

УДК 621.382.2 (088.8)

## ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ТУННЕЛЬНЫХ ДИОДОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМАХ

Цвирко Ю.В., Ионкина А.С.

Научный руководитель – старший преподаватель Михальцевич Г.А.

**Туннельный диод** – полупроводниковый прибор, в котором используется туннельный механизм переноса носителей заряда через *p-n*-переход при прямом напряжении на нём и на прямой ветви характеристики которого имеется область отрицательного дифференциального сопротивления.

Явление туннельного эффекта в полупроводниках было открыто в 1958 году. Японским ученым Лео Есаки. Туннельный эффект состоит по сути в том, что электроны проходят через потенциальный барьер *p-n*-перехода, не изменяя своей энергии.

Для получения туннельного эффекта используется полупроводниковый материал (*Ge*, *GaAs*) с очень большой концентрацией примесей (до  $10^{21}$  примесных атомов в  $1\text{см}^3$ ), в то время как для обычных полупроводников  $10^{15}/\text{см}^3$ . Полупроводники с таким высоким содержанием примесей называются вырожденными. При этом ширина *p-n*-перехода оказывается очень малой (не более 0,01 мкм), что приводит к значительному повышению напряженности электрического поля на переходе (около  $10^8$  В/м). В этих условиях имеется конечная вероятность того, что электрон, который движется к очень узкому переходу, пройдет сквозь него (как через «туннель») и займет свободное состояние с такой же энергией по другую сторону от барьерного слоя. Туннельный эффект приводит к появлению на прямой ветви ВАХ диода участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением.

Основные параметры туннельных диодов:

- пиковый ток  $I_n$  – прямой ток в точке максимума ВАХ;
- ток впадины  $I_b$  – прямой ток в точке минимума ВАХ;
- отношение токов туннельного диода  $I_n/I_b$  ( $\approx 3 \dots 6$  для диодов из *Ge* и  $\geq 8$  – из *GaAs*);
- напряжение пика  $U_n$  – прямое напряжение, соответствующее пиковому току;
- напряжение впадины  $U_b$  – прямое напряжение, соответствующее току впадины;

Туннельные диоды используются для генерации и усиления электромагнитных колебаний, а также в быстродействующих переключающих и импульсных схемах.

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) туннельного диода и его обозначение на схеме показано на рис. 1.

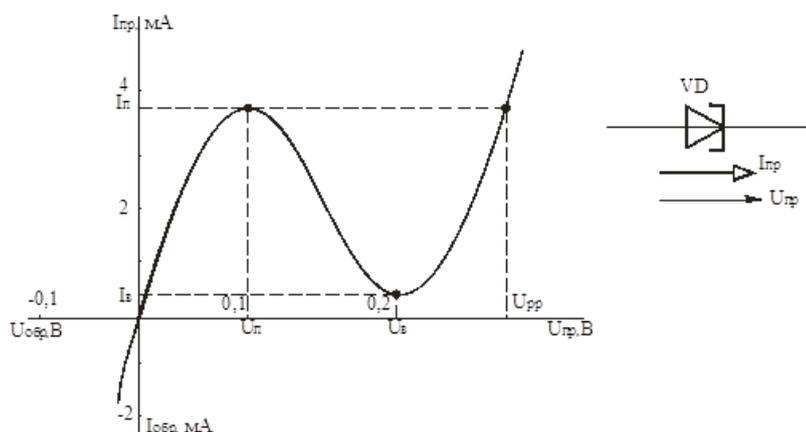


Рисунок 1. ВАХ туннельного диода

Самой уникальной особенностью туннельных диодов является их соотношение напряжение-ток, когда они имеют прямое смещение.

В обычных условиях туннельные диоды работают в области своего отрицательного сопротивления. В данной области незначительное уменьшение напряжения включает этот прибор, а небольшое повышение – выключает его. В качестве такого своеобразного выключателя туннельный диод может использоваться либо как генератор, либо как высокоскоростной выключатель: специфическая особенность прибора, низкое сопротивление, позволяет почти мгновенно изменять внутреннее сопротивление. Туннельные диоды могут также использоваться в качестве усилителей, где изменения в подаваемом напряжении в сторону повышения, вызывают пропорционально более значительные изменения тока в цепи.

Так как на ВАХ туннельного диода имеется участок с отрицательным сопротивлением устойчивым по напряжению, то при подключении к нему параллельного колебательного контура он может генерировать. Современные туннельные диоды могут генерировать на частотах до 1 ГГц и более. По этой причине туннельные диоды могут использоваться в СВЧ-технике.

Из-за небольшой величины участка ВАХ диода с отрицательным сопротивлением мощность, отдаваемая им на любых частотах, составляет доли милливатт.

Основным условием генерации является превышение величины сопротивления потерь контура над величиной отрицательного сопротивления туннельного диода. Учитывая, что параллельное сопротивление потерь в реальных колебательных контурах значительно превышает отрицательное сопротивление туннельного диода, часто используется частичное включение диода в контур. Для питания туннельных диодов следует применять источники с возможно более низким выходным напряжением.

