

Туннельный диод: оценка, отбор и практическое применение

С.А. Елкин, г. Житомир

Туннельным диодом (ТД) называют полупроводниковый диод на основе вырожденного полупроводника, в котором туннельный эффект (при приложении к ТД напряжения в прямом направлении) приводит к появлению на вольтамперных характеристиках (ВАХ) участка с отрицательной дифференциальной проводимостью (ОДП) - рис.1. Туннельный эффект заключается в том, что электрон при определенных условиях может, не затрачивая энергии, пройти сквозь потенциальный барьер, как по туннелю.

Напряжение $U(U_B - U_P)/2$ для ТД на основе германия лежит в пределах 60...100 мВ, для ТД из арсенида галлия - 280...360 мВ.

Ток через ТД при приложении небольших напряжений растет достаточно резко (рис.1). Это связано с тем, что при туннельном переходе электрон не расходует своей энергии, поэтому может совершать его при температуре, близкой к абсолютному нулю. Именно этим обстоятельством объясняется способность ТД работать в более широком диапазоне температур, чем обычные диоды. В интервале напряжений от U_P до U_B ВАХ ТД имеет спадающий участок, что указывает на наличие ОДП. Этот участок ВАХ является наиболее ценным при практическом использовании ТД. ОДП позволяет компенсировать потери, вносимые положительным сопротивлением, и в зависимости от поставленной задачи осуществить схему усилителя, генератора или преобразователя колебаний. В точке перегиба ВАХ, соответствующей напряжению U_B , ОДП минимальна. Величина ОДП колеблется от сотых долей ома до сотен ом.

Мощность, потребляемая ТД в том или ином режиме от источника питания, примерно в десять раз меньше, чем при использовании для той же цели транзистора. Однако полностью реализовать это преимущество не удастся, поскольку в реальных конструкциях для питания ТД чаще всего используют стандартные гальванические элементы напряжением 1,5 В, а остаток гасят резисторами.

Основным преимуществом ТД перед известными полупроводниковыми приборами является его высокая граничная частота, до которой он может быть использован в различных радиотехнических устройствах. Эта особенность ТД связана с механизмом прохождения электрона через узкий туннельный р-п-переход со скоростью, близкой к скорости света (за время $10^{-13}...10^{-14}$ с).

Частотный предел применимости ТД определяется такими конструктивными параметрами, как емкость р-п-перехода и сопротивление его потерь, сопротивлением материала выводных проводников, а также паразитной индуктивностью выводов.

ТД способны генерировать и преобразовывать электромагнитные колебания до нескольких сотен гигагерц, что соответствует миллиметровому диапазону волн. Их усилительные свойства сохраняются в интервале температур -200 до +400°С. К указанным достоинствам также можно добавить практическую нечувствительность ТД к радиации.

Основное отличие ТД от транзисторов заключается в том, что они являются двухполюсниками с ОДП. Именно поэтому генераторы на ТД не требуют положительной внешней обратной связи.

По схемотехнике генераторы на ТД могут выполняться по последовательной (рис.2), параллельной (рис.3) и последовательно-параллельной (рис.4) схемам.

