

Министерство образования и науки Российской Федерации
МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(государственный университет)
ФАКУЛЬТЕТ ФИЗИЧЕСКОЙ И КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ
КАФЕДРА ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИИ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

На правах рукописи

УДК 53.043

ОСОБЕННОСТИ ОТКЛИКА РЕЗОНАНСНО-ТУННЕЛЬНОГО ДИОДА НА ПЕРЕМЕННОМ
СИГНАЛЕ

Магистерская диссертация

Направление подготовки 010900 «Прикладные математика и физика»

Магистерская программа 010943 «Физика и технология нанозлектронных приборов»

Заведующий кафедрой, чл.-корр. РАН:

Аристов В. В.

Научный руководитель, к.ф.-м.н.,

Попов В. Г.

Студент

Зотов А.В.

г. Черноголовка

2013

Содержание

1. Введение	3
1.1. Актуальность и цель работы.....	3
1.2. Литературный обзор.....	4
2. Постановка эксперимента	9
2.1. Описание технологии получения и параметров диода.....	9
2.2. Схема экспериментальной установки.....	10
3. Экспериментальные результаты и их обсуждение	12
3.1. ВАХ диода при нагрузочных сопротивлениях 39 и 200 Ом.....	12
3.2. Нагрузочная прямая, учёт вклада переменного сигнала в измерениях ВАХ.....	16
3.3. Объяснение измерений пороговых значений тока при небольших нагрузках.....	17
3.4. Измерение ВАХ РТД при больших нагрузках и их обсуждение.....	18
4. Заключение	25
5. Выводы	26
6. Список литературы	27

1. Введение.

1.1. Актуальность и цель работы.

Научные исследования и технические разработки, посвященные быстродействующим электронным приборам, принцип работы которых основан на туннелировании поперек квантово-размерных слоев, не перестают быть актуальными уже более 20 лет. Для создания таких приборов нужно уметь получать тонкие и качественные полупроводниковые пленки. Молекулярно-лучевая эпитаксия, достигшая высокого уровня развития в наши дни, позволяет получать многослойные тонкопленочные структуры.

Принцип работы туннельных приборов нанозлектроники основан на эффекте туннелирования электронов сквозь тонкие потенциальные барьеры, содержащие потенциальные ямы с энергетическими уровнями размерного квантования. Одной разновидностью таких приборов, является резонансно-туннельный диод (РТД) на основе двухбарьерной гетероструктуры ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$). Если энергия движения электронов в направлении туннельных барьеров, налетающих на двухбарьерную структуру, совпадает с энергией одного из энергетических уровней в яме, то их поток на выходе принимает максимальное значение. Происходит так называемое резонансное туннелирование. Благодаря этому, вольт-амперная характеристика РТД имеет последовательность пиков (их количество определяется количеством уровней в потенциальной яме) на фоне нерезонансного тока. Та часть пика, где ток падает с ростом напряжения, называется областью отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС).

Именно с наличием ОДС в РТД связаны возникающие при прохождении этой области неустойчивости тока.

Токовые неустойчивости в полупроводниковых структурах изучаются уже более 50 лет. Впервые их исследовали в диодах Ганна. Затем появилось множество других полупроводниковых приборов с подобными эффектами, например лавинно-пролетные транзисторы, рррп-диоды, гетероструктурные диоды на горячих электронах.

Успехи в исследовании токовых неустойчивостей, неоднородных по площади образца или доменов, в диодах Ганна были связаны с довольно большим размером рабочей области структуры, что позволяло использовать локальные зонды для изучения распределений токов и потенциала в образце. Латеральные и вертикальные размеры РТД существенно меньше, что затрудняет использование локальных методов при исследовании неоднородных токовых неустойчивостей. Поэтому необходимо исследовать интегральные эффекты, которые могли бы указать на наличие неоднородных токовых неустойчивостей.

Цель данной работы заключается в том, чтобы исследовать прохождение переменного сигнала через РТД, выявить особенности такого прохождения на ВАХ и объяснить их.

1.2. Литературный обзор.

Туннелирование является одним из самых ярких квантовых явлений в физике. В полупроводниках его первым наблюдал Эсаки (Esaki) [1] в 1958 году. С тех пор, туннелирование стало предметом исследования для многих направлений в физике твердого тела. В 1960х годах для физиков всего мира были интересны тонкопленочные транзисторы. Над численными квантово-механическими расчетами структур из систем барьеров работал Иогансен [2,3]. В работах Иогансена впервые появился такой термин, как резонансное туннелирование. Необходимо отметить, что этот термин со времен

Иогансена разделится на два понятия: резонансное когерентное и резонансное последовательное туннелирование. В модели когерентного туннелирования РТД рассматривается как резонатор Фабри-Перо [2,3] для волновой функции электрона, причем ток определяется туннельной прозрачностью двухбарьерной структуры и энергией электрона, налетающего на систему барьеров, что наблюдалось в первой экспериментальной работе [4]. Модель последовательного туннелирования впервые предложил Лурьи (S. Luryi) в работе [5]. В этой модели электрон сначала туннелирует через барьер эмиттера в яму, образованную двумя барьерами, а уже из нее он туннелирует через барьер коллектора. Эта модель имеет место в образцах, где происходит сбой фазы волновой функции электрона в яме, т.е. некогерентность. Сам сбой фазы вызывают разного вида неупругие рассеяния, время взаимодействия которых меньше времени жизни электрона в яме.

На рисунке 1.1 схематично изображена система из двух барьеров. Напишем из общих соображений выражение для тока в модели когерентного туннелирования следующим образом:

$$I = \frac{2e}{h} \int T(E)[f_1(E) - f_2(E)]dE$$
, где $f_{1,2}$ - функции распределения ферми в эмиттере и коллекторе, $T(E)$ - туннельная прозрачность системы. Туннельную прозрачность удобнее считать в лоренцевом приближении как:

$$T(E) = \frac{\Gamma_1 \Gamma_2}{\Gamma_1 + \Gamma_2} \sum_m A(E - E_m)$$
, где Γ_1 и Γ_2 (если их поделить на \hbar) являются темпами туннелирования из ямы в эмиттер и коллектор соответственно, а именно:

$$\Gamma_1 = \frac{dE}{dk} T_1, \Gamma_2 = \frac{dE}{dk} T_2$$
, $A(E - E_m)$ - спектральная функция.

