторном переходе  $U$  для разных  $n$

Из условия  $\alpha M = 1$  можно найти напряжение пробоя при обрыве базы:

$$U_\beta = U_M \sqrt[n]{1 - \alpha}. \quad (2)$$

Оно составляет (в зависимости от  $\alpha$ ) 0,2–0,5  $U_M$  (рис. 2).

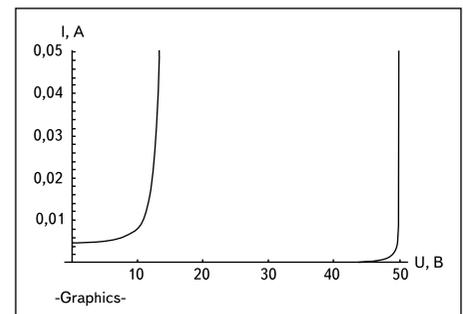


Рис. 2. ВАХ для схемы включения транзистора «коллектор — база» (правая кривая) и «коллектор — эмиттер с обрывом базы»

Напряжения пробоя в этих схемах заметно отличаются, причем  $U_M > U_\beta$ . В диапазоне напряжений:

$$U_\beta < U < U_M \quad (3)$$

транзистор имеет значение  $\alpha M > 1$  и проявляет свойства негатрона. Лавинно-инжекционные транзисторы имеют легко управляемые как *S*-образные, так и *N*-образные ВАХ (рис. 3).

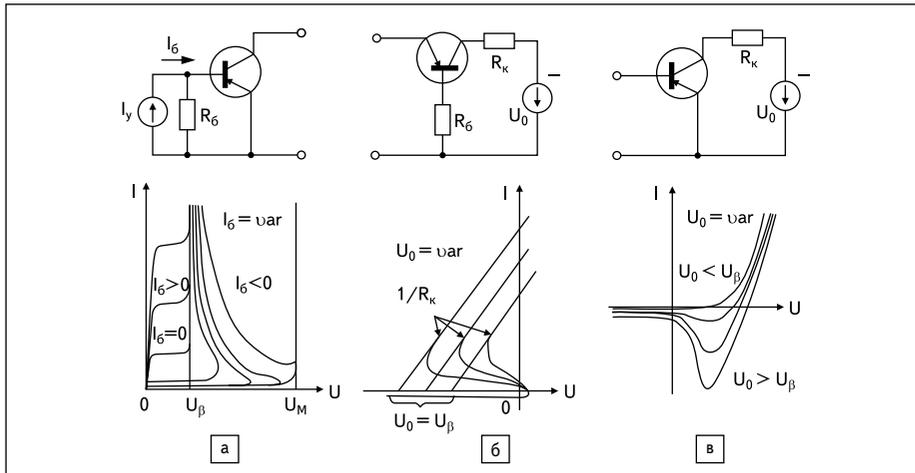


Рис. 3. Схемы включения лавинного р-п-р-транзистора и соответствующие им семейства ВАХ: а) со стороны коллектора; б) со стороны эмиттера; в) со стороны базы

Вполне возможно управление всеми этими ВАХ путем освещения структуры лавинных транзисторов. На этом основана работа лавинных фототранзисторов. Детальный анализ ВАХ ЛИТ дан в [3, 4], в том числе с применением системы компьютерной математики Mathematica.

Сам по себе механизм лавинного умножения имеет очень малую инерционность: время развития лавинного пробоя — около  $10^{-11}$ – $10^{-12}$  с. Однако быстродействие ЛИТ определяется не только им, но и обычными механизмами переноса носителей через область базы и емкостями переходов транзистора.

В качестве ЛИТ хорошо показали себя массовые советские германиевые диффузионно-сплавные транзисторы П416, ГТ313, П422, П423 и др. [3, 4]. В наше время они уже не выпускаются. Это, а также работа при повышенных напряжениях, значительный разброс параметров, небольшой выигрыш в скорости работы и конкуренция со стороны обычных импульсных микросхем не позволили схемам на ЛИТ прорваться на просторы рынка импульсных устройств массового применения.

**«Аномально быстрое» включение лавинного транзистора**

Модель ЛИТ оказалась качественно неточной для большинства современных планарно-эпитаксиальных и меза-эпитаксиальных биполярных транзисторов в области больших токов — выше десятков миллиампер. Это особенно касается кремниевых транзисторов.

По мере их исследования стали выявляться странные, с позиций обычной теории биполярных транзисторов, явления. Осциллографы 1970-х и даже 1980-х годов не позволяли в деталях разбираться в форме сигналов в схемах на лавинных транзисторах, и их поведение нередко воспринималось как аномальное и вредное. Это во многом тормозило исследования и применение приборов.

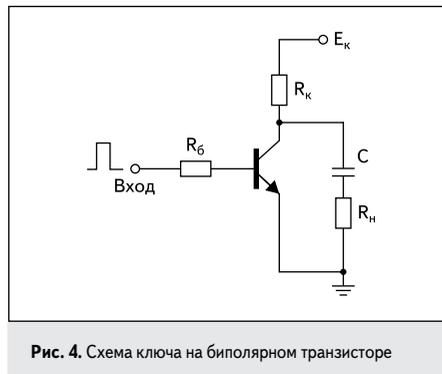


Рис. 4. Схема ключа на биполярном транзисторе

Сейчас трудностей в измерении таких быстрых процессов нет — не считая дорогостоящих скоростных осциллографов. К примеру, цифровой осциллограф DPO 4101 компании Tektronix позволяет наблюдать перепады напряжения с длительностью до 0,5 нс даже при высокоомном (10 МОм с пробником) входе. Рассмотрим с его помощью поведение обычного ключа на кремниевом *n-p-n*-биполярном транзисторе КТ3117 (рис. 4 при  $R_6 = 10$  кОм,  $R_k = 51$  кОм и  $R_n = 0$ ), переключаемого прямоугольными импульсами — меандром. При этом во время отрицательной полуволны меандра транзистор закрыт, а во время положительной открывается и при достаточном большом входном сигнале входит в насыщение. С помощью средства Wave Inspector (по существу, «лупы времени») из обзорной части изображения (в верхней части экрана) вырезается часть, отображающая процесс включения транзистора.

Пока  $E_k < U_\beta$ , никаких аномалий в работе ключа не отмечается. Ключ довольно медленно (за десятые доли микросекунды) включается и при достаточной амплитуде входных импульсов входит в насыщение. При запираении он с большой задержкой выходит из насыщения. Напряжение  $U_M$  у данного транзистора около 150 В,  $U_\beta$  — около 50 В.

«Аномалии» начинают появляться при увеличении  $E_k$  (рис. 5): при  $E_k$  около 95 В.

Внезапно, при небольшом превышении этого напряжения, появляется участок очень быстрого (порядка 1 нс) спада напряжения в начале довольно медленной экспоненты спада включающегося транзистора. Обычно  $E_k$  больше  $U_\beta$ , но меньше  $U_M$ . Автоматическое измерение времени спада осциллографом пока не реагирует на появление маленького участка быстрого спада, поскольку он по уровню намного меньше уровня полного перепада (он близок к  $E_k$ ). Измеренное время полного спада составляет в среднем 224 нс, и его возросшее стандартное отклонение в 7,5 нс говорит о появлении временной нестабильности — джиттера. Он возникает на быстром перепаде, что и видно на рис. 5. Менее быстрый осциллограф может вообще не отметить такой необычный спад.

А теперь начнем плавно увеличивать  $E_k$ , не меняя амплитуды входных импульсов. Классическая теория импульсного режима работы биполярного транзистора предсказывает, что при этом время включения должно плавно увеличиваться из-за роста тока насыщения коллектора при постоянном отпирающем токе базы. Но на деле наблюдается нечто прямо противоположное — более резкое проявление быстрого спада. При  $E_k$  близких к  $U_M$  этот спад по амплитуде быстро увеличивается, и транзистор аномально быстро (примерно за 1 нс) входит в насыщение (рис. 6). Интересно, что джиттер при этом резко уменьшается до 42 пс, то есть в сотни раз! Область быстрого спада распространяется на весь спад.