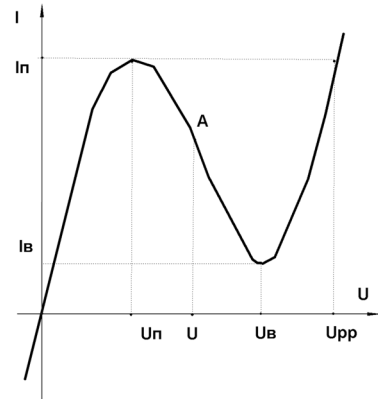


рис.1

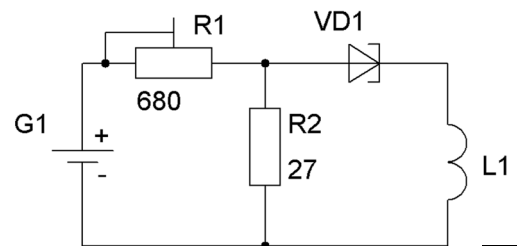


рис.2

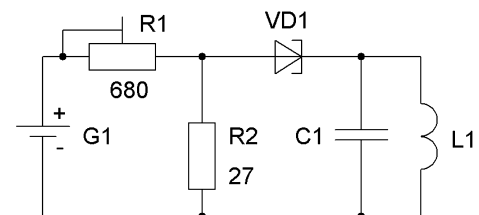


рис.3

Последовательная схема наиболее простая и имеет

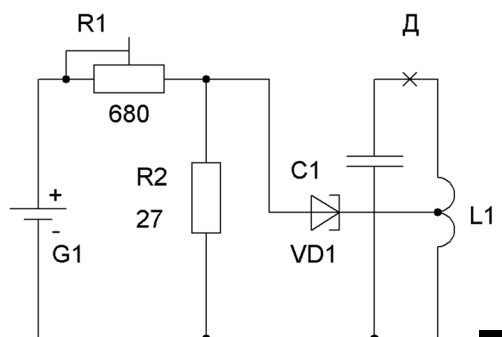


рис.4

наибольшую граничную частоту. Параллельная схема имеет наибольшую выходную мощность. Последовательно-параллельная схема имеет наилучшую стабильность и форму выходного напряжения.

Основное назначение ТД - работа в качестве усилителей, генераторов и переключающих устройств радиотехнической аппаратуры (РЭА) широкого применения.

Поскольку жизнь гармонична, то все описанные выше электрические преимущества ТД, вызванные малыми габаритами корпуса, с точки зрения нанесения маркировки являются его недостатками, так как места для нанесения маркировки очень мало. Практически только иногда в РЭА можно встретить ТД с одной нанесенной на большой диаметр

участке ОДС; третья группа предназначена для работы в переключающих схемах.

Остальные цифры несут информацию о номере разработки и разделении по некоторым параметрам внутри номера.

Точно тип ТД можно определить, только построив его ВАХ по точкам и сравнив полученные параметры со справочной литературой.

Проверка на исправность ТД авометром не допускается, так как ТД может выйти из строя. Например, для АИ101 пиковый ток I_p равен 1...5 мА, для АИ201 - 10...100 мА (в зависимости от буквенного индекса), для АИ301 - 5...10 мА (в зависимости от буквенного индекса).

Однако, как показывает практика (например, если точно известно, что в схеме синхронизации осциллографа установлен АИ301Г), некоторые группы ТД все же можно проверить с помощью авометра типа Ц435, Ц43109 (т.е. с напряжением внутреннего источника питания омметра 1,5 В). В порядке эксперимента 10 экземпляров ТД АИ301Г подверглись "прозвонке" авометром Ц43109, включенным в режим омметра. При измерении в прямом направлении омметр показывал около 10 Ом, в обратном направлении - около 500 Ом. После этого ТД, установленные в схему синхронизации осциллографа, нормально функционировали.

Однако для других групп ТД такой прием однозначно приведет к выходу их из строя. Поэтому, если неизвестна группа ТД, проверять его на работоспособность лучше всего пробником, например, генераторным (ГП), который обеспечивает безопасную проверку ТД в активном режиме.

Наблюдая на экране осциллографа форму колебаний на контуре ГП, по форме сигнала можно также предварительно определить и группу ТД. При этом можно заметить, что у усилительных и генераторных ТД форма генерируемого сигнала близка к синусоидальной, а переключающих - к прямоугольной. Участок с ОДП определяется по напряжению появления и срыва генерации при изменении напряжения питания ТД с помощью потенциометра, а рабочая точка "А" (рис.1) на участке с ОДП определяется как напряжение, соответствующее примерно середине этого промежутка.

Схема самого простого ГП со звуковой индикацией показана на рис.6. Генератор ГП выполнен по последовательной схеме. Электромагнитный телефон BF1 выполняет две функции: индуктивности контура и электромагнита для звукоизлучающего элемента (мембраны). Недостатки схемы: в связи с малой мощностью (единицы милливатт) генератора и низкой добротностью контура (большие потери мощности на активном сопротивлении и низким КПД BF1, как преобразователя электрических колебаний в звуковые) настройка режима генерации (слышимая) получается достаточно острой, что позволяет проверить общие генераторные свойства ТД, но затрудняет даже предварительное определение рабочей точки ТД на ВАХ.