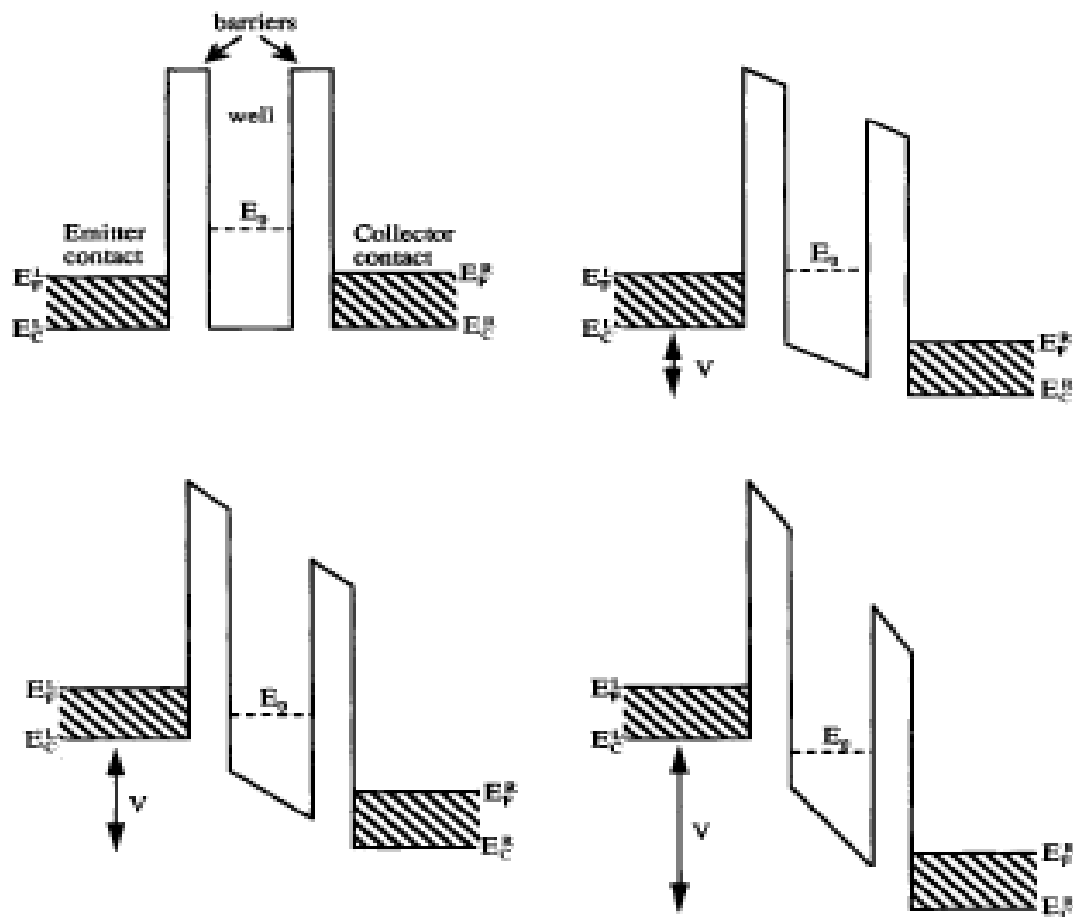


Рис. 1.1. Энергетическая диаграмма РТД в развертке по приложенному напряжению.

Подставим выражение для туннельной прозрачности в выражение для тока, причем пределы интегрирования будут от E_m до μ_1 . Более того будем считать, что температура достаточно низка для того, чтобы распределение Ферми приняло ступенчатый вид. Тогда выражение для m -й моды будет следующим:

$$I_m = \frac{2e}{h} \frac{\Gamma_1 \Gamma_2}{\Gamma_1 + \Gamma_2} \int_{E_m}^{\mu_1} A(E - E_m) dE$$

Если ненулевые крылья спектральной функции полностью попадают в область от E_m до μ_1 и, если учесть, что по всем энергиям она нормирована на 2π , то максимальное значение тока для одиночной рассматриваемой моды примет выражение: $I_p = \frac{2e}{h} \frac{\Gamma_1 \Gamma_2}{\Gamma_1 + \Gamma_2}$ (*)

Теперь рассмотрим модель последовательного туннелирования. Для этого воспользуемся уравнением баланса токов, поскольку в этой модели происходит туннелирование через барьеры по очереди независимым образом, то:

$$I_1 = \frac{2e}{h} \Gamma_1 [f_1(1-f_z) - f_z(1-f_1)], \quad I_2 = \frac{2e}{h} \Gamma_2 [f_2(1-f_z) - f_z(1-f_2)],$$
 где f_z - вероятность заполнения уровня в яме. Как и в предыдущем рассмотрении будем считать, что температура низкая, а приложенное напряжение смещения велико, тогда можно принять, что $f_1 = 1$, а $f_2 = 0$. С учетом закона сохранения тока получаем, что $f_z = \frac{\Gamma_1}{\Gamma_1 + \Gamma_2}$. Таким образом, мы получаем такое же выражение для тока, как и в выражении (*), в когерентной модели туннелирования:
$$I_p = \frac{2e}{h} \frac{\Gamma_1 \Gamma_2}{\Gamma_1 + \Gamma_2} (**).$$

Общепринятые эквивалентные схемы РТД в модели когерентного и последовательного туннелирования приведены на рис. 1.2.

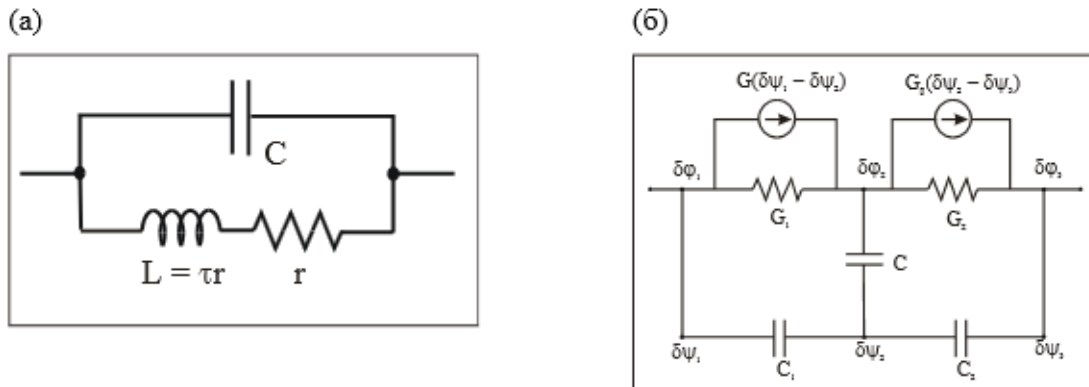


Рис. 1.2. Эквивалентные схемы РТД, а) - когерентное туннелирование, б) - последовательное туннелирование.

Высокочастотные свойства РТД с использованием схемы на рис.1,а подробно изучались в работах [8,9]. Эти работы продемонстрировали возможность работы РТД вплоть до терагерцового диапазона [8]. В [9] авторами было обнаружено проявление конечности времени жизни электрона в квантовой яме. Этот эффект приводит к частотной зависимости дифференциальной проводимости диода, что эквивалентно введению отрицательной квантовой индуктивности. Однако наличие ОДП на столь высоких частотах (2.5 ТГц) сложно объяснить, если учесть кулоновское взаимодействие электронов. С учетом взаимодействия оценки дают частоту на три порядка меньше наблюдаемой. В связи с этим S. Luryi и предложил модель последовательного туннелирования (ПТ) электронов в РТД.

