

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
КЫРГЫЗСКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени первого Президента Российской Федерации Б.Н. Ельцина

ЕСТЕСТВЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА «СЕТИ СВЯЗИ И СИСТЕМЫ КОММУНИКАЦИЙ»

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к лабораторным работам по Электронике
для студентов по направлению подготовки 690300 (11.03.02)
«Инфокоммуникационные технологии и системы связи»,
690100 «Электроника и нанoeлектроника»

Бишкек 2021

УДК 621.38
ББК 32.85
У 91

Рецензенты:

О. Т. Абдылдаев – канд. физ-мат. наук, доц.,

М. О. Оконов – канд. техн. наук, доц.

Составитель

С. А. Токтогонов

Рекомендовано к изданию
кафедрой «Сети связи и системы коммуникаций»

У 91 Учебно-методические указания к лабораторным работам по Электронике для студентов Кыргызского Российского Славянского университета по направлению подготовки 690300 (11.03.02) «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», 690100 «Электроника и наноэлектроника» / сост. С. А. Токтогонов. Бишкек: КРСУ, 2019. 82 с.: ил.

В учебно-методических указаниях изучаются лабораторные работы по электронике на основе многофункционального учебного стенда «Электроника», разработанного коллективом авторов кафедры «Сети связи и системы коммуникации» КРСУ имени Б. Ельцина.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
Лабораторная работа № 1. «ИЗУЧЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ»	6
1. Физические процессы в полупроводниковых диодах	6
1.1. Зонная теория полупроводников	6
1.2. Процессы в р-п- переходах (ВАХ диодов).....	10
1.3. Однофазная однополупериодная схема выпрямления	12
1.4. Однофазная мостовая схема выпрямления	13
1.5. Основные характеристики полупроводниковых диодов.....	14
1.6. Схемы и порядок измерения характеристик диодов	15
<i>Задание 1.1. Получение осциллограммы однополупериодного выпрямителя</i>	16
<i>Задание 1.2. Получение ВАХ диода на основе схемы на стенде</i>	16
<i>Задание 1.3. Получение осциллограммы двухполупериодного выпрямителя</i>	18
1.7. Выпрямитель с удвоением напряжения	20
Лабораторная работа № 2. ИЗУЧЕНИЕ СТАБИЛИТРОНОВ, СТАБИСТОРОВ И ВАРИКАПОВ	22
2.1. Пробой диода.....	22
2.2. Стабилитроны и стабисторы	23
2.3. Особенности применения стабилитронов.....	24
2.4. Основные параметры стабилитрона	26
2.5. Варикапы.....	26
<i>Задание 2.1. Получение ВАХ стабистора</i>	27
<i>Задание 2.2. Изучение ограничивающих свойств стабистора</i>	28
<i>Задание 2.3. Получение вольтамперной характеристики стабилитронов</i>	28
<i>Задание 2.4. Стабилитроны в качестве ограничителя напряжения</i>	29
<i>Задание 2.5. Изучение стабилизирующих свойств стабилитронов</i>	30
<i>Задание 2.6. Изучение инерционных свойств стабилитронов</i>	32
<i>Задание 2.7. Изучение стабилитрона в режиме варикапа</i>	33
Лабораторная работа № 3. ИЗУЧЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА НА ОСНОВЕ ТИРИСТОРА И ТУННЕЛЬНОГО ДИОДА	34
3.1. Туннельные диоды	34
3.2. Параметры туннельного диода	36
<i>Задание 3.1. Получение ВАХ туннельного диода</i>	40
<i>Задание 3.2. Получение осциллограмм параметров туннельного диода</i>	41
3.4. Тиристоры	43
3.5. Триодные тиристоры	45
3.6. Способы запираания тиристоров.....	48
3.7. Запираемые тиристоры	49
3.8. Снятие и анализ характеристик тиристора	51
<i>Задание 3.3. Изучение влияния тока управления I_u на открывание тиристора</i>	51
<i>Задание 3.4. Подача на тиристор (точка $U_{ген}$) синусоидального сигнала</i>	54
<i>Задание 3.5. Измерение времени включения и выключения транзистора</i>	54

Лабораторная работа 4. ИЗУЧЕНИЕ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ.....	56
4.1. Элементы оптоэлектроники	56
4.2. Принцип работы фотоприемников	56
4.3. Фоторезистор	58
4.4. Фотодиод.....	59
4.5. Фототранзистор	61
4.6. Фототиристор	62
4.7. Источники света	63
4.7.1 Светодиоды	64
4.7.2. Полупроводниковые лазеры	65
4.8. Оптопары.....	66
<i>Задание 4.1. Измерение вольт-амперной характеристики оптопары</i> <i>с открытым оптическим каналом щелевого типа</i>	<i>69</i>
<i>Задание 4.2. Измерения ВАХ диодной оптопары ЗОД101</i>	<i>70</i>
<i>Задание 4.3. Осциллограммы работы диодного оптрона ЗОД101</i> <i>при различном напряжении на светодиоде</i>	<i>71</i>
<i>Задание 4.4. Динамические (длительность фронта и спада)</i> <i>характеристики диодной оптопары ЗОД101</i>	<i>73</i>
<i>Задание 4.5. Измерения свойств транзисторной оптопары.....</i>	<i>74</i>
<i>Задание 4.6. Осциллограммы работы транзисторного оптрона АОТ110В</i> <i>при различном напряжении на светодиоде</i>	<i>75</i>
<i>Задание 4.7. Динамические (длительность фронта и спада)</i> <i>характеристики транзисторной оптопары АОТ110.....</i>	<i>77</i>
<i>Задание 4.9. Амплитудно-частотная характеристика транзисторной</i> <i>оптопары АОТ110.....</i>	<i>78</i>
<i>Задание 4.10. Осциллограммы работы оптоэлектронного реле РКПЗБ</i> <i>при различном напряжении на светодиоде</i>	<i>79</i>
Литература	81

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время, роль элементной базы в развитии электронных и инфокоммуникационных систем является одним из важных и определяющих направлений. Несомненно, что главными факторами достижения высокого быстродействия, а значит, и высокой производительности ЭВМ являются их реализация на новейшей элементной базе. Смена поколений ЭВМ в значительной степени связана с переходами на новые виды элементной базы, знаменующие достижения новых частотных диапазонов работы схем в рамках доступных технологий.

Все эти проблемы связанные с развитием базовых элементов ставят на повестку дня и соответствующую фундаментальную подготовку специалистов. Это требует от специалистов знания не только общей организации электронных систем, но знания глубинных физических процессов, на которых строятся работы базовых элементов, таких как диоды, стабилитроны, транзисторы, тиристоры и т.п. Знание фундаментальных закономерностей базовых элементов систем связи дает понимание возможных направлений развития всей системы, лучшую адаптацию при освоении и обслуживании новых прогрессивных приборов и оборудования.

Данная работа посвящена изучению полупроводниковых диодов. В частности, изучаются основные характеристики полупроводниковых диодов, схемы включения диодов, схемы выпрямителя переменного напряжения с удвоением величины этого напряжения, схемы измерения характеристик диодов, двухполупериодное выпрямление, выпрямитель с удвоением напряжения, схемы стабилизации сигнала и элементы оптоэлектроники.

Силами сотрудников кафедры Сети связи и системы коммуникации ЕТФ КРСУ им. Б. Ельцина был разработан учебно-лабораторный стенд для изучения различных видов полупроводниковых диодов и наиболее распространенных схем на их основе. На рисунке 1 приведена схема учебно-лабораторного стенда по электронике. Стенд состоит из трех блоков. В верхнем желтом блоке приведены схемы для изучения выпрямительных полупроводниковых диодов. Следующий зелёный сектор посвящен изучению различных видов полупроводниковых диодов: стабилитрона, стабилитрона, варикапа, туннельного диода и тиристора. Третий самый нижний голубой блок предназначен для оптоэлектронных элементов и схем: светодиод, фотодиод, диодный оптрон, тиристорный оптрон и оптоэлектронное реле.

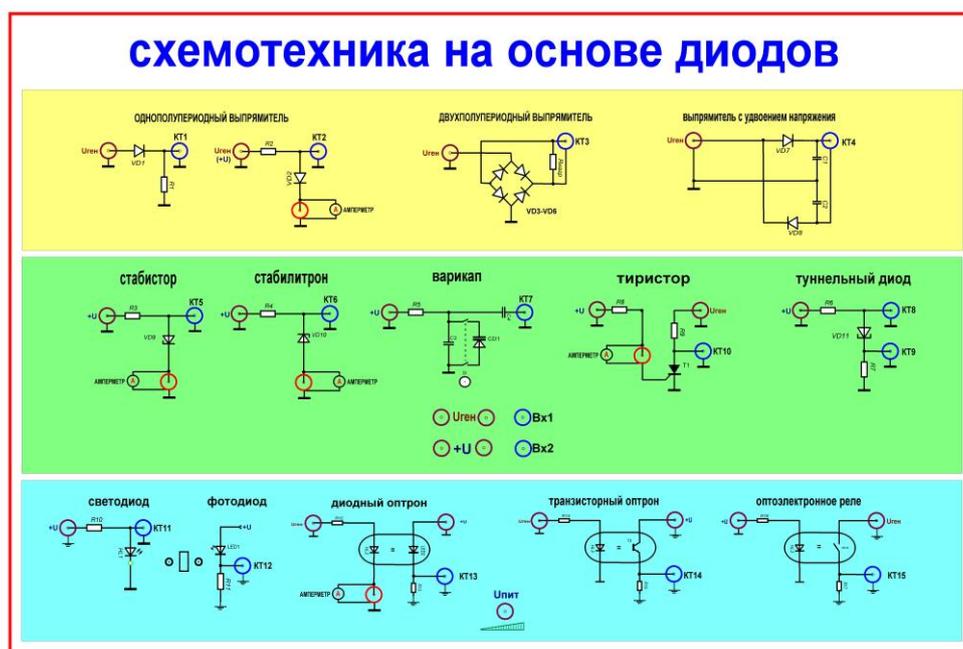


Рис. 1. Схема учебно-лабораторного стенда для изучения полупроводниковых диодов

В зеленом секторе имеются два гнезда « \odot Уген» для подачи различных переменных сигналов с генераторов сигнала, два гнезда « \odot +U» для подачи постоянного сигнала, два гнезда « \odot Вх 1», « \odot Вх 2» для подачи сигнала на осциллограф. Для регулировки уровня постоянного сигнала используется регулятор « \odot Упит» в нижнем синем секторе. Данные компоненты стенда используются при изучении всех схем на данном учебно-лабораторном стенде. Сигналы с выхода схем снимаются с помощью мультиметра или изучаются с помощью электронного осциллографа АКИИП. Некоторые формы электрических сигналов может подаваться с внутреннего генератора электронного осциллографа АКИИП.

Лабораторная работа № 1

ИЗУЧЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ

Одним из основных аспектов современной электроники являются процессы, происходящие в р-п-переходах. На них построена работа полупроводников диодов, транзисторов, тиристоров и в целом микросхем и других компонентов электроники. Поэтому необходимо, в первую очередь, детально изучить физические процессы, происходящие в р-п-переходах и виды диодов, функционирующие на различных аспектах этих процессов.

Данная лабораторная работа посвящена изучению выпрямительных полупроводниковых диодов. В частности, изучаются основные характеристики полупроводниковых диодов, схемы включения диодов, схемы выпрямителя переменного напряжения с удвоением величины этого напряжения, схемы измерения характеристик диодов, двухполупериодное выпрямление, выпрямитель с удвоением напряжения.

1. Физические процессы в полупроводниковых диодах

1.1. Зонная теория полупроводников

Полупроводниками, как правило, являются твердые тела с регулярной кристаллической структурой. В твердом теле концентрация (объемная плотность) атомов велика, поэтому внешние электронные оболочки соседних атомов сильно взаимодействуют. Электрические и магнитные поля, колеблющихся соседних атомов, воздействуют на энергетические уровни и приводят к расщеплению дискретных уровней отдельных атомов. Вместо системы дискретных энергетических уровней, характерной для одного изолированного атома, появляется система зон энергетических уровней. Эти зоны уровней называют разрешенными, а области между ними – запрещенными зонами. Верхняя разрешенная зона называется зоной проводимости, а первая под ней – валентной зоной (рис. 1.1).

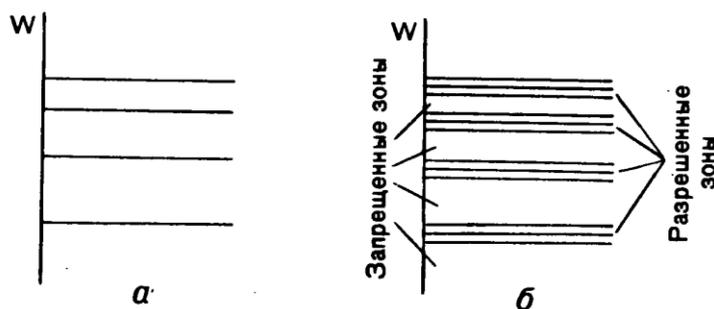


Рис. 1.1. Разрешенные энергетические уровни электронов в отдельном атоме (а) и расщепление их на энергетические зоны в кристалле (б)

В физике принята классификация твердых тел на металлы, полупроводники и диэлектрики по ширине запрещенной зоны ΔW_z , от значения которой зависят концентрация свободных носителей, удельное электрическое сопротивление и ток. Условно к диэлектрикам относят тела, у которых $\Delta W_z > 2$ эВ, к полупроводникам, когда $\Delta W_z < 2$ эВ, у металлов зоны проводимости и валентная либо перекрываются, либо ширина запрещенной зоны $\Delta W_z = 0$ (рис. 1.2).

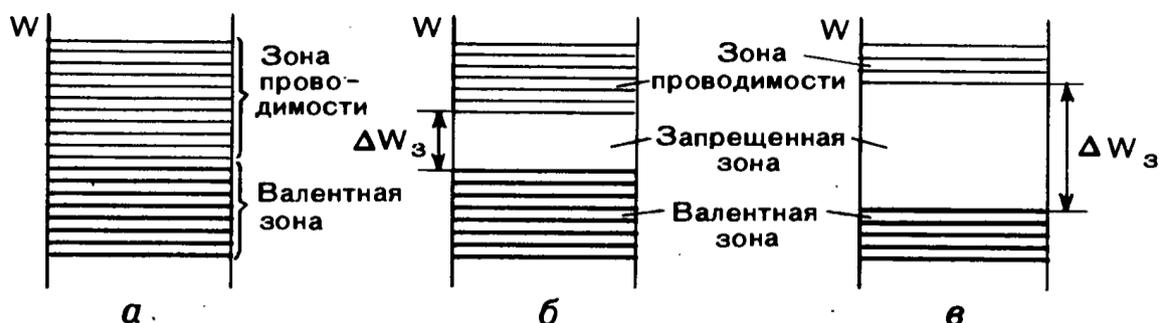


Рис. 1.2. Энергетические диаграммы металлов (а), полупроводников (б) и диэлектриков (в)

В полупроводниковой электронике обычно используются кремний (Si) и германий (Ge) – элементы четвертой группы периодической системы химических элементов (четыревалентные элементы). В последние годы начал широко использоваться арсенид галлия (GaAs), в кристаллической решетке которого чередуются атомы трехвалентного галлия (Ga) и пятивалентного мышьяка (As). Ширина запрещенной зоны при абсолютной температуре $T=300$ К у германия 0,66 эВ, кремния 1,12 эВ и арсенида галлия 1,4 эВ (рис. 1.3).

