Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)
Радиофизический факультет
Кафедра полупроводниковой электроники (КПЭ)

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ В ГЭК
Руководитель ООП
д-р физ.-мат. наук, профессор
_____ В. П. Гермогенов
19 июня 2021 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

ВЛИЯНИЕ АКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО КОНТУРА НА ПЕРЕХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИ КОММУТАЦИИ ЛАВИННОГО *S*-ДИОДА

по основной образовательной программе подготовки бакалавров
направление подготовки
03.03.03. – Радиофизика

Гарина Арина Евгеньевна

Руководитель ВКР
кандидат физ.-мат. наук, зав. лаб.
_____И. А. Прудаев
подпись
«10» июня 2021 г.

Автор работы
студент группы №773
_____А. Е. Гарина
подпись

Томск – 2021

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)
Радиофизический факультет
Кафедра полупроводниковой электроники (КПЭ)

УТВЕРЖДАЮ
Руководитель ООП
д-р физ.-мат. наук, профессор
_____ В.П. Гермогенов
21 октября 2020 г.

ЗАДАНИЕ
по подготовке ВКР бакалавра
студенту Гариной Арине Евгеньевне группы № 773

1. Тема ВКР: Влияние активного сопротивления колебательного контура на переходные характеристики при коммутации лавинного S-диода.

2.Срок сдачи студентом выполненной ВКР:
а) на кафедре 14.06.2021,
б) в ГЭК 23.06.2020.

3. Краткое содержание работы: Работа направлена на исследование переходных процессов, протекающих в сверхбыстрых переключателях – лавинных S-диодах из арсенида галлия. Необходимо провести измерения переходных характеристик при замыкании S-диода в схеме колебательного контура с различными активными сопротивлениями нагрузки. Целью работы является выявление закономерности влияния сопротивления нагрузки в диапазоне 1-100 Ом на переходной процесс переключения лавинного S-диода из закрытого в открытое состояние.

4. Календарный график выполнения ВКР:

а) изучение литературы	19.10.2020–20.12.2020
б) проведение эксперимента	19.10.2020–01.05.2021
в) анализ результатов	01.04.2020–15.05.2021
г) написание ВКР	15.05.2021–01.06.2021
д) подготовка презентации работы	(01–12).06.2021

5. Дата выдачи задания «22» октября 2020 г.

Руководитель ВКР –
кандидат физ.-мат. наук,
зав. лаб. НППЭ _____ Прудаев И.А.

Задание принял к исполнению _____ Гарина А.Е.

АННОТАЦИЯ

Выпускная квалификационная работа 28 страниц, 17 рисунков, 1 таблица, 11 источников.

ИМПУЛЬСНЫЙ ЛАВИННЫЙ *S*-ДИОД, АРСЕНИД ГАЛЛИЯ, АКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ, RLC-КОНТУР, ПЕРЕХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, СВЕРХБЫСТРОЕ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ.

Цель работы: Исследование процесса переключения *S*-диода в схемах с различными нагрузками.

Измерить напряжение и время переключения на *S*-диодах при различных сопротивления нагрузки.

Выявить закономерность изменения напряжения на *S*-диодах.

В результате проведенной работы были сделаны следующие выводы:

1) При переключении лавинного *S*-диода из закрытого в открытое состояние в RLC-цепи происходит сложный колебательный процесс, что не связано с номиналами реактивных элементов цепи, но обусловлено динамическим изменением активного сопротивления лавинного *S*-диода.

2) Снижение активного сопротивления в RLC-цепи (повышение коммутируемого тока) приводит к повышению остаточного сопротивления лавинного *S*-диода в открытом состоянии.

ОГЛАВЛЕНИЕ

АННОТАЦИЯ 3
ВВЕДЕНИЕ 5
1 Лавинный *S*-диод (литературный обзор) 7
1.1 Импульсный лавинный *S*-диод 7
1.2 Колебательный контур 8
1.3 Согласование сопротивлений 10
Лавинный процесс в *S*-диодах 12
Теория коллапсирующих доменов Ганна. Механизм переключения 12
2 Методика эксперимента 15
2.1 Используемые партии *S*-диодов 15
2.2 Схема измерительной платы 17
3 Результаты и их обсуждение 20
3.1 Временные зависимости напряжения лавинных *S*-диодов 20
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 26
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ 27

ВВЕДЕНИЕ

Арсенид галлия является одним из основных и наиболее перспективных материалов микро- и наноэлектроники. У GaAs большая ширина запрещённой зоны (при комнатной температуре (300 К) порядка 1,424 эВ), высокая подвижность носителей заряда (у электронов при комнатной температуре - 8500 см²/ (В·с)) и широкая область изменения параметров при легировании различными примесями. Благодаря этому арсенид галлия используется в быстродействующей электронике. В полупроводниковой электронике используется легирование мелкими примесями, потому что легирование глубокими примесями приводит к уменьшению подвижности и времени жизни носителей заряда. В современной микроэлектронике, которая построена на полупроводниковой основе, существует важная задача: получение импульсных токов за время, равное пико- и наносекундам. Помощь в решении этой задачи оказывает использование лавинных *S*-диодов. Работа некоторого количества полупроводниковых приборов основана на использовании особенных свойствπ-υ-n перехода. Эти свойства такими физическими явлениями, как инжекция, ударной ионизацией носителей, туннелирование и т.д. В данной работе будет рассматриваться процесс переключения *S*-диода и изменение напряжения на нем при изменении сопротивления нагрузки. Ранее при измерении характеристик *S*-диода не обращалось должное внимание на нагрузку, и предполагалось, что независимо от того, какая нагрузка, переключение происходит с одним и тем же временем. Задачей работы ставим наблюдение того, как на разных нагрузках меняется время переключения диода из закрытого в открытое состояние. Дальнейшее изучение, обработка данных о физических процессах, протекающих в данных структурах, является важной целью, достижение которой приведет к универсализации работы диодов как с лидарами, так и с лазерными сборками и оптическими дальномерами.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Изучение литературы по теме исследования;
2. Сборка измерительной схемы;
3. Измерение напряжения и времени переключения на *S*-диодах при различных сопротивления нагрузки;
4. Анализ полученных экспериментальных результатов.

1 Лавинный *S*-диод (литературный обзор)

Управлять свойствами различных материалов можно путем легирования. От примеси, которой материал легируют, зависит, каким типом проводимости будет обладать материал, какая будет концентрация носителей заряда и их диффузионная длина. Примеси, уровни которых отстоят от краев разрешенных зон на величину, примерно равную ширине запрещенной зоны, особо интересны, так как они создают глубокие уровни в самой структуре, которые, в свою очередь, позволяют создавать переходы, которые имеют отличительные черты, которые можно использовать в микро- и наноэлектронике. Особенность заключается в том, что расположенный на *n*-подложке π-ν- переход, состоящий из высокоомного слоя *p*-типа (π-слоя), высокоомного слоя *n*-типа (ν-слоя) и области объёмного заряда (ООЗ) на границе между ними, проявляет одновременно свойства объёмного материала и электронно-дырочного перехода. [1]

1.1 Импульсный лавинный *S*-диод

Лавинный импульсный *S*-диод – прибор на основе полупроводниковых π-ν-*n* - структур, который работает в режиме лавинного пробоя при обратном смещении. Участок отрицательной дифференциальной проводимости (ОДС) на обратной ветви вольт-амперной характеристики (ВАХ) формируется на протяжении перезарядки глубоких центров с последующим формированием и распространением волн ударной ионизации. [3] В настоящий момент разработаны диоды со сверхбыстрыми временами переключения (пико- и наносекундные времена переключения). Этот прибор не имеет аналогов, разрабатывался и производился в Томске. На данный момент он защищен тремя патентами. Данные приборы ввиду своего быстродействия используются в качестве сильноточных электронных ключей в схемах питания полупроводниковых лазерных диодов. Схемы используются для производства лидаров, полупроводниковых лазеров, в

устройствах целеуказания и дальнометрии военного назначения, где требуется получение коротких сигналов высокой мощности.

