

РТД многослойной конструкции состоит из верхнего и нижнего металлических электродов и полупроводниковых слоев между ними. Средние из этих полупроводниковых слоев нелегированы и образуют собственно резонансно-туннельную структуру (РТС). Их толщина от 1 до 10 нм. Остальные прилегающие к ним полупроводниковые слои легированы и играют вспомогательную технологическую роль. Степень легирования их донорной примесью (Si) возрастает по мере приближения к слоям металлических электродов. Когда к металлическим электродам РТД прикладывают напряжение, основное падение напряжения происходит на РТС. Падение напряжения на сильнолегированных вспомогательных слоях мало из-за их высокой проводимости.

На рис.48 изображена центральная часть РТД - слои РТС при наложении внешнего напряжения таким образом, что верхний металлический электрод РТД имеет знак минус, а нижний - плюс. Электрон из верхнего металлического электрода через ряд верхних вспомогательных легированных полупроводниковых слоев доходит до слоев РТС. После резонансного туннелирования через эти основные слои электрон проходит ряд нижних вспомогательных легированных слоев и выходит через нижний металлический электрод во внешнюю цепь.

РТС изготавливают чередованием полупроводниковых слоев нанометровой толщины так, что соседние слои имеют разную ширину запрещенной энергетической зоны. Для выбора материалов РТС используется диаграмма зависимости ширины  $3\Delta$  от постоянной кристаллической решетки полупроводника.

На рис. изображена последовательность слоев РТС из AlGaAs вместе с распределением электронов проводимости по энергии и по вертикальной координате поперек слоев РТС. Перед тем, как попасть в РТС, электрон проходит верхние слои. Распределение электронов в них по энергии описывается функцией Ферми, изображенной на верхнем графике. Эта функция имеет ступенчатый вид с энергией ступеньки  $E_F$  и плавным размытием края ступеньки на величину энергии  $kT$  теплового хаотического движения электронов при температуре  $T$ . Это размытие определяет незначительную температурную зависимость характеристик РТД. Из графика видно, что вероятность для электрона иметь энергию выше энергии Ферми  $E_F$  мала. Поэтому энергия электрона, пришедшего сверху к слоям РТС, находится между 0 и  $E_F$ . Для РТС из AlGaAs величина энергии Ферми равна примерно 0,1 эВ и растет при увеличении степени легирования верхних вспомогательных слоев РТД. Толщина этих слоев составляет сотни нм, что много больше характерной длины волны электрона. Поэтому основную роль при прохождении электроном вспомогательных слоев играют столкновения, обычные для объема полупроводника. На том же верхнем графике на рис. изображено распределение электронов по энергии для нижних вспомогательных слоев после РТС. Оно совпадает с функцией Ферми для

верхних вспомогательных слоев за исключением сдвига вниз по шкале энергий на величину напряжения, приложенного к РТД. Этот график определяет вероятность прохода электрона через нижние вспомогательные слои. Пусть электрон из верхних вспомогательных слоев прошел через РТС и попал в нижние вспомогательные слои. Тогда его энергия находится либо в области занятых энергетических состояний внутри нижней ступенчатой функции Ферми, либо вне этой области. В первом случае электрон поворачивает обратно, а во втором случае - может пройти через нижний металлический электрод во внешнюю цепь.

Теперь рассмотрим поведение электрона в центральной части РТД - в слоях РТС. Имея энергию примерно от 0 до 0,1 эВ электрон из верхних вспомогательных слоев приходит в верхний слой РТС. Толщина слоев РТС составляет единицы нм, что сравнимо с характерной длиной волны электрона. Поэтому при прохождении электроном этих слоев основную роль играют квантовые эффекты.

Рассмотрим на рис. электрон в верхнем GaAs-слое, движущийся вниз к соседнему AlAs-слою. Дно зоны проводимости в AlAs-слое выше по энергии, чем в GaAs-слое. Поэтому AlAs-слой для электрона является барьером потенциальной энергии. Электрон может либо пройти через этот барьерный слой вниз, либо отразиться от него вверх. Какая из этих возможностей реализуется, зависит от энергии электрона и параметров потенциального барьера. Вероятность прохождения электрона через барьерный слой экспоненциально зависит от энергии электрона, высоты и ширины барьера.

Энергия электрона определяет его длину волны. При подходе к барьерному слою потенциальная энергия электрона относительно дна зоны проводимости равна нулю, и полная энергия электрона равна его кинетической энергии. Чем выше над дном зоны проводимости энергия электрона, тем меньше его длина волны. Для изображенного на рис. GaAs-слоя она равна примерно 10 нм при энергии электрона 0,1 эВ.