Итак, в нашем примере при увеличении  $E_k$  со 100 до 150 В время включения ключа не только не увеличилось, а уменьшилось с 224 до 1,05 нс, то есть более чем в 200 раз! При этом транзистор «аномально» быстро входит в глубокое насыщение. Все это явно указывает на возникновение некоторого нового физического явления. Оно, безусловно, полезно: такие высоковольтные быстрые перепады остро необходимы для запуска оптических ячеек Поккельса и Керра, стробирования электронных фотоумножителей и т. д.

Описанные эффекты еще более резко проявляются в схеме релаксатора на лавинном транзисторе. Она подобна рис. 4 при  $R_n > 0$ . Включение  $R_n$  позволяет снимать осциллограмму разрядного тока конденсатора и оценивать параметры выходного импульса релаксатора (рис. 7) ( $R_n = 51$  Ом,  $C = 33$  пФ). Амплитуда импульса достигает 78 В, время нарастания (спада с учетом отрицательной полярности импульса на нагрузке) — менее 0,8 нс.

При уменьшении  $R_n$  до 0,5–1 Ом амплитуда импульса достигала 30–50 А и более, а длительность составляла немного более 1 нс. Росту быстродействия явно способствует большой ток разряда конденсатора — он же ток коллектора. Это полностью противоречит теории обычного транзистора, предсказывающей резкое падение  $B$  и  $f_T$  при на пару порядков

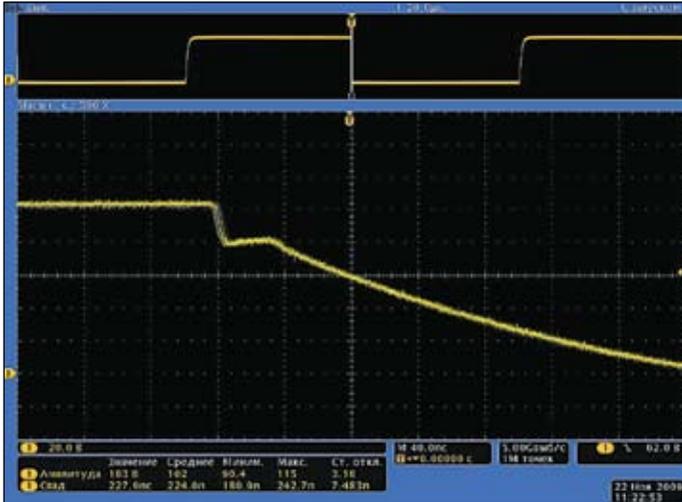


Рис. 5. Осциллограмма напряжения на коллекторе транзистора ключа, изображенного на рис. 4, при  $E_k = 100$  В выявляет «подозрительно» быстрый, пока небольшой спад напряжения

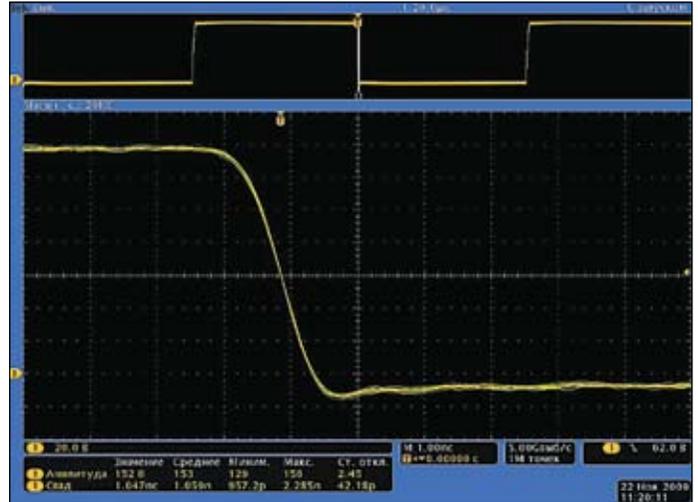


Рис. 6. Осциллограмма напряжения на коллекторе транзистора ключа на рис. 4 при  $E_k = 150$  В показывает anomalно быстрое полное переключение транзистора за время менее 1 нс — вплоть до его входа в насыщение



Рис. 7. Осциллограммы импульсов напряжения на коллекторе лавинного транзистора и при сопротивлении нагрузки  $R_n = 50$  Ом релаксатора, изображенного на рис. 4

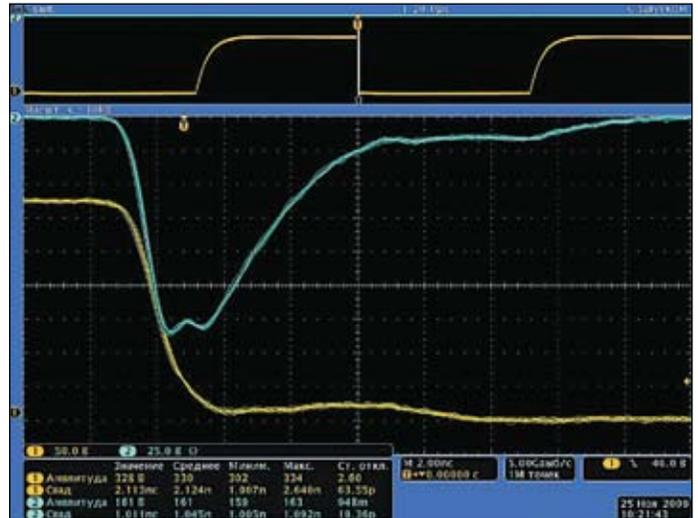


Рис. 8. Осциллограммы импульсов напряжения на коллекторе высоковольтного транзистора и при сопротивлении нагрузки  $R_n = 50$  Ом релаксатора, изображенного на рис. 4

меньших токах из-за эффекта Кирка. Ни один обычный полупроводниковый прибор не дает таких малых значений времени нарастания и длительности импульсов при таких больших амплитудах напряжения и тока.

Еще более поразительные результаты дает применение современных высоковольтных кремниевых эпитаксиальных транзисторов, например КТ630 или КТ642 с  $U_M$  более 300 В. Такие приборы дают перепад напряжения свыше 300 В при времени спада около 2 нс. Таким образом, скорость изменения напряжения на коллекторе достигает  $1,5 \times 10^{11}$  В/с и выше. На нагрузке 50 Ом формируется импульс с амплитудой выше 160 В с временем нарастания 1 нс (рис. 8). Эти параметры не хуже, чем у современных специальных лавинных транзисторов.

При  $E_k > U_M$  релаксатор переходит в автоколебательный режим работы и не требует запуска (входные импульсы в этом случае

могут использоваться для синхронизации). При меньших  $E_k$  у транзисторов с описанными эффектами наблюдается разрывной характер зависимости амплитуды импульсов от напряжения  $E_k$  (рис. 9) (из книги [4]). Такая

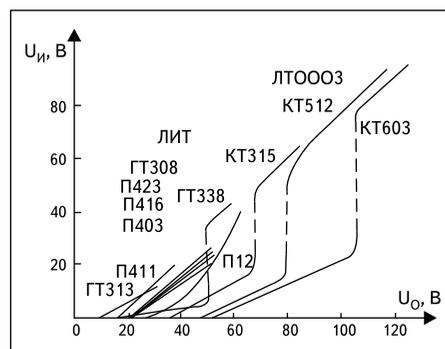


Рис. 9. Зависимость амплитуды импульсов релаксатора от напряжения  $E_k$  у разных типов транзисторов

зависимость не наблюдается у старых типов лавинно-инжекционных транзисторов.