1.2 Колебательный контур

В современной радиотехнике и электронике используются разнообразные электрические колебательные системы. Самая элементарная — колебательный контур. Колебательным контуром называется электрическая цепь, состоящая из соединенных между собой емкости C и индуктивности L (рис. 1). Реальный колебательный контур так же включает активное сопротивление R, обусловленное потерями энергии непосредственно в контуре. [6]

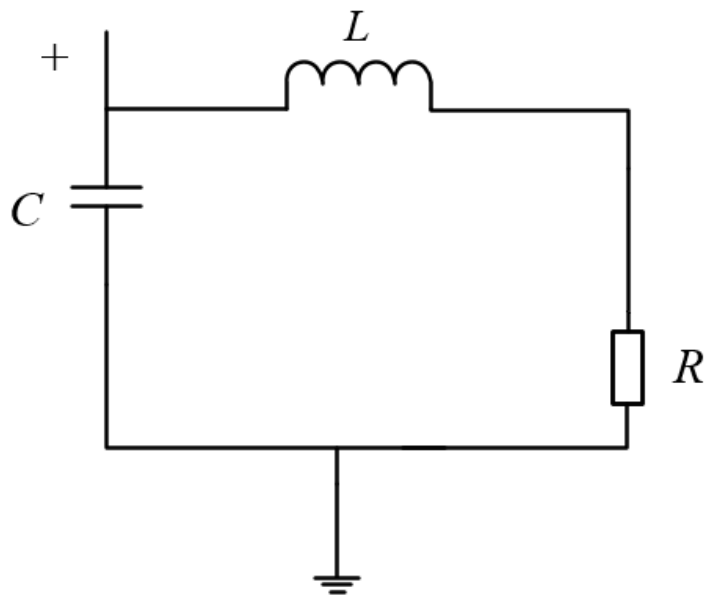

Рисунок 1– Схематическое изображение колебательного контура

Энергия заряженного конденсатора:

$$W_C = \frac{C \cdot U^2}{2}$$

Если к конденсатору через ключ подключить индуктивность (без потерь), то в получившейся электрической цепи потечет ток, конденсатор будет постепенно

разряжаться, а вокруг катушки индуктивности образуется магнитное поле. Поле в катушке будет нарастать, вследствие ЭДС самоиндукции начнет препятствовать росту тока и магнитного поля, поэтому разряд конденсатора и нарастание тока в цепи произойдёт за некоторое время, а не моментально. Постепенно конденсатор разрядится, и вся электрическая энергия перейдет в магнитную.

$$W_L = \frac{L \cdot I^2}{2}$$

После разрядки конденсатора поле катушки постепенно начинает убывать, на выводах индукции наводится ЭДС, а конденсатор начнет заряжаться с противоположным знаком. Когда конденсатор полностью зарядится, он вновь начнется разряжаться, и весь процесс повторится. Если потери в цепи отсутствуют, полная энергия останется постоянной, а амплитуда колебаний неизменной. Такие колебания в LC контуре называются незатухающими гармоническими колебаниями. Ток в таком контуре меняется по синусоидальному закону с частотой ω_0.

Одним из характерных параметров колебательного контура является его волновое сопротивление. Это соотношение между напряжением на контуре и током в нем при совершающихся свободных колебаниях, которое можно установить из равенства энергий магнитного поля катушки индуктивности и электрического поля конденсатора.

$$W_C = W_L$$

Решив данное уравнение относительно I, получим выражение

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}},$$

которое описывает величину волнового сопротивления контура.

Однако стоит заметить, что реальный колебательный контур всегда содержит активное сопротивление, из-за чего количество энергии в нем уменьшается и

колебания затухают. Чем больше сопротивление – тем быстрее затухают колебания. [7]

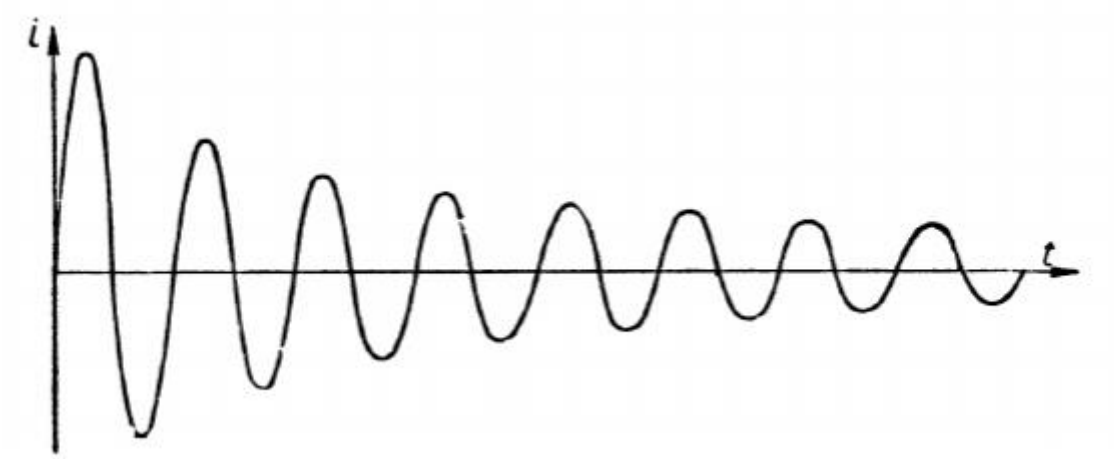

Рисунок 1.2– Характер колебательного процесса в контуре с потерями [7]

1.3 Согласование сопротивлений

Согласованным режимом является такой режим работы электрической цепи, когда на нагрузке, подключенной к источнику, выделяется максимальная мощность. Условием возникновения данного режима является равенство сопротивления нагрузки внутреннему сопротивлению источника для цепей с постоянным током, или равенство собственного импеданса источника комплексному импедансу нагрузки для цепей переменного тока.

Для реальных источников электроэнергии с определенным внутренним сопротивлением справедливо утверждение, что чем выше сопротивление нагрузки, выделяемая на ней мощность, сначала нелинейно растет, достигает пик выделяемой на нагрузке мощности и с дальнейшим увеличением сопротивления нагрузки нелинейно снижается (Рис. 1.3).

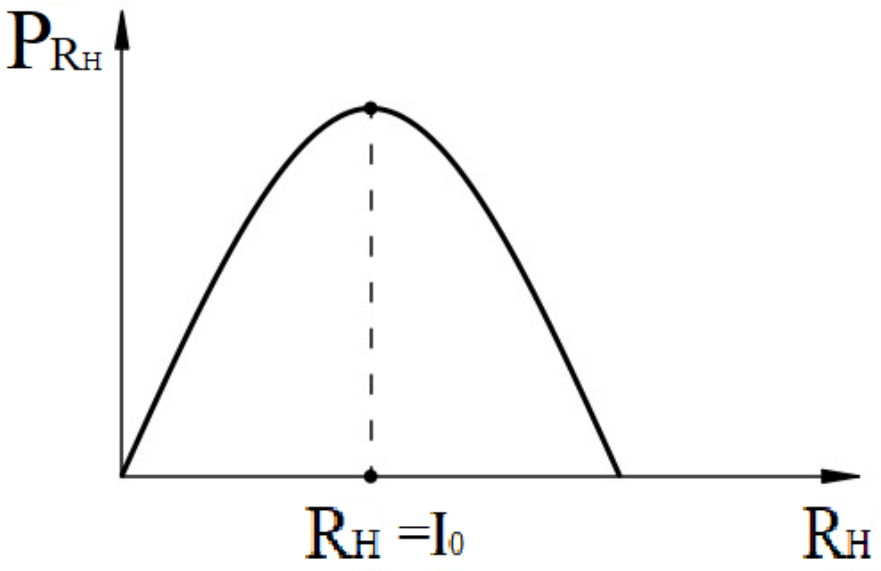

Рисунок 1.3 – Согласование сопротивлений

Это связано с тем, что ток источника связан не только с сопротивлением нагрузки R, но и с собственным сопротивлением источника r:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}$$

С целью согласования нагрузки и источника, выбирают именно такое соотношение между внутренним сопротивлением источника и сопротивлением цепи нагрузки, чтобы система в итоге проявляла бы именно те свойства, которые от нее для конкретной задачи требуются. Нас интересует согласование по волновому сопротивлению.