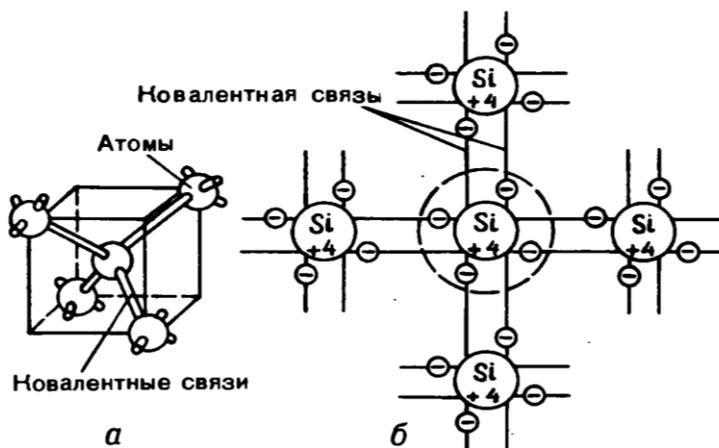


Рис. 1.3. Объемная структура части кристаллической решетки кремния или германия (а) и ее схематическая плоскостная модель (б)

Беспримесный (чистый) полупроводник без дефектов кристаллической структуры называют собственным полупроводником и обозначают буквой *i* (от слова intrinsic – собственный). При температуре абсолютного нуля ($T=0$ К) в таком полупроводнике все энергетические уровни валентной зоны заполнены валентными электронами, а в зоне проводимости нет электронов. По мере увеличения температуры растет энергия колебательного движения атомов кристаллической решетки и увеличивается вероятность разрыва ковалентных (парных) связей атомов, приводящего к образованию свободных электронов, энергия кото-

рых соответствует уровням зоны проводимости. Отсутствие одного электрона в ковалентной связи двух соседних атомов, или «вакансия», эквивалентно образованию единичного положительного заряда, называемого дыркой. Эта вакансия может быть потом занята одним из валентных электронов, принадлежащих соседней паре атомов. Тогда дырка будет «принадлежать» этой паре атомов, и условно можно говорить о перемещении дырки, хотя в действительности это только результат перемещения валентного электрона.

Очень важно, что появление одного свободного электрона сопровождается образованием одной дырки. Говорят, что идет образование (генерация) пар электрон – дырка с противоположными знаками заряда (рис. 1.4, 1.5).

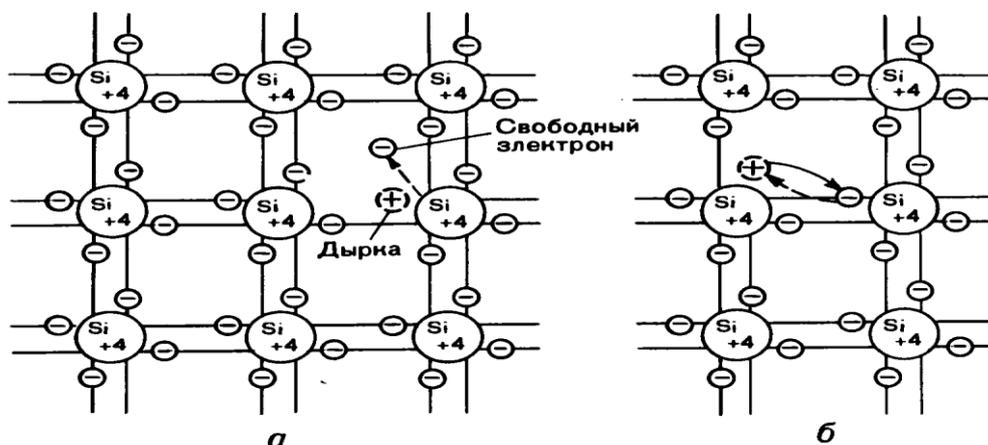


Рис. 1.4. Генерация пар свободный электрон — дырка в результате разрушения ковалентной связи (а) и перемещение дырки в кристалле (б)

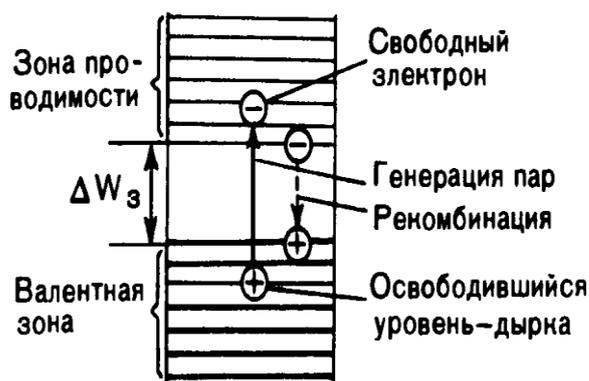


Рис. 1.5. Энергетическая диаграмма, иллюстрирующая собственную электропроводность полупроводника при разрушении ковалентной связи

Если в собственный четырехвалентный кремний (или германий) ввести атом пятивалентного элемента, например фосфора (P), сурьмы (Sb) или мышьяка (As), то четыре из пяти валентных электронов введенного атома примеси вступят в связь с четырьмя соседними атомами Si (или Ge) и образуют устойчивую оболочку из восьми электронов, а пятый электрон оказывается слабо связанным с ядром атома примеси. Этот «лишний» (условно «примесный») электрон движется по орбите значительно большего размера и легко (при небольшой затрате энергии) отрывается от примесного атома, т. е. становится свободным. При этом неподвижный атом превращается в положительный ион. Свободные электроны «примесного» происхождения добавляются к свободным электронам исходного собственного полупроводника, поэтому электрическая проводимость полупроводника при большой концентрации

примеси становится преимущественно электронной. Такие примесные полупроводники называются электронными или *n*-типа (от слова *negative* – отрицательный). Примеси, обуславливающие электронную проводимость, называют донорными (рис. 1.6).

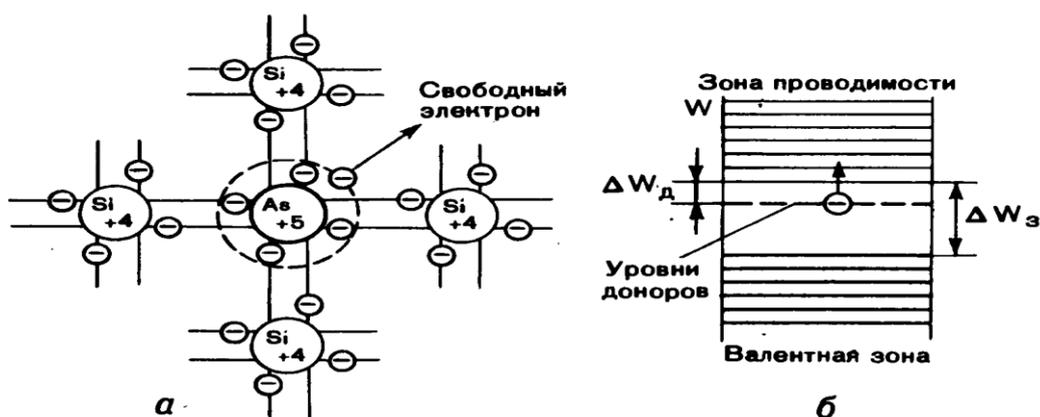


Рис. 1.6. Появление свободного электрона при введении донорной примеси (а) и энергетическая диаграмма полупроводника *n*-типа (б)

Если в собственный полупроводник, например кремний, ввести примесный атом трехвалентного элемента, например бора (В), галлия (Ga) или алюминия (Al), то все валентные электроны атома примеси включатся в ковалентные связи с тремя из четырех соседних атомов собственного полупроводника. Для образования устойчивой восьмиэлектронной оболочки (четыре парные связи) примесному атому не хватает одного электрона. Им может оказаться один из валентных электронов, который переходит от ближайших атомов кремния. В результате у такого атома кремния появится «вакансия», т. е. дырка, а неподвижный атом примеси превратится в ион с единичным отрицательным зарядом. Дырки примесного происхождения добавляются к собственным дыркам, так что при большой концентрации примеси проводимость полупроводника становится преимущественно дырочной. Такие примесные полупроводники называют дырочными или *p*-типа (от слова *positive* – положительный). Примеси, обеспечивающие получение большой концентрации дырок, называют акцепторными («захватывающие» электроны).

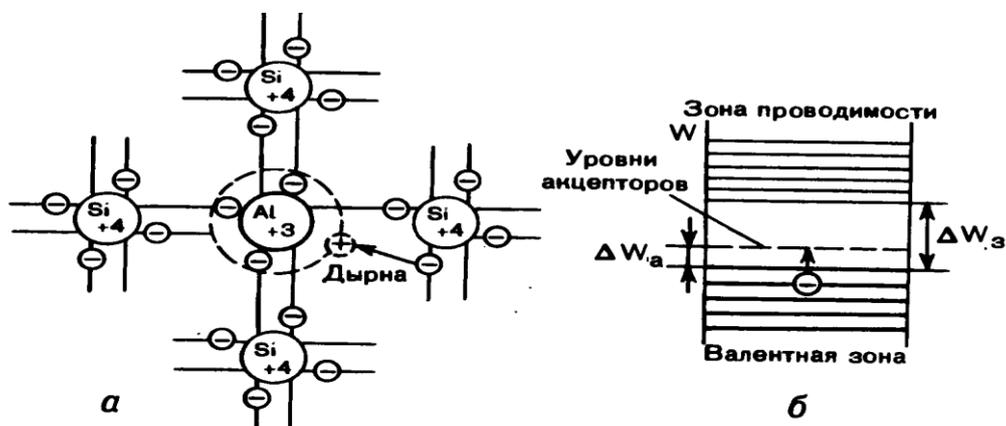


Рис. 1.7. Появление дырки при введении акцепторной примеси (а) и энергетическая диаграмма полупроводника *p*-типа (б)

Отрыв электрона от донорного атома и валентного электрона от атомов исходного (собственного) полупроводника для «передачи» его акцепторному атому требует затраты некоторой энергии, называемой энергией ионизации или активизации примеси. Поэтому при температуре абсолютного нуля ионизации нет, но в рабочем диапазоне температуры, включающем комнатную температуру, примесные атомы практически полностью ионизированы. Энергия ионизации доноров ΔW_D и акцепторов ΔW_A составляет несколько сотых долей электронвольта (эВ), что значительно меньше ширины запрещенной зоны ΔW_z . Поэтому энергетические уровни электронов донорных атомов («примесные уровни») располагаются в запрещенной зоне вблизи нижней границы («дна») зоны проводимости на расстоянии, равном энергии ионизации ΔW_D . Аналогично примесный уровень акцепторов находится в запрещенной зоне на небольшом расстоянии ΔW_A от верхней границы («потолка») валентной зоны.

В собственном полупроводнике концентрации электронов и дырок одинаковы. В примесных полупроводниках они отличаются на много порядков, поэтому носители заряда с большей концентрацией называют основными, а с меньшей – неосновными. В полупроводнике n-типа основные носители – электроны, а в полупроводнике p-типа – дырки. Значения концентраций свободных электронов и дырок устанавливаются (состояние равновесия) в результате действия двух противоположных процессов: процесса генерации носителей (прямой процесс) и процесса рекомбинации электронов и дырок (обратный процесс). Рекомбинация означает, что свободный электрон восстанавливает ковалентную связь (устраняет вакансию). Этот процесс можно представить на энергетической диаграмме как переход электрона из зоны проводимости на свободный энергетический уровень валентной зоны. Результатом восстановления связи является одновременное исчезновение свободного носителя отрицательного заряда и свободной положительно заряженной дырки, т. е. исчезновение пары свободных носителей с противоположным знаком заряда, каждый из которых до этого мог участвовать в создании электрического тока. В состоянии равновесия скорость генерации носителей заряда равна скорости рекомбинации.

1.2. Процессы в p-n- переходах (ВАХ диодов)

Основным элементом большинства полупроводниковых приборов является электронно-дырочный переход (p-n-переход), представляющий собой переходный слой между двумя областями полупроводника, одна из которых имеет электронную электропроводность, другая – дырочную.

Вводя примеси того или иного сорта, можно изменять механизм электрического тока в полупроводнике, т. е. создавать такие условия, при которых активную роль в этом механизме будут играть электроны или дырки. Наука позволяет измерять число свободных электронов и дырок в единице объема и изучать поведение этих носителей тока в кристаллах. Практический интерес представляют системы, состоящие из двух полупроводников типов n и p, которые находятся в контакте друг с другом – p-n- переход. В полупроводнике типа n находится много свободных электронов – основных носителей тока, и мало дырок – неосновных носителей тока. В полупроводнике типа p наблюдается обратная картина. Через границу соприкосновения полупроводников двух разных типов начнут диффундировать ("пробираться") их основные носители тока: в материал типа p – электроны, в материал типа n – дырки. У контактирующей поверхности в полупроводнике типа n возникает положительный, а в полупроводнике типа p – отрицательный потенциал. Иначе говоря, в месте контакта образуется электрическое поле, препятствующее дальнейшему нарастанию диффузии; переход зарядов за счет диффузии компенсируется обратным переходом за счет поля контакта. После установления равновесия зарядов скачок потенциала сохранится (рис. 1.8).

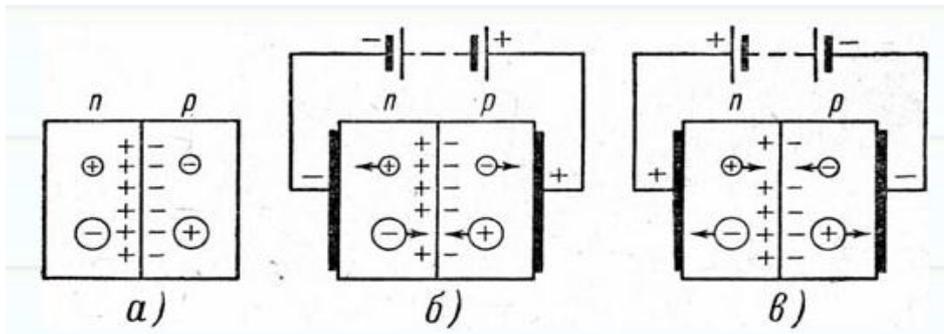


Рис. 1.8. Объяснение механизма тока в электронно-дырочном переходе:
 а – потенциальный барьер;
 б – ток в пропускном направлении;
 в – ток в обратном направлении

Теперь положим, что на полупроводники типов n и p наложены с внешних сторон металлические электроды, контакт которых с полупроводником обладает очень малым сопротивлением. Присоединим к электроду полупроводника типа p положительный, а к электроду полупроводника типа n отрицательный полюс внешней батареи (рис. 1.8, б). При этом через p - n -переход потечет ток; этот ток будет и во внешней цепи. Из рисунка 1.8, б видно, что в этом случае внешнее электрическое поле противоположно тому полю, которое имеется в переходном слое. Иначе говоря, скачок потенциала p - n -перехода окажется в той или иной мере скомпенсированным за счет действия внешнего поля. Основные носители тока каждого из полупроводников (большие кружки), двигаясь навстречу друг другу под действием внешнего поля, смогут преодолеть оставшийся скачок потенциала (потенциальный барьер) и проскочить через него. С увеличением напряжения будет возрастать число основных носителей, переходящих границу, а значит, и величина тока в цепи. Изменим полярность электродов на обратную, переключив источник тока (рис. 1.8, в). Тогда к переходу устремятся с каждой стороны неосновные носители тока (малые кружки). Эти носители могут переходить границу даже без внешнего поля, так как разность потенциалов для них "попутна". Однако неосновных носителей мало, а потому величина тока, создаваемого ими, незначительна. Для основных же носителей внешнее поле является как бы дополнением к потенциальному барьеру.