Итак, в работе релаксатора можно выделить 5 характерных стадий (рис. 7): начало лавинного пробоя (1), развитие быстрого пробоя из-за сужения базы по мере роста тока и быстрый рост разрядного тока (2), спад разрядного тока из-за разряда накопительного конденсатора  $C$  (3), вход транзистора в глубокое динамическое насыщение (иногда и в обратимый вторичный пробой) (4) и выход из насыщения, полное закрытие транзистора и заряд конденсатора  $C$  через токоограничивающий резистор в цепи коллектора (5).

Работу релаксатора на рис. 4 можно рассматривать как дифференцирование перепада напряжения на включающемся транзисторе цепочкой  $CR_n$ . На этом основан метод динамического пробоя, описанный в [3, 4] и позволяющий рассчитать временную зависимость разрядного тока.

### Лавинные транзисторы с ограниченной областью объемного заряда (ЛТОООЗ)

Причины «аномально высокого быстродействия» биполярных транзисторов (особенно кремниевых  $n^+ - p - n^+$  планарно-эпитаксиальных) в лавинном режиме кроются во впервые обнаруженном и объясненном в [3, 4, 9–11] эффекте расширения ООЗ коллекторного перехода вглубь базы, при росте коллекторного тока даже при спаде напряжения на коллекторе. Расширение ООЗ происходит вплоть до динамического (временного) смыкания базовой границы ООЗ коллекторного перехода с ООЗ эмиттерного перехода в условиях двойной (обычной и лавинной) инжекции носителей в перекрытую ООЗ базовую область транзистора. После смыкания переходов расширение ООЗ (ограниченной низкоомными областями эмиттера и коллектора) прекращается, и она, с содержащейся в ней плазмой, выполняет роль разрядного промежутка.

Этот эффект происходит при больших токах коллектора и коэффициенте лавинного умножения  $M$ , превышающем некоторое вполне умеренное критическое значение  $M_{кр}$ . Приблизительно оно оценивается как [3, 4, 9, 10]:

$$M > M_{кр} = (v_p + v_n) / v_n \tag{4}$$

где  $v_p$  и  $v_n$  — скорости насыщения дырок и электронов в ООЗ коллекторного перехода. Ему соответствует некоторое критическое значение напряжения на коллекторе  $U_{кр}$ , вычисляемое из (1). Обычно оно лежит в интервале между напряжениями  $U_\beta$  и  $U_M$ .

При этом заряд вторичных носителей превышает заряд первичных носителей и ООЗ коллектора расширяется, а не сужается, как в обычном режиме работы транзистора (последний эффект и назван эффектом Кирка и снижает быстродействие транзисторов в области больших токов [5]). Эффект Кирка в обычном режиме имеет место у всех плоскостных транзисторов и ведет к заметному спаду гранич-

ной частоты транзистора  $f_T$  с ростом тока коллектора. Он наблюдается и у специальных лавинных транзисторов при работе в обычном режиме. Однако при  $M > M_{кр}$  в базовой ООЗ преобладает заряд вторичных, а не первичных носителей, поэтому с ростом  $I_k$  область базы сужается вплоть до ее смыкания с эмиттерным переходом (рис. 10). При этом время переноса определяется отношением размеров ООЗ к предельной скорости неосновных носителей и составляет доли наносекунды. Соответствующие расчеты приведены в [3, 4, 9, 10].

Использующие этот новый эффект транзисторы были названы нами лавинными транзисторами с ограниченной областью объемного заряда — ЛТОООЗ. К таким транзисторам относятся серийные советские германиевые  $p^+ - n - p^+$  специальные лавинные транзисторы серии ГТ338, зарубежные массовые кремниевые лавинные транзисторы наших дней фирмы Zetex и большинство кремниевых  $n^+ - p - n^+$  обычных транзисторов, используемых в лавинном режиме [3, 4].

### Моделирование релаксационных генераторов на лавинных транзисторах

Положенные в основу ЛТОООЗ физические явления не учитываются в классических моделях биполярных транзисторов, например Эберса-Молла, Гуммеля-Пуна и др., в том числе в моделях для схемотехнических САПР класса PSpice. Однако полная модель биполярного транзистора с учетом этих эффектов была описана еще в [3], и результаты расчета по ней ряда схем на лавинных транзисторах были выполнены на ЭВМ и приведены в [3, 4].

Не повторяя описания этой довольно сложной модели, рассмотрим результаты моделирования по полной модели транзистора 2Т603, одного из первых ЛТОООЗ. Представленные на рис. 11а зависимости напряжения на коллекторе и тока коллектора даны для разных значений начального напряжения на коллекторе, которое изменялось при разных значениях напряжения питания. Диаграммы были получены на экране графического дисплея ЭВМ. Отчетливо видно проявление всех стадий переходных процессов, описанных выше для ЛТОООЗ. Реальные осциллограммы представлены на рис. 11б.

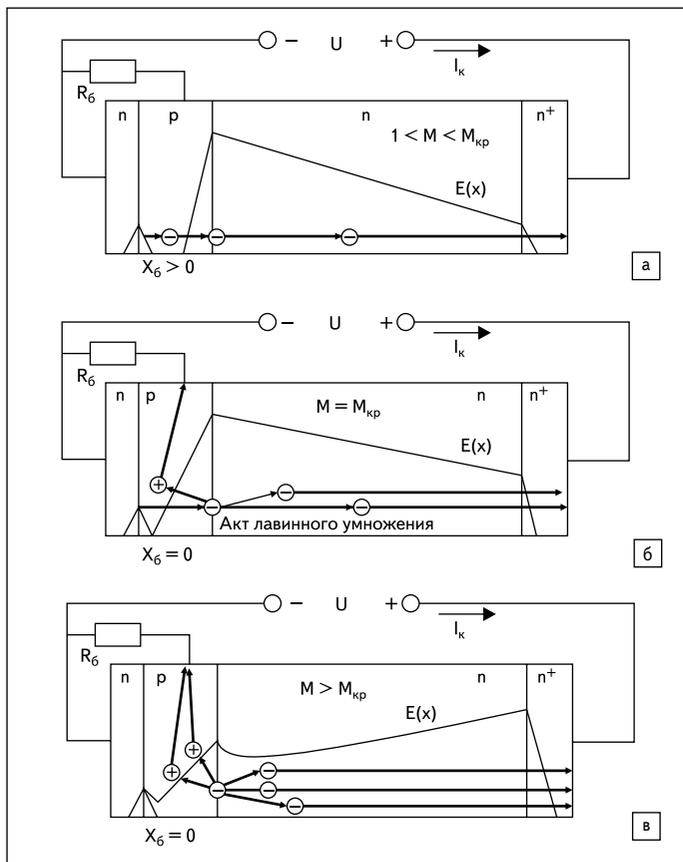


Рис. 10. Физика работы ЛТОООЗ структуры  $n^+ - p - n^+$

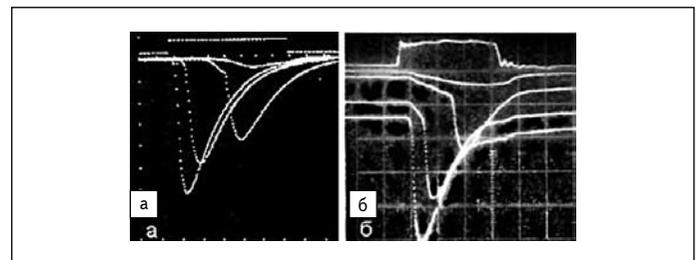


Рис. 11. а) Расчетные переходные процессы в релаксаторе на лавинном транзисторе при разных начальных напряжениях на коллекторе; б) реальные осциллограммы переходных процессов

Поразительная близость довольно сложных расчетных временных диаграмм и реальных осциллограмм свидетельствует о высокой точности как качественного, так и количественного моделирования сложных процессов работы релаксатора на ЛТОООЗ и правомерности описанных выше представлений о физике их работы.