В теории длинных линий и в СВЧ технике это особо значимый тип согласования. При согласовании по волновому сопротивлению, в линии передачи самый максимальный коэффициент бегущей волны.

При согласовании по волновому сопротивлению, волновое сопротивление нагрузки равно внутреннему сопротивлению источника волны.

$$Z_0 = r$$

Применительно к альтернативной энергетике будущего, в которой источник энергии обладает особыми индивидуальными характеристиками, необходимо обеспечить согласованный режим работы источника и приемника. Достижимо это

путем изготовления приемника, подходящего своими характеристиками к данному источнику, и преобразовывающего полученную энергию в нужный для нагрузки вид.

Лавинный процесс в S-диодах

При подаче на диод обратного смещения напряжение пробоя π–ν-перехода почти уравнивается с напряжением переключения из высокоомного состояния в низкоомное. [2] При этом температурные зависимости этих напряжений тоже совпадают. Участок отрицательного дифференциального сопротивления на обратной ветви вольт-амперной характеристики описывается развитием лавинного пробоя. Носители заряда начинают ускоряться при превышении критического значения напряженности поля в области пространственного заряда, приобретая при этом энергию. Достигнув определенного значения энергии ($E_{\text{и}} = 1{,}5Eg$), возникает процесс выбивания носителями заряда валентных электронов у атома полупроводника. В процессе ударной ионизации образуется пара свободных носителей заряда (электрон и дырка). После одного процесса УИ получается три «горячих» носителя заряда, которые создают новые пары электронов и дырок. [5]

Теория коллапсирующих доменов Ганна. Механизм переключения

Домены Ганна - это динамические неоднородности, являющиеся областью пространственного заряда и связанные с флуктуацией концентрации свободных носителей заряда. Их поле значительно больше остальной части полупроводниковой среды, а также меньше концентрация носителей. Теория формирования доменов Ганна и их стремительное сужение за счет ударной ионизации в сильном поле и образование положительной ОС между напряжённостью электрического поля и концентрацией захваченных в побочную долину носителей заряда через активную область связана со сверхбыстрым

переключением π–ν–n-структуры, которое происходит за меньшее время, чем время пролета НЗ через активную область. Переход некоторого количества электронов в верхнюю подзону приводит к увеличению сопротивления участка полупроводникового образца, следовательно, увеличивается электрическое поле на этом участке и увеличивается количество «горячих» электронов.

Движение «горячих» и «холодных» электронов приводит к формированию двойного подвижного электрического слоя зарядов – домена. Это дополнительно увеличивает напряженность поля в доменной области и способствует переходу электронов в верхнюю долину. Формируется домен до тех пор, пока все электроны не станут «горячими» и не произойдет выравнивание дрейфовых скоростей электронов в домене и за его пределами. Время формирования домена

$$t_{\text{ф}} = 10^{-12} - 10^{-13} \text{ с.}$$

Переключение данной структуры неоднородно, и приводит к возникновению токовых шнуров. Быстрое уменьшение ширины движущихся доменов Ганна и увеличение амплитуды домена для активного напряжения на коллекторе способствует сверхбыстрому переключению структуры. Чем выше амплитуда домена, тем выше скорость лавинного умножения. Новые домены постоянно генерируются вблизи катода, а после они распространяются к контакту анода и там поглощаются. Пространственная плотность доменов уменьшается слева направо. Это описывается в основном последовательностью генерации доменов, а не изменением скорости распространения, так как домены генерируются при увеличении тока и времени. Когда эти домены приближаются к контакту анода, домены «отмечают» более длинные пространственные интервалы между ними в момент их генерации. В определенных случаях движущаяся область исчезает в пределах n-области, прежде чем домен достигнет контакта с анодом. Это также влияет на интервалы между конкретными доменами. Так же на интервалы влияет история изменений скорости во время распространения доменов. [11]

Генерация лавинных доменов Ганна вызывается собственной положительной обратной связью в GaAs, который работает в режиме лавинного умножения. Эти домены перемещаются через область к аноду и возникает электронно-дырочная

плазма между доменами. Так как присутствует отрицательная дифференциальная подвижность электронов, то происходит сужение основных областей и возрастание амплитуды доменов. Особенно хорошо это видно при высокой плотности носителей заряда. Лавины в доменах умножаются, что приводит к филаментации, а увеличение плотности носителей увеличивает амплитуду домена, и, как следствие, скорость генерации лавин.

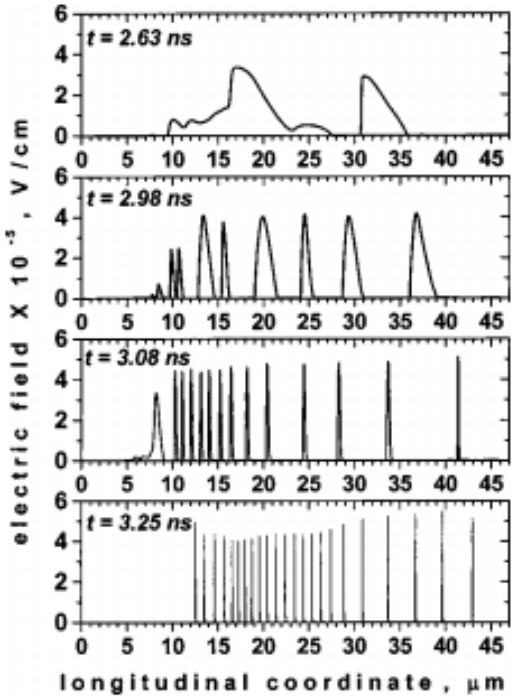

Рисунок 1.3 –Профили электрического поля,
связанные с переходным процессом [11]

2 Методика эксперимента

2.1 Используемые партии *S*-диодов

Кристаллы *S*-диодов изготавливались при помощи вертикальной технологии с омическими контактами на n^+-слое и со стороны подложки (Рис. 2.1). В качестве омических контактов использовался слои AuGe, которые были нанесены с обеих сторон структуры.

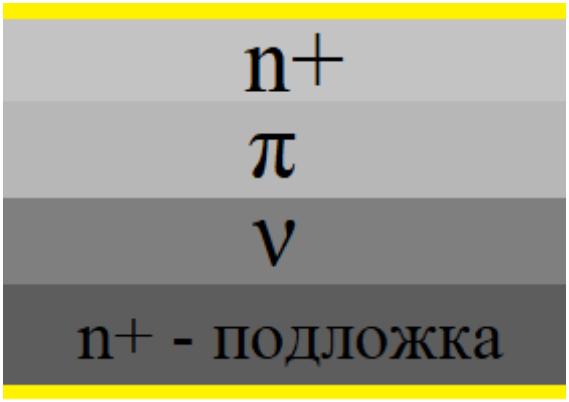

Рисунок 2.1 – Схематическое изображение лавинного *S*-диода

Все образцы эпитаксиальных структур были получены при помощи хлорид-гидридной газофазной эпитаксии (HVPE)GaAs без примеси железа. В качестве мелкой примеси использовалась сера. После этого проводилась диффузия глубокого акцептора. В качестве глубокого акцептора использовали железо. При диффузии железа из любого источника в *n*-GaAs в результате компенсации исходных доноров глубокими акцепторами происходит образование высокоомного слоя, включающего π- и ν-области.

Для всех *S*-диодов концентрация электронов в исходном слое была $3.5 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$. Концентрация железа в π-слое составляла $(2\text{-}8) \cdot 10^{16}$ см$^{-3}$, предельная растворимость железа в арсениде галлия $1 \cdot 10^{17}$ см$^{-3}$. Концентрация дырок в π-слое равнялась приблизительно $1 \cdot 10^{11}$ см$^{-3}$. Удельное сопротивление слоёв составляло

$1 \cdot 10^5$ Ом·см^2. Толщина n^+-слоя составляла 5 мкм, толщины и концентрации свободных носителей в слоях π- и ν - типов представлены в таблице 1.

Полученные пластины резали на кристаллы размерами 1800x900 мкм при помощи дисковой резки на оборудовании ADT Vectus 7100.