В схеме, показанной на рис.7, вместо электромагнитного телефона использован звонок пьезокерамический (ЗП) от звуковой открытки. ЗП имеет значительно лучшие электроакустические параметры и КПД [1]. Высокое входное сопротивление НА1 на частоте его параллельного резонанса позволило подключить его к контуру Т1С1 непосредственно. Собственная емкость НА1 входит совместно с С1 и L1 в контур, настроенный на резонансную частоту НА1. Недостаток схемы: звуковую индикацию не всегда удобно использовать в местах с повышенным уровнем шума.

Для устранения этого недостатка в пробники обычно дополнительно вводят и световую индикацию. Однако в данном случае, поскольку напряжение питания всего 1,5 В, использовать для индикации светодиод как достаточно эффективный и экономичный элемент невозможно, так как для

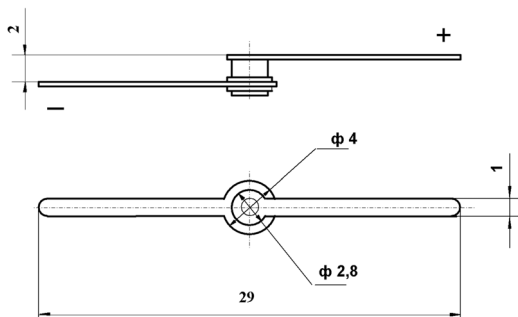


рис.5

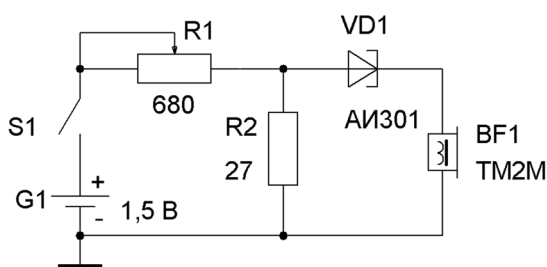


рис.6

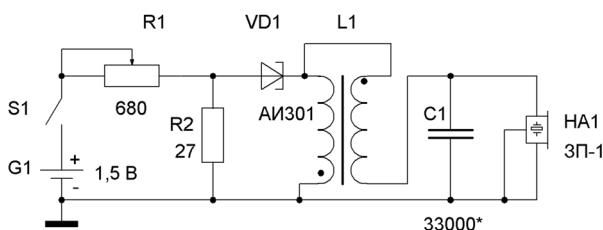


рис.7

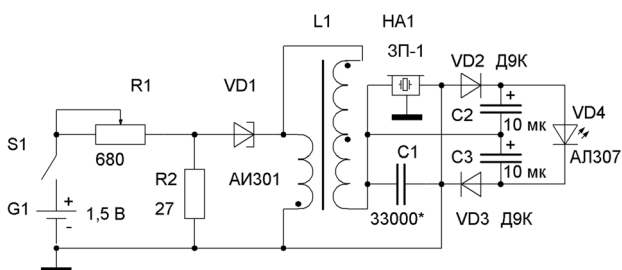


рис.8

корпуса буквой или точкой, которые не несут полной информации о ТД. Конструкция корпуса и полярность ТД типа АИ101, АИ201, АИ301 показаны на рис.5.

Первый знак (буква) в обозначении несет информацию о материале, из которого изготовлен ТД, второй знак (буква) обозначает тип диода, третий знак обозначает группу ТД: усилительные, генераторные, переключаемые. Первые две группы могут работать на первой восходящей ветви ВАХ и на