Релаксатор (рис. 4) на ЛТОООЗ является основой множества схем для запуска лазерных диодов и светоизлучающих решеток, требующих импульсных токов в десятки ампер и выше. Поэтому результаты исследования переходных процессов в нем носят фундаментальный характер.

### Серийные лавинные транзисторы и их применение

В различных странах в разные годы были разработаны и выпускались серийно специальные лавинные транзисторы, например ГТ338, NS1110, 2N3035 и др. Многие были вариантами обычных транзисторов, хорошо работающих в лавинном режиме. В настоящее время ряд

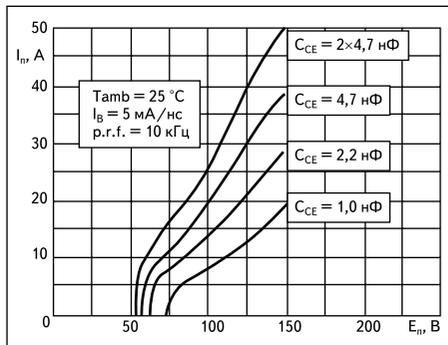
**Таблица.** Основные параметры кремниевых ЛТОООЗ фирмы Zetex

Транзистор	$U_M$ , В	$U_{\beta}$ , В	$I_{pmax}$ , А	$P_{ср}$ , Вт	Корпус
FMMT413	150	50	50	0,33	SOT-23
FMMT415	260	100	50	0,33	SOT-23
ZTX415	260	100	60	0,68	E-line
FMMT417	320	100	60	0,33	SOT-23

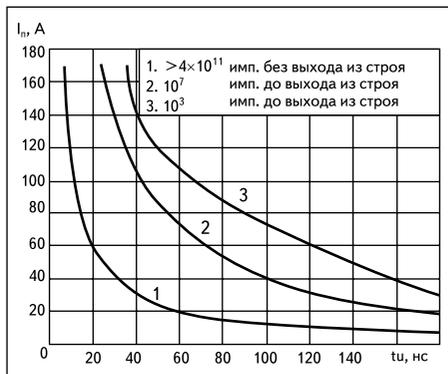
фирм (Zetex, KEYIN, Diotek и др.) выпускает серию высоковольтных кремниевых эпитаксиальных ЛТОООЗ (таблица).

Все транзисторы (кроме ZTX-415) выполнены в сверхминиатюрном корпусе SOT23 для плотного поверхностного монтажа на печатные платы. Длина «массивных» выводов у них минимизирована, что резко уменьшает их паразитную индуктивность и снижает вероятность возникновения колебаний при разряде  $C$ . Несмотря на уникально большие импульсные токи в лавинном режиме (до 60–100 А), средняя рассеиваемая мощность приборов составляет всего 0,33 или 0,68 Вт, то есть приборы относятся к классу маломощных транзисторов.

На рис. 12 показана зависимость амплитуды разрядного тока от напряжения питания релаксатора при разных значениях емкости конденсатора в цепи «коллектор – эмиттер». Нетрудно заметить, что приборы рассчитаны на работу с довольно большой емкостью накопительного конденсатора — примерно до 10 нФ.



**Рис. 12.** Зависимость амплитуды разрядного тока от напряжения питания релаксатора



**Рис. 13.** Зависимость амплитуды разрядного тока от длительности импульса при разном максимальном числе импульсов

При большой длительности импульсов амплитуду их приходится ограничивать. При больших амплитудах неизбежна деградация приборов. Поэтому предельная длительность разрядных импульсов нормируется (рис. 13). Есть много применений лавинных транзисторов, например, в устройствах подрыва снарядов и ракет, когда время работы приборов ограничено. При этом желательно в это время иметь высокие параметры приборов, например большую амплитуду импульсов.

Любопытно, что фирма Zetex в PDF-файлах детально описывает характеристики этих транзисторов и в обычном режиме работы. Ничего выдающегося в этом режиме приборы не показывают и ведут себя как обычные биполярные транзисторы. К примеру, спад  $V$  начинается с тока 0,1 А, и  $V$  падает до 10 уже при токе 1 А. И это в то время как амплитуда тока в лавинном режиме достигает 50–60 А, а иногда и выше.

#### Интегральное исполнение схем на лавинных транзисторах

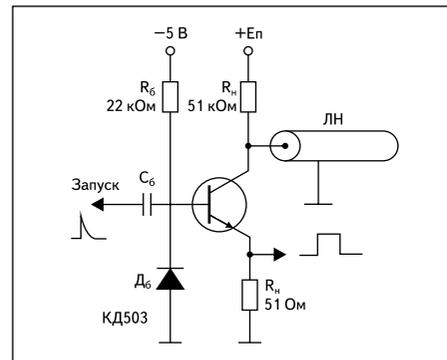
Длину разрядной цепи генераторов импульсов на лавинных транзисторах можно минимизировать только при интегральном конструктивном исполнении. Однако большинство интегральных микросхем имеют напряжение питания намного меньше, чем у схем на лавинных транзисторах (сотни В и выше). Это препятствует созданию монолитных интегральных схем. Но гибридные схемы на лавинных транзисторах настолько просты, что их интегральное исполнение вполне возможно даже в корпусе для монолитных микросхем. Естественно, изоляторы корпуса должны выдерживать напряжение питания схем.

Безусловно, интегральному исполнению схем на лавинных транзисторах принадлежит будущее этого класса схем. Но пока этому препятствует лишь невысокая массовость подобных схем. При интегральном исполнении длина разрядной цепи релаксаторов минимизируется, и «звон» после импульса практически устраняется.

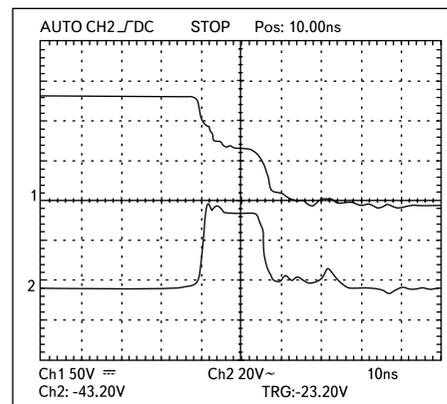
#### Релаксаторы на ЛТОООЗ с накопительной линией

Для получения с помощью релаксатора на лавинном транзисторе почти прямоугольных и стабильных по длительности импульсов можно использовать хорошо известный в импульсной технике прием — разряд через коммутирующее устройство накопительной линии (рис. 14, 15).

Нельзя не отметить очень неплохую форму импульсов на нагрузке у этого генератора, выполненного на массовом и дешевом транзисторе в пластмассовом корпусе. Амплитуда импульса на нагрузке 50 Ом достигает 40 В при времени нарастания импульсов около 1 нс и длительности около 15 нс. Включив параллельно транзистору корректирующий конденсатор в несколько пикофард, можно немного улучшить форму импуль-



**Рис. 14.** Схема релаксатора с разрядом накопительной коаксиальной линии через лавинный транзистор



**Рис. 15.** Оциллограммы импульсов на коллекторе лавинного транзистора КТ3102 и на его эмиттере (нагрузке) для схемы, изображенной на рис. 14

сов и уменьшить почти в два раза время их нарастания. Высоковольтные транзисторы КТ630 и КТ645 с  $U_M > 300$  В позволяют получить от такой схемы импульсы с амплитудой до 100–150 В.

Недостатком такого простого генератора является необходимость точного согласования волнового сопротивления линии с сопротивлением разрядной цепи во избежание отражений от начала линии, искажающих форму импульсов. В [3, 4, 11] можно найти описание свободных от этого недостатка схемных решений и множества других подобных схем на лавинных транзисторах. В том числе релаксаторов с совместным применением лавинных транзисторов с мощными биполярными и полевыми транзисторами, используемыми в обычном режиме работы [8, 12, 13].