Таблица 1 – Толщины и концентрации свободных носителей в структуре.

Обозначения партии *S*-диодов	Толщина π-слоя, мкм	Толщина ν-слоя, мкм	Концентрация электронов в ν-слое, см$^{-3}$
Э-84	11	11	$1.5 \cdot 10^{16}$
Э-513	5	10	$2 \cdot 10^{16}$
As67 (288)	9.5	9.5	$1.5 \cdot 10^{16}$
As70	11	16	$0.8 \cdot 10^{16}$
As69 (299)	10.5	14.5	$1 \cdot 10^{16}$

2.2 Схема измерительной платы

Переходные характеристики снимались осциллографом со схемы, представленной ниже.

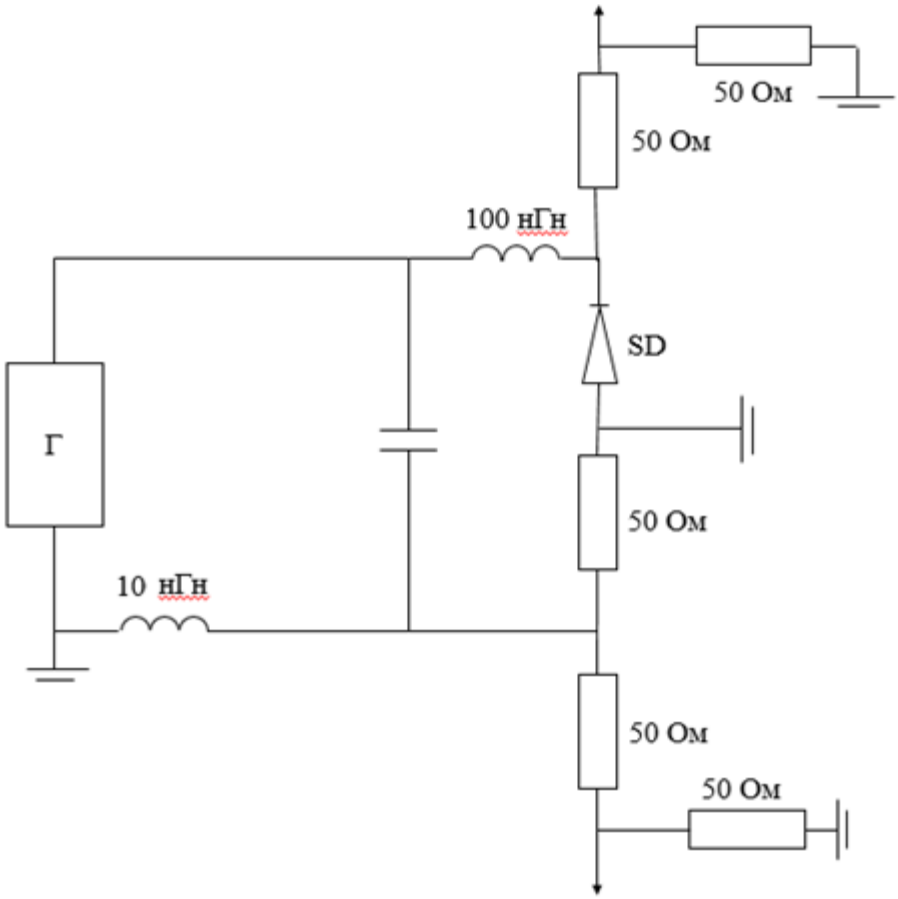

Рисунок 2.2 – Схема измерительной платы

Эксперимент производился на установке, изображенной на рисунке 2.3. *S*-диод располагался на измерительной плате, на которую поступало импульсное напряжение.

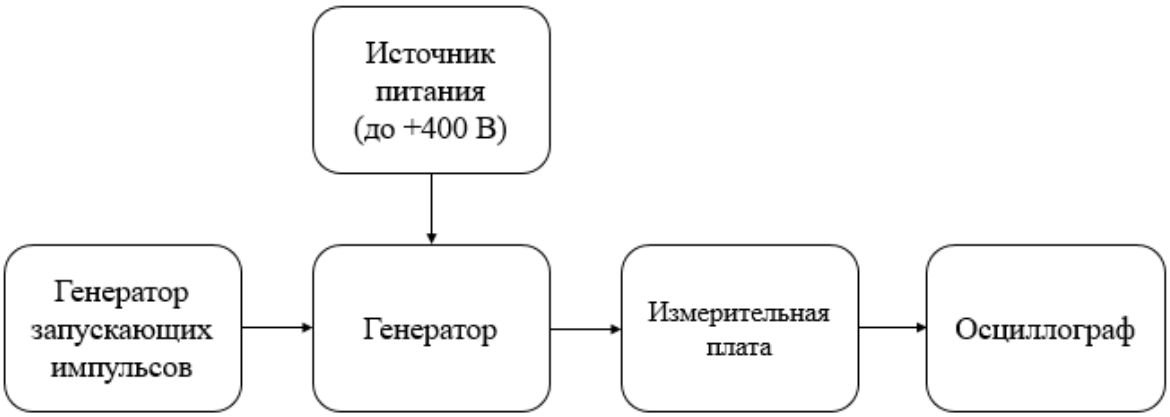

Рисунок 2.3 – Схематическое изображение измерительной установки

Измерительная схема представлена на рисунке 2.4.

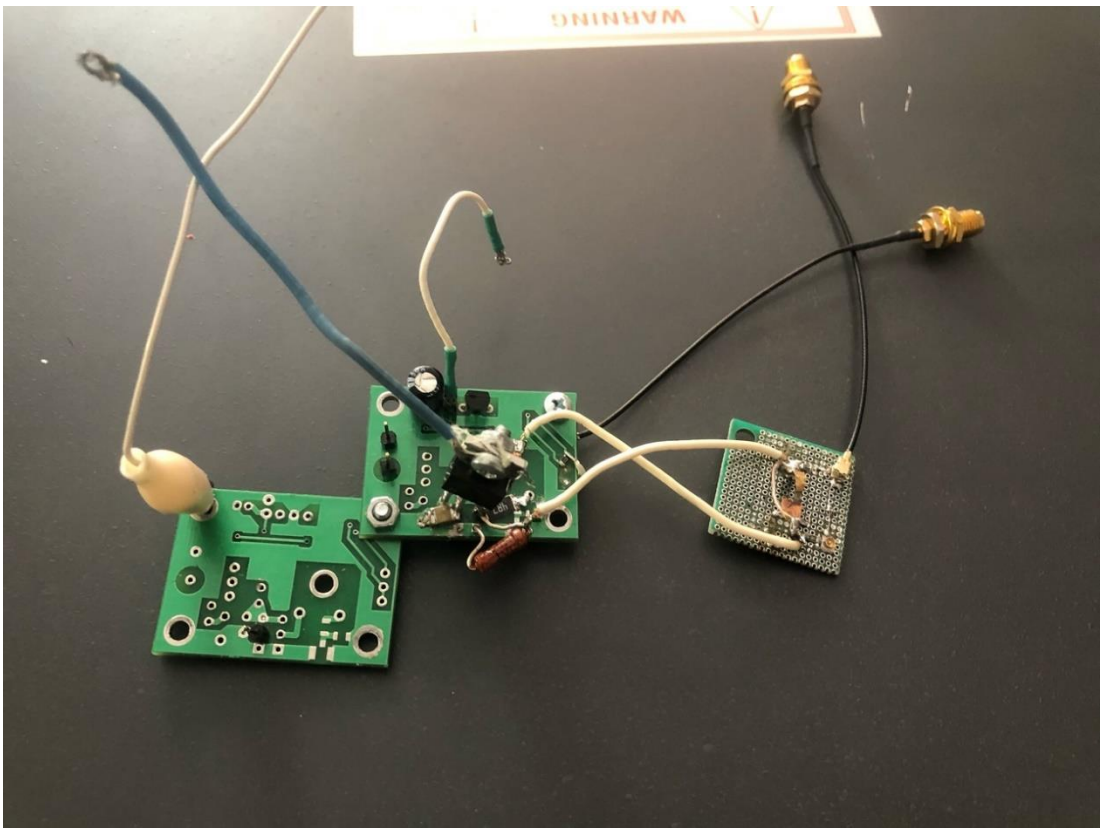

Рисунок 2.4 – Измерительная схема

Схема подсоединялась к генератору запускающих импульсов Tektronix AFG3011, источнику питания GWINSTEK GPS-4303, который подавал

напряжение на низковольтный источник питания (Рис. 2.5) и на драйвер, открывающий транзистор. После подавалось напряжение 12 В на низковольтный источник (до 400 В), от которого напряжение подавалось на транзистор. Далее подавалось от источника питания так же 12 В уже на драйвер, который открывает транзистор. Затем напряжение подавалось на генератор импульсов. На каждый входящий сигнал драйвер создавал 12 В импульс.