Итак, сопротивление p - n -перехода зависит от направления тока: при полярности, обеспечивающей движение основных носителей через границу, сопротивление мало и убывает с ростом напряжения; при обратной же полярности сопротивление велико и незначительно зависит от приложенного напряжения. Такое свойство p - n -перехода обеспечивает возможности создания различных технических устройств и в первую очередь выпрямителей. Выпрямители, создаваемые на основе кристаллов германия или кремния, будем называть полупроводниковыми (кристаллическими) диодами. Следует отметить, что в действительности процессы в p - n -переходе более сложны; мы изложили их лишь в упрощенном представлении.

Разность потенциалов φ_K в переходе, обусловленную градиентом концентрации носителей заряда, называют контактной разностью потенциалов

$$\varphi_K = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_a N_{\bar{a}}}{n_i^2} = \frac{kT}{e} \ln \frac{P_p}{P_n}, \quad (1.1)$$

где k – постоянная Больцмана;

e – заряд электрона;

T – температура;

N_a и $N_{\bar{a}}$ – концентрации акцепторов и доноров в дырочной и электронной областях соответственно;

p_p и p_n – концентрации дырок в p -и n -областях соответственно;

n_i – концентрация собственных носителей. Обычно контактная разность потенциалов имеет порядок десятых долей вольта.

Полупроводниковый прибор с p - n -переходом, имеющий два омических вывода, называют полупроводниковым диодом (далее диод). Одна из областей p - n -структуры (p^+), называемая эмиттером, имеет концентрацию основных носителей заряда на несколько порядков больше, чем другая область, называемая базой.

Статическая вольт-амперная характеристика (ВАХ) диода изображена на рисунке 1.9. Здесь же пунктиром показана теоретическая ВАХ электронно-дырочного перехода, определяемая соотношением

$$I = I_0 (e^{U/(m\varphi_m)} - 1), \quad (1.2)$$

где I_0 – обратный ток насыщения (ток экстракции, обусловленный неосновными носителями заряда); U – напряжение на p - n -переходе;

$\varphi_m = kT/e$ – температурный потенциал;

m – поправочный коэффициент:

$m=1$ для германиевых p - n -переходов и $m = 2$ для кремниевых p - n - переходов при малом токе.

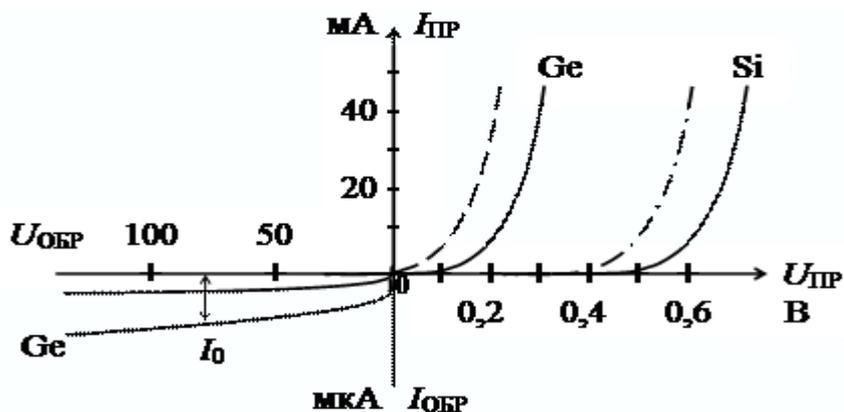


Рис. 1.9. Статическая вольт-амперная характеристика (ВАХ) диода

Кремниевые диоды имеют существенно меньшее значение обратного тока по сравнению с германиевыми вследствие более низкой концентрации неосновных носителей заряда. Обратная ветвь ВАХ у кремниевых диодов при данном масштабе практически сливается с осью абсцисс. Прямая ветвь ВАХ у кремниевых диодов расположена значительно правее, чем у германиевых.

1.3. Однофазная однополупериодная схема выпрямления

На рисунке 1.10 представлена простейшая схема выпрямления. Схема содержит один выпрямительный диод, включенный между вторичной обмоткой трансформатора и нагрузкой. Напряжение u_2 изменяется по синусоидальному закону, т. е. содержит положительные и отрицательные полуволны (полупериоды). Ток в цепи нагрузки проходит только в положительные полупериоды, когда к аноду диода VD прикладывается положительный потенциал (рис. 1.10, а). При обратной полярности напряжения u_2 диод закрыт, ток в нагрузке не протекает, но к диоду прикладывается обратное напряжение $U_{обр}$ (рис. 1.10, б). Т. о. на нагрузке выделяется только одна полуволна напряжения вторичной обмотки. Ток в нагрузке протекает только в одном направлении и представляет собой выпрямленный ток, хотя носит пульсирующий характер (рис. 1.10, в). Такую форму напряжения (тока) называют постоянно-импульсной.

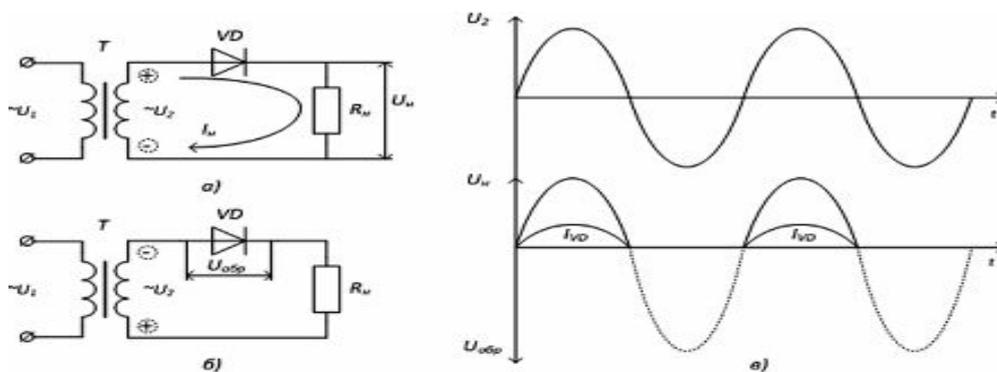


Рис. 1.10. Однофазный однополупериодный выпрямитель:
 а) схема – диод открыт; б) схема – диод закрыт; в) временные диаграммы работы

Выпрямленные напряжения и ток содержат постоянную (полезную) составляющую и переменную составляющую (пульсации). Качественная сторона работы выпрямителя оценивается соотношениями между полезной составляющей и пульсациями напряжения и тока. Коэффициент пульсаций данной схемы составляет 1,57. Среднее за период значение выпрямленного напряжения $U_H = 0,45U_2$. Максимальное значение обратного напряжения на диоде $U_{обр.макс} = 3,14U_H$.

Достоинством данной схемы является простота, недостатки: плохое использование трансформатора, большое обратное напряжение на диоде, большой коэффициент пульсации выпрямленного напряжения.

1.4. Однофазная мостовая схема выпрямления

Состоит из четырех диодов, включенных по мостовой схеме. В одну диагональ моста включается вторичная обмотка трансформатора, в другую – нагрузка (рис. 1.11). Общая точка катодов диодов VD2, VD4 является положительным полюсом выпрямителя, общая точка анодов диодов VD1, VD3 – отрицательным полюсом.

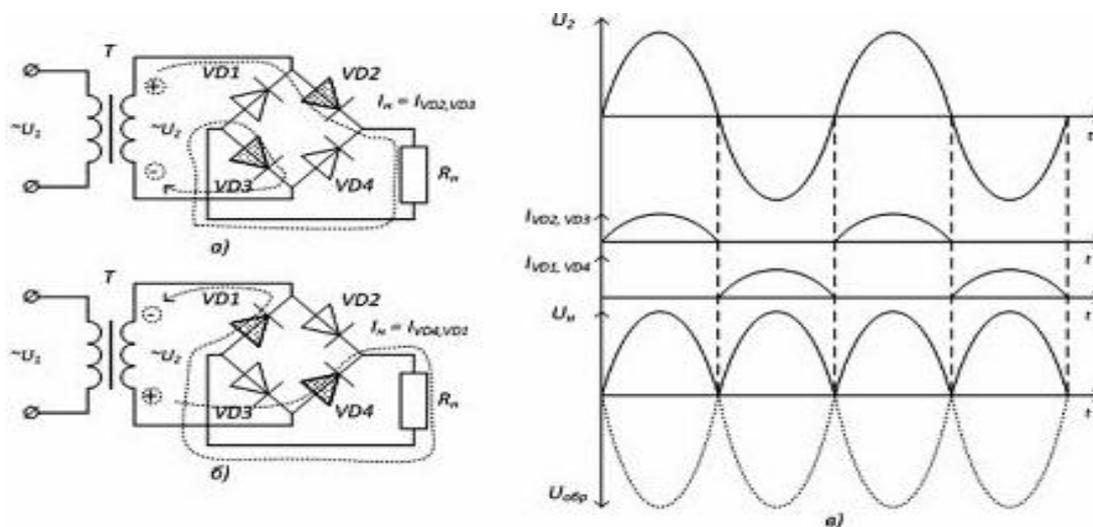


Рис. 1.11. Однофазный мостовой выпрямитель:
 а) схема – выпрямление положительной полуволны,
 б) выпрямление отрицательной полуволны,
 в) временные диаграммы работы

Полярность напряжения во вторичной обмотке меняется с частотой питающей сети. Диоды в этой схеме работают парами поочередно. В положительный полупериод напряжения u_2 проводят ток диоды VD2, VD3, а к диодам VD1, VD4 прикладывается обратное напряжение, и они закрыты. В отрицательный полупериод напряжения u_2 ток протекает через диоды VD1, VD4, а диоды VD2, VD3 закрыты. Ток в нагрузке проходит все время в одном направлении. Схема является двухполупериодной (двухтактной), т. к. на нагрузке выделяется оба полупериода сетевого напряжения $U_n = 0,9U_2$, коэффициент пульсаций – 0,67. Использование мостовой схемы включения диодов позволяет для выпрямления двух полупериодов использовать однофазный трансформатор. Кроме того, обратное напряжение, прикладываемое к диоду в 2 раза меньше. Питание постоянным током потребителей средней и большой мощности производится от трехфазных выпрямителей, применение которых снижает загрузку диодов по току и уменьшает коэффициент пульсаций.

1.5. Основные характеристики полупроводниковых диодов

Полупроводниковым диодом называют прибор с одним электрическим переходом и двумя выводами. В полупроводниковом диоде используется свойство р-п перехода хорошо проводить электрический ток в одном направлении и плохо пропускать его в противоположном направлении. Эти токи и соответствующие им напряжения между выводами полупроводникового диода называют прямым и обратным токами, прямым и обратным напряжениями. р-п-переход (n – negative – отрицательный, электронный; p – positive – положительный, дырочный), или электронно-дырочный переход – область соприкосновения двух полупроводников р- и n-типа, в которой происходит переход от одного типа проводимости к другому. Электрические процессы в р-п-переходах являются основой работы полупроводниковых диодов, транзисторов и других электронных полупроводниковых приборов с нелинейной вольт-амперной характеристикой.

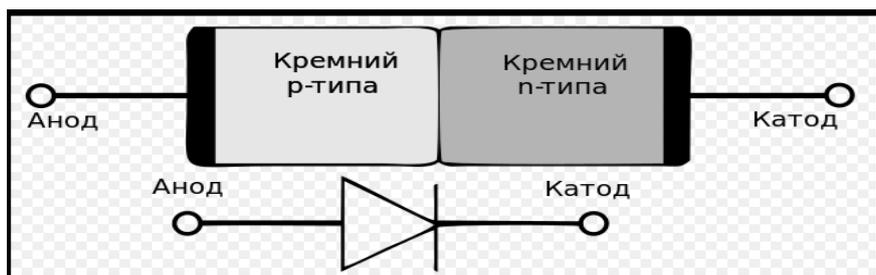


Рис. 1.12. Полупроводниковый диод

По типу конструкции перехода различаются точечные и плоскостные полупроводниковые диоды.

По назначению полупроводниковые диоды подразделяются на выпрямительные диоды малой, средней и большой мощности, полупроводниковые стабилитроны и импульсные диоды. В данной работе исследуется кремневый выпрямительный диод 1N4001.

Серия 1N4001 представляет собой семейство популярных 1,0 А кремневых выпрямительных диодов общего назначения, обычно применяющихся в адаптерах переменного тока для обычных бытовых приборов. Диапазон выпрямленного напряжения лежит в пределах от 50 до 1000 В. Данная серия полупроводниковых (кремневых) диодов выполнена в пластиковом корпусе.

Выпрямительные полупроводниковые диоды предназначены для выпрямления переменного тока. Основными параметрами выпрямительных диодов являются:

U_{пр} – прямое напряжение, при определенном прямом токе **I_{пр}**;

Задание 1.1.

Получение осциллограммы однополупериодного выпрямителя

Для этого используется первая схема в желтом секторе учебно-лабораторного стенда (рис. 1).

- с генератора («О Уген») переменный сигнал подается на вход схемы «Уген» с помощью специального коаксиального шнура;
- с помощью раздвоителя и коаксиального кабеля этот же сигнал подается на вход осциллографа «О Вх 1»;
- с выхода схемы КТ1 сигнал с помощью коаксиального кабеля подается на входы осциллографа «О Вх 2».

Полученные сигналы имеют вид, показанный на следующем рисунке 1.15.