#### Генераторы с последовательным включением лавинных транзисторов

Лавинные транзисторы в релаксаторах можно включать последовательно (пример на рис. 16) или даже по комбинированным схемам. Это позволяет увеличить амплитуду импульсов.

Включение последовательно более двух транзисторов тоже не вызывает особых трудностей (рис. 17). Импульс запуска подается на базу нижнего транзистора. Он включа-

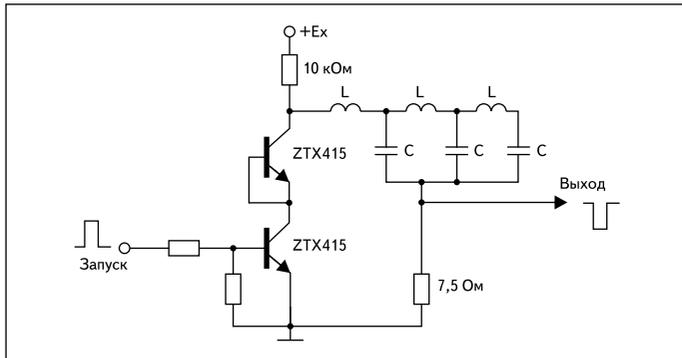


Рис. 16. Релаксатор на двух последовательно соединенных лавинных транзисторах с разрядной линией и сосредоточенными постоянными

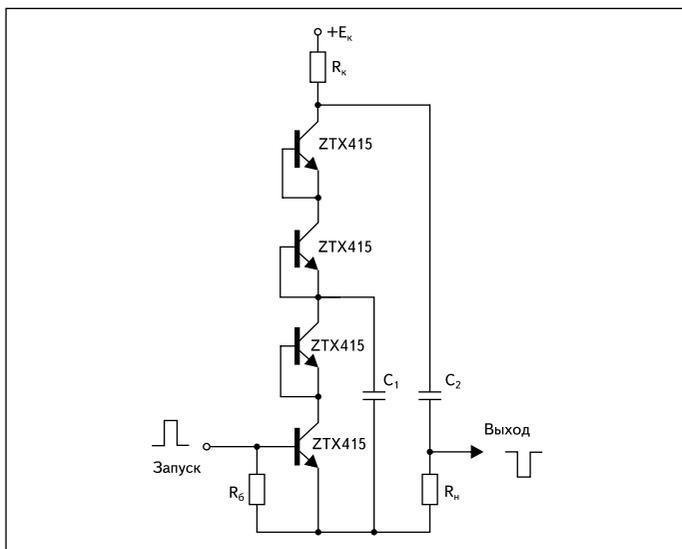


Рис. 17. Релаксатор на четырех последовательно включенных ЛТОООЗ фирмы Zetex

ется, и понижение напряжения на нем вызывает включение других транзисторов. В схеме на рис. 17 включение облегчается применением конденсатора  $C_1$ , обеспечивающего быстрое включение двух нижних транзисторов. Следом включаются верхние транзисторы, и обеспечивается быстрый разряд основного конденсатора  $C_2$ .

#### Генераторы на лавинных транзисторах, построенные по схеме Аркадьева-Маркса

Издавна существуют схемы генераторов высоковольтных импульсов, в которых заряд нескольких накопительных конденсаторов осуществляется параллельно от одного источника питания, а при разряде конденсаторы и разрядные устройства соединяются последовательно. Такие схемы были известны еще на вакуумных и газоразрядных приборах и получили название схем Аркадьева-Маркса. Они позволяют получать импульсы с амплитудой, большей напряжения питания.

Простейшая схема генератора по этой схеме на специальных лавинных транзисторах NS1110 приведена на рис. 18. Такая схема формирует импульсы с амплитудой 55 В на нагрузке  $R_H = 50$  Ом при времени нарастания около 1 нс.

Генераторы с накопительной линией не лишены серьезных недостатков. К ним прежде всего относятся большие габариты линий, трудность плавной перестройки длительности импульсов и вдвое меньшая (по сравнению со схемой емкостного релаксатора) амплитуда импульсов. Кроме того, они обычно требуют согласования линии с нагрузкой. На рис. 19 показана схема Аркадьева-Маркса с последовательным включением лавинных транзисторов в каждой секции. В таких схемах амплитуда импульсов может достигать многих сотен вольт и выше.

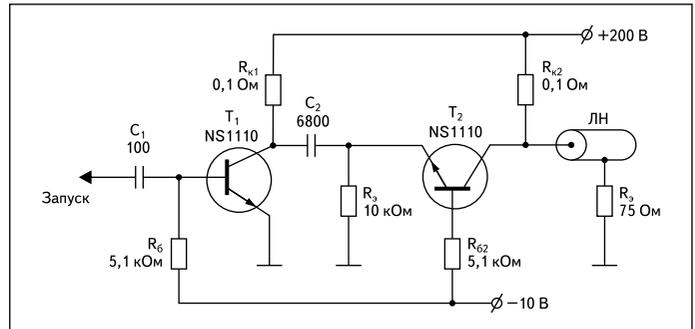


Рис. 18. Генератор по схеме Аркадьева-Маркса с накопительной линией с сосредоточенными постоянными на кремниевых лавинных транзисторах NS1110

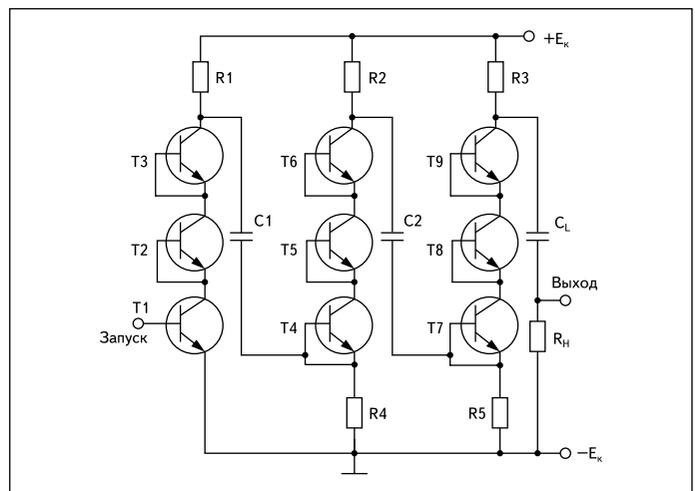


Рис. 19. Генератор по схеме Аркадьева-Маркса с последовательным включением лавинных транзисторов в каждой секции

#### Генераторы с параллельным включением лавинных транзисторов

На низкоомной нагрузке ( $R_H = 0,5$  Ом) простейшего релаксационного генератора можно формировать импульсы тока с амплитудой до 10–40 А, если использовать в нем ЛТОООЗ с  $U_M > 150$  В. Можно значительно увеличить амплитуду импульсов тока, включая параллельно несколько релаксационных генераторов. В подобных схемах, из-за малости  $R_H$ , на форму импульсов существенно влияют колебательные процессы, вызванные индуктивностью разрядной цепи. Это приводит к появлению заметного выброса на заднем срезе выходного импульса.

Подобная схема на трех ЛТОООЗ фирмы Zetex (рис. 20) способна обеспечить в нагрузке 0,5 Ом пиковый ток до 120–150 А. При этом время нарастания импульсов составляет 4–5 нс.