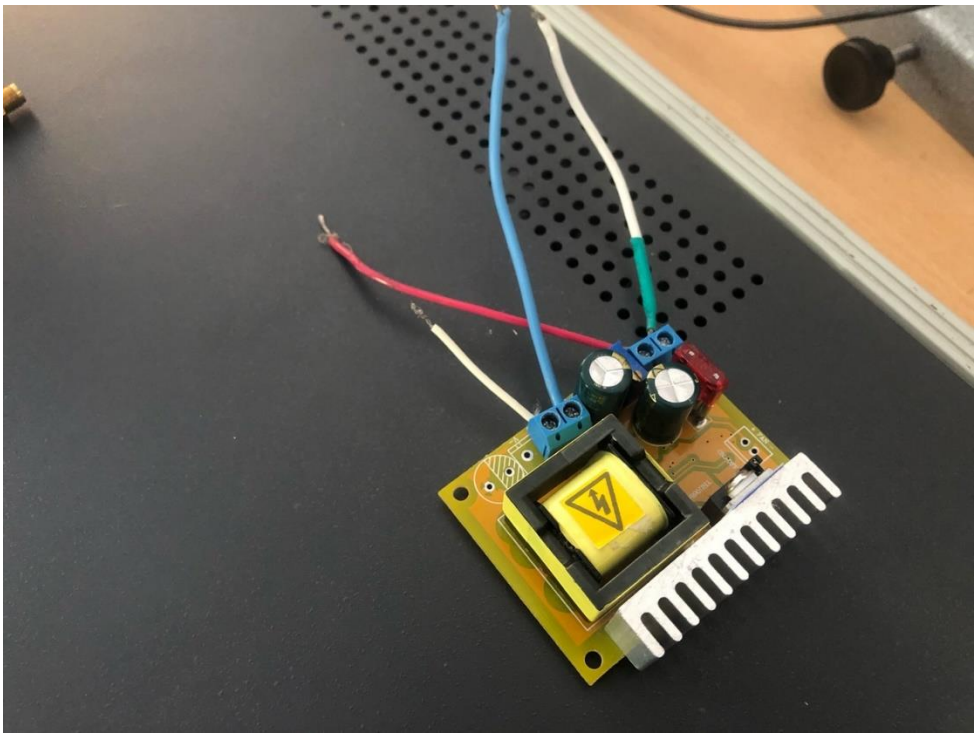

Рисунок 2.5 – Низковольтный источник питания

После того, как *S*-диод открывался, подбирались наиболее подходящие условия, при которых сигнал был явно выраженный, снимались готовые данные и обрабатывались в системе Origin.

3 Результаты и их обсуждение

3.1 Временные зависимости напряжения лавинных *S*-диодов

Временные зависимости *S*-диодов снимались на измерительной схеме при различном подаваемом напряжении и при различном активном сопротивлении – 5,5 Ом и 33 Ом соответственно.