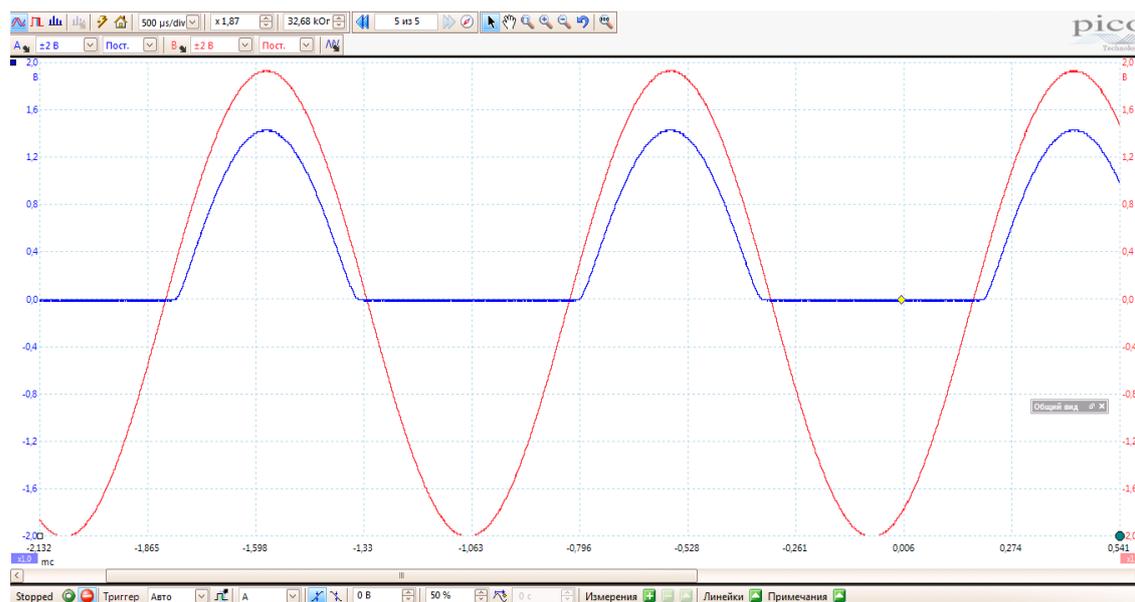


Рис. 1.15. Осциллограмма измеренных сигналов на входе выпрямителя на диоде 1N4001 (красный цвет) и нагрузке (синий цвет)

Задание 1.2.

Получение ВАХ диода на основе схемы на стенде

Для снятия ВАХ диода используется следующая схема на желтом секторе, в котором между его катодом и землей включен амперметр А1 (рис. 1).

- с выпрямителя («+ U») постоянный сигнал подается на вход схемы «U+» с помощью специального коаксиального шнура;
- с помощью раздвоителя и коаксиального кабеля этот же сигнал подается на вход вольтметра U_1 ;
- с выхода схемы КТ2 сигнал с помощью коаксиального кабеля подается на вход вольтметра U_2 ;
- с гнезда «А» с помощью специального шнура сигнал подается на амперметр.

Полученные данные сигналов заполняются на следующей таблице и по ним строится ВАХ диода – $I(U_2)$.

Измеренные данные ВАХ диода (прямая ветвь). Таблица 1.1

N	1	2	3	n
U_1, B						
U_2, B	0					
I, mA	0					

ВАХ можно построить на основе программы **Multisim**. Изменяя напряжение источника питания U_1 от 0 до 30 В, замеряем напряжение на нагрузке и ток через диод. Полученная ВАХ диода показана на рисунке 1.16. Видно, что диод начинает открываться при напряжении на нем, равном примерно 600 мВ.

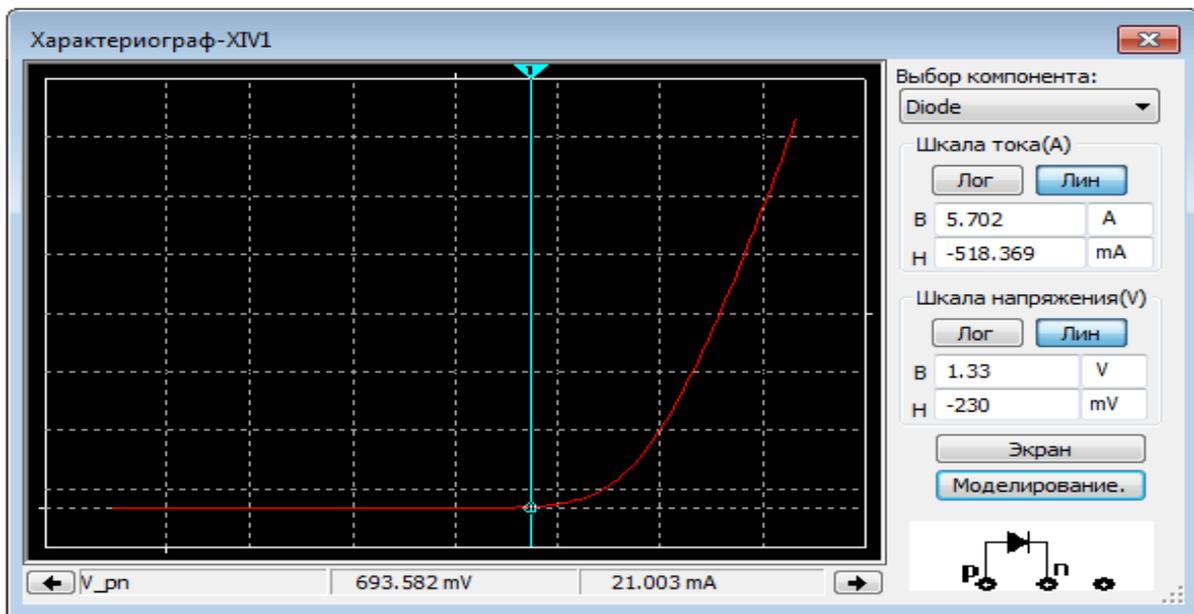


Рис. 1.16. Вольт-амперная характеристика диода

Для снятия ВАХ диода 1N4001 в диапазоне от $-2V$ до $+2V$, используем схему, показанную на рисунке 2. На входном генераторе $V1$ установим линейно-возрастающий сигнал с частотой 100 Гц, и амплитудой $\pm 2V$, и будем снимать напряжение с нагрузочного резистора. На стенде это будет блок “однополупериодный выпрямитель”, точки $U_{ген}(+U)$ и $KT2$. Полученная осциллограмма показана на рисунке 1.17.

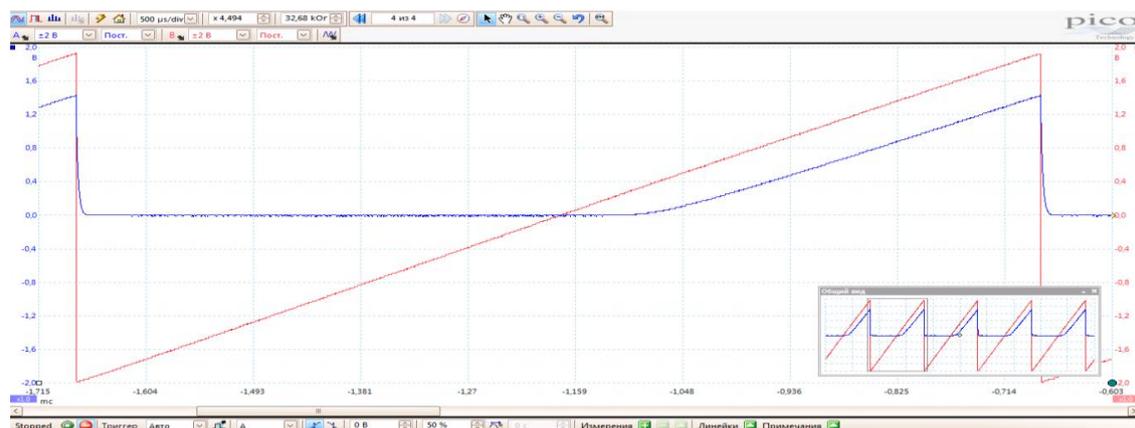


Рис. 1.17. Осциллограмма ВАХ диода 1N4001

Красная линия – напряжение с генератора, синяя – ВАХ диода, если предположить что по оси X напряжение на диоде, а по оси Y – ток через диод, видно, что расчетные и измеренные ВАХ похожи и отличаются только диапазоном входных напряжений, и напряжением открывания диода. Расчетный диод открывается при напряжении 600 мВ, и диод 1N4001 при напряжении 400 мВ

На рисунке 1.18 показана схема однополупериодного выпрямителя положительной полярности. Принцип работы его следующий. Сигнал переменного двухполярного напряжения подается на анод диода. Нагрузка подключена к катоду диода и вторым концом к земле. При приходе положительного напряжения на диод последний открывается, и весь ток идет через него и нагрузку. При приходе отрицательного напряжения диод закрывается и не пропускает ток через нагрузку.

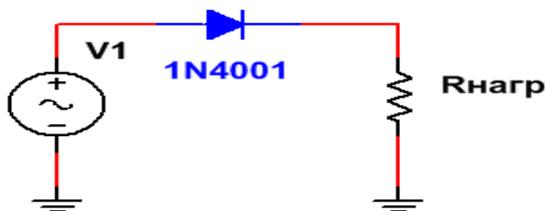


Рис. 1.18. Схема однополупериодного выпрямителя положительной полярности

На рисунке 1.19 показана осциллограмма сигналов на входе выпрямителя и положительные полуволны на нагрузке.

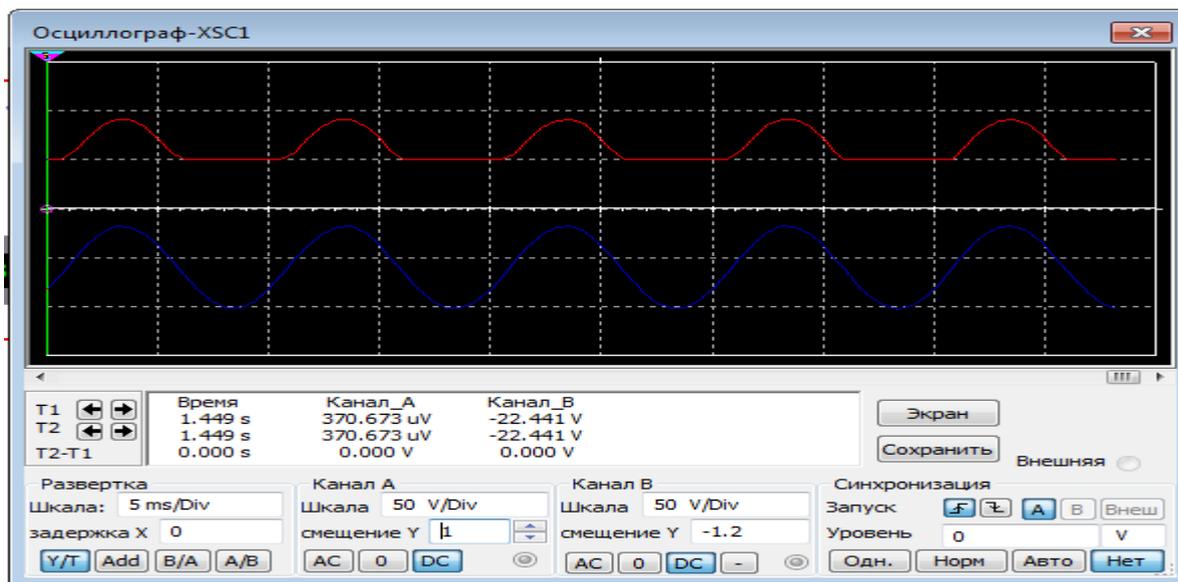


Рис. 1.19. Осциллограмма сигналов на входе выпрямителя (синий цвет) и нагрузке (красный цвет). Расчет выполнен в программе Multisim

Задание 1.3.

Получение осциллограммы двухполупериодного выпрямителя

Для этого используется третья схема в желтом секторе учебно-лабораторного стенда (рис. 1).

– с генератора («О Уген») переменный сигнал подается на вход схемы «Уген» с помощью специального коаксиального шнура;

- с помощью раздвоителя и коаксиального кабеля этот же сигнал подается на вход осциллографа «O Вх 1»;
- с выхода схемы КТЗ сигнал с помощью коаксиального кабеля подается на входы осциллографа «O Вх 2».

Полученные сигналы имеют вид, показанный на следующем рисунке 1.20.

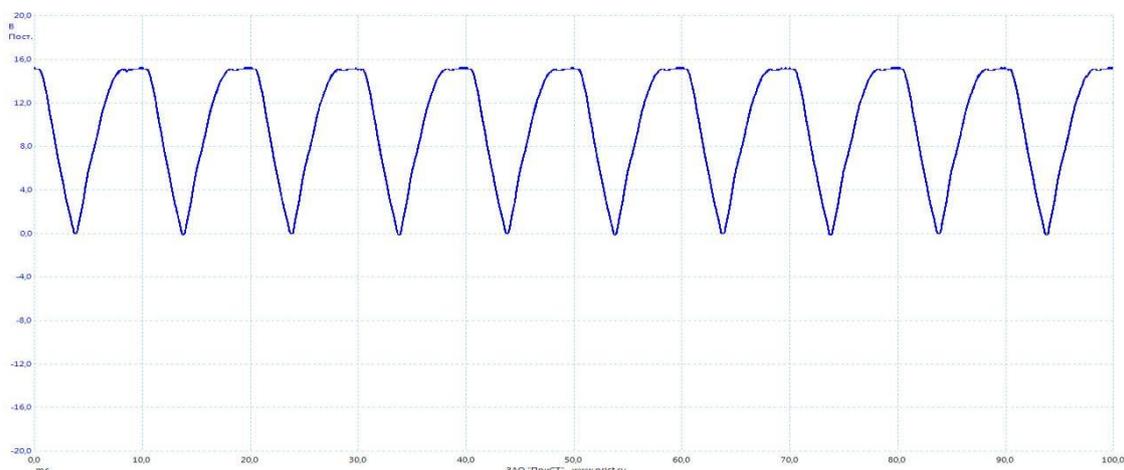


Рис. 1.20. Осциллограмма измеренного сигнала на выходе двухполупериодного выпрямителя на диодах 1N4001

Осциллограммы напряжений на входе и выходе мостового выпрямителя и напряжения в нагрузке показаны на рисунке 1.21.

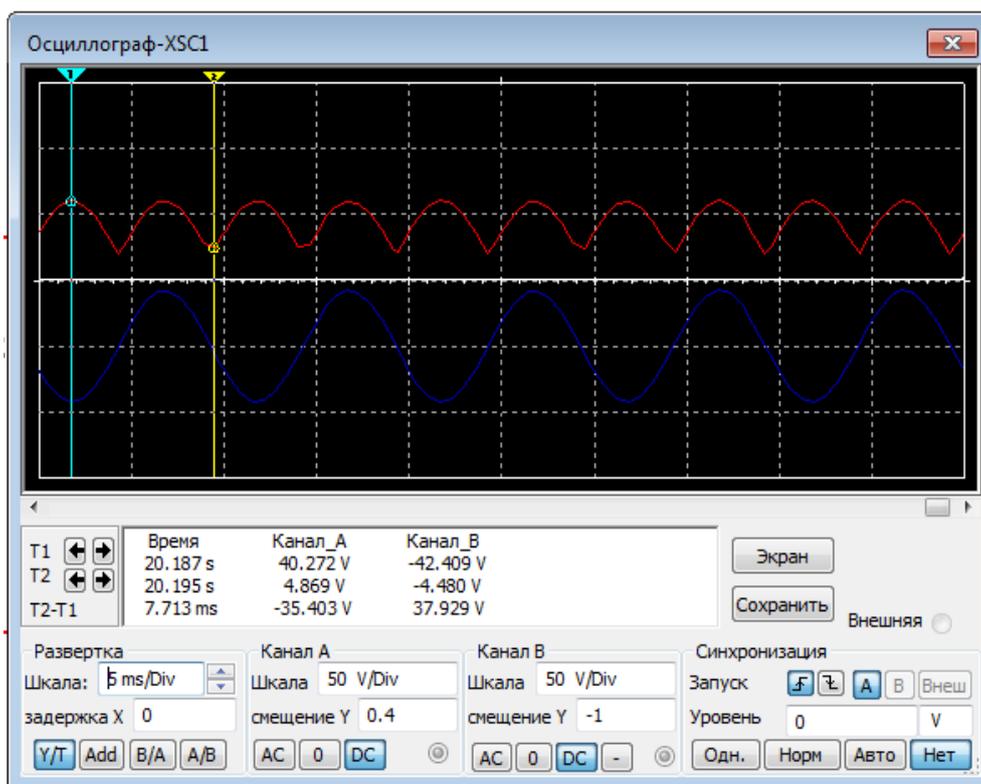


Рис. 1.21. Осциллограммы напряжений на входе мостового выпрямителя (синий цвет) и напряжения в нагрузке (красный цвет). Расчет выполнен в программе Multisim

1.7. Выпрямитель с удвоением напряжения

На рисунке 1.22 представлена схема выпрямителя переменного напряжения с удвоением величины этого напряжения.