Подробное исследование частотных характеристик РТД в модели ПТ было выполнено в [10]. Эквивалентная схема, полученная в этой работе, представлена на рис. 1,б.

В работе [11] был проведен анализ результатов исследований токовых неустойчивостей в РТД в моделях ПТ и когерентного туннелирования. Одним из выводов этой работы стало то, что некоторые особенности в работе РТД можно объяснить рассмотрев неоднородное протекание туннельного тока по диоду.

2. Постановка эксперимента.

2.1 Описание технологии получения и параметров диода.

В этой работе исследовался образец на основе гетероструктуры типа $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Качество гетероструктуры является одним из самых важных вопросов. На сегодняшний день есть две технологии создания гетероструктур: метод химического осаждения из газовой фазы и молекулярно-пучковая эпитаксия (МВЕ Molecular Beam Epitaxy).

Молекулярно-пучковая эпитаксия является лучшей технологией для создания гетероструктур наивысшего качества. В данной технологии, в условиях сверхвысокого вакуума (10^{-7} Торр), реагенты осаждаются на подложку в форме молекулярных пучков, которые создаются путем нагревания исходного материала до испарения в ячейке с очень малым отверстием. Для роста эпитаксиальной пленки обычно на подложку направлено несколько пучков: компоненты образующие материал и легирующие примеси.

Основное требование к материалам для правильного роста гетероструктур с наименьшим количеством дефектов на границе раздела - это малое различие постоянной решетки двух полупроводников, образующих гетеропереход. GaAs и $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ отлично удовлетворяют этому условию. Различие между постоянными решеток менее чем 1%. В зависимости от молярной концентрации алюминия, определяется разрыв дна зоны проводимости. Параметры РТД, исследовавшегося в данной работе, приведены в таблице 1.

№ слоя	Концентрация доноров, $n_D, \text{см}^{-3}$	Состав	Толщина, нм
8	$2 \cdot 10^{18} \text{см}^{-3}$	GaAs	$0.5 \cdot 10^3$
7	$2 \cdot 10^{17} \text{см}^{-3}$	GaAs	50
6	не легирован	GaAs	50
5	не легирован	$\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$	8.0
4	не легирован	GaAs	6.0
3	не легирован	$\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$	8.0
2	не легирован	GaAs	50
1	$2 \cdot 10^{17} \text{см}^{-3}$	GaAs	50
Подложка: n^+ -GaAs, $n_D=2 \cdot 10^{18} \text{см}^{-3}$			

Таблица 1. Параметры РТД.

2.2 Схема экспериментальной установки.

Схема приведена на рисунке 2.1. Источником напряжения в этой схеме служит цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП). Два аналого-цифровых преобразователя (АЦП) использовались в качестве вольтметров. Как ЦАП, так и АЦП давали высокочастотные шумы (выше 1 МГц) большой амплитуды (20-50 мВ). Для устранения этих шумов использовались LC и RC-фильтры. LC-фильтр стоит на выходе первого канала ЦАП. Второй канал ЦАП заземлен. Уровень шумов в электрической цепи не превышал 1 мВ после установки фильтров. В качестве источника переменного сигнала использовался генератор переменного напряжения синусоидальной формы.

Диод был помещен в сосуд с жидким азотом ($T = 77.4 \text{ K}$). Для модуляции постоянного сигнала от ЦАП переменным от генератора, использовался сумматор на операционном усилителе (ОУ) (см. рис. 2.1). Для упрощения обработки данных параметры сумматора были подобраны таким образом, чтобы напряжение на выходе сумматора равнялось сумме сигналов с ЦАП и генератора (с коэффициентом усиления равным 1). Для этого было необходимо выполнить условие баланса:

$$R_{oc}/R_4 = R_3/R_1 + R_3/R_2. \text{ Тогда } U_{\text{вых.}} = U_{\text{вх.1}}K_1 + U_{\text{вх.2}}K_2, \text{ где } K_1 = R_3/R_1, K_2 = R_3/R_2.$$

В нашем случае $R_1=R_2=R_3=R_4= 2 \text{ кОм}$, $R_{oc} = 4 \text{ кОм}$.

$$\text{Тогда: } K_1=K_2=1, U_{\text{вых.}} = U_{\text{вх.1}} + U_{\text{вх.2}}$$

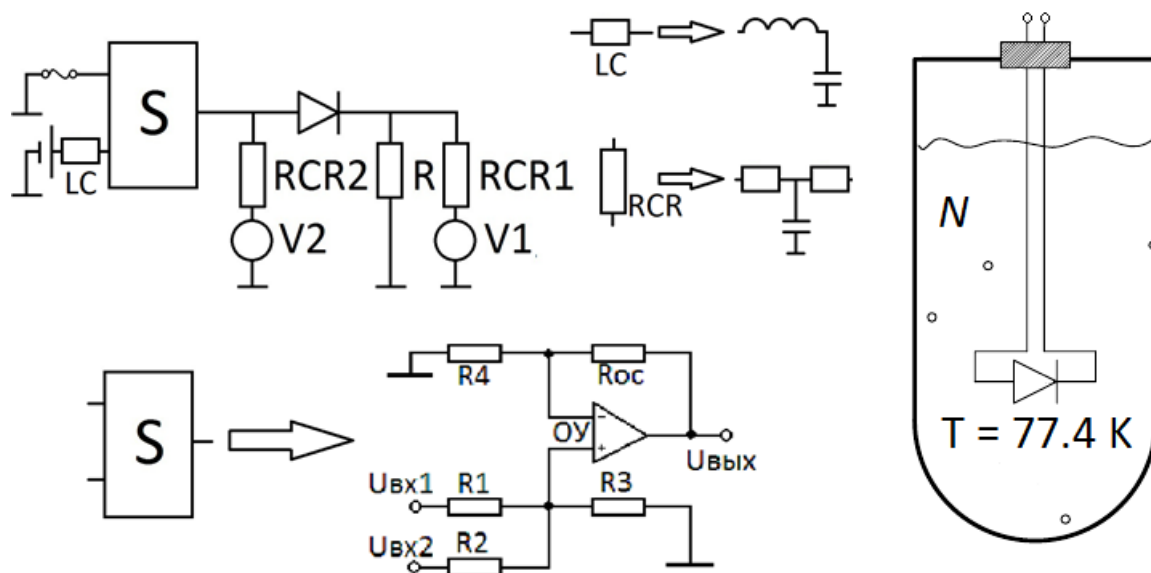


Рис. 2.1. Схема экспериментальной установки.