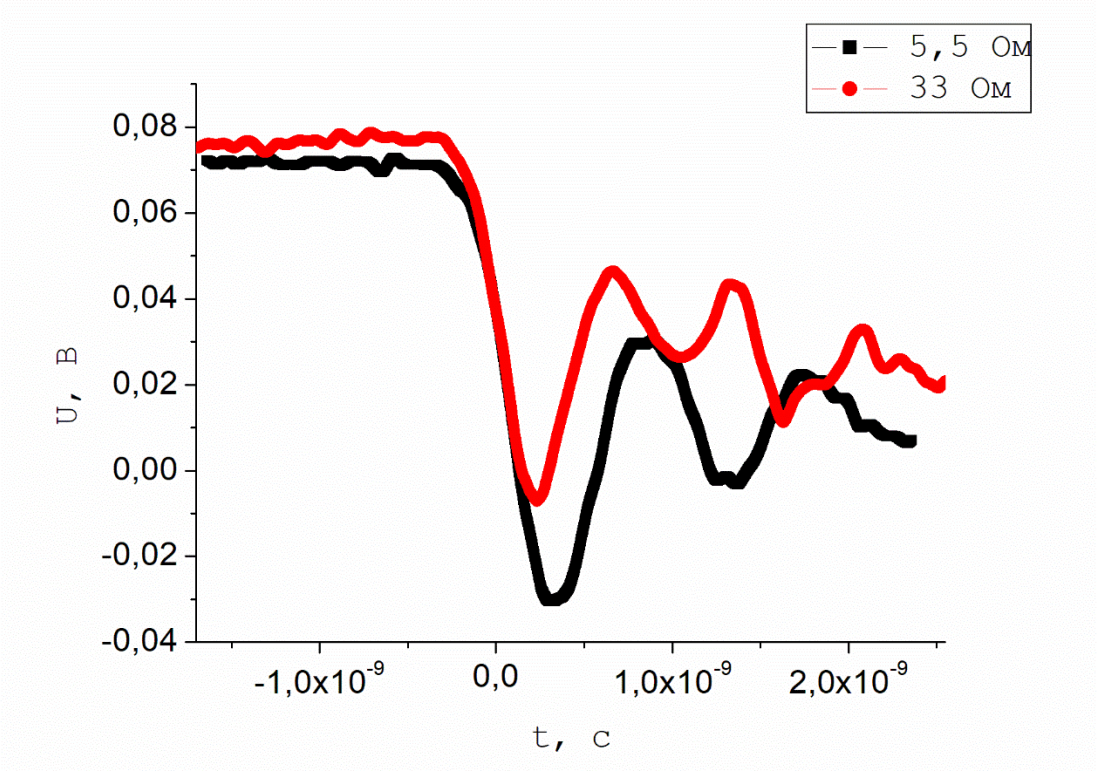

Рисунок 3.1 – Зависимость напряжения от времени для образца серии Э-84

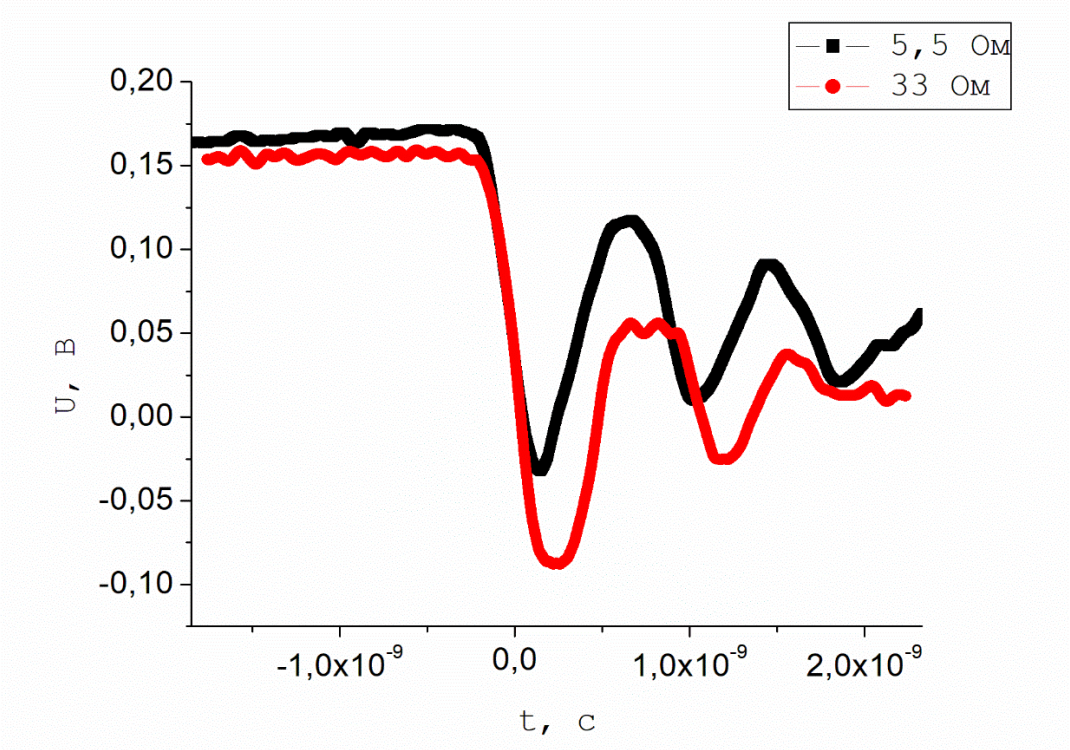

Рисунок 3.2– Зависимость напряжения от времени для образца серии Э-513

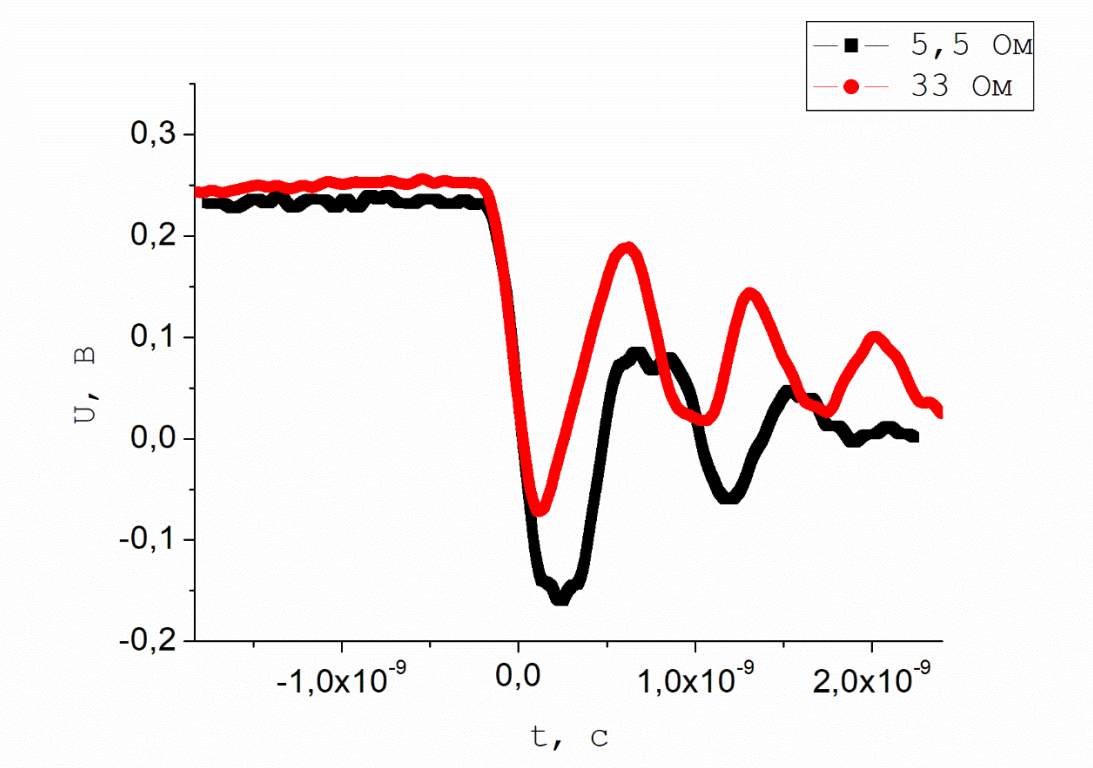

Рисунок 3.3 – Зависимость напряжения от времени для образца серии AS70

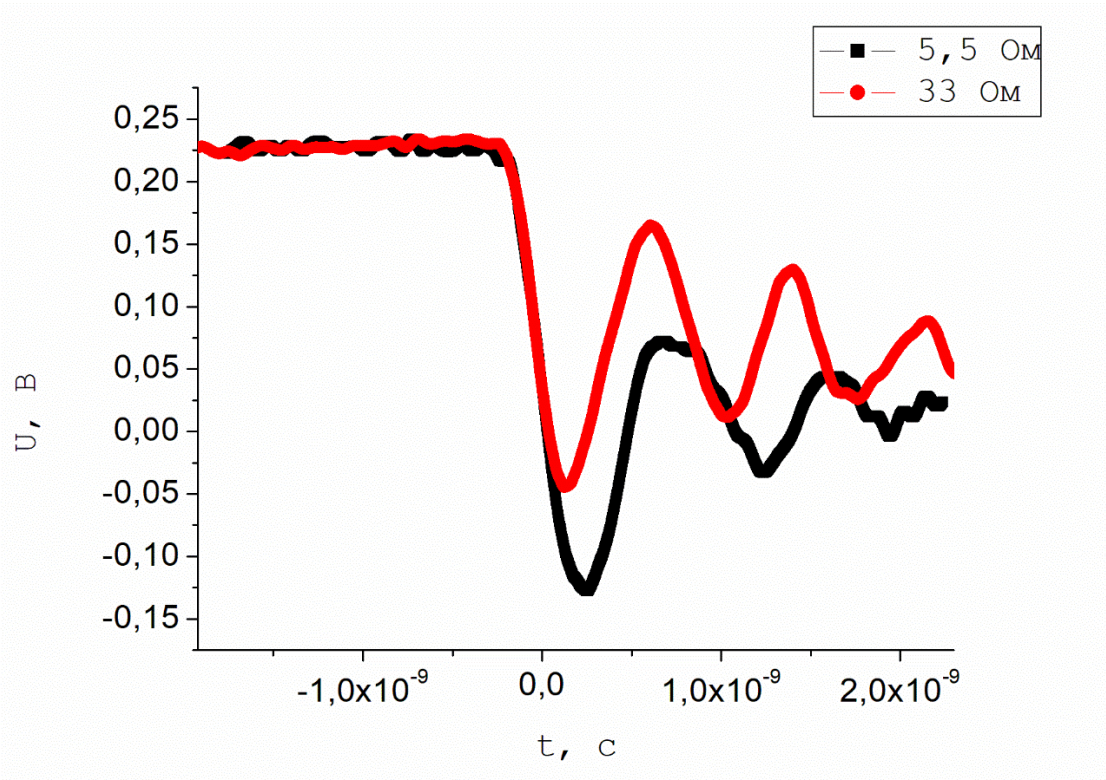

Рисунок 3.4 – Зависимость напряжения от времени для образца серии AS69

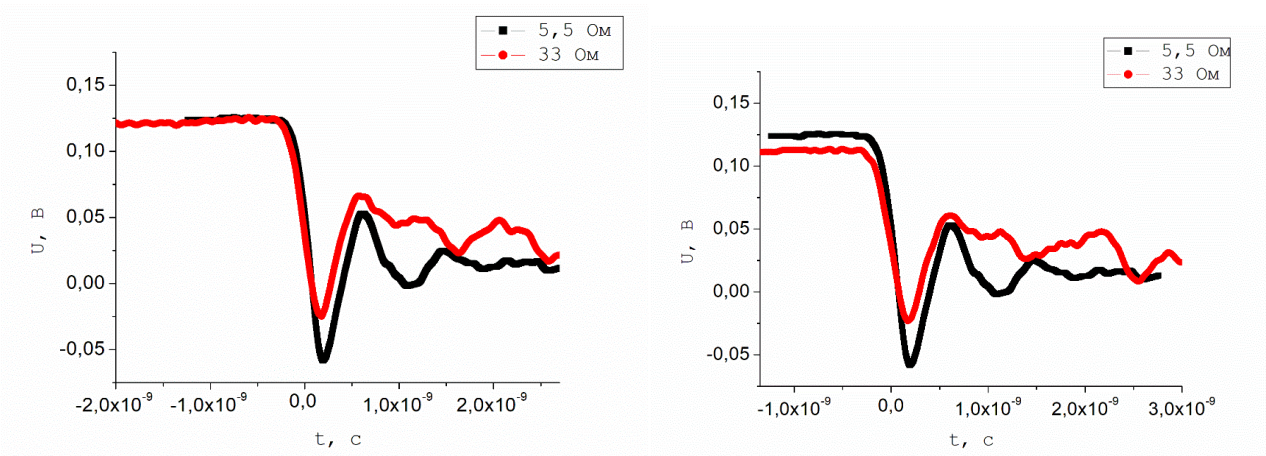

Рисунок 3.5 – Зависимости напряжения от времени для образца серии AS67 при различном питании, подаваемом с низковольтного источника