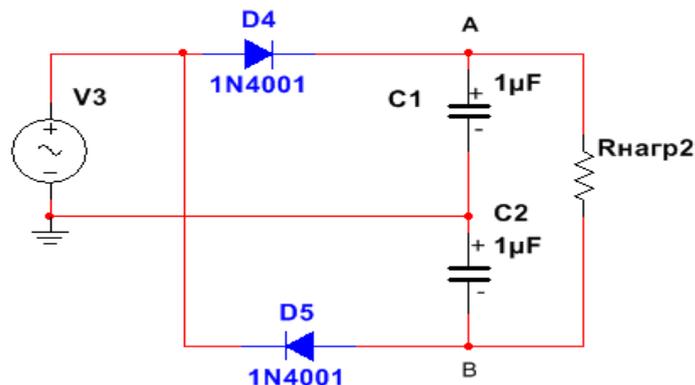


Рис. 1.22. Схема выпрямителя с удвоением напряжения

Принцип действия схемы следующий. Подаем на вход схемы переменное напряжение 30 Вольт (эффективное значение). Ток при положительной волне напряжения проходит по цепи +V3_D4_C1_-V3. Конденсатор C1 при этом заряжается (верхний конец будет положительный относительно нижнего) до напряжения питания минус падение напряжения на диоде D4.

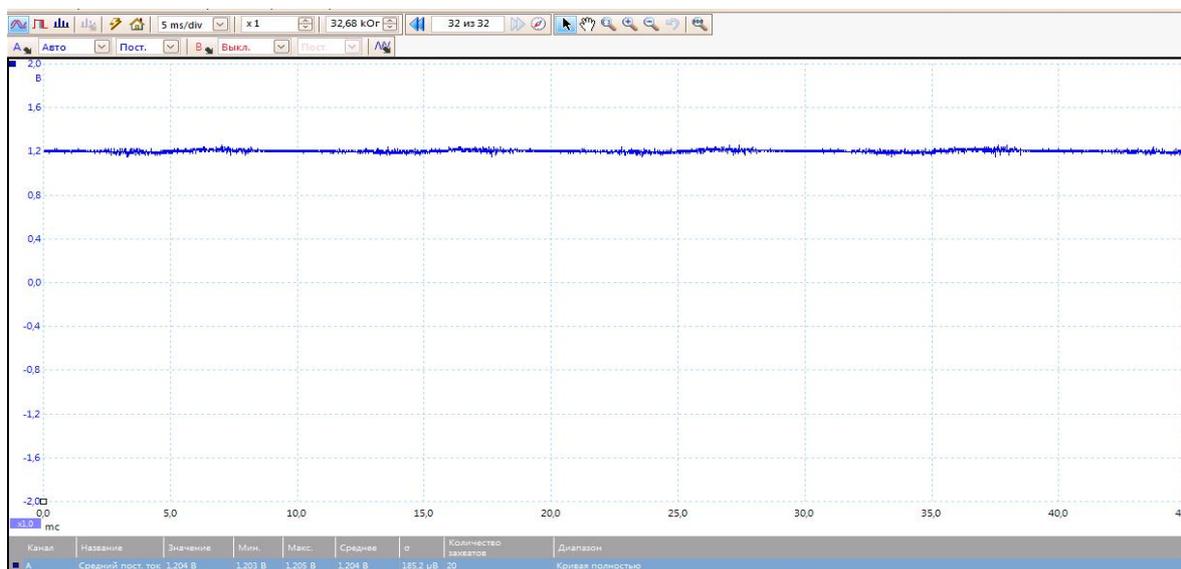


Рис. 1.23. Напряжение на конденсаторе C (показания напряжения умножить на 20)

При отрицательной волне напряжения, ток проходит по цепи +V3_D5_C2_-V3. При этом происходит заряд конденсатора C2 (нижний конец отрицательный относительно верхнего по схеме) до напряжении питания минус падение напряжения на диоде D5 (см. рис. 1.24).

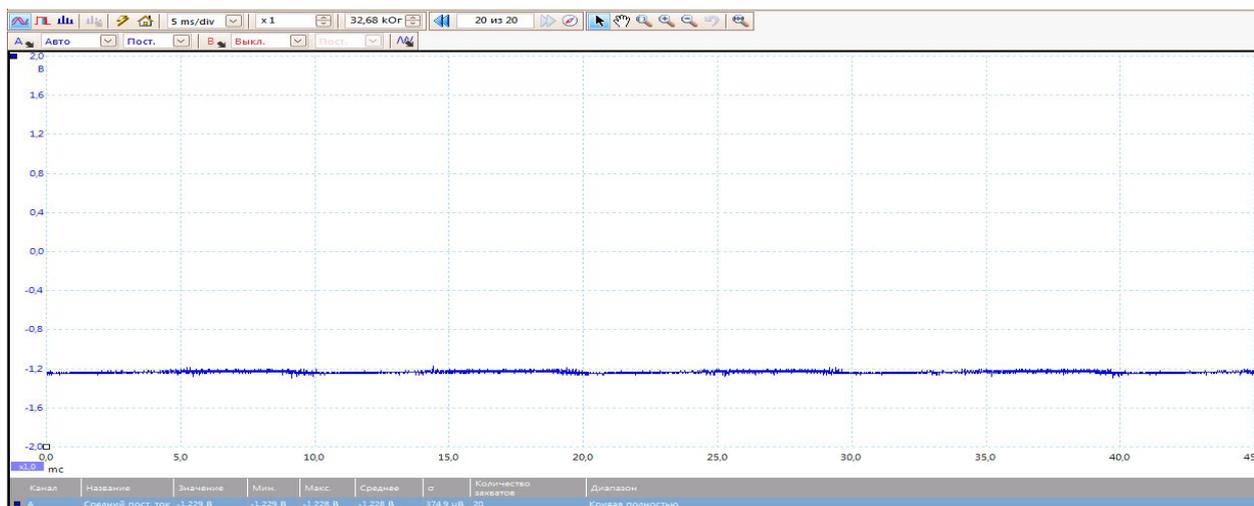


Рис. 1.24. Напряжение на конденсаторе C2 (показания напряжения умножить на 20)

В точках “А” “В” получаем примерно удвоенное значение постоянного напряжения (52,4 Вольта) относительно входного сигнала.

Полученные осциллограммы показаны на рисунке 1.25. Для снятия параметра “времени открывания” диода КД521 подадим на вход U ген(+U) (см. стенд “СХЕМОТЕХНИКА НА ОСНОВЕ ДИОДОВ”, блок однополупериодный выпрямитель), импульсный сигнал с генератора, и посмотрим сигнал в КТ2. Полученная осциллограмма показана на рисунке 1.25.

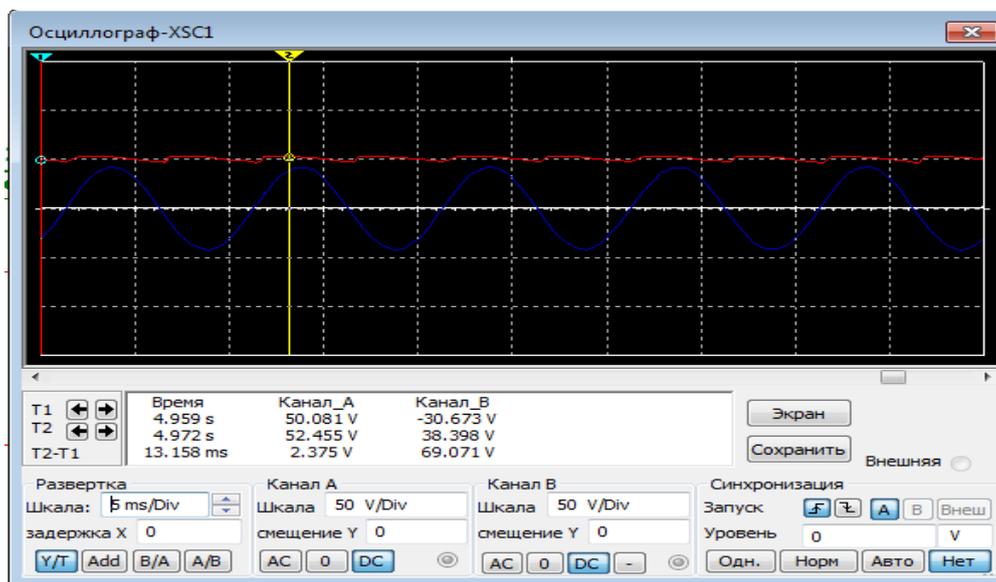


Рис. 1.25. Осциллограммы напряжения на входе (синий цвет) и выходе (красный цвет) выпрямителя с удвоением

Для снятия параметра “времени открывания” диода КД521 подадим на вход U ген(+U) (см. стенд “СХЕМОТЕХНИКА НА ОСНОВЕ ДИОДОВ”, блок однополупериодный выпрямитель), импульсный сигнал с генератора, и посмотрим сигнал в КТ2. Полученная осциллограмма показана на рисунке 2.4.5.

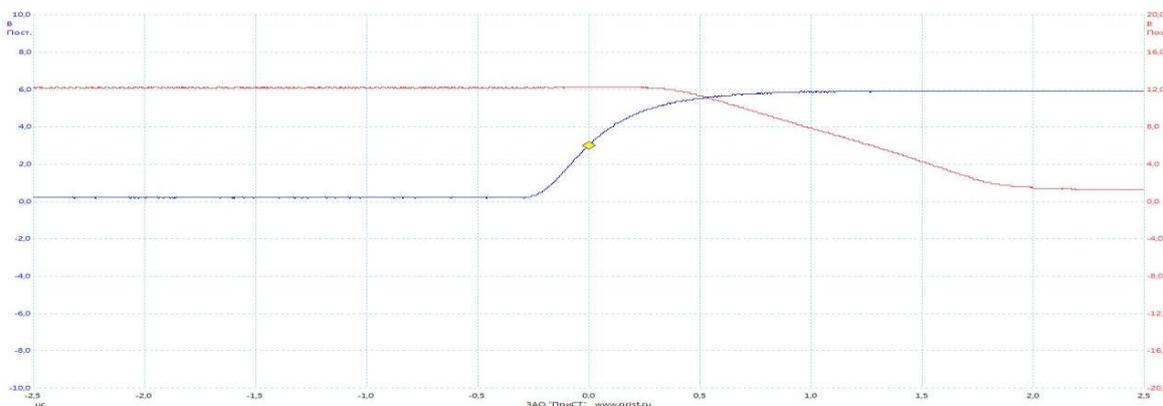


Рис. 1.26. Осциллограмма показывающая длительность времени открывания (включения) диода 1N4001

Определим время открывания $t_{вкл}$, мкс диода 1N4001 определим как:

$$t_{вкл} = t_{им} - t_{изм},$$

где $t_{им}$ – длительность фронта входного импульса:

$t_{изм}$ – длительность измеренного спада напряжения на диоде.

Откуда $t_{вкл} = 1,2 - 0,5 = 0,7$ мкс.

Лабораторная работа № 2. ИЗУЧЕНИЕ СТАБИЛИТРОНОВ, СТАБИСТОРОВ И ВАРИКАПОВ

В данной лабораторной работе изучаются различные базовые элементы, такие как стабисторы, стабилитроны и варикапы. При работе данных видов диодов физические процессы те же, что рассматривались при изучении выпрямительных диодов в 1 лабораторной работе. Здесь рассмотрим процессы пробоя p-n-перехода и его емкостные свойства, на которых основаны принцип работы стабилитронов и варикапов.

2.1. Пробой диода

При обратном напряжении диода свыше определенного критического значения наблюдается резкий рост обратного тока (рис. 2.1). Это явление называют пробоем диода. Пробой диода возникает в результате воздействия сильного электрического поля в p-n-переходе (рис. 2.1, кривая а). Такой пробой называется электрическим. Электрический пробой может быть туннельным или лавинным. Либо пробой возникает в результате разогрева перехода при протекании тока большого значения и при недостаточном теплоотводе, не обеспечивающем устойчивость теплового режима перехода. Такой пробой называется тепловым пробоем (рис. 2.1, кривая б, тепловой пробой). Электрический пробой при определенных условиях обратим, т. е. он не приводит к повреждению диода, и при снижении обратного напряжения свойства диода сохраняются. Тепловой пробой является необратимым. Нормальная работа диода в качестве элемента с односторонней проводимостью возможна лишь в режимах, когда обратное напряжение не превышает пробивного значения.

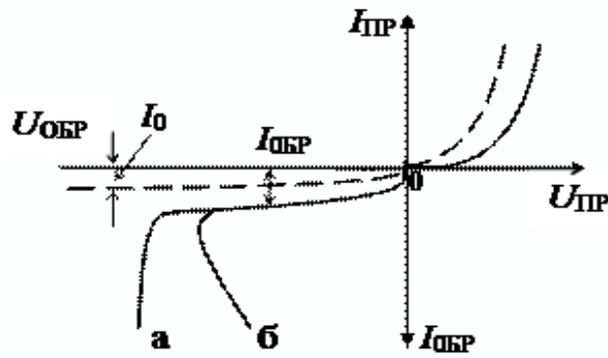


Рис. 2.1. Виды пробоя диодов

Пробой перехода связан с тем, что в закрытом состоянии перехода почти все приложенное напряжение действует в тонком пограничном слое. Поэтому в нем сформируется большая напряженность электрического поля, способная ускорить электрон на малом расстоянии до энергий достаточных для "выбивания" электрона из ковалентной связи; далее уже оба электрона будут ускорены, они выбьют еще электроны и так далее. Получится подобие электронной лавины, приводящей к пробую перехода. Пробую соответствует участок около U_c на ВАХ (см. рис. 2.1). Этот участок при U немного меньше U_c имеет участок нарастания тока, при практически неизменном напряжении на переходе, что позволяет использовать явление пробоя, вернее предпробойное состояние для стабилизации напряжения.

