

МЕТОДИКА И УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ПРОВОДИМОСТИ РЕЗОНАНСНО-ТУННЕЛЬНЫХ СТРУКТУР

© 2011 г. М. П. Бежко, И. Ю. Безотосный

Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”

Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31

Поступила в редакцию 23.12.2010 г.

Разработана методика определения дифференциальной проводимости в области отрицательного дифференциального сопротивления для резонансно-туннельных и туннельных гетероструктур. Для реализации этой методики создана экспериментальная установка, на которой получены результаты для резонансно-туннельного диода.

ВВЕДЕНИЕ

Для разработки схем на основе резонансно-туннельных диодов (р.т.д.) [1] необходимо располагать информацией о статических и динамических характеристиках конкретной структуры, таких как сопротивление, емкость, мощность генерации и т.д. Существующие стандартные методики получения вольт-амперных характеристик (в.а.х.) на практике дают не достаточно полное представление об области отрицательного дифференциального сопротивления (о.д.с.) для резонансно-туннельных структур.

Цель нашей работы заключалась в разработке методики для экспериментального определения значений дифференциальной проводимости внутри области о.д.с. Основная идея предложена в работе [2], в которой для измерения параметров р.т.д. использовалась схема активного резонатора при криогенных температурах (≤ 77 К) с применением специальных буферных усилителей. В данной работе предлагается методика для проведения измерений параметров резонансно-туннельных структур с большим отношением пик/долина (≥ 2) при комнатной и криогенной температурах.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ПРОВОДИМОСТИ

Так как генератор на р.т.д. представляет собой автогенератор с внутренней обратной связью, то наблюдая моменты возникновения и срыва генерации в зависимости от напряжения смещения при различных добротностях контура, можно оценить значения отрицательной дифференциальной проводимости при данных напряжениях смещения, исходя из условия генерации [3]:

$$|R_{(-)}| < L/R_a C = \rho Q, \quad (1)$$

где ρ – характеристическое сопротивление колебательного контура; Q – добротность контура;

$|R_{(-)}|$ – модуль отрицательного дифференциального сопротивления р.т.д., R_a – полное активное сопротивление контура; L и C – соответственно индуктивность и емкость.

Так как мы будем искать граничные точки, в которых происходит возникновение генерации, то условие (1) можно записать в виде равенства

$$|R_{(-)}| = \rho Q, \quad (2)$$

т.е. именно при таком условии будет возникать (или наоборот пропадать) генерация переменного сигнала.

Основное внимание в этой работе уделено созданию установки для реализации такой методики, а также проверке ее применимости для раз-

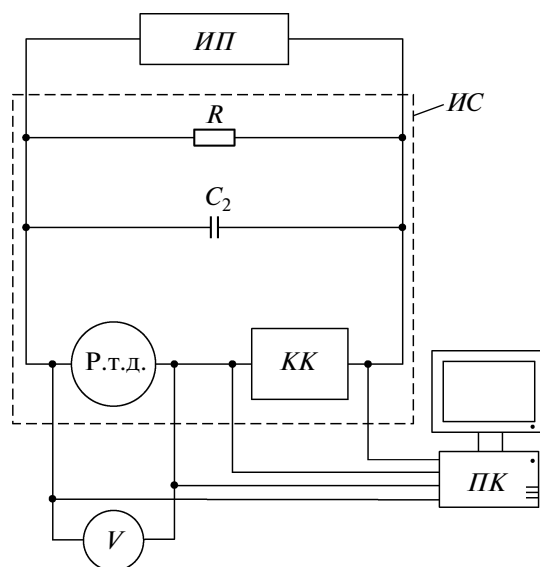


Рис. 1. Экспериментальная установка. ИП – источник питания; Р.т.д. – образец; КК – колебательный контур; V – контрольный вольтметр; ПК – компьютер с платой а.ц.п.; ИС – измерительная схема.

личных образцов, поэтому все измерения носят не количественный, а качественный характер.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка состоит из следующих основных элементов (рис. 1): источника питания (Agilent N6700A + N6734B), контрольного вольтметра (Agilent 34401A), компьютера с платой аналого-цифрового преобразователя (а.ц.п.) (ЛА-н150-14РСІ) и измерительной схемы с колебательным контуром для получения генерации. Напряжение от источника питания подается на измерительную схему с образцом и колебательным контуром. Для визуального контроля напряжения на образце используется вольтметр, подключенный к образцу. Сигналы с образца и колебательного контура поступают на входы а.ц.п. компьютера.