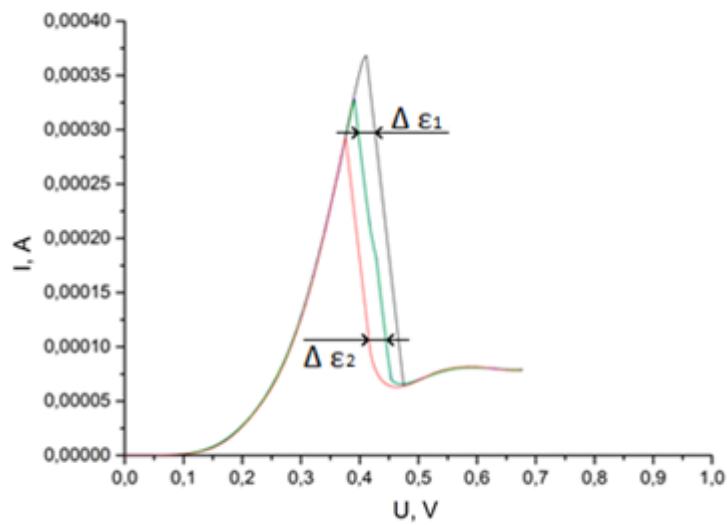
В данной работе ВАХ диода исследовались как при различных параметрах переменного сигнала (амплитуда, частота), так и сопротивлений нагрузки R . ВАХ измерялись при температуре кипения жидкого азота 77.4 K .

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение.

3.1. ВАХ диода при нагрузочных сопротивлениях 39 и 200 Ом.

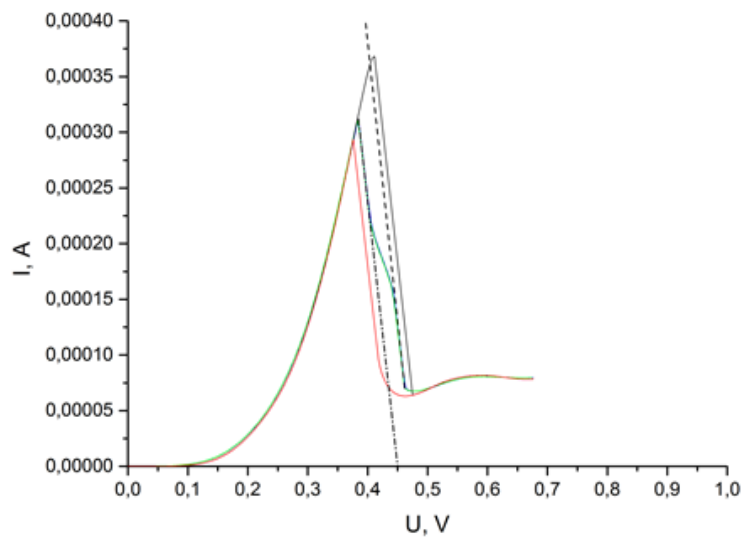
Rload = 200Om, Anoise = 30mV, f = 10kHz

(a)



Rload = 200Om, Aac = 40mV, f = 10kHz

(б)



Rload = 200Om, Aac = 50mV, f = 10kHz

(в)

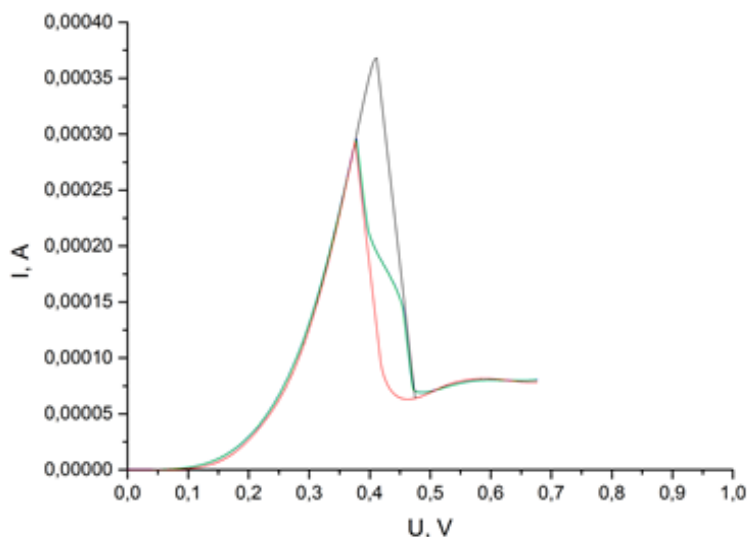


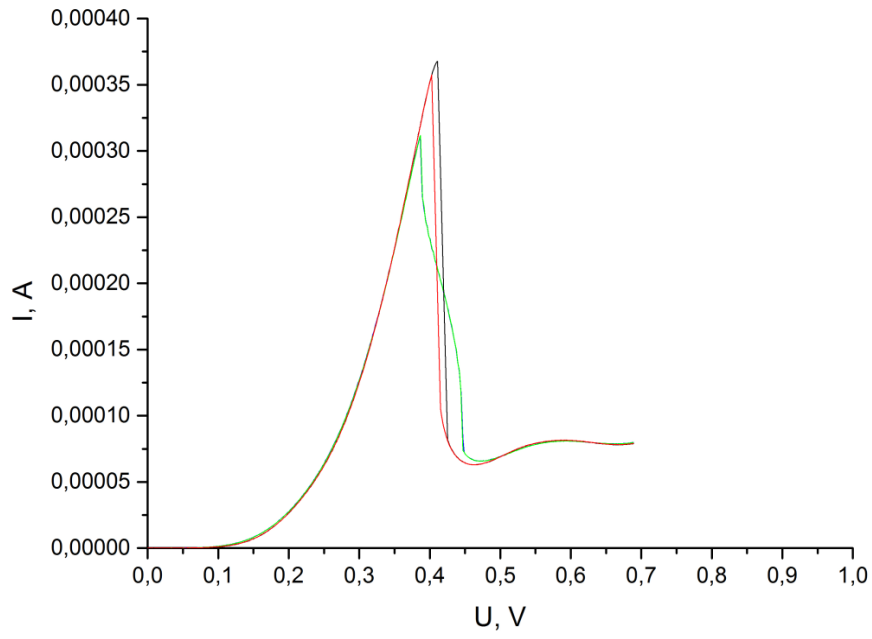
Рис. 3.1. Графики, полученных ВАХ для сопротивления нагрузки 200 Ом, в диапазоне подаваемого переменного сигнала частоты 10 кГц, от 30 до 50 мВ, а) $A_{ac} = 30\text{mV}$, б) $A_{ac} = 40\text{mV}$, в) $A_{ac} = 50\text{mV}$. На всех графиках черные и красные линии – ВАХ без переменного сигнала (с амплитудой переменного сигнала в цепи меньше 1 мВ) в положительной и отрицательной развертке напряжения соответственно, синие и зеленые – аналогично, но при наличии переменного сигнала.

На рис. 3.1 а) указаны экспериментально измеряемые величины $\Delta\epsilon_{1,2}$ (разница в постоянных напряжениях на диоде в точках максимума тока для ВАХ без переменного сигнала и ВАХ с переменным сигналом, индекс 1 для положительной развертки, 2 – для отрицательной).