2.2. Стабилитроны и стабисторы

Стабилитрон и стабистор – разновидность полупроводниковых диодов, рассчитанные на стабилизацию напряжения на определенном уровне. При одинаковых задачах стабилитрон и стабистор имеют существенные отличия.

Стабилитроны используют обратную ветвь вольт-амперной характеристики, по сравнению с простыми диодами обладают достаточно низким напряжением пробоя (в случае обратного включения) и способны поддерживать регламентированное напряжение на одном уровне в условии весомых изменений силы обратного тока.

Напряжение стабилизации $U_{ст}$ равно напряжению электрического (лавинного) пробоя р-п перехода при некотором заданном токе стабилизации $I_{ст}$ (рис. 2.2). Стабилизирующие свойства характеризуются дифференциальным сопротивлением стабилитрона $r_d = DU/DI$, которое должно быть возможно меньше.

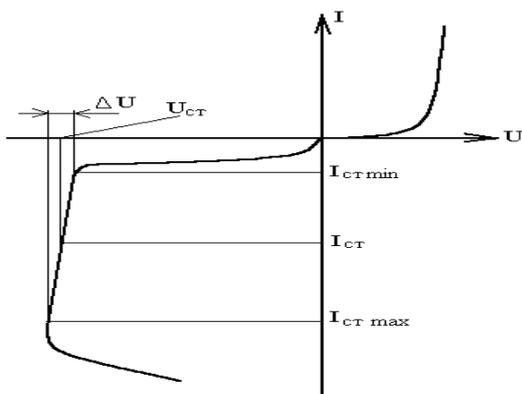


Рис. 2.2. ВАХ стабилитрона

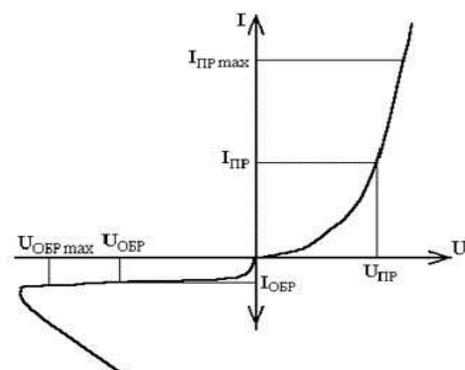


Рис. 2.3. ВАХ стабистора

Промышленностью выпускаются стабилитроны с параметрами: $U_{ст}$ от 1,5 до 180 В, токи стабилизации от 0,5 мА до 1,4 А. Выпускаются также двуханодные стабилитроны, служащие для стабилизации разнополярных напряжений и представляющие собой встречно включенные р-п.

Стабисторы используют прямую ветвь вольт-амперной характеристики, при этом в области прямого смещения происходит падение напряжения до 0,7 – 2в и практически не зависит от тока (рис. 2.2).

Основными отличиями между стабилитронами и стабисторами являются:

- напряжение стабилизации у стабилитрона от 3 до 400 В, когда у стабистора всего от 0,7 до 2 В;
- использование противоположных ветвей вольт-амперной характеристики, вследствие чего разные способы включения в электрическую цепь.

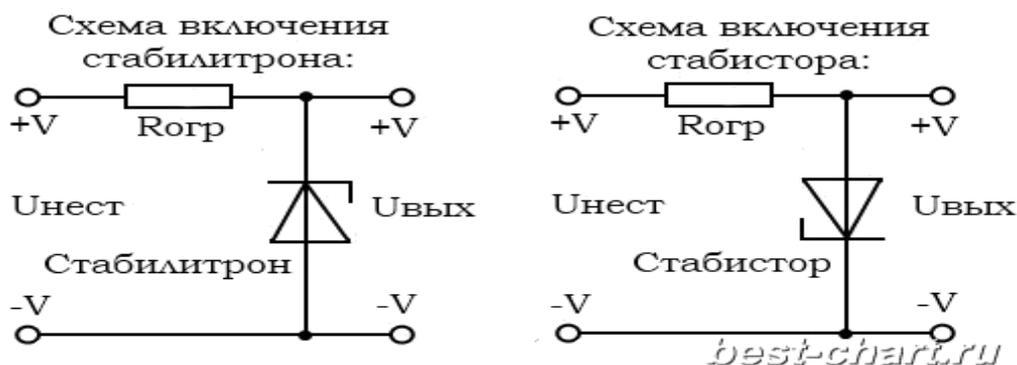


Рис. 2.4. Схемы включения стабилитрона и стабистора

Сопротивление токоограничивающего резистора рассчитывается по формуле:

$$R_{огр} = (U_{нест} - U_{вых}) / (I_{стаб} + I_{нагр}),$$

где $U_{нест}$ – нестабилизированное входное напряжение;

$U_{вых}$ – напряжение на выходе (стабилизированное);

$I_{стаб}$ – ток стабилизации стабилитрона;

$I_{нагр}$ – ток потребляемый нагрузкой.

Различают 3 вида стабилитронов:

- прецизионные – стабилитроны с повышенной степенью стабильности;
- быстродействующие – позволяющие улавливать кратковременные скачки напряжения;
- двусторонние – стабилизирующие и ограничивающие двухполярное напряжение.

2.3. Особенности применения стабилитронов

При прямом включении стабилитрон работает как обычный диод, т. е. открывается, проводя электрический ток. При обратном включении до определённого значения напряжения стабилитрон заперт, как обычный диод, а при достижении и превышении этого порогового значения в некоторых пределах происходит обратимый пробой р-п перехода, через стабилитрон начинает протекать ток, сильно зависящий от величины превышения напряжения пробоя. Если последовательно стабилитрону подключить резистор, то на нём при протекании тока будет падать часть приложенного напряжения, а напряжение на стабилитроне будет находиться практически на одном уровне. В таком режиме работы стабилитрон как бы пыта-

ется удержать напряжение на своём переходе в определённом узком диапазоне, стабилизировать его, от чего и получил своё название. Последовательный резистор принимает на себя часть избыточного напряжения, снижая ток стабилитрона и позволяя использовать его при более широких колебаниях напряжения. Называется он балластным сопротивлением.

Вольтамперную характеристику стабилитрона можно условно разбить на два участка – характеристика прямого и обратного включения. Характеристика прямого включения стабилитрона идентична характеристике прямого включения выпрямительного диода. Рассмотрим характеристику обратного включения (рис. 2.5), которая для стабилитрона является рабочей.

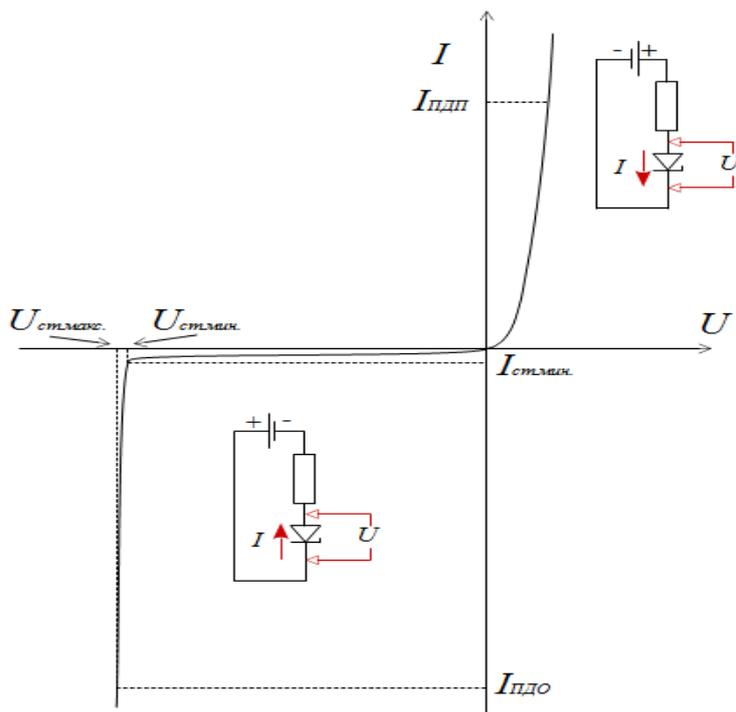


Рис. 2.5. Рабочая характеристика стабилитрона

При обратном напряжении на стабилитроне не достигшим значения напряжения стабилизации $U_{ст.мин.}$ он ведёт себя как обычный выпрямительный диод, через него протекает незначительный ток, обусловленный токами утечки через р-п переход.

Как только обратное напряжение достигает значения минимального напряжения стабилизации $U_{ст.мин.}$, происходит лавинный пробой р-п перехода, и стабилитрон начинает проводить ток в обратном направлении.

В некоторых пределах, от минимального тока стабилизации $I_{ст.мин.}$ до предельно допустимого значения обратного тока $I_{пдо}$, на р-п переходе выделяется некоторое количество тепла, отводимое через корпус стабилитрона. Отвод тепла не позволяет р-п переходу перегреться, что предотвращает его термическое разрушение. Как только величина напряжения на стабилитроне снижается до значений меньше минимального напряжения стабилизации, лавинная проводимость прекращается, р-п переход восстанавливается и прекращает проводить электрический ток, за исключением тока утечки. На этом участке характеристики напряжение стабилизации может варьироваться от некоторого минимального до максимального значений: $U_{ст.мин.} - U_{ст.макс.}$. Если обратный ток стабилитрона превысит значение предельно допустимого, отвод выделяемого тепла на р-п переходе может оказаться не достаточным, при этом переход «спекается», лавинный пробой становится необратимым, стабилитрон выходит из строя. При проверке такого стабилитрона мультиметром может наблюдаться как обрыв цепи стабилитрона, так и короткое замыкание.

2.4. Основные параметры стабилитрона

Для расчета параметров схем с применением стабилитронов требуется знать три основных его параметра: напряжение стабилизации, минимальный ток стабилизации и предельно-допустимый обратный ток. В некоторых случаях может потребоваться величина предельно допустимого прямого тока стабилитрона, если он используется в цепи переменного напряжения и должен проводить ток в оба полупериода.

Напряжение стабилизации

Напряжение стабилизации, это усреднённое значение между минимальным и максимальным напряжениями стабилизации. В справочниках приводится как основной параметр. Дополнительно может указываться погрешность этого напряжения, а также минимальное и максимальное значение напряжения стабилизации.

Минимальный ток стабилизации

Минимальным током стабилизации является значение тока, при котором начинается обратимый лавинный пробой р-п перехода. Это значение тока соответствует минимальному напряжению стабилизации.

Максимально допустимый ток стабилизации

Это максимальное значение обратного тока, при котором р-п переход может быть подвержен длительное время обратимому пробую, без термического разрушения и изменения параметров стабилизации.

Максимально допустимый прямой ток

Максимальное значение прямого тока стабилитрона, которое длительное время может выдержать его р-п переход без термического разрушения и ухудшения параметров проводимости.

2.5. Варикапы

Один из способов применения стабилитронов является использование их в качестве емкости изменяемой от приложенного к стабилитрону напряжения, аналог варикапа.

Варикапом называется полупроводниковый диод, используемый в качестве электрически управляемой емкости с достаточно высокой добротностью в диапазоне рабочих частот. В нем используется свойство р-п-перехода изменять барьерную емкость под действием внешнего напряжения (рис. 2.6).

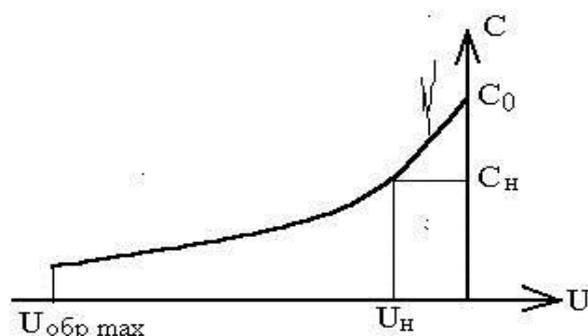


Рис. 2.6. Зависимость емкости варикапа от напряжения

Основные параметры варикапа: номинальная емкость C_H при заданном номинальном напряжением U_H (обычно 4 В), максимальное обратное напряжение $U_{обр\ max}$, добротность Q .

Основное применение варикапов – электрическая перестройка частоты колебательных контуров. В настоящее время существует несколько разновидностей варикапов, применяемых в различных устройствах непрерывного действия. Это параметрические диоды, предназначенные для усиления и генерации СВЧ-сигналов, и умножительные диоды, предназначенные для умножения частоты в широком диапазоне частот. Иногда в умножительных диодах используется и диффузионная емкость.

Задание 2.1. Получение ВАХ стабистора

В данной работе в качестве стабистора используется КД521. Вначале требуется определить его параметры.

Параметры стабистора КД52. Таблица 2.1

Наимен.	$U_{обр.}, В$	$I_{пр. \max}, А$	$I_{обр. \max}, мкА$	$F_d \max, кГц$	Тип корпуса
КД521А	75	0.05	1	100000	
КД521В	50	0.05	1	100000	
КД521Г	30	0.05	1	100000	
КД521Д	12	0.05	1	100000	

Эта процедура необходима для того, чтобы исключить превышение максимальных значений напряжения и тока при получении ВАХ стабистора. Нельзя подавать на стабистор напряжение, обуславливающее протекание тока больше максимального тока стабилизации. Это может привести к тепловому пробое и выхода из строя диода.

С другой стороны студенты должны приобрести навыки поиска данных для различных элементов электроники, приобрести знания о маркировке и классификации их.

Подавая прямое напряжение на вход схемы стабистора $+U$, начиная с нуля, снимаем значение тока амперметром (красный разъем) и заполняем следующую таблицу:

ВАХ стабистора. Таблица 2.2

n/n	1	2	...	N
$U_{пр}, В$				
$I_{пр}, мкА$				

По полученным данным строится ВАХ стабистора.

Делается анализ ВАХ стабистора, сравниваются её реальные параметры и паспортные данные. Определяются различия между идеальными и реальными ВАХ, объясняются причины их различия.

Задание 2.2. Изучение ограничивающих свойств стабилитора

Для изучения ограничивающих свойств стабилитора, в изучаемой схеме, на её вход подается переменный сигнал с амплитудой большей, чем напряжение стабилизации стабилитора ($U = 1,7 \text{ В}$). Выходной сигнал снимается с контрольной точки КТ5. Для этого на один из каналов электронного осциллографа, через тройное соединение, подается сигнал с генератора. На второй канал сигнал подается с выхода схемы КТ5.