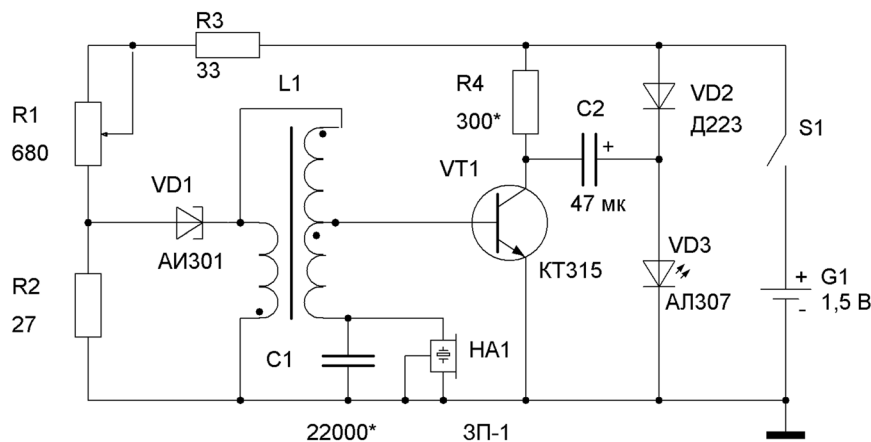


рис. 9

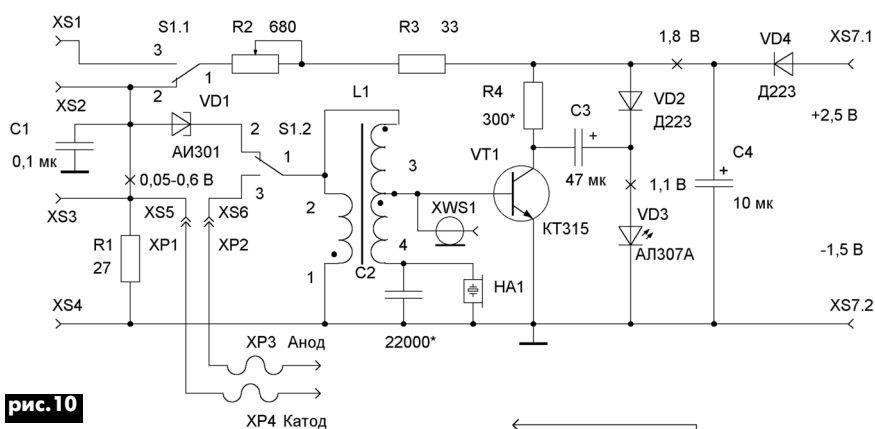


рис. 10

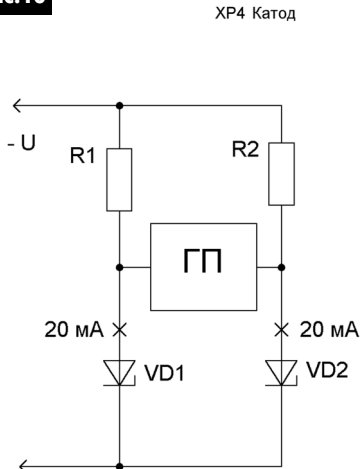


рис. 11

получения заметного визуального свечения необходимо напряжение 1,6...1,8 В.

Именно поэтому в схему, показанную на рис.8, введен двухполупериодный выпрямитель с удвоением выходного напряжения (удвоитель) VD1, VD2, C2, C3. Недостатком схемы является питание светодиода непосредственно от генератора, что нагружает ТД и несколько сужает диапазон установки рабочей точки (особенно в первый момент при включении, когда C2 и C3 разряжены).

Устранить этот недостаток в ГП можно, если использовать усилитель на VT1 (рис.9), тем самым, разгрузив ТД по мощности. Необходимое для работы светодиода напряжение получается в результате работы схемы удвоения напряжения, выполненной на C2, VD2, VD3.

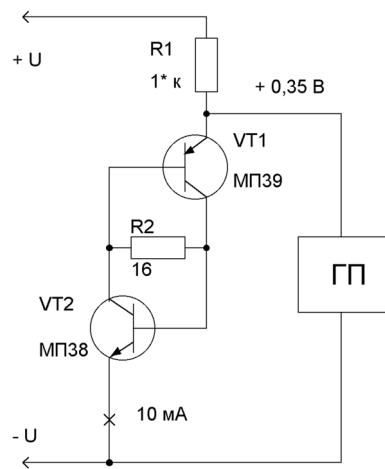


рис. 12

питания (ВИП). Схема ГП защищена от подключения ВИП в противоположной полярности с помощью VD4.

Поскольку ГП (рис. 10) в авторском варианте используется в стационарных условиях, для его питания применен ВИП Б5-7, что дало возможность увеличить напряжение питания усилителя и удвоителя до 1,8 В, а значит, и увеличить яркость свечения VD3 в режиме генерации. (Величина постоянного напряжения на VD3 измерена при отсутствии генерации.)

В схемах рис.6-10 проверка ТД на работоспособность, а также примерная установка его рабочей точки производится на звуковых частотах (ЗЧ), что в большинстве случаев вполне достаточно в радиолюбительской практике для проверки работоспособности ТД как элемента.