На рис. 2 приведены температурные зависимости прямого тока от напряжения в туннельных диодах, изготовленных из германия и арсенида галлия. Видно, что у диода с более широкозонным материалом  $GaAs$ , чем  $Ge$ , минимум тока наблюдается при больших значениях прямого напряжения.

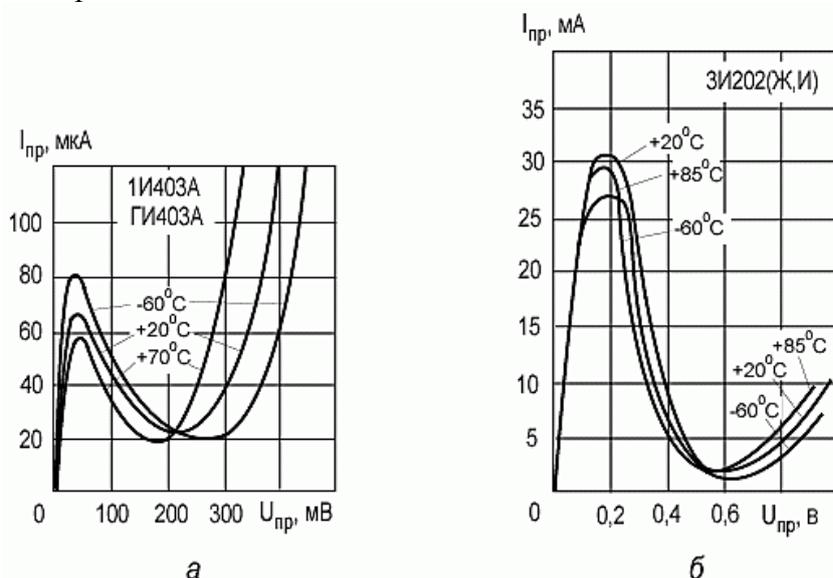


Рисунок 2. Температурные зависимости прямого тока от напряжения в туннельных диодах: а) германиевый диод 1И403; б) арсенидгаллиевый диод 3И202

Генераторные и усилительные устройства на основе туннельных диодах могут быть использованы в радиоприемниках, радиомикрофонах, измерительной аппаратуре и т.п.

Простой передатчик на туннельном диоде, изображенный на рисунке 2 обеспечивает надежный прием в ЧМ диапазоне в радиусе 10-30 м при использовании штыревой антенны и ЧМ приемника средней чувствительности. Сильно увеличивать выходную мощность такого передатчика нельзя, так как он является источником помех. Такой передатчик можно

использовать как переносный радиомикрофон, вызывное или переговорное устройство для малых расстояний (рис. 3).

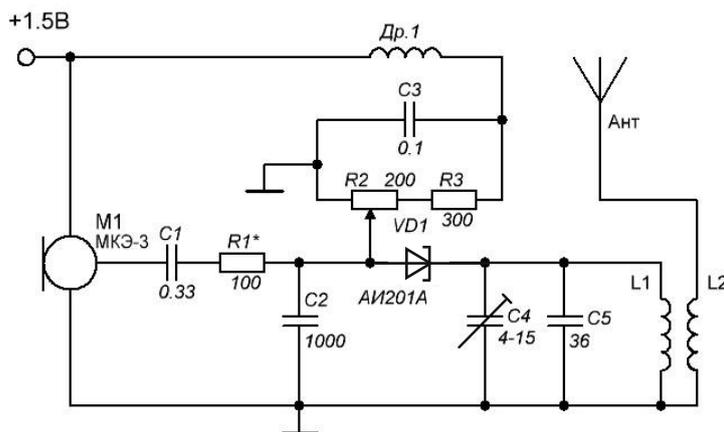


Рисунок 3. Простой передатчик на туннельном диоде

Основу этого устройства составляет схема высокочастотного генератора на туннельном диоде. Генератор сохраняет свою работоспособность при напряжении источника питания от 1 В и выше при соответствующем выборе рабочей точки резистором  $R_2$ . Индуктивность дросселя должна быть 100-200 мкГн. Дроссель может быть заводского изготовления. Катушка колебательного контура  $L_1$  выполнена без каркаса и содержит 7 витков провода ПЭВ 1,0 мм. Диаметр катушки 8 мм, длина намотки 13 мм. Катушка связи  $L_2$  так же, как и  $L_1$  — бескаркасная, намотана проводом ПЭВ 0,35 мм, 3 витка, диаметр катушки 2,5 мм, длина намотки — 4 мм. Катушка  $L_2$  располагается внутри катушки колебательного контура  $L_1$ . Настройка передатчика сводится к установке рабочей точки туннельного диода путем вращения движка подстроечного резистора  $R_2$  до появления устойчивой генерации и подстройке частоты колебаний конденсатором  $C_4$ . Антенной является отрезок монтажного провода длиной примерно в четверть длины волны. Глубину модуляции можно изменять подбором сопротивления резистора  $R_1$ . Сигнал этого передатчика можно принимать на радио приемник в диапазоне частот 88-108 МГц.

В аппаратуре туннельные диоды часто применяются совместно с транзисторами. Схема передатчика с усилителем сигнала от микрофона на биполярном транзисторе изображена на рис. 4.