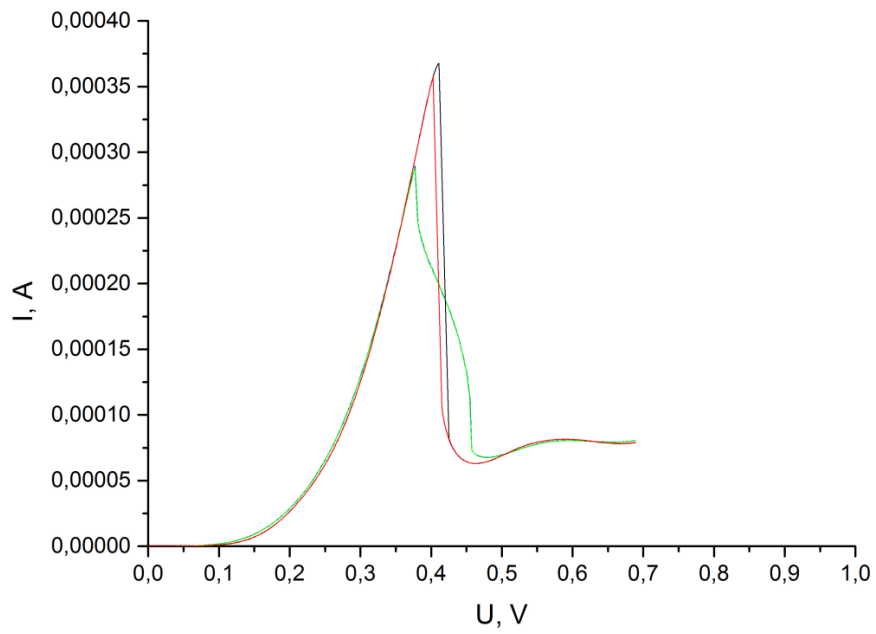
На рис. 3.1 б) штрих-пунктиром построены нагрузочные прямые для ВАХ с переменным сигналом (для ВАХ без переменного сигнала они в точности совпадают с самими ВАХ, т.е. переход с одной ветви ВАХ на другую в этом случае осуществляется строго по нагрузочной прямой). Нагрузочные прямые построены только для рисунка 3.1 б) дабы не нагромождать графики; на всех полученных ВАХ картина аналогична этой.

Также отмечу, что на многих графиках синие и зеленые линии совпадают настолько, что одна из них полностью закрывает другую, в том случае если на графике не видно одну из них, то это значит, что совпадение было практически полным.

Rload = 390m, Aac = 30mV, f = 10Hz



Rload = 390m, Aac = 40mV, f = 10Hz



Rload = 39Om, Aac = 50mV, f = 10Hz

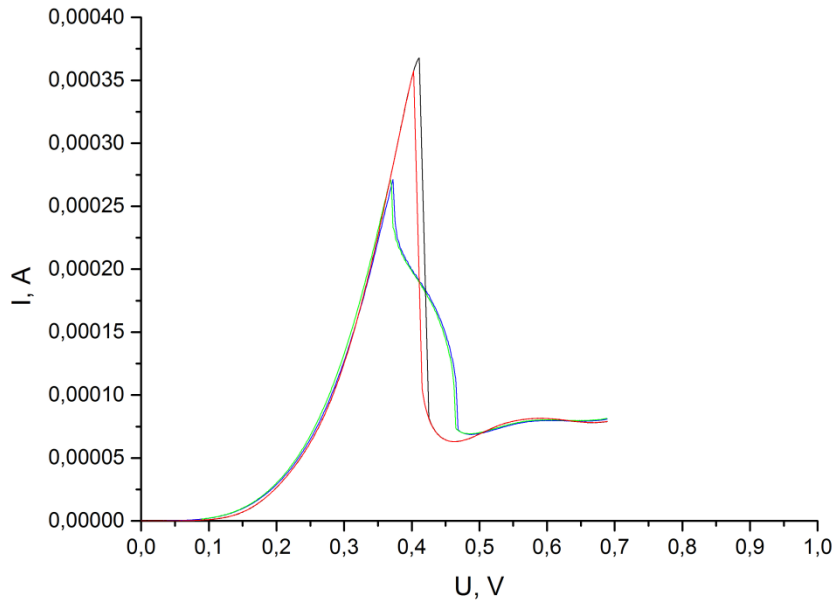


Рис. 3.2. Графики, полученных ВАХ для сопротивления нагрузки 39 Ом, в диапазоне подаваемого переменного сигнала частоты 10 Гц, от 30 до 50 мВ

Видно, что при наличии переменного сигнала пиковые значения тока и напряжения уменьшаются.

Отмечу, что для этих сопротивлений ВАХ были получены в большом диапазоне частот от 10 Гц до 1 МГц и на всех ВАХ картина идентична той, что на рис. 3.1 и рис. 3.2. Экспериментально полученные значения величин $\Delta \epsilon_{1,2}$ приведены в таблице 2.

f ас, Гц	Rнагр = 39 Ом				Rнагр = 200 Ом		
	A ас, мВ	$\Delta \epsilon_1$, мВ	$\Delta \epsilon_2$, мВ		f ас, Гц	A ас, мВ	$\Delta \epsilon_1$, мВ
10Гц	30	27	32	10КГц	30	28	29
	40	37	40		40	38	38
	50	45	47		50	47	48
10КГц	30	26	30	1МГц	30	27	27
	40	36	39		40	37	35
	50	45	46		58	53	53
1МГц	30	25	30	A ас - амплитуда переменного сигнала f ас - частота переменного сигнала			
	40	35	40				
	58	51	57				

Табл. 2. Результаты измерений $\Delta \epsilon_{1,2}$ для нагрузок 39 Ом и 200 Ом.

Для понимания рисунков 3.1,3.2 и табл. 2 необходимо учесть тот факт, что ВАХ были получены не теоретическим расчетом, а именно экспериментально, а это значит, что для их объяснения необходимо ввести в рассмотрение понятие о нагрузочной прямой:

3.2 Нагрузочная прямая, учет вклада переменного сигнала в измерении ВАХ.