Источник питания может задавать напряжения 0.04–35 В с погрешностью 1 мВ при токе ≤ 1.5 А. Можно использовать и другой источник питания с подобными характеристиками, учитывая что для р.т.д., как правило, достаточно максимального напряжения в 2.5 В, а ток в данной конфигурации не превышает 500 мА. Вольтметр можно использовать практически любой или вообще не использовать, так как служит он только для дополнительного контроля напряжения, который не обязателен, если источник питания устанавливает напряжение в автоматическом режиме. Вышеуказанная плата а.ц.п. имеет разрешение 14 бит при частоте дискретизации 7 МГц и максимальном входном напряжении ± 5 В. Тем не менее, для описываемой методики можно использовать и более простые аналоги с меньшим разрешением и частотой дискретизации, поскольку нам не обязательно получать форму генерируемого сигнала, а необходимо лишь определить точку, где возникают и пропадают колебания, генерируемые образцом. Также можно использовать и цифровые осциллографы для этой цели, но платы а.ц.п., как правило, выгоднее с экономической точки зрения и удобнее с точки зрения автоматизации, при этом экспериментальная установка с а.ц.п. занимает значительно меньше места.

Выполнение основных действий при проведении измерений (установка и измерение напряжения, сбор данных и их отображение на экране компьютера) производится в автоматическом режиме под управлением компьютерной программы.

Принципиальная электрическая схема для проведения измерений представлена на рис. 2. Напряжение от источника питания подается на колебательный контур с образцом. Параллельно образцу включено сопротивление R , которое используется для стабилизации напряжения. Номинал сопротивления выбирается таким, чтобы ток через него был в несколько раз больше тока через диод [4], тогда скачки напряжения на диоде в об-

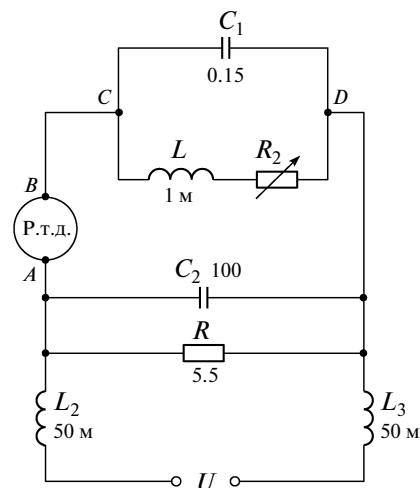


Рис. 2. Измерительная схема.

ласти о.д.с. сглаживаются. В этом случае основной нагрузкой для источника питания является это сопротивление, и в результате общее падение напряжения практически постоянно при условии, что источник питания задает постоянное напряжение.

В нашем случае сопротивление образца в рабочей области составляет ~ 200 Ом. Для сопротивления R выбрано значение 5.5 Ом. При таком значении сопротивления напряжение на образце стабильно, а мощность, выделяемая на сопротивлении, не слишком большая, что позволяет использовать стандартные электротехнические сопротивления без каких-либо дополнительных теплоотводов и радиаторов, а также источник питания, не рассчитанный на высокий ток.

Чтобы снизить влияние внешних цепей на генерацию переменного сигнала, в схему включен конденсатор C_2 и индуктивности L_2 и L_3 . Емкость C_2 выбирается достаточно большой (в нашем случае 100 мкФ), чтобы “закоротить” получившийся генератор для генерируемого переменного сигнала — это практически равносильно тому, что удаляется все, что находится за этой “перемычкой”. На частоте 50 кГц реактивное сопротивление такого конденсатора составляет ~ 0.2 Ом.

Индуктивности L_2 и L_3 , включенные последовательно с источником питания, также должны быть достаточно большими, чтобы создавать большое сопротивление на пути переменного сигнала. Однако при выборе индуктивностей следует учитывать ток, который будет в цепи (ток через сопротивление R), чтобы он не превышал максимальный рабочий ток для этих индуктивностей, а также необходимо учитывать возможности источника питания: поскольку в стандартных больших (десятки миллигенри) индуктивностях активные сопротивления также достаточно большие (десятки ом), у источника питания может просто не хватить диапазона напряжений для

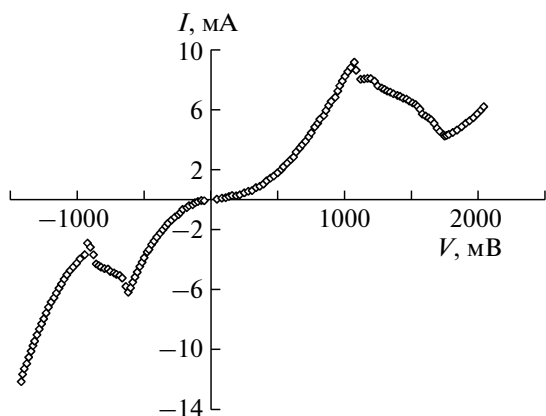


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика образца р.т.д.