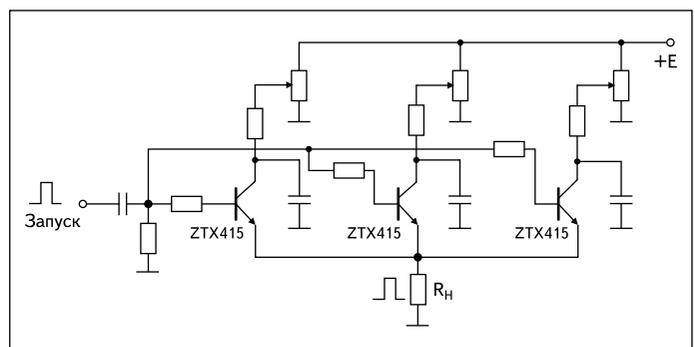


Рис. 20. Генератор сильноточных импульсов с параллельным включением ЛТОООЗ фирмы Zetex

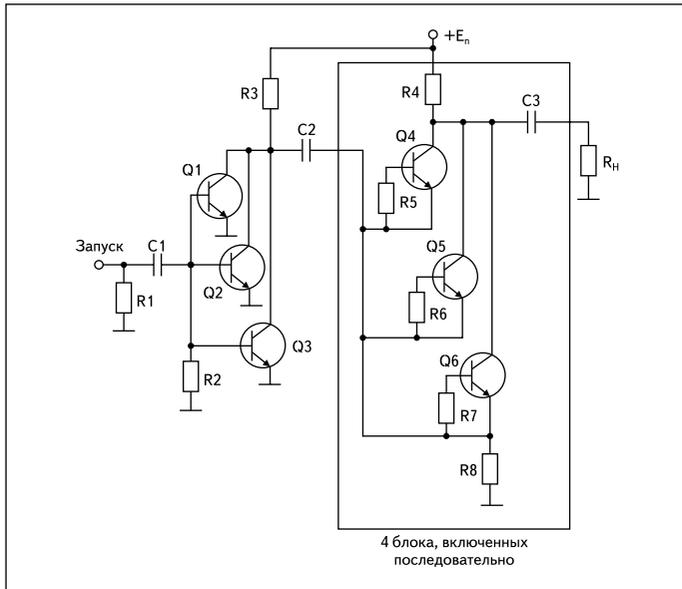


Рис. 21. Релаксатор с комбинированным включением лавинных транзисторов

Генераторы с параллельно включенными лавинными транзисторами могут работать только в ждущем режиме работы при одновременном запуске всех лавинных транзисторов. На рис. 21 показана схема Аркадьева-Маркса с параллельным включением лавинных транзисторов в каждой секции. От таких схем возможно получение импульсов с амплитудой до 10–20 кВ на нагрузке 50 Ом. Подобные схемы применяются для запуска мощных лазерных диодов и светоизлучающих решеток на основе лазерных диодов.

### Сверхскоростная развертка на лавинных транзисторах

Одной из проблем в создании аналоговых сверхскоростных осциллографов является заметное снижение чувствительности пластин горизонтального отклонения трубки. При этом требуемые напряжения генераторов развертки возрастают до 150–300 В, а иногда и намного выше.

На рис. 22 показана типичная схема парафазной скоростной развертки на двух лавинных транзисторах. Применение парафазного напряжения позволяет обеспечить постоянство среднего потенциала пластин горизонтального отклонения. Это нужно для обеспечения четкой фокусировки по всему экрану трубки. Запуск лавинных транзисторов, формирующих напряжение развертки, осуществляется от эмиттерного повторителя.

Формируемое на пластинах трубки напряжение близко к экспоненциальному, хотя многие лавинные транзисторы обеспечивают быстрый спад напряжения «коллектор – эмиттер», близкий к линейному. Однако для построения развертки необходимо изменить

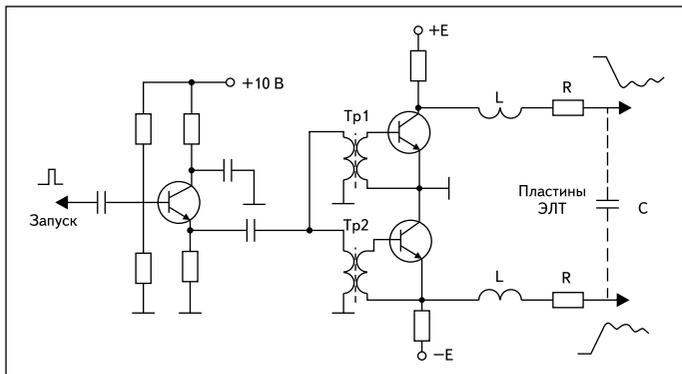


Рис. 22. Генератор сверхскоростной развертки

хотя бы фиксированно крутизну почти линейного напряжения развертки. В генераторе (рис. 22) с этой целью применены простейшие  $R_L$ -корректирующие цепочки. Их переключение позволяет создать развертку с длительностью 0,5; 1 и 2 нс/дел. В генераторе могут использоваться транзисторы NS1110, КТ312, КТ603, лавинные транзисторы фирмы Zetex и др.

Напряжение на емкости пластин  $C_{пл}$  меняется в соответствии с выражением:

$$u(t) = U_0 e^{-\delta x} \left[ \cos(x\sqrt{1+\delta^2}) + \frac{\delta}{\sqrt{1-\delta^2}} \sin(x\sqrt{1+\delta^2}) \right], \quad (5)$$

где  $\delta = R/2\omega_0 L$ ,  $x = \omega_0 t$  и  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC_{пл}}$ .

Из выражения (5) имеем:

$$\left( \frac{u(t)}{U_0} \right) = -\frac{1}{\sqrt{1-\delta^2}} e^{-\delta x} \sin(x\sqrt{1-\delta^2}). \quad (6)$$

Из выражения (5) следует, что при  $\delta = 0,3$  коэффициент нелинейности напряжения  $u(t)$  не превышает 10% при коэффициенте использования напряжения питания в каждом плече, равном 0,7. Для скоростной развертки такие параметры вполне приемлемы.

### Лавинные транзисторы в ультразвуковых эхо-импульсных толщиномерах

Эхо-импульсные ультразвуковые толщиномеры и локаторы (сонары) — еще одна область применения лавинных транзисторов. Работа этих устройств основана на возбуждении ультразвукового излучателя, выполненного чаще всего на специальной пьезокерамике. Одни из лучших — аperiodические излучатели ультразвука, способные выполнять и функции приемника ультразвуковых импульсов. Они должны быть нагружены усилителем с малым (близким к 0) входным сопротивлением. Но при этом для получения достаточной чувствительности нужно возбуждать преобразователь в режиме передачи наносекундными импульсами большой (выше 100 В) амплитуды. Это делает целесообразным применение лавинных транзисторов.

На рис. 23 представлена схема выносной головки эхо-импульсного серийного ультразвукового толщиномера УТ-30ПЦ. Часть возбуждителя ультразвука содержит релаксатор на трех последовательно включенных самых массовых транзисторах Т4–Т6 типа КТ315И, используемых как ЛТОООЗ.

При запуске разряд С обеспечивает формирование на излучателе ТПП импульса с длительностью около 50 нс в форме, близкой к одному периоду синусоиды (моноимпульса). Для получения отрицательной полуволны импульса используется отрезок короткозамкнутого коаксиального кабеля. На емкости преобразователя 90 пФ обеспечивается амплитуда импульсов не менее 90 В. Диоды Д5 и Д6 (КД513А) отсекают формирователь импульсов от преобразователя после формирования импульса.

Приемник ультразвуковых импульсов (верхняя часть рис. 23) содержит транзисторный усилитель тока с малым входным сопротивлением. Оно достигается первым каскадом по схеме с общей базой (транзистор Т1) и параллельной отрицательной обратной связью через резистор R2.

### Лавинные транзисторы в схемах возбуждения антенн

В последнее десятилетие бурно развивается техника сверхширокополосной связи (UWB), видеоимпульсной локации и геолокации (обнаружения объектов под землей и в закрытых помещениях). Работа этих новых средств основана на возбуждении специальных антенн очень короткими импульсами — нередко с длительностью менее 1 нс. Они применяются и при измерениях антенн во временной области, которые проще, чем измерения в частотной области.