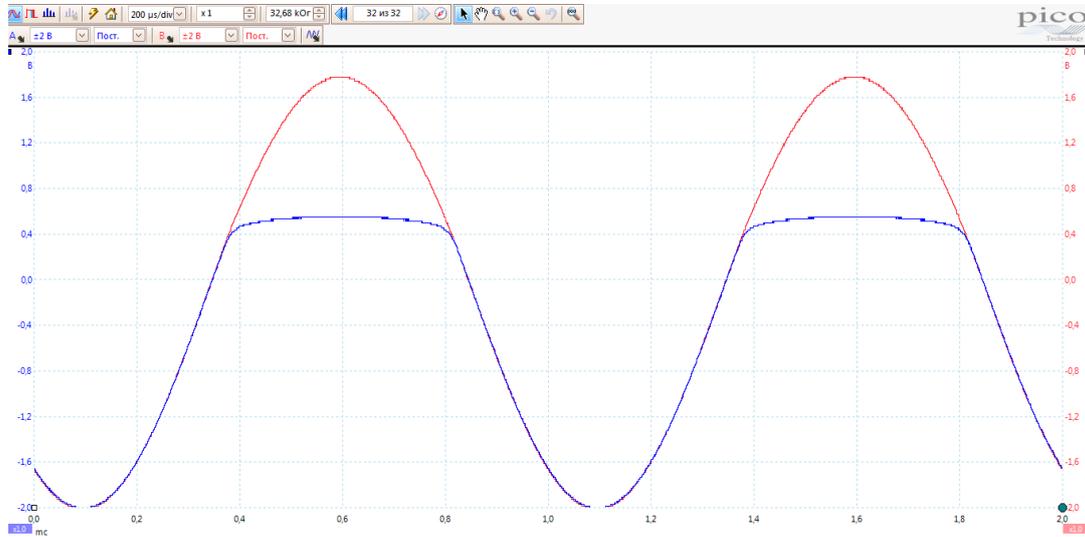


Рис. 2.7. Осциллограмма работы стабилитора КД521 в качестве ограничителя

Осциллограммы входного (красная линия) и выходного сигнала (синяя линия), полученные с помощью электронного осциллографа представлены на рисунке 2.7. Как отсюда видим, выходной сигнал имеет ограничение приблизительно на уровне 0,5 В.

Красная линия (канал В) входной сигнал подавался в точку +U, синяя (канал А), напряжение на стабилитроне, снималось с точки КТ5 (см. Рис.1).

Как видно из рисунка режим стабилизации стабилитора находится в интервале 0,5 – 0,6 В, и мало зависит от превышающего входного напряжения.

Задание 2.3. Получение вольтамперной характеристики (ВАХ) стабилитронов

На основе разрабатываемого стенда можно получить ВАХ стабилитронов. Для этого используется схема на основе стабилитрона (зелёный сектор, вторая схема), амперметр и вольтметр. В качестве последних используются мультиметры. Токи малых значений в обратной ветви стабилитрона (до пробоя) желательно измерять микроамперметром.

До проведения измерений по маркировке стабилитрона по справочнику (или по Интернету) определяются его параметры:

Основными параметрами стабилитрона являются:

U_{cm} – напряжение на стабилитроне;

R_d – динамическое сопротивление на участке стабилизации;

I_{max} и I_{min} – максимальный и минимальный токи стабилизации;

$ТКН$ – температурный коэффициент напряжения на участке стабилизации, характеризующий относительное изменение напряжения стабилизации, вызванное изменением температуры на 1 C° при постоянном токе, протекающем через стабилитрон.

Примеры маркировки стабилитронов:

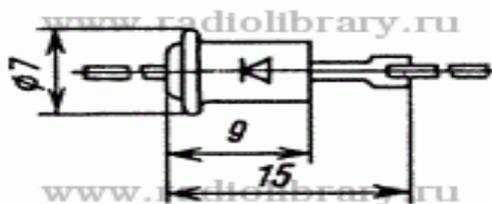


Рис. 2.8. Размеры и цоколевка стабилитрона KC156A

Характеристики стабилитрона KC156A

- Номинальное напряжение стабилизации – **5,6 В**
- Ток стабилизации стабилитрона – **10 мА**
- Температурный коэффициент напряжения стабилизации стабилитрона – **±0,05 %/С**
- Постоянное прямое напряжение **1 (50) В**
- Дифференциальное сопротивление стабилитрона **46 (10) Ом**
- Минимально допустимый ток стабилизации стабилитрона **3 мА**
- Максимально допустимый ток стабилизации стабилитрона **55 мА**
- Прямая рассеиваемая мощность **0,3 Вт**
- Рабочий диапазон температуры **-60... + 125 гр.**

Эта процедура необходима для того, чтобы исключить превышение максимальных значений напряжения и тока при получении ВАХ стабилитрона. Нельзя подавать на стабилитрон напряжение, обуславливающее протекание тока больше максимального тока стабилизации. Это может привести тепловому пробую и выхода из строя стабилитрона.

Подавая обратное напряжение на вход схемы стабилитрона +U, начиная с нуля, снимаем значение тока амперметром (красный разъем) и заполняем следующую таблицу:

ВАХ стабилитрона. Таблица 2.3

n/n	1	2	...	N
U, В				
I, мкА				

По полученным данным строится ВАХ стабилитрона.

Делается анализ ВАХ стабилитрона, сравниваются её реальные параметры и паспортные данные. Определяются различия между идеальными и реальными ВАХ, объясняются причины их различия.

Задание 2.4.

Стабилитроны в качестве ограничителя напряжения

Для изучения ограничивающих свойств стабилитрона, в изучаемой схеме, на её вход подается переменный сигнал с амплитудой большей, чем напряжение стабилизации стабилитрона ($U = 6 \text{ В}$, $f = 1 \text{ кГц}$). Выходной сигнал снимается с контрольной точки КТ6. Для этого на один из каналов электронного осциллографа, через тройное соединение, подается сигнал с генератора. На второй канал сигнал подается с выхода схемы КТ6. Осциллограммы входного (красная линия) и выходного сигнала (синяя линия), полученные с помощью электронного осциллографа представлены на рис. 2.9. Как отсюда видим, выходной сигнал имеет ограничение приблизительно на уровне 5 В.

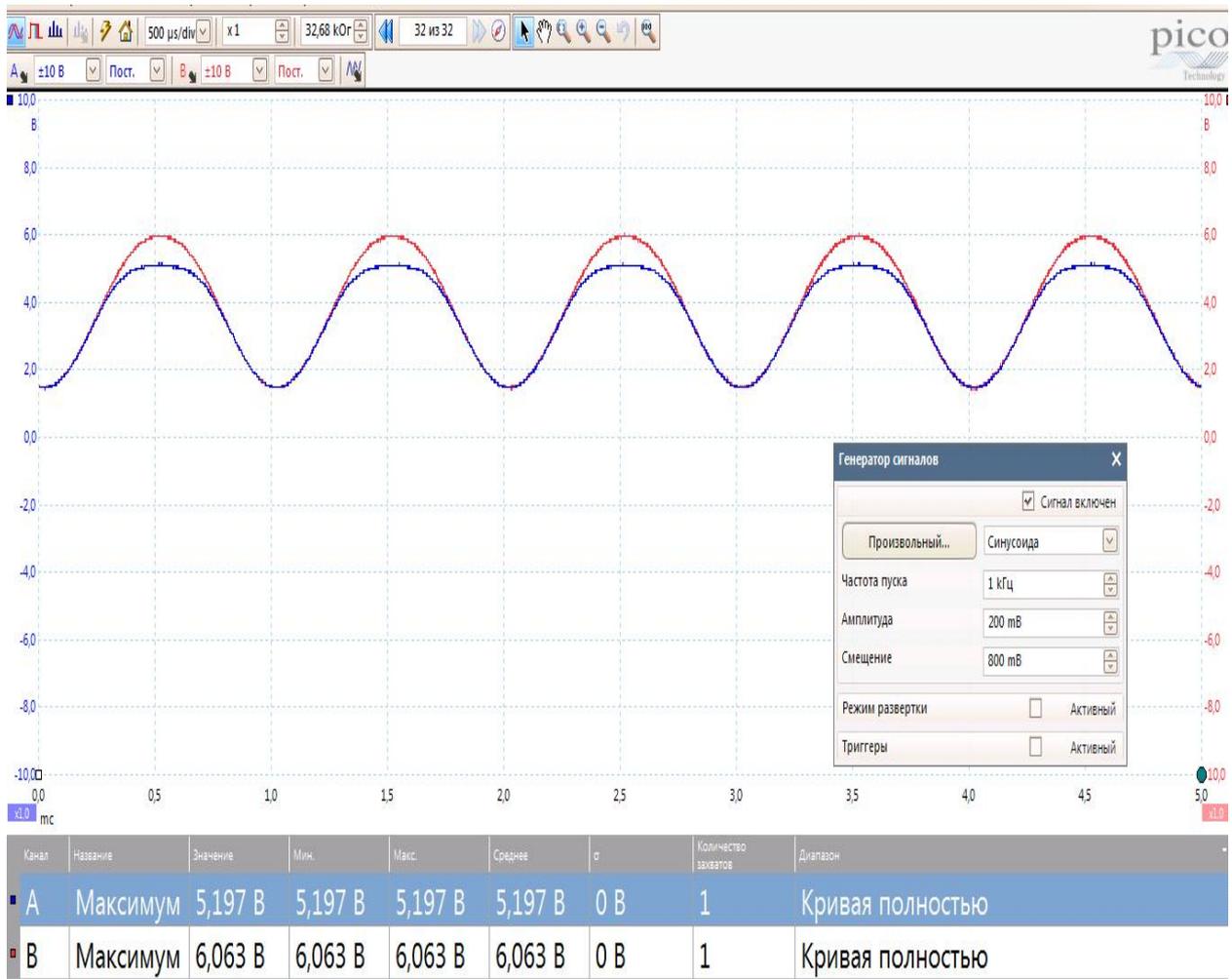


Рис. 2.9. Осциллограмма работы стабилитрона КС156 в качестве ограничителя. Красная линия (канал В) входной сигнал подавался в точку +U, синяя (канал А), напряжение на стабилитроне, снималось с точки КТ6

Задание 2.5. Изучение стабилизирующих свойств стабилитронов

В первом случае на вход подаем не стабилизированный сигнал по уровню меньший, чем напряжение стабилизации стабилитрона. Осциллограммы сигналов на входе и на выходе, представлены на рисунке 2.10. Здесь также входной сигнал имеет красный цвет, а выходной сигнал – синий цвет. Сравнение этих сигналов показывает, что в этом случае изменения сигнала не происходит, сигналы повторяют друг друга.

Как видно из рисунка 2.10, напряжения практически идентичны (на стабилитроне чуть меньше из-за падения напряжения на резисторе R4, см рис.1).

Во втором случае, на вход подается нестабилизированный сигнал по уровню выше уровня напряжения стабилизации стабилитрона. Полученные осциллограммы представлены на рис. 2.11. Как видно, напряжение на стабилитроне равно напряжению стабилизации, и мало зависит от входного напряжения, что видно по сглаживанию пульсаций.

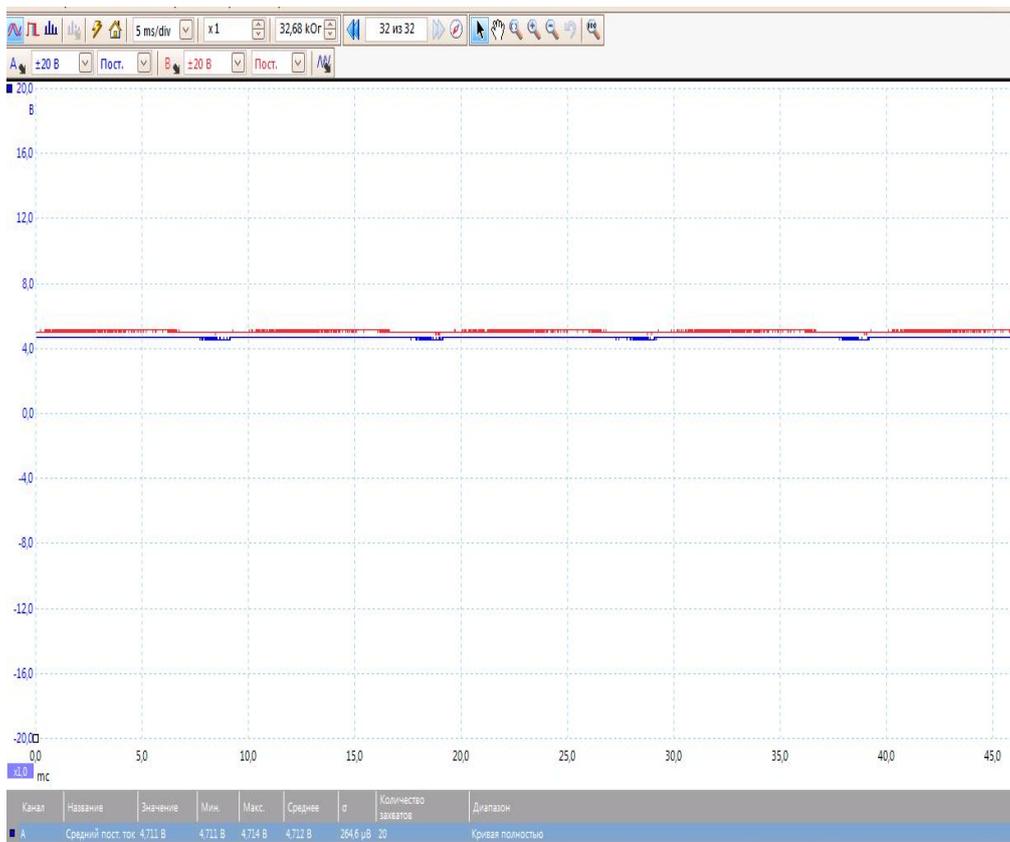


Рис. 2.10. Осциллограмма напряжения на входе схемы (красная линия) и на стабильтроне КС156 (синяя линия) при напряжении на входе (+U) меньше, чем напряжение стабилизации