Рассмотрим схему, представленную на рис.2.1. Запишем для нее закон Ома:

$$E = U_d + U_{load} = U_d + I_d R_{load} \Rightarrow I_d = (E - U_d) / R_{load}$$

С другой стороны $I_d = f(U_d)$ - т.е. I_d есть некая неизвестная нам функция U_d , которую мы измеряем. Т.о. экспериментальная зависимость I_d от U_d будет найдена из графического решения системы уравнений, а учет вклада переменного сигнала будет осуществляться вводом дополнительного слагаемого во второе уравнение (см. рис. 3.3):

$$\left\{ \begin{array}{l} I_d = f(U_d) \\ I_d = (E - U_d) / R_{нагр.} \end{array} \right. \longrightarrow \left\{ \begin{array}{l} I_d = f(U_d) \\ I_d = (E \pm A_{ac} - U_d) / R_{load} \end{array} \right. \quad (1)$$

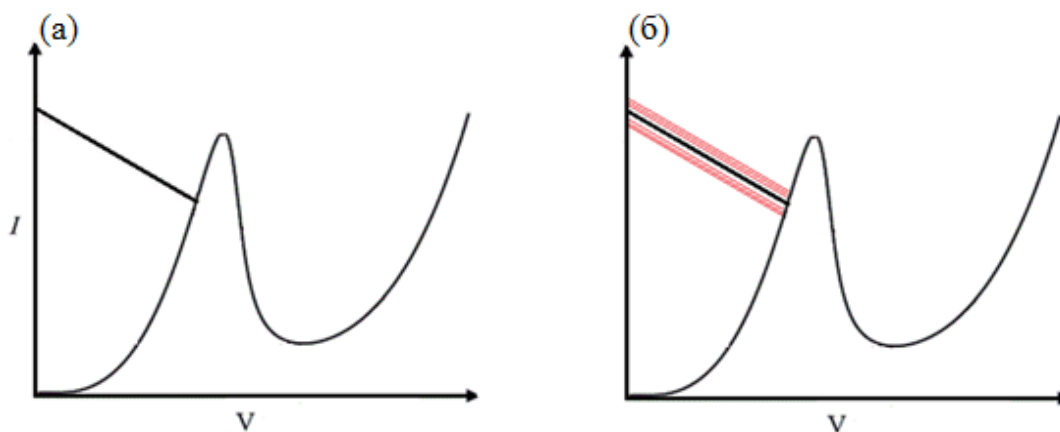


Рис.3.3. Учет переменной составляющей в нагрузочной прямой, а) – нагрузочная прямая без переменного сигнала, б) – с переменным сигналом. Красные прямые соответствуют нагрузочным прямым, смещенным сигналом генератора.

Теперь мы можем объяснить результаты, представленные на рис. 3.1,3.2 и табл. 2 .

3.3. Объяснение изменений пороговых значений тока при небольших нагрузках.

При развертке постоянного напряжения, модулированного переменным сигналом, смещения пиковых значений туннельного тока могут быть объяснены «забросом» нагрузочной прямой за «гребень» ВАХ диода переменной составляющей сигнала (см. рис.3.4).

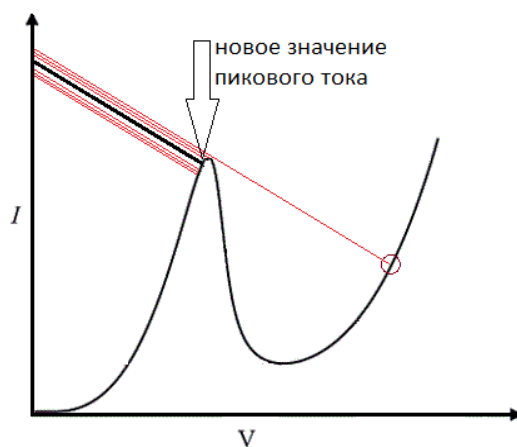


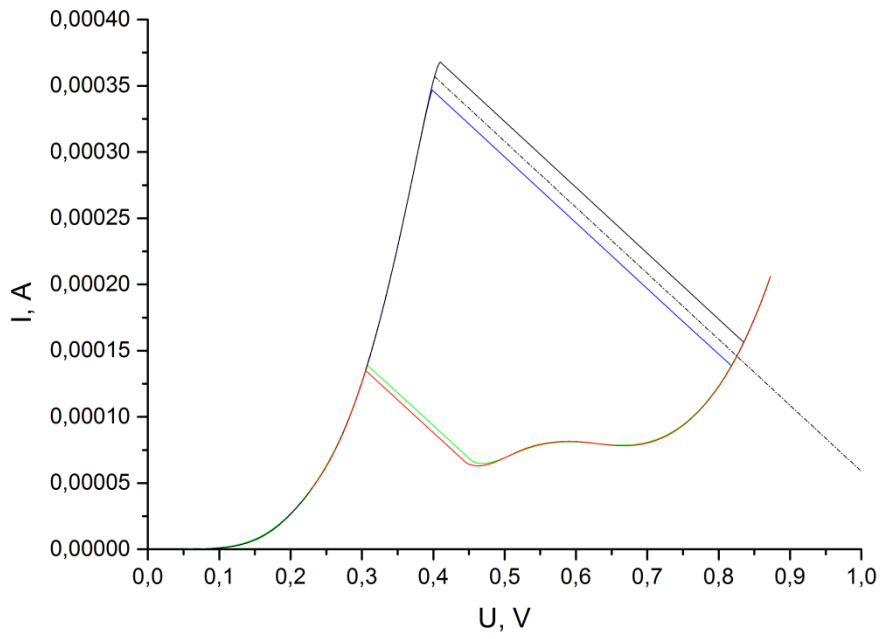
Рис.3.4. Уменьшение пороговых значений тока переменным сигналом.

Действительно, просмотрев таблицу 2, можно убедиться в состоятельности такого объяснения, сравнивая между собой значения переменного сигнала при измерении и величин $\Delta \varepsilon_{1,2}$. С хорошей степенью точности они равны друг другу, что и должно быть, в рамках этой модели.

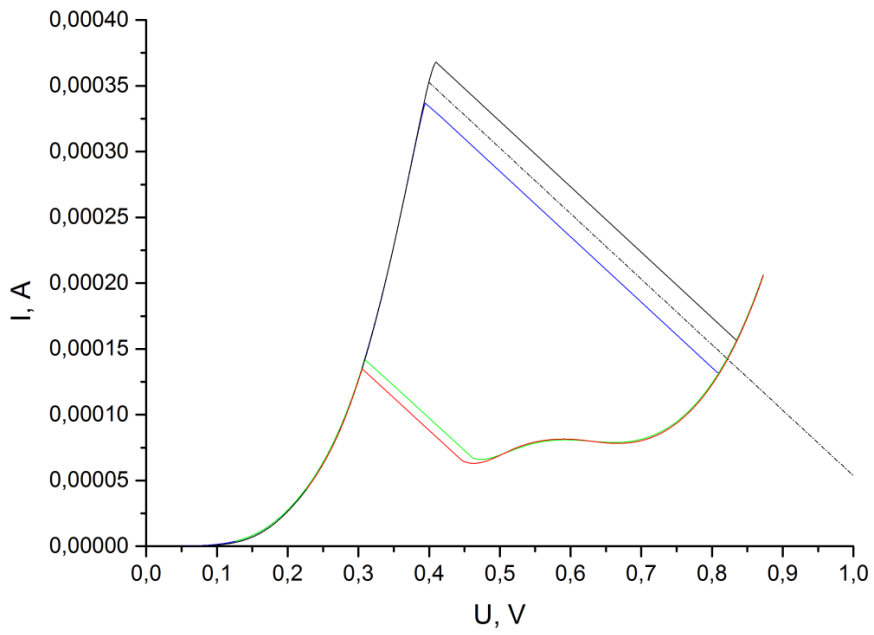
3.4. Измерения ВАХ РТД при больших нагрузках и их обсуждение.