Одними из первых для этого были использованы релаксаторы на лавинных транзисторах (рис. 24). Здесь на ключе (Т1) с трансформатором и диодным выпрямителем выполнен высоковольтный преобразователь

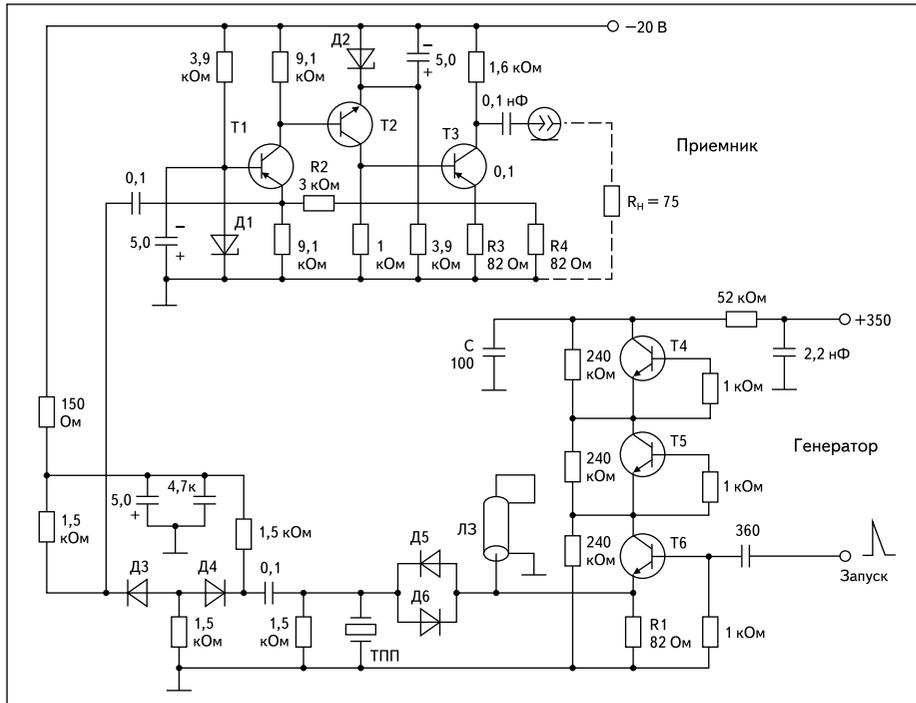


Рис. 23. Принципиальная схема приемопередающего устройства для совмещенного ультразвукового преобразователя эхо-импульсного толщиномера

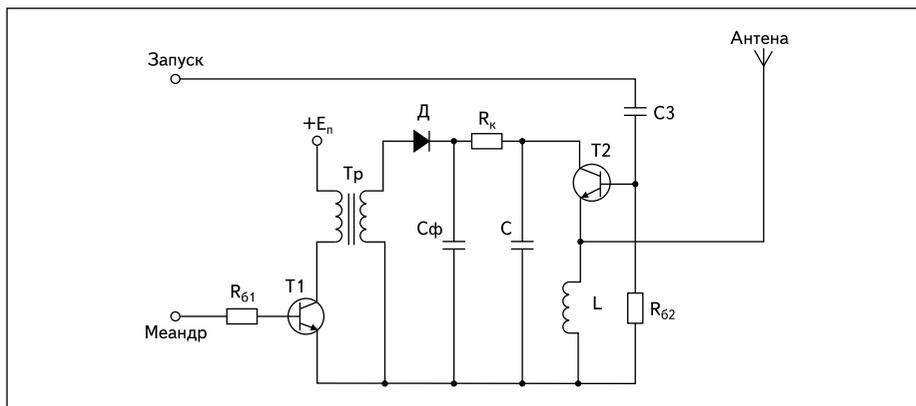


Рис. 24. Схема генератора на лавинном транзисторе для возбуждения антенны

напряжения питания  $E_n$ , в повышенное напряжение питания релаксатора на лавинном транзисторе T2. Индуктивность  $L$  дифференцирует и обостряет импульс разрядного тока релаксатора, что позволяет получить импульс с длительностью менее 1 нс, поданный на антенну.

Оптимальной формой в ряде устройств такого рода является моноимпульс — один

период синусоиды с частотой в 1 ГГц и выше. Близкий к такой форме импульс можно получить при уменьшении емкости накопительного конденсатора релаксатора до нескольких пикофарад и при наличии в разрядной цепи индуктивности в несколько наногенри (рис. 25). Тщательность разработки конструкции для таких устройств обязательна.

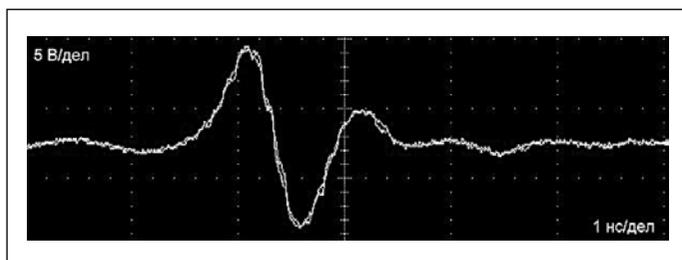


Рис. 25. Осциллограмма импульса, напоминающего моноимпульс

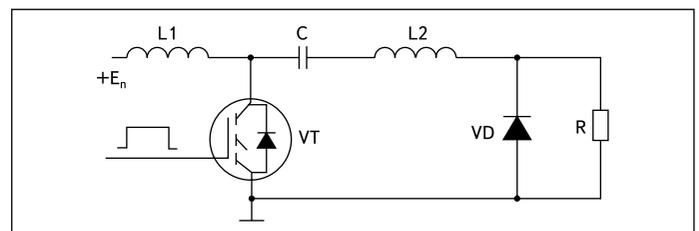


Рис. 26. Схема генератора коротких импульсов на приборах с режимом восстановления после пробоя и индуктивными накопителями энергии

### Генераторы на новом поколении лавинных приборов

В настоящее время в подобных генераторах с амплитудой до десятка вольт и выше применяются новые приборы — лавинные S-диоды с задержкой лавинного пробоя, SOS-диоды, дрейфовые диоды и лавинные транзисторы с режимом восстановления. Некоторые из них позволяют получать субнаносекундные импульсы с амплитудой в десятки и сотни вольт, а при последовательном включении даже и сотни киловольт.

Среди наиболее известных приборов этого нового класса — S-диоды с задержкой лавинного пробоя при подаче на них быстрого перепада обратного напряжения. Лавинный пробой при этом не успевает развиваться, и напряжение на диоде может значительно (до двух раз) превысить напряжение лавинного пробоя  $U_M$ . Спустя время задержки (порядка единиц наносекунд) развивается ускоренный и сильно развитый механизм лавинного пробоя.

У дрейфовых диодов и лавинных транзисторов с режимом восстановления через них вначале пропускается короткий импульс прямого тока, а затем подается быстрый перепад обратного напряжения. Перед пробоем в приборах остается небольшой заряд (плазма), сосредоточенный в небольшой по размеру области, что обеспечивает очень малое (даже в сравнении с ЛТОООЗ) время обрыва тока.

На рис. 26 показана типовая схема, реализующая этот принцип. Ключевой транзистор VT, например полевой, лавинный или JGBT (биполярный с полевым управлением), включается на некоторое время и затем выключается.

В контуре «C-L<sub>2</sub> — дрейфовый диод с быстрым восстановлением (DSRD) VD» развивается колебательный процесс (рис. 27). Во время первой полуволны его VD включен, и в нем накапливается заряд. Во время отрицательной полуволны он рассеивается, и в какой-то момент диод резко выключается. Быстрый обрыв тока формирует на диоде (и нагрузке R) импульс с большой амплитудой и очень малым (часто доли наносекунды) временем нарастания. Его дифференцирование позволяет получить импульс, подобный моноимпульсу (одному периоду синусоиды).