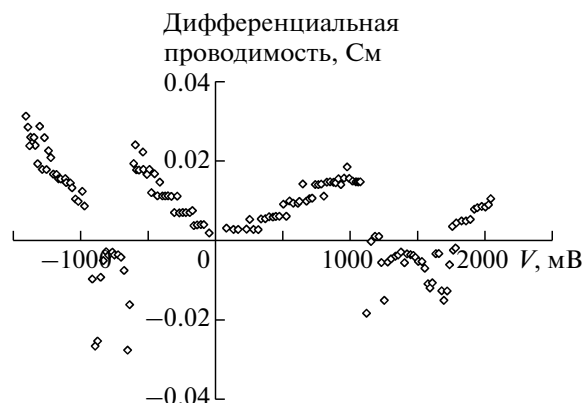


Рис. 4. Зависимость дифференциальной проводимости от напряжения смещения, полученная из в.а.х. (рис. 3) путем математических преобразований.

установки необходимого напряжения на сопротивлении — $R = 5.5 \text{ Ом}$.

Для генерации колебаний используется схема с параллельным колебательным контуром. Емкость C_1 и индуктивность L_1 (рис. 2), а следовательно и частота генерируемого сигнала, выбраны исходя из следующих условий: во-первых, частота генерируемых колебаний должна быть не слишком высокой (чтобы избежать влияния емкостей и индуктивностей проводов, а также высокочастотных наводок и помех), но и не слишком низкой (чтобы работал фильтр, состоящий из C_2 , L_2 и L_3 , снижающий влияние внешних цепей); во-вторых, добротность контура должна быть максимально возможной для получения устойчивой генерации с большой амплитудой генерируемого сигнала, которую будет легко детектировать.

В соответствии с этими условиями необходимо выбирать маленькую емкость и большую индуктивность. Мы выбрали следующие значения: $C_1 = 0.15 \text{ мкФ}$, $L_1 = 1 \text{ мГн}$. При этом расчетная резонансная частота составляет 13 кГц , реальная рабочая частота несколько отличается от расчетной из-за влияния емкости самого образца, но для нашей методики точное соответствие какой-то конкретной частоте не обязательно. При увеличении значения индуктивности возрастает и сопротивление, и в результате при больших значениях индуктивности мы получали меньшую добротность, а дальнейшее уменьшение емкости приводило к выходу частоты генерации в область высоких частот ($\sim \geq 100 \text{ кГц}$), что также является нежелательным в нашем случае. При выборе рабочей частоты важно только чтобы помехи на этой частоте были минимальными, а генерация устойчивой.

В колебательный контур последовательно включен реостат R_2 (рис. 2), при помощи которого можно плавно уменьшать добротность контура, увеличивая активное сопротивление в нем. Так как для колебательного контура $Q = \rho/r$, где r — активное сопротивление контура, то формула (2) примет вид

$$|R_{(-)}| = \rho^2/R_a, \quad (3)$$

где ρ — характеристическое сопротивление колебательного контура (в данном случае оно определено для параллельного контура); R_a — полное активное сопротивление контура; $|R_{(-)}|$ — модуль отрицательного дифференциального сопротивления р.т.д.

В процессе измерений сигналы с точек A , B , C и D поступают на входы а.ц.п. А.ц.п. измеряет падения напряжений между парами точек, в результате чего на экране монитора отображается сигнал с образца (точки A , B), который состоит из постоянного напряжения на образце и генерируемых колебаний, а также сигнал с колебательного контура (точки C , D). Когда на реостате установлено нулевое сопротивление, падение постоянного напряжения между точками C , D очень мало (практически отсутствует), и с этих точек снимаем лишь сгенерированный сигнал; если же сопротивление реостата устанавливается не равным нулю, то также получаем переменный сигнал с небольшой постоянной составляющей.

ИЗМЕРЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ПРОВОДИМОСТИ Р.Т.Д.

В качестве тестовых образцов взяты р.т.д. на основе гетероструктуры AlGaAs/AlAs . Вольт-амперная характеристика одного из них представлена на рис. 3. Для сравнения на рис. 4 представлена зависимость дифференциальной проводимости от напряжения смещения, полученная математическими преобразованиями из этой вольт-амперной характеристики.