Однако, к нашему удивлению, подобная картина нарушается при больших сопротивлениях нагрузки (в диапазоне частот от 1КГц до 1МГц); в тоже время она сохраняется в диапазоне частот от 10 Гц до 100 Гц.

Rload = 2000Om, Aac = 30mV, f = 1MHz



Rload = 2000Om, Aac = 40mV, f = 1MHz



$R_{load} = 2000\Omega$, $A_{ac} = 56mV$, $f = 1MHz$

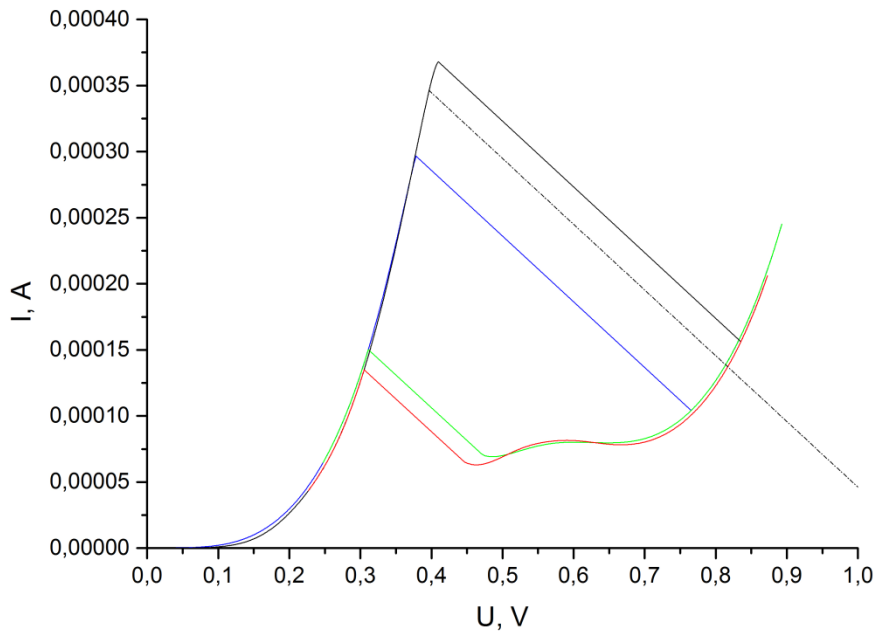


Рис. 3.5. ВАХ диода для нагрузочного сопротивления 2000 Ом, $A_{ac} = 1MГц$. Штрих-пунктиром проведены прямые, по которым должен был бы осуществляться переход с одной ветви ВАХ на другую, в рамках модели, описанной выше.

Видно, что модель, хорошо описавшая изменения ВАХ для нагрузок в 39 Ом и 200 Ом перестает работать для нагрузки 2000 Ом, и частоты сигнала 1 МГц. Однако для сигнала частотой 10 Гц модель снова работает (см. рис. 3.6 и табл. 3).

Rload = 2000Om, Aac = 50mV, f = 10Hz

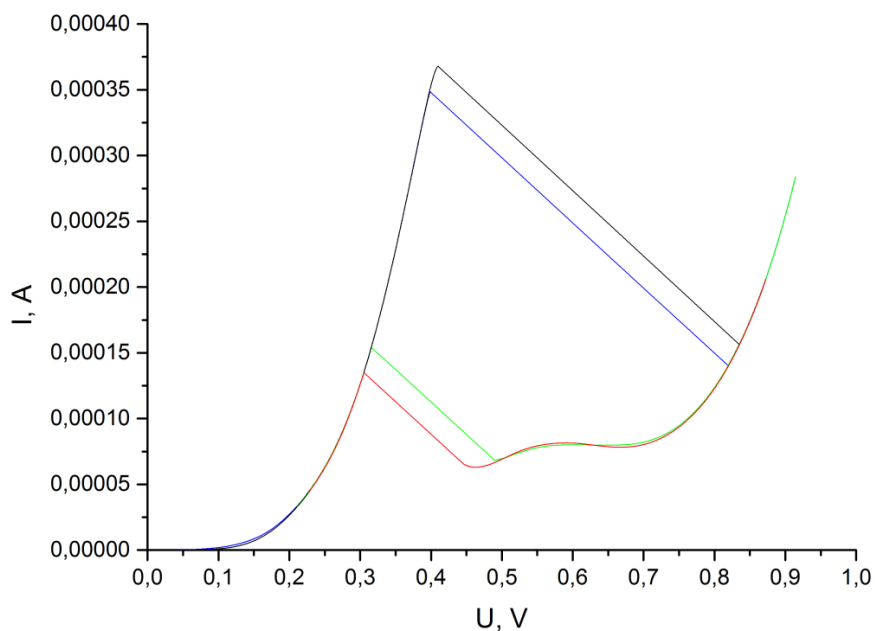


Рис. 3.6. ВАХ диода для нагрузочного сопротивления 2000 Ом, f ac = 10 Гц.

	Rнагрузки 2000 Ом		
f ac	A ac, мВ	$\Delta \epsilon_1$, мВ	$\Delta \epsilon_2$, мВ
10 Гц	50	50	50
1 МГц	58	173	36
	30	53	11
	40	77	19

Табл. 3. Результаты измерений $\Delta \epsilon_{1,2}$ для нагрузки 2000 Ом.

Чем можно объяснить ВАХ при больших нагрузках?

Итак, суть эффекта при больших нагрузках сводится к тому, что мы наблюдаем переход с одной ветви ВАХ на другую значительно раньше, чем должны бы были в рамках описания приведенного в пунктах 3.1, 3.2 (назовем этот эффект Уширением Нагрузочной Прямой, УНП), чем можно объяснить такое отклонение от этой модели?

Первое возможное объяснение это влияние генерации, появляющейся тогда, когда нагрузочная прямая проходит область ОДС.

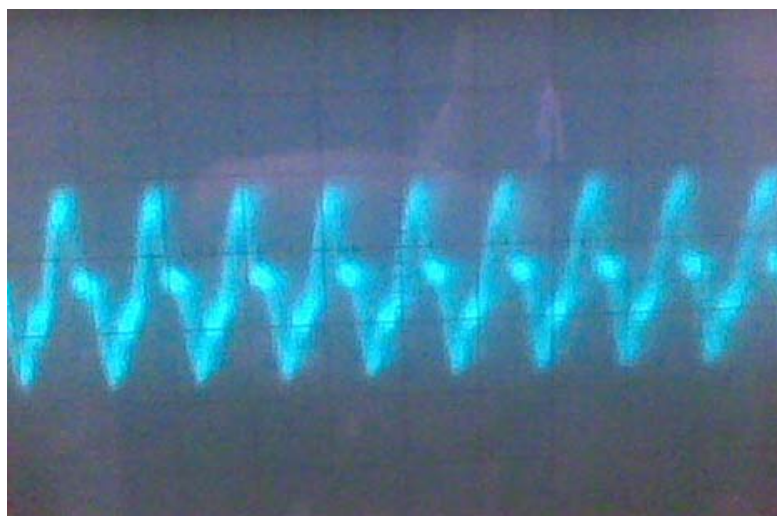


Рис. 3.7. Генерация переменного сигнала в измерительной цепи при смещении РГД в область ОДС.