Высота и ширина потенциального барьера определяют затухание волны электрона при его проникновении внутрь барьерного слоя РТС. При подходе к барьеру кинетическая энергия электрона меньше высоты барьера, поэтому по мере прохождения барьерного слоя волна электрона затухает по экспоненте с некоторой характерной длиной затухания. Чем дальше от вершины потенциального барьера энергия электрона, и чем больше ширина барьерного слоя, тем меньше эта длина затухания. Для изображенного на рис.1 AlAs-слоя она равна примерно 5 нм при энергии электрона 0,1 эВ.

После прохождения через барьерный слой затухающая волна электрона попадает в слой потенциальной ямы, состоящей из того же материала, что и слой перед барьером. Здесь опять потенциальная энергия электрона равна нулю. Поэтому затухание волны электрона прекращается и она возвращается к свободному распространению. Эта распространяющаяся

волна проходит вниз через слой потенциальной ямы и доходит до границы второго барьерного слоя. Здесь повторяется то же, что и с первым барьерным слоем. Волна электрона частично отражается вверх от второго барьера, а частично проникает внутрь него и с затуханием идет вниз.

Отраженная от второго барьера вверх волна приводит к резонансному эффекту, если толщина слоя потенциальной ямы равна половине длины волны электрона. В этом случае отраженная волна доходит вверх через слой потенциальной ямы до границы первого барьерного слоя и отражается от нее вниз. После такого отражения она оказывается в фазе с той волной, которая проходит в первый раз вниз с затуханием через первый барьер. При сложении эти волны усиливают друг друга и суммарная волна идет вниз через слой потенциальной ямы.

В результате таких многократных отражений от границ барьерных слоев внутри слоя потенциальной ямы возникает стоячая волна электрона. Волна электрона при этом находится в резонансе как с падающей на РТС волной из верхних слоев, так и с выходящей из РТС волной в нижние слои. Для этого энергия электрона должна быть такой, чтобы ей соответствовала длина волны электрона, равная удвоенной толщине слоя потенциальной ямы. Это значение энергии называется энергией резонансного уровня, а само явление прохождения электрона через РТС - резонансным туннелированием. Вероятность такого прохождения изображена на нижнем графике на рис. Из графика видно, что пройти через РТС имеют шанс только электроны с энергией близкой к резонансной  $E_0$ . То есть РТС отфильтровывает электроны по энергии с разбросом, равным ширине  $\Gamma$  резонансной кривой на графике. Для изображенной на рис. AlGaAs-РТС ширина  $\Gamma$  равна примерно 0,1 мэВ, а резонансная энергия  $E_0$  (отсчитываемая от дна зоны проводимости  $E_C$ ) равна примерно 0,1 эВ. Чем толще слой потенциальной ямы, тем ниже в нем резонансный уровень.

Внешнее напряжение, приложенное к металлическим электродам РТД, не падает на вспомогательных высоколегированных полупроводниковых слоях из-за их высокой проводимости. Из рис. видно, что основное падение напряжения происходит на барьерных слоях РТС. Приложенное напряжение делится между ними пропорционально их толщине и смещает резонансный уровень в потенциальной яме вниз по шкале энергии. Для изображенной на рис. одинаковой толщины барьерных слоев напряжение  $eV$  делится пополам между верхним и нижним барьерным слоем. Поэтому резонансный уровень в яме смещен на  $eV/2$  вниз по энергии относительно верхних слоев РТС. То есть РТС пропускает в нижние слои только те электроны, энергия которых (отсчитываемая от дна зоны проводимости  $E_C$ ) равна  $E_0 - eV/2$  с разбросом, равным  $\Gamma$ .

Толщина слоя потенциальной ямы выбирается так, чтобы при нулевом напряжении резонансная энергия была выше энергии Ферми верхних слоев. С ростом напряжения резонансный уровень опускается до этой энергии Ферми, и через РТС проходит все больше электронов из верхних слоев в нижние. Поэтому ток растет. Для симметричной РТС такая же картина наблюдается и при перемене знака напряжения. Поэтому вольтамперная характеристика (ВАХ) РТД антисимметрична.

С ростом напряжения резонансный уровень в яме опускается по энергии ниже  $E_C$  - дна зоны проводимости верхнего слоя РТС. Из рис. видно, что в этой области энергий располагается запрещенная зона и электронов с такой энергией в верхнем слое нет. Поэтому поток электронов из верхнего слоя вниз к РТС прекращается, и ток через РТД равен нулю. Таким образом, ВАХ имеет растущий и падающий участки.