Светодиод VD3 выполняет две функции: выпрямителя и светоизлучателя.

В схему ГП, показанную на рис.10, введены режим самоконтроля и возможность получения исходных данных для построения ВАХ ТД. Перед проверкой ТД с помощью переключателя S1 ГП переводится в режим самоконтроля, т.е. проверяется работоспособность его внутренних элементов, принимающих участие в испытаниях. После проверки S1 переключают в режим испытаний. В этом случае в работе участвуют все проверенные элементы, кроме испытываемого ТД (активного элемента), который подсоединяется к ГП через соединители XS5XP1 и XS6XP2 и две соединительные линии из гибких проводников с игольчатыми щупами.

При получении исходных данных для построения ВАХ с помощью переключателя S1 напряжение от источника питания подают через внешний миллиамперметр, подключенный к клеммам XS1, XS2. Внешний вольтметр подключают к клеммам XS3, XS4. При выполнении этой работы нельзя превышать $I_{пр.макс}$ (максимальный прямой ток - (рис.1) через ТД на второй восходящей ветви ВАХ, при котором обеспечивается заданная надежность. Ориентировочно для разных типов ТД $I_{пр.макс}$ составляет 0,5...1 от I_n . Наиболее характерным параметром, с помощью которого можно оценить качество и материал, из которого изготовлен ТД, является отношение I_n/I_v . Для германиевых диодов оно равно 3-6, а для диодов из арсенида галлия 10.

Соединитель XWS1 служит для визуального контроля формы генерируемого сигнала с помощью осциллографа, а также для подключения частотомера при отборе одинаковых (по частоте генерации при одном и том же смещении) ТД для использования в двухтактных схемах.

XS7 предназначен для подключения внешнего источника

При неустойчивой работе высокочастотных генераторов [2], режим ТД в которых предварительно установлен на ЗЧ, поступают следующим образом. Вольтметр типа ВК7-9 подключается к "горячему" концу контура (например, к точке "Д" по схеме рис.4). Допустим, показания вольтметра равны 0,6 В. Рабочая точка ТД установлена правильно, если при прикосновении пальца к контуру (отбор колебательной мощности) величина напряжения на индикаторе ВК7-9 уменьшится до нуля, а при снятии пальца плавно возвратится к уровню 0,6 В. В противном случае потребуется некоторое изменение напряжения смещения в большую или меньшую сторону с последующей аналогичной проверкой.

При конструировании высокочастотных генераторов [2]

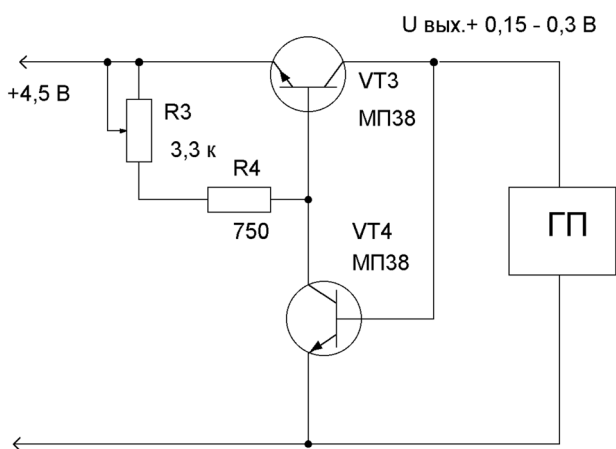


рис. 13

на ТД для получения стабильных параметров весьма существенным является качество источника питания. Поскольку в продаже редко встречаются стабилитроны на малые напряжения, а на напряжения 0,1...0,3 В они вообще отсутствуют, стабильные источники питания для ТД получают теми или иными схемотехническими способами. Самым простым решением является включение генератора на ТД между анодами двух стабилитронов (рис. 11). В этом случае используется относительная разность напряжений (разброс) стабилизации конкретных экземпляров стабилитронов (одинаковой марки с одинаковым буквенным индексом) в несколько десятых вольта. Можно использовать также и светодиоды разного цвета, включенные в прямом направлении. На рис. 12 показана схема двухполюсника, выполненного на германиевых транзисторах с напряжением стабилизации 0,35 В. При использовании кремниевых транзисторов напряжение стабилизации увеличивается до 1...1,2 В.