До момента переключения лавинного S-диода из закрытого состояния в открытое, на последнем сохраняется высокое напряжение (при учете коэффициента ослабления аттенюатора - более 100 В). В момент замыкания RLC-контура, когда лавинный S-диод переходит в открытое состояние, напряжение на нем резко уменьшается за время не более 300 пс. Такая быстрая коммутация

приводит к формированию затухающих колебаний в цепи, в ходе которых запасенная в конденсаторе энергия переходит в энергию магнитного поля индуктивности и рассеивается на активном сопротивлении нагрузки, а также сопротивлении лавинного S-диода в открытом состоянии.

Согласно общим представлениям из теории электрических цепей, изменение величины активного сопротивления должно приводить к изменению времени затухания колебаний в RLC-контуре. Оценим период затуханий по простой формуле

$$T = 2\pi(LC)^{1/2}$$

При использованных в работе номиналах C = 330 пФ, L = 15 нГн, период осцилляций должен составлять 14 нс. Наблюдение осцилляций возможно в случае, если волновое сопротивление $2(L/C)^{1/2} > R$ (где R - полное активное сопротивление контура. Данное условие является "границей" апериодического режима). Для случая использования нагрузочного сопротивления 5.5 Ом данное неравенство вполне приемлемо. Однако, период колебаний оказывается существенно больше наблюдаемого, и составляет порядка 2 нс.

Представленный анализ указывает, что наблюдаемые колебания являются результатом динамического изменения активного сопротивления *S*-диода вследствие сложного механизма его переключения.

Обратим внимание на следующий неожиданный результат. Из рисунков 3.1 - 3.5 видно, что снижение активного сопротивления нагрузки в RLC-контуре приводит к увеличению остаточного напряжения на лавинном *S*-диоде (напряжение после переключения). Данный результат является новым, что требует более детальных измерений в цепи с пониженной паразитной индуктивностью. В области высоких токов и малых нагрузок использовалась схема с предельно низкой паразитной индуктивностью (1.5 нГн), которая представлена на рисунке 3.6. Фотография стенда представлена на рисунке 3.7.

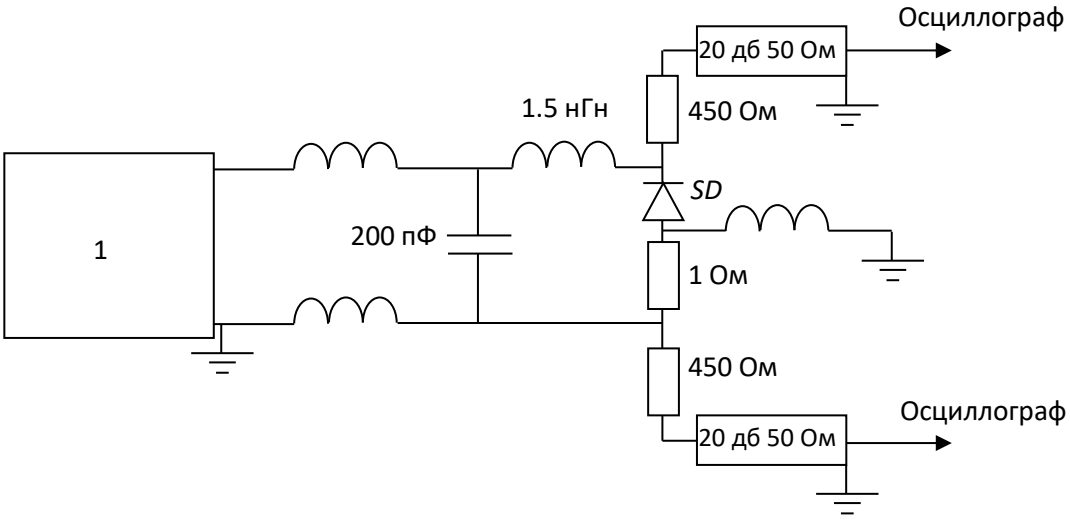

Рисунок 3.6 - Схематическое изображение измерительного стенда для исследования динамики переключения S-диодов в сильноточном режиме, 1 - генератор запускающих (обостряемых) импульсов положительной полярности.

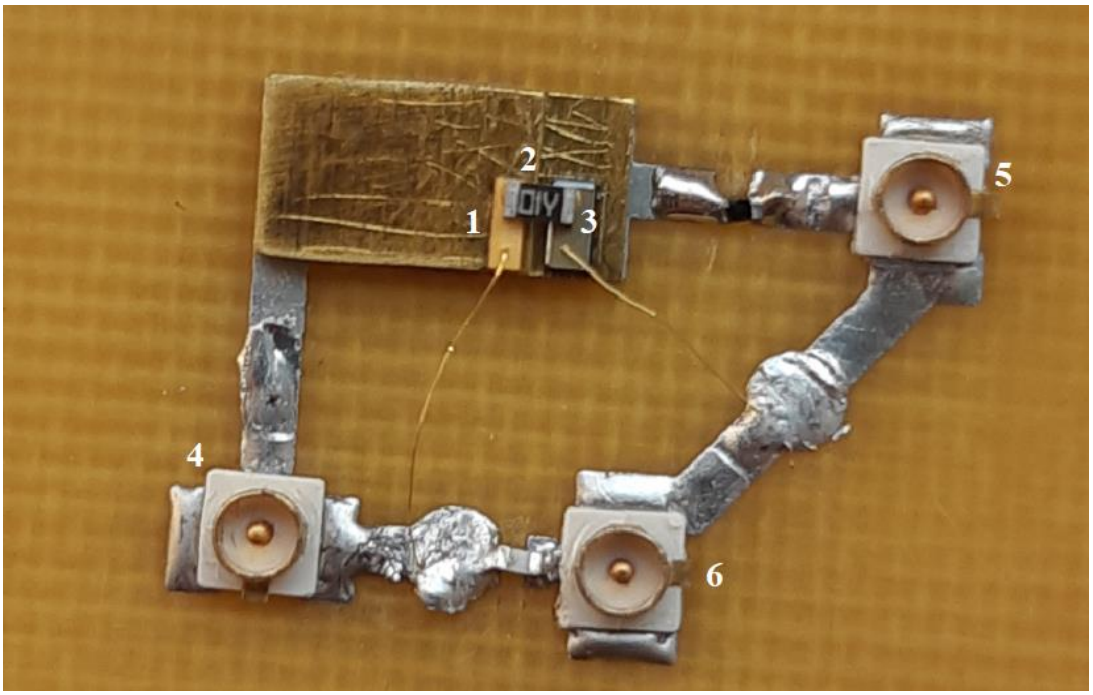

Рисунок 3.7 - Фотография измерительного стенда (без генератора 1) для исследования динамики переключения S-диодов в сильноточном режиме, где 1 – конденсатор 200 пФ, 2 – резистор 1 Ом, 3 – *S*-диод SD, 4,5,6 – выходы к генератору и осциллографам.

Сложность динамики можно продемонстрировать при помощи экспериментальных данных, представленных на рисунке 3.8. Здесь представлены две временные зависимости напряжения на *S*-диоде, полученные путем замены только одного чип-резистора (с 1 Ом на 50 Ом) в стенде (рисунок 3.7). Из рисунка 3.8 видно, что в сильноточном режиме наблюдается серия осцилляций во время перехода в открытое состояние S-диода. Этот результат является принципиально новым и ранее не был обнаружен другими исследователями, в литературе не описан. Подобный эффект наблюдается в лавинных биполярных транзисторах на основе GaAs [8-10], что косвенно подтверждает одинаковую природу переключения *S*-диодов и биполярных транзисторов из GaAs.