В процессе измерения получаем на экране график зависимости напряжения на образце от времени. При подаче на образец плавно возрастающего напряжения в области о.д.с. появляются колебания, которые видны на экране в виде осциллирующего сигнала, наложенного на линию, соответствующую напряжению смещения на образце. Из такого графика легко определить значения напряже-

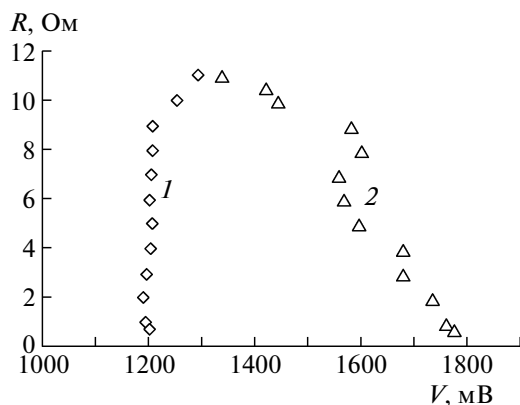


Рис. 5. Зависимость напряжений возникновения (1) и срыва (2) генерации от активного сопротивления в контуре.

ния возникновения и срыва генерации по тем точкам на графике напряжения, в которых соответственно возникают и пропадают осцилляции. Затем этим напряжениям сопоставляем значения активного сопротивления в контуре и получаем зависимость (рис. 5) напряжений возникновения и срыва генерации от активного сопротивления в контуре. Аналогично получаем зависимость для смещения р.т.д. в обратном направлении (рис. 3 отрицательная область напряжений). Следующий шаг – преобразование значений активного сопротивления в значения дифференциального сопротивления по формуле (3), используя номиналы установленных в контуре емкости C_1 и индуктивности L_1 , а затем и в значения дифференциальной проводимости как величины обратной дифференциальному сопротивлению.

Зависимость дифференциальной проводимости от напряжения смещения р.т.д., полученная при помощи этой методики внутри области о.д.с., изображена на рис. 6 вместе со значениями дифференциальной проводимости, полученными путем пересчета из вольт-амперной характеристики р.т.д. вне области о.д.с. соответственно при прямом и обратном смещении.

Полученные значения дифференциальной проводимости (рис. 6) хорошо согласуются с результатами, рассчитанными из в.а.х., вне области о.д.с. Видно, что значения, полученные при помощи математических преобразований в.а.х. (рис. 4), отражают искаженную картину, согласно которой в середине области о.д.с. генерация должна практически пропадать, а по обоим краям иметь максимумы по амплитуде, что не соответствует наблюдавшимся на эксперименте эффектам. Также при использовании представленной методики обнаружено, что модуль дифференциальной проводимости в области о.д.с. имеет максимум, и его значение в ≥ 2 раза превосходит значение, рассчитанное из в.а.х.

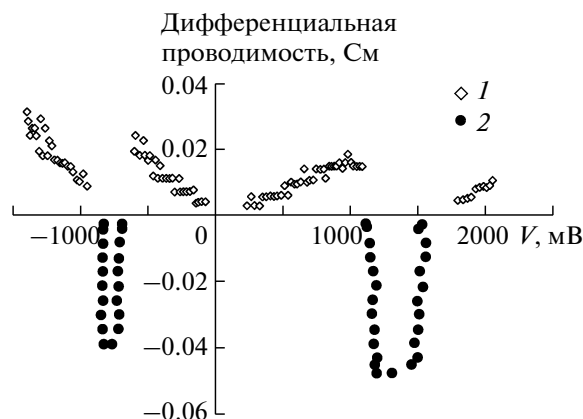


Рис. 6. Зависимость дифференциальной проводимости от напряжения смещения для резонансно-туннельного диода. 1 – точки вне области о.д.с., полученные пересчетом из обычной в.а.х.; 2 – точки внутри о.д.с., полученные при помощи описанной методики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана и испытана методика построения зависимости дифференциальной проводимости от напряжения смещения для резонансно-туннельных гетероструктур на основе AlGaAs/AlAs, реальный вид которых нельзя получить стандартными методами, такими как математическое преобразование в.а.х. Методика экспериментально испытана на нескольких, различных по своей внутренней структуре и параметрам, образцах р.т.д. как при комнатной, так и при криогенной температурах. Полученные результаты качественно совпадают друг с другом. Воспроизводимость полученных результатов говорит о возможности реального практического применения вышеописанной методики для определения параметров резонансно-туннельных и туннельных структур и расчета схем на основе таких устройств.

Работа выполнена в рамках реализации федеральной целевой программы “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009–2013 гг. (“Компьютерное моделирование и экспериментальные исследования статических и динамических характеристик полупроводниковых наноструктур, а также процессов образования и коалесценции кластеров благородных металлов”, государственный контракт № П893).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tsu R., Esaki L.* // Appl. Phys. Lett. 1973. V. 22. P. 562.
2. *Безотосный И.Ю., Вирасова М.С., Подиуевит Н.В.* // ПТЭ. 1999. № 5. С. 71.
3. *Гоноровский И.С.* Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Сов. радио, 1971. С. 390.
4. *Манаев Е.И.* Основы радиоэлектроники. М.: Радио и связь, 1985. С. 315.