Действительно, амплитуда генераций, в зависимости от условий эксперимента меняется, но в целом это десятки мВ, и могли бы при определенных условиях обеспечить в сумме с сигналом от генератора значительное уменьшение пиковых значений тока (см. табл. 3). Но, генерации наблюдаются только, когда нагрузочная кривая проходит область ОДС и не влияет на точку максимума тока, т.к. их появление возможно только тогда, когда мы эту точку уже прошли. Также отмечу, что для больших нагрузок (в частности для $R = 2000 \text{ Ом}$) генерации в эксперименте не наблюдаются вовсе, что связано с тем, что коэффициент наклона нагрузочной прямой не позволяет попасть в область ОДС. Т.о. генерации не могут обеспечить этого эффекта.

Второе возможное объяснение сводится к влиянию паразитной емкости или индуктивности в нагрузке. Действительно, эффект отклонения от модели УНП, наблюдался при больших частотах (1МГц) и сопротивлениях (2000 Ом), т.е. если представить сопротивление нагрузки как параллельное соединение сопротивления

нагрузки и паразитной емкости, последовательно соединенное с паразитной индуктивностью (см. рис. 3.8), то это изменит сопротивление нагрузки (особенно на больших частотах).

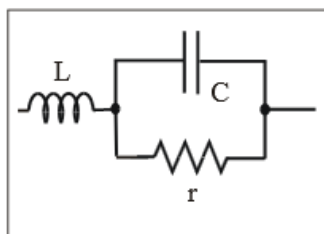


Рис. 3.8. Паразитные емкость и индуктивность в нагрузке.

В таком случае на диоде будет падать больше (или меньше, в зависимости от самих величин $L_{\text{пар}}$ и $C_{\text{пар}}$) переменного напряжения. Т.е. в уравнении $I_d = (E \pm A_{\text{ac}} - U_d) / R_{\text{load}}$ слагаемое U_d может эффективно увеличиться или уменьшиться на какую-то величину. Но эта добавка не может (даже в предельном случае $L \ll 1$, $C \gg 1$) превосходить амплитуду переменного сигнала, а на рис. 3.5 мы видим, что при амплитуде переменного напряжения $A_{\text{ac}} = 56$ мВ, $\Delta \varepsilon_1 = 173$ мВ, т.е. вклад от этого эффекта должен быть более чем в два раза больше амплитуды A_{ac} .

Т.о. паразитные емкость или индуктивность не могут отвечать за отклонение от модели УНП.

Третьим, и с моей точки зрения, наиболее правильным возможным объяснением такого отклонения может быть неоднородное протекание тока в РТД. В работе [11] упоминается о проблемах, возникших у исследователей при описании ВАХ РТД в рамках эквивалентных схем. Оказалось, что если по пороговому сопротивлению (некий параметр исследовавшийся в данной работе) найти значения всех элементов эквивалентной схемы и

затем использовать эти значения для вычисления пороговой частоты диода, то реальная (экспериментально измеренная) и теоретически рассчитанная из эквивалентной схемы пороговые частоты не сходятся больше чем на порядок.

В этой статье приводилось возможное объяснение такого несоответствия неоднородным распределением тока вдоль РТД (т.е. уменьшением эффективной площади самого РТД и, следовательно, ёмкости в эквивалентной схеме). Также на возможность существенного вклада неоднородного распределения тока при работе с РТД указывали и ряд других работ (как экспериментальных, так и теоретических).

Допустим, что в нашем случае ток распределяется неоднородно и видимо, по каким-то причинам, для этого необходимы соответствующие параметры внешней измерительной цепи. Тогда если при каком-то (не пиковом) значении напряжении на диоде потечет туннельный ток через небольшую область РТД, то это увеличит эффективное падение напряжения на диоде на величину $U_1 = I_1 R_d$, это в свою очередь, может привести к переходу в туннелирующее состояние и других областей диода. Таким образом, будет осуществлен переход с одной ветви на другую, при значениях напряжения на диоде меньше пикового. Т.е. как раз и обеспечит отклонение от модели УНП.

4. Заключение.

В пункте 3.5 было приведено объяснение полученных зависимостей для большой нагрузки в рамках модели неоднородного протекания туннельного тока (в литературе можно встретить термин шнурование тока). Однако в РТД такое явление практически не исследовалось и для прояснения физики этого эффекта требуются дальнейшие исследования.

5. Выводы.

Проведены исследования прохождения переменного сигнала через РТД в широком диапазоне частот. Для малых нагрузок были получены результаты, хорошо описываемые в рамках модели уширения нагрузочной прямой.

Для объяснения особенностей в ВАХ РТД при большой нагрузке была предложена модель, объясняющая эти особенности (шнурование тока).

6. Список литературы.

- [1] L. Esaki // Phys. Rev, **109**, 603 (1958).
- [2] Иогансен // ЖЭТФ.-1963.-Т.45, вып. 2.-с 207-213.
- [3] Иогансен // УФН.-1965.-Т.86, вып. 1.-с 175-179.
- [4] L. L. Chang, L. Esaki, R. Tsui // Appl. Phys. Lett., **24**, 593 (1974).
- [5] S. Luryi // Appl. Phys. Lett., **47**, 490 (1985).
- [6] T. Weil, B. Vinter // Appl. Phys. Lett., **50**, 1281 (1987).
- [7] M. Jonson, A. Grincwajg // Appl. Phys. Lett., **51**, 1729 (1987).
- [8] Brown E.R., Söderström J.R., Parker C.D., Mahoney L.J., Molvar K.M., McGill T.C. Oscillations up to 712 GHz in In-As/AlSb resonant-tunneling diodes // Appl. Phys. Lett. 1991. V.58. P. 2291.
- [9] Brown E.R., Parker C.D., Sollner T.C.L.G. Effect of quasi-bound state lifetime on the oscillation power of resonant-tunneling diodes // Appl. Phys. Lett. 1989. V. 54. P. 934.
- [10] Mattia J.P., McWhorter A.L., Aggarwal R.J., Rana F., Brown E.R., Maki P. Comparison of a rate-equation model with experiment for the resonant tunneling diode in scattering-dominated regime // J. Appl. Phys. 1998. V. 84. No. 2. P. 1140-1148.
- [11] Попов В.Г. Токовые неустойчивости в резонансно-туннельных диодах. // Успехи современной радиоэлектроники. 2010 вып. 6.-с 23-38.