Схема низковольтного стабилизатора с регулируемым выходным напряжением, специально разработанная для питания ТД, показана на рис. 13. Возможно также применение для этих целей источников стабильного тока, поскольку в этом случае падение напряжения на постоянной нагрузке (27 Ом и ТД с фиксированным смещением) будет стабильным.

Схема термокомпенсированного источника тока на биполярном транзисторе показана на рис. 14.

Конструкция

Пробник (рис.10) собран в луженом металлическом корпусе размерами 110x64x34 мм от конденсатора МБМ емкостью 4 мкФх600 В. S1, XS1-XS7, XWS1 крепят к передней панели (крышка конденсатора, на которой были установлены выводы в стеклянных изоляторах) с помощью собственных конструктивных резьбовых соединений. Резистор R2 крепят к корпусу S1 через упругую прокладку с помощью хомута, стянутого винтом с гайкой М3. Светодиод VD3 приклеен изнутри передней панели молекулярным

клеем. После сборки и проверки ГП переднюю панель соединяют с корпусом с помощью пайки.

Печатная плата ГП крепится к хомуту с помощью того же стяжного винта. Потенциометр R2 типа СП5-1В5 многооборотный, проволочный, с удлиненной осью, что позволяет плавно устанавливать рабочую точку ТД.

Детали

По рис. 10. Транзистор, диоды - в соответствии со схемой, с любым буквенным индексом. Постоянные резисторы - МЛТ-0,25. Катушка индуктивности L1 намотана на кольцевом магнитопроводе К16х8х6 из феррита 1000 НМ. Обмотки 1-2-3 содержат 50+50+50 витков провода ПЭВ-2 диаметром 0,2 мм. Конденсаторы - К50-6 и КМ; гнездовой соединитель XWS1 - СР-50; гнездовые соединители XS1-XS6 - Г1, 6Ч; XS7 - МГК-1. Переключатель S1 - МТ-3.

Настройка, работа с пробником

Напряжения смещения VD3 (рис.10) контролируют по внешнему вольтметру (ВВ), подсоединенному к клеммам XS3, XS4, а ток - по внешнему миллиамперметру, подключенному к гнездам XS1, XS2.

Работают с пробником следующим образом. Проверяют

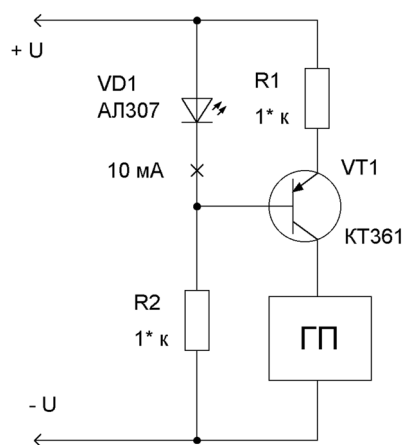


рис. 14

работоспособность ГП, установив S1 в положение "Контроль", и, изменяя смещение VD1 с помощью R2 от 0,05 до 0,65 В. Генерация должна наблюдаться в интервале напряжения смещения ТД 0,15...0,6 В. Частота генерации при этом изменяется примерно от 1500 до 3000 Гц. Максимум акустической отдачи (резонанс) НА1 проявляется на частоте порядка 2,5 кГц, что соответствует смещению для АИ301 около 0,37 В. Это величина напряжения смещения используется в качестве контрольного в положении "Проверка".

Переключают S1 в положение "Проверка". Напряжение на ВВ без присоединенного испытываемого ТД увеличится до 0,47 В. Щупы к испытываемому ТД подсоединяют аналогично работе с омметром - прямо и инверсно. При подключении испытываемого ТД к ГП в правильной полярности должна возникнуть генерация, а напряжение смещения на ВВ уменьшится до 0,3 В. При подключении ТД к ГП в инверсной полярности напряжение смещения уменьшается практически до нуля.

Если при проверке конкретного экземпляра ТД (при смещении, установленном по контрольному) генерация отсутствует, вращением R2 изменяют напряжение смещения от 50 мВ до напряжения, при котором появляется генерация.

Литература

1. Отечественные пьезокерамические звонки // Радиоаматор. - 2002. - №1. - С.31.
2. Шустов М. ВЧ генератор для ПЭВМ // Радиолучитель. - 1993. - №2. - С.4.