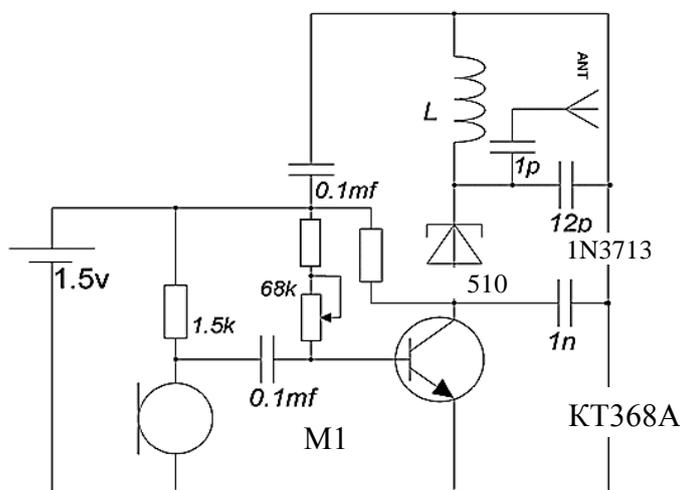


Рисунок 4. Передатчик на туннельном диоде

Контур намотан на пластмассовой оправе с диаметром 5 мм, содержит 7 витков (для FM-диапазона), провод с диаметром 0,8...1 мм.

Дальность работы небольшая, всего 20-30 метров и то при точной настройке. Генератор начинает работать даже тогда, когда напряжение 0,5-0,6 вольт, стандартное напряжение -1,5 вольт, выше подавать не стоит. Ток потребления всего 1,5-2 мА.

Микрофон использован от гарнитуры мобильного телефона.

Рабочая частота – 88-108 МГц

Транзистор с резистором на 510 Ом в коллекторной цепи образует делитель напряжения, ее рабочая точка задается подстроечным резистором 68 кОм, резистор регулируют так, чтобы на коллекторе транзистора напряжение было 0,2-0,6 вольт, таким образом, обеспечивая нормальное напряжение для питания генератора, это второе предназначение транзистора. Антенна – кусок многожильного провода с длиной 20 см, при исключении последнего, дальность действия жучка падает до 5-6 метров.

Туннельный диод типа 1N3713 можно заменить на АИ201А, однако при этом вырастет потребляемый ток устройством до 9-12мА.

Схема генератора низкой частоты, который может использоваться для проверки работоспособности туннельного, диода изображена на рис. 5.

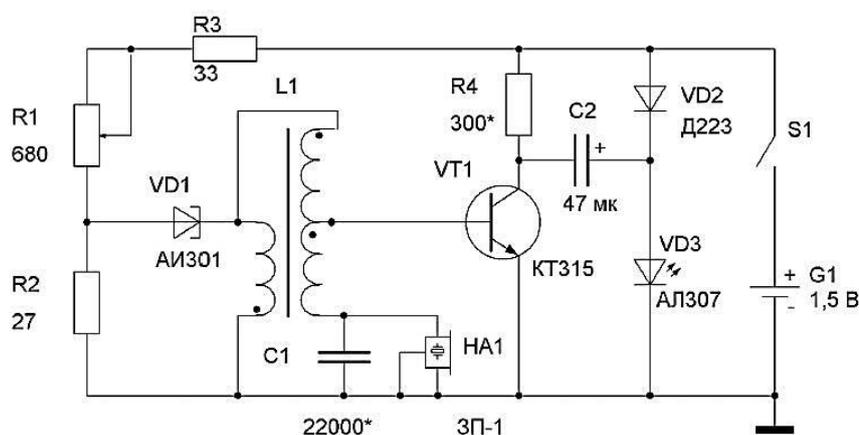


Рисунок 5. Генератор низкой частоты на туннельном диоде

Генератор на туннельном диоде может строиться и с применением кварцевого резонатора, задающего частоту колебаний (рис. 6).

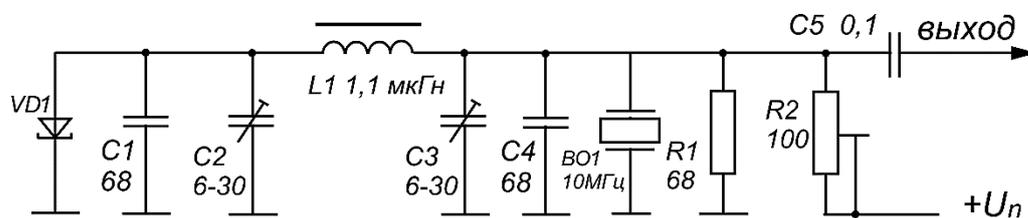


Рисунок 6. Автогенератор на туннельном диоде с кварцевым резонатором

### Литература

1. <http://www.club155.ru/diods-tunnel/>
2. [https://ru.m.wikipedia.org/wiki/Туннельный\\_диод](https://ru.m.wikipedia.org/wiki/Туннельный_диод)
3. <http://asest.com/413-primeneniye-tunnelnykh-diodov>
4. <http://science21.ru/elektronnye-elementy/160-tunnelnye-diody>.