На рис. 28 показана еще одна схема формирования субнаносекундных импульсов (разработана в Чешском техническом университете). Для ее запуска могут использо-

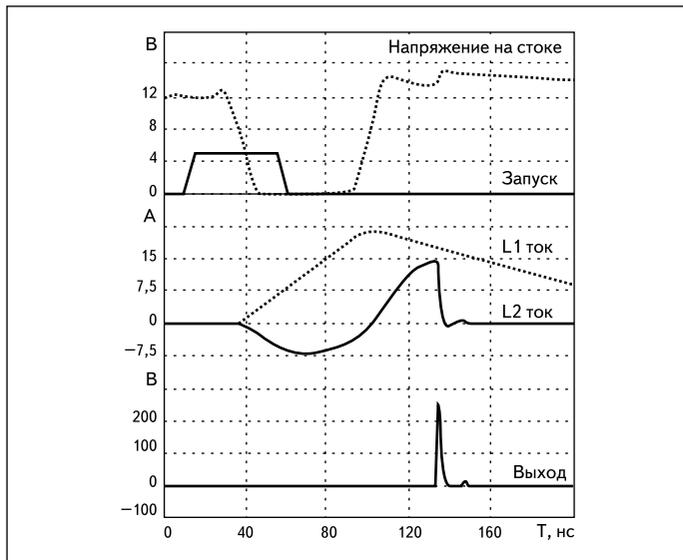


Рис. 27. Временные диаграммы работы генератора, изображенного на рис. 26

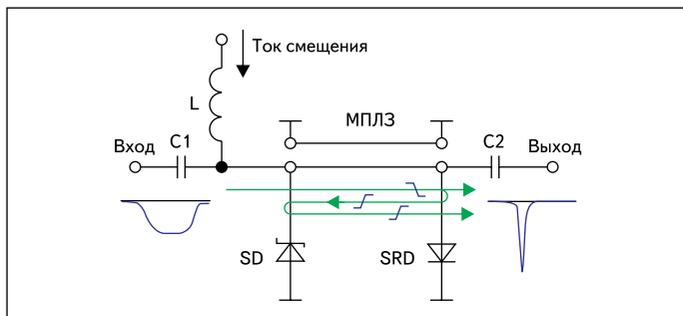


Рис. 28. Формирователь субнаносекундных импульсов на основе линии задержки, диода Шоттки SD и дрейфового диода с режимом восстановления SRD

ваться релаксатор на лавинном транзисторе и даже ключ на СВЧ биполярных транзисторах.

Дифференцируя короткий импульс с выхода этого формирователя с помощью отрезков линий передачи, можно получить моноимпульс (рис. 29).

### Лавинные транзисторы завтра

Среди обычных дешевых (порой стоимостью в десяток-другой центов) кремниевых эпитаксиальных транзисторов можно найти приборы, ничуть не уступающие по параметрам лавинного режима дорогим (свыше \$10) серийным специальным лавинным транзисторам. Они уже стали основой для производства серийных лавинных транзисторов с  $U_M$  от 10–15 до 300–500 В. Это откроет возможности применения лавинных транзисторов в серьезной аппаратуре. Примеров этому уже немало: в генераторах наносекундных импульсов (в виде настольных приборов фирм Picosecond Pulse Lab, США [14] и AVTECH, Тайвань [15]), в модулях HVS фирмы ALPHALAS, Германия [16], с запуском от лавинных транзисторов крайтронов, в модулях фирмы DEI с запуском от лавинных транзисторов мощных МДП-транзисторов и др.

Если ЛТОООЗ достойно представлены сегодня, то завтра следует ожидать разработок массовых серийных лавинных фототранзисторов, лавинных диодов с задержкой лавинного пробоя и быстрым восстановлением, лавинных S-диодов, SOS-диодов с быстрым прерыванием тока, дрейфовых диодов и транзисторов с режимом восстановлением и других приборов такого класса, уже обеспечивающих получение наносекундных и пикосекундных импульсов с большой (сотни вольт) и даже с фантастически большой (сотни киловольт) амплитудой. Это

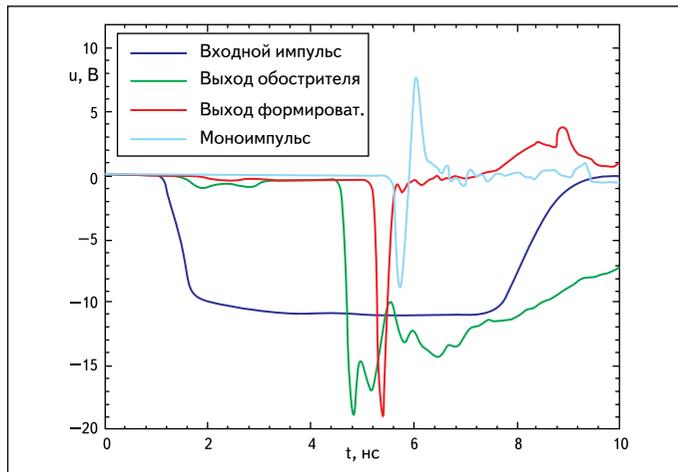


Рис. 29. Формы сигналов в разных точках формирователя, изображенного на рис. 27

открывает новые возможности в сфере промышленных и нанотехнологий, видеоимпульсной локации, в разработке георадаров и в других новых областях гражданской и военной науки и техники.

Несомненно, что схемы на лавинных транзисторах перспективны для создания специализированных высоковольтных и сильноточных импульсных устройств в интегральном исполнении. Конструктивно и технологически такие транзисторы вполне совместимы с интегральными схемами на обычных транзисторах. Пока такие устройства применяются редко и обычно являются уникальными разработками. Но то, что сегодня кажется уникальным и редким, завтра станет массовым и повсеместно используемым изделием.

### Литература

- Кузнецов Ю. А., Каменецкий Ю. А., Смутьский А. С. Германиевый лавинный транзистор ГТ338 // Электронная промышленность. 1971. № 4.
- Дьяконов В. П., Босый В. И., Кузнецов Ю. А. и др. Лавинный транзистор и его использование в схемотехнике / В кн. «Полупроводниковые приборы в технике электросвязи». Под ред. И. Ф. Николаевского. М.: Связь, 1972.
- Дьяконов В. П. Лавинные транзисторы и их применение в импульсных устройствах. М.: Советское радио, 1973.
- Дьяконов В. П. Лавинные транзисторы и тиристоры. Теория и применение. М.: СОЛОН-Пресс, 2008.
- Kirk C. T. A theory of transistor cut-off frequency ( $f_T$ ) fall-off of high current densities // IRE Trans, v. ED9, 1962.
- Еремин С. А., Мокеев О. К., Носов Ю. Р. Полупроводниковые диоды с накоплением заряда. М.: Советское радио, 1966.
- Бачурин В. В., Ваксенбург В. Я., Дьяконов В. П., Максимчук А. А., Ремнев А. М., Смердов В. Ю. Схемотехника устройств на мощных полевых транзисторах. М.: Радио и связь, 1994.
- Дьяконов В. П., Максимчук А. А., Ремнев А. М., Смердов В. Ю. Энциклопедия устройств на полевых транзисторах. М.: СОЛОН-П, 2002.
- Дьяконов В. П. Предельные возможности лавинных транзисторов в импульсных цепях // Радиотехника. 1976. № 7.
- Дьяконов В. П., Самойлова Т. А. Математическая модель биполярного транзистора для обычного и лавинного режимов работы // Радиотехника. 1979. № 10.
- Дьяконов В. П. Генераторы с разрядной линией на лавинных транзисторах // ПТЭ. 1976. № 4.
- Дьяконов В. П. Генераторы наносекундных импульсов на лавинных и МДП-транзисторах // ПТЭ. 1981. № 1.
- Дьяконов В. П., Адамов П. Г., Иванов А. И. Формирователь импульсов тока амплитудой 10 А с субнаносекундными фронтами // ПТЭ. 1988. № 6.
- [www.picosecond.com](http://www.picosecond.com)
- [www.avtechpulse.com](http://www.avtechpulse.com)
- [www.alphalas.com](http://www.alphalas.com)