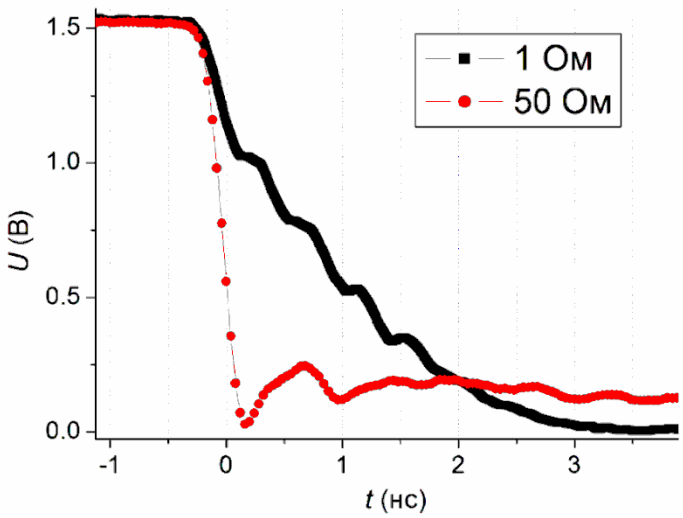

Рисунок 3.8 - Динамика переключения S-диода в схеме рис. 3.7-3.8 для двух различных сопротивлений нагрузки (делитель напряжения 1:100)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В итоге проделанной работы была изучена литература на тему основ теории электрических цепей и принципа работы лавинных *S*-диодов. Собрана измерительная схема при помощи паяльного оборудования, измерены напряжение и динамика переключения *S*-диодов при различных сопротивления нагрузки (1-50 Ом). Краткий анализ полученных экспериментальных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1) При переключении лавинного *S*-диода из закрытого в открытое состояние в RLC-цепи происходит сложный колебательный процесс, что не связано с номиналами реактивных элементов цепи, но обусловлено динамическим изменением активного сопротивления лавинного *S*-диода.

2) Снижение активного сопротивления в RLC-цепи (повышение коммутируемого тока) приводит к повышению остаточного сопротивления лавинного *S*-диода в открытом состоянии.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хлудков С.С., Толбанов О.П., Вилисова М.Д., Прудаев И.А. Полупроводниковые приборы на основе арсенида галлия с глубокими примесными центрами // под ред. О.П. Толбанова. – Томск : Издательский Дом Томского государственного университета, 2016. – 258 с.

2. Гаман В. И. Физика полупроводниковых приборов // Учебное пособие. - Томск: Изд-во НТЛ, 2000. - 426 с

3. Хлудков С. С., Толбанов О. П., Корецкий А. В. Арсенид-галлиевый лавинный *S*-диод на основе n+-π-v-*n*-структуры // Изв. вузов. Физика. - 1986. - Т. 29, №4. - С. 54-58.

4. Шалимова К. В. Физика полупроводников: Учебник. / К. В. Шалимова. – 4-е изд., стер. – СПб.: Издательство «Лань», 2010. – 400 с. – ISBN 978-5-8114-0922-8

5. Котельников В. А., Николаев А. М. Основы радиотехники // Учебник. – Москва: Изд-во ФИЗМАТЛИТ, 2014. - 312 с. - ISBN 978-5-9221-1601-5.

6. Бардин В. М., Брагин А. В. Устройства генерирования и формирования сигналов. Колебательные контуры: Метод. разработка / сост.: В. М. Бардин, А. В. Брагин. – Саранск: Изд-во Мордов. Ун-та, 2015. – 15 с.

7. Vainshtein S. N., Kilpela A. J., Kostamovaara J. T., Myllyla R. A., Starobinets S. U., and Zhilyaev J. V., “Multistreamer regime of GaAs thyristorswitching,” IEEE Trans. Electron Devices, vol. 41, no. 8, pp. 1444–1450, Aug. 1994.

8. Vainshtein S. N., Yuferev V. S., and Kostamovaara J. T., “Analyses of the picosecond range transient in a high-power switch based on a bipolar GaAs transistor structure,” IEEE Trans. Electron Devices, vol. 52, no. 12, pp. 2760–2768, Dec. 2005.

9. Vainshtein S. N., Yuferev V. S., and Kostamovaara J. T., Kulagina M. M., and Moilanen H. T., “Significant effect of emitter area on the efficiency, stability and reliability of picosecond switching in a GaAs bipolar transistor structure,” IEEE Trans. Electron Devices, vol. 57, no. 4, pp. 733–741, Apr. 2010.

10. Vainshtein S.N. Superfast high-current switching of GaAs avalanche transistor // Electronics Letter. – 2004.– V. , – P. 4.

АНТИПЛАГИАТ
ОБНАРУЖЕНИЕ ЗАИМСТВОВАНИЙ

Отчет о проверке на заимствования №1

Автор: Гарина Арина
Проверяющий: Гарина Арина (arishakisa1503@gmail.com / ID: 5166043)

Отчет предоставлен сервисом «Антиплагиат» - users.antiplagiat.ru

ИНФОРМАЦИЯ О ДОКУМЕНТЕ

№ документа: 3
Начало загрузки: 13.06.2021 14:25:31
Длительность загрузки: 00:00:01
Имя исходного файла: ВКР.pdf
Название документа: ВКР
Размер текста: 27 кБ
Символов в тексте: 27265
Слов в тексте: 3177
Число предложений: 260

ИНФОРМАЦИЯ ОБ ОТЧЕТЕ

Начало проверки: 13.06.2021 14:25:32
Длительность проверки: 00:00:01
Комментарии: не указано
Модули поиска: Интернет

ЗАИМСТВОВАНИЯ	САМОЦИТИРОВАНИЯ	ЦИТИРОВАНИЯ	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ
7,87%	0%	0%	92,13%

Заимствования — доля всех найденных текстовых пересечений, за исключением тех, которые система отнесла к цитированиям, по отношению к общему объему документа.
Самоцитирования — доля фрагментов текста проверяемого документа, совпадающий или почти совпадающий с фрагментом текста источника, автором или соавтором которого является автор проверяемого документа, по отношению к общему объему документа.
Цитирования — доля текстовых пересечений, которые не являются авторскими, но система посчитала их использование корректным, по отношению к общему объему документа. Сюда относятся оформленные по ГОСТу цитаты; общеупотребительные выражения; фрагменты текста, найденные в источниках из коллекций нормативно-правовой документации.
Текстовое пересечение — фрагмент текста проверяемого документа, совпадающий или почти совпадающий с фрагментом текста источника.
Источник — документ, проиндексированный в системе и содержащийся в модуле поиска, по которому проводится проверка.
Оригинальность — доля фрагментов текста проверяемого документа, не обнаруженных ни в одном источнике, по которым шла проверка, по отношению к общему объему документа.
Заимствования, самоцитирования, цитирования и оригинальность являются отдельными показателями и в сумме дают 100%, что соответствует всему тексту проверяемого документа.
Обращаем Ваше внимание, что система находит текстовые пересечения проверяемого документа с проиндексированными в системе текстовыми источниками. При этом система является вспомогательным инструментом, определение корректности и правомерности заимствований или цитирований, а также авторства текстовых фрагментов проверяемого документа остается в компетенции проверяющего.

№	Доля в отчете	Доля в тексте	Источник	Актуален на	Модуль поиска	Блоков в отчете	Блоков в тексте
[01]	3,7%	3,7%	Согласованный режим работы электрической цепи http://electricalschool.info	28 Окт 2017	Интернет	14	14
[02]	2,14%	2,14%	Шаблоны титульных листов ВКР http://tsu.ru	10 Дек 2018	Интернет	4	4
[03]	2,02%	2,02%	Significant Effect of Emitter Area on the Efficiency, Stability and Reliability of Picosecond Switching in a GaAs Bipolar Transistor Structure https://doi.org	28 Фев 2020	Интернет	6	6