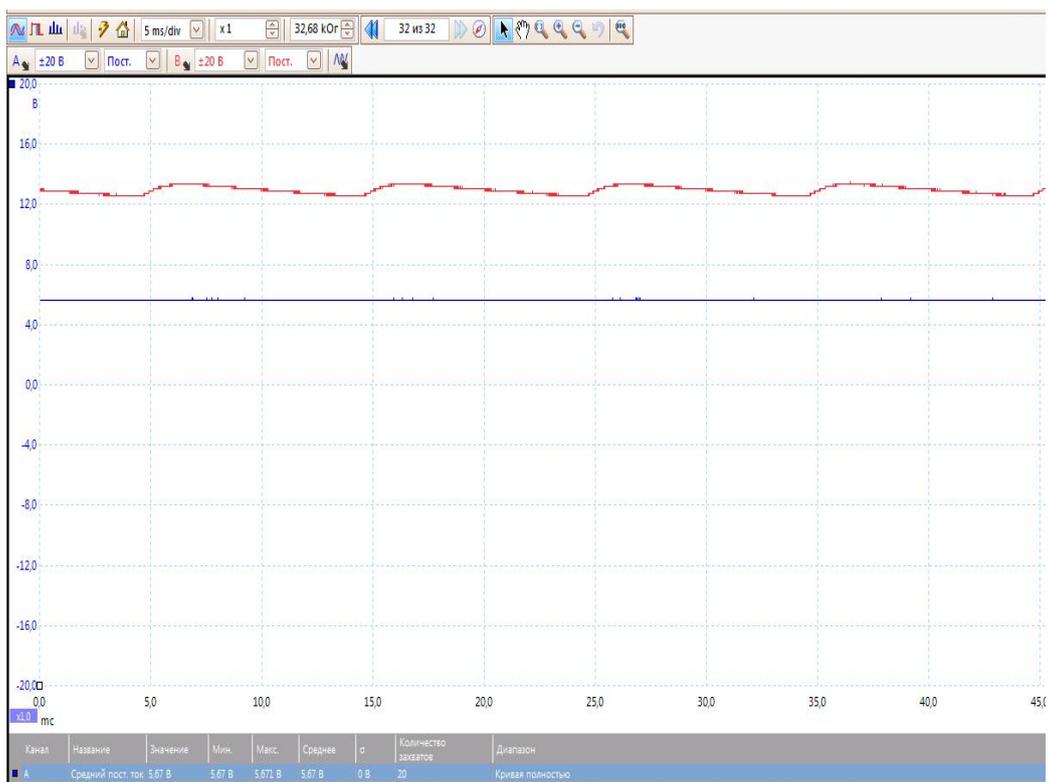
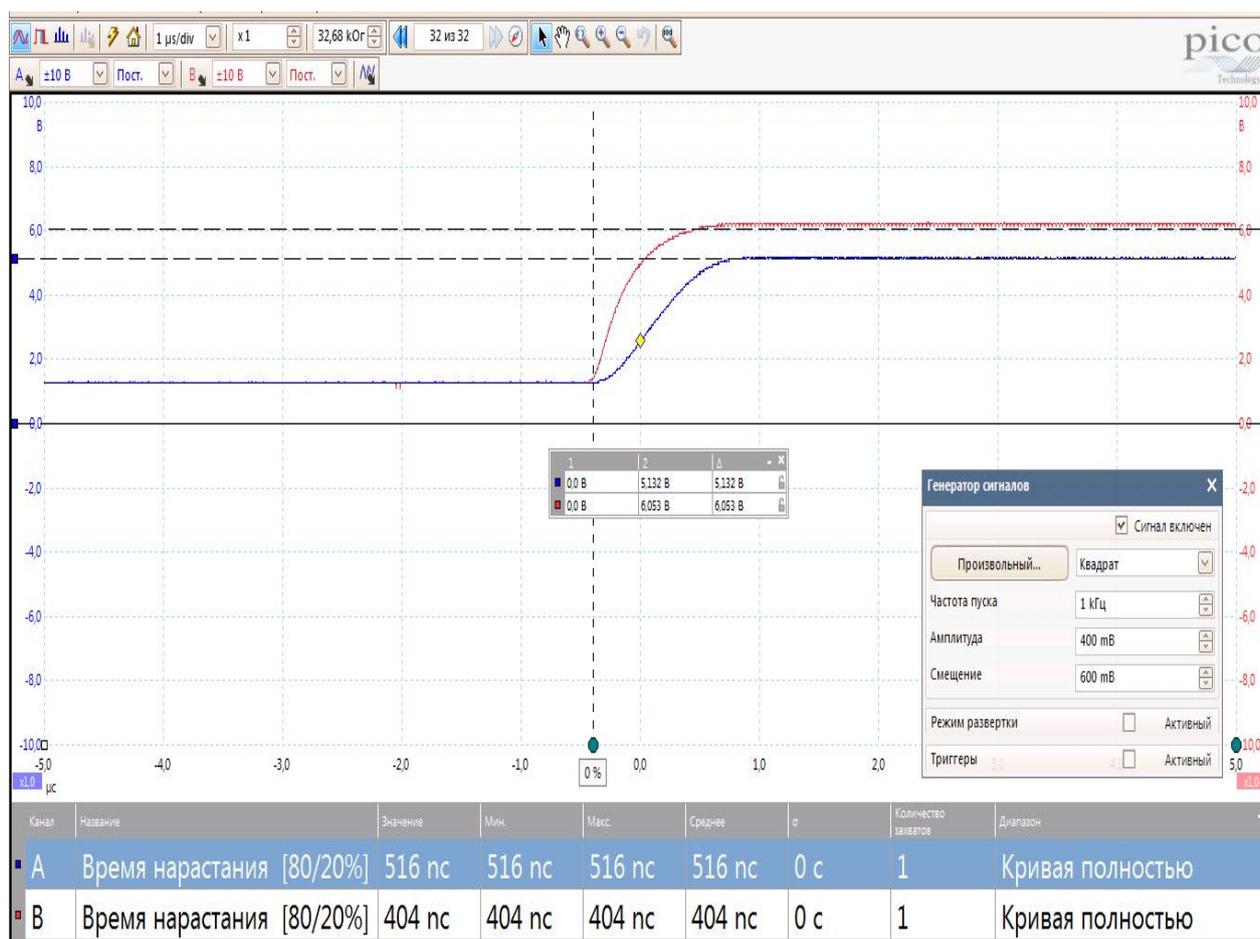


Рис. 2.11. Осциллограмма напряжения на входе схемы (красная линия) и на стабильтроне КС156 (синяя линия) при напряжении на входе (+U) большем, чем напряжение стабилизации

Задание 2.6. Изучение инерционных свойств стабилитронов

Для изучения инерционных свойств стабилитронов необходимо сравнить задержку импульсов по переднему и заднему фронтам. Как и в предыдущем задании, в изучаемой схеме, на её вход подается прямоугольный сигнал с некоторым временем нарастания (в нашем случае она была равна 404 нс). Выходной сигнал снимается с контрольной точки КТ6. Для этого на один из каналов электронного осциллографа, через тройное соединение, подается сигнал с генератора. На второй канал электронного осциллографа сигнал подается с выхода схемы КТ6. Осциллограммы входного (красная линия) и выходного сигнала (синяя линия), полученные с помощью электронного осциллографа представлены на рисунке 2.12. Как отсюда видим, выходной сигнал имеет фронт нарастание 516 нс и больше чем фронт нарастание входного сигнала на более чем 100 нс. Этой величиной определяется порядок инерционности данного стабилитрона по переднему фронту.



*Рис. 2.12. Время нарастания фронта сигнала на стабилитроне.
Красная линия (канал B) фронт входного импульса.
Синяя линия (канал A), фронт сигнала на стабилитроне*

Данные фронта спада представлены на рисунке 2.13. Эти графики также получены на электронном осциллографе. Как видно отсюда, Время спада входного импульса равна 464 нс, тогда как время затухания выходного импульса 960 нс и инерционность составляет почти 500 нс ($960 - 464 = 496$ нс).

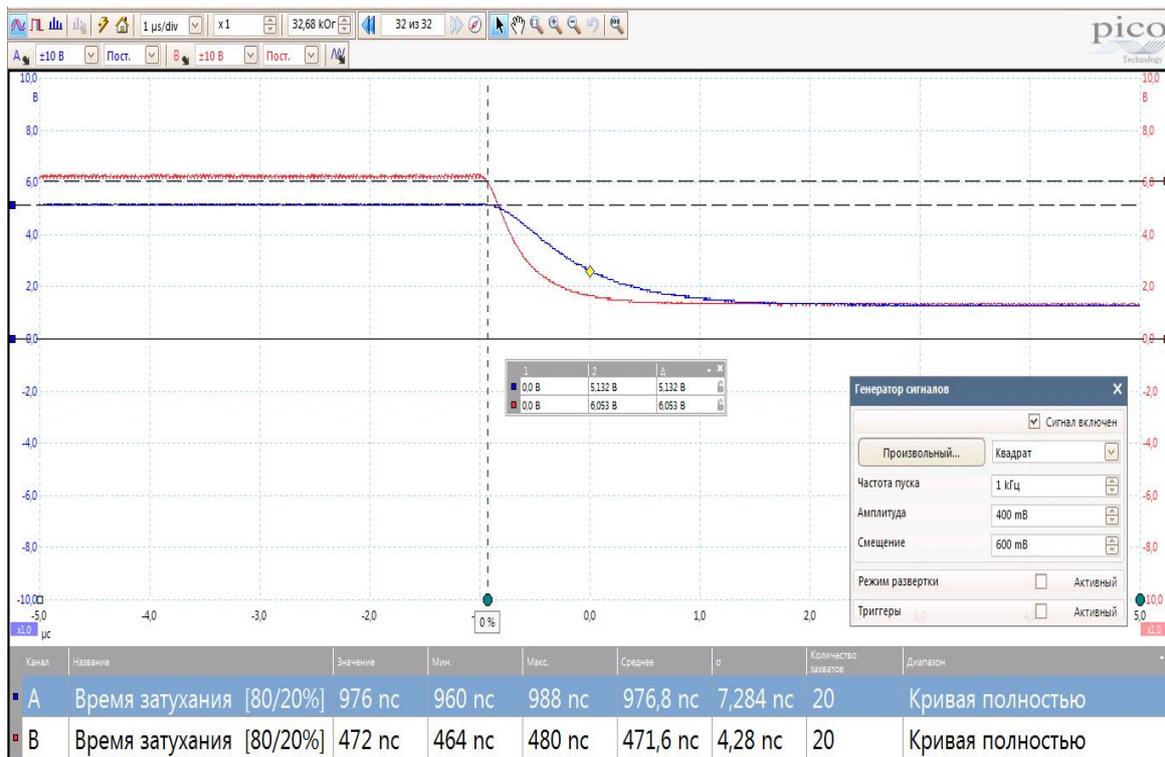


Рис. 2.13. Время спада сигнала на стабильтроне. Красная линия (канал B) спад входного импульса. Синяя линия (канал A), спад сигнала на стабильтроне

Задание 2.7.

Изучение стабильтрона в режиме варикапа

Для изучения зависимости емкости варикапа от приложенного обратного напряжения собрана следующая схема (схема «варикап» в стенде «СХЕМОТЕХНИКА НА ОСНОВЕ ДИОДОВ»), состоящая из входного гнезда «+U», резистора R5, емкостей C3, C4 и выходного гнезда «КТ7». Варикап CD1 включается параллельно C3 двойным реле S1.

Подается фиксированный положительный потенциал на вход «+U», при этом сначала измеряется емкость C3 без стабильтрона. Затем параллельно C3 включается варикап CD1 и измеряется суммарная емкость (C_{сум}). Данные заносятся в таблицу 4. Емкость варикапа определяется как $C=C_{\text{сум}} - C_3$.

Изменение емкости варикапа от приложенного к нему напряжения. Таблица 2.4

Напряжение на варикапа, В	Емкость(C ₃) без варикапа, нФ	Суммарная (C _{сум}) емкость с варикапом, нФ	Емкость (C) варикапа, нФ
2	2	2,2	0,2
4	2,1	2,3	0,2
6	2,3	4,1	1,8
6,5	2,4	18,4	16
7	2,4	31	28,6
7,5	2,4	37,6	35,2
8	2,4	49,4	47
8,5	2,5	62,5	60
9	2,5	65,8	63,3
10	2,6	66,2	63,6

По табличным данным были построены зависимости емкостей от приложенного обратного напряжения на варикапе. Отсюда видно, что основное изменение емкости происходит при напряжении на стабилитроне от 6 до 9 Вольт.

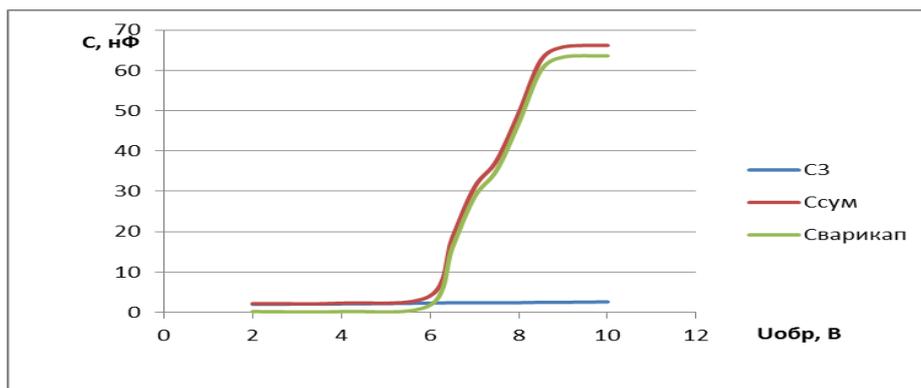


Рис. 2.14. Зависимости емкости $C_З$, суммарной емкости $C_{сум}$ и емкости варикапа $C_{вар}$ от приложенного обратного напряжения

Лабораторная работа № 3. ИЗУЧЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА НА ОСНОВЕ ТИРИСТОРА И ТУННЕЛЬНОГО ДИОДА

3.1. Туннельные диоды

Туннельный диод – это полупроводниковый диод на основе вырожденного полупроводника, в котором туннельный эффект приводит к появлению на вольт-амперной характеристике при прямом напряжении участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Для изготовления туннельных диодов используют полупроводниковый материал с очень высокой концентрацией примесей ($10^{18} - 10^{20} \text{ См}^{-3}$), вследствие чего получается малая толщина р-п-перехода (около 10^{-2} мкм), что на два порядка меньше, чем в других полупроводниковых диодах, и сквозь тонкий потенциальный барьер возможно туннелирование свободных носителей заряда.

На рисунке 3.1 представлена вольтамперная характеристика типичного туннельного диода при прямом смещении.

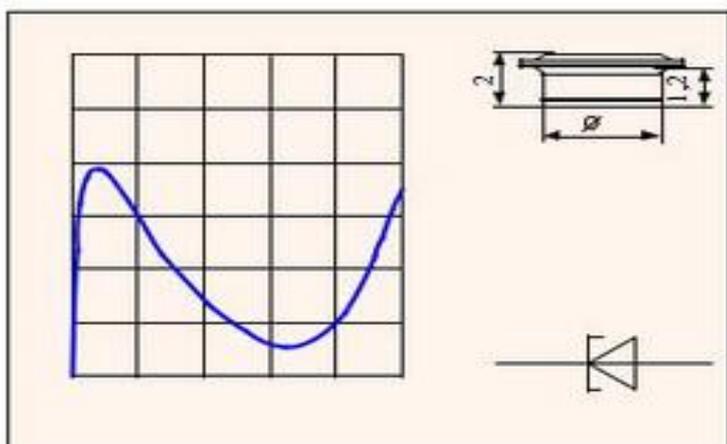


Рис. 3.1. Туннельный диод ИИ104:
а – вольт-амперная характеристика при прямом смещении;
б – конструктивное исполнение;
в – условное графическое изображение туннельных диодов

Параметрами туннельных диодов являются (рис. 3.2, а):

1. Пиковый ток I_{Π} – значение прямого тока в точке максимума вольт-амперной характеристики;
2. Ток впадины $I_{\text{в}}$ – значение прямого тока в точке минимума вольт-амперной характеристики;
3. Отношение токов $I_{\Pi}/I_{\text{в}}$;
4. Напряжение пика U_{Π} – значение прямого напряжения, соответствующее пиковому току;
5. Напряжение впадины $U_{\text{в}}$ – значение прямого напряжения, соответствующее току впадины;
6. Напряжение раствора $U_{\text{рр}}$ – значение прямого напряжения на второй восходящей ветви, при котором ток равен пиковому току.

Работа туннельного диода иллюстрируется диаграммами, изображенными на рисунке 3.2.

В равновесном состоянии системы уровень Ферми постоянен для обеих областей полупроводникового диода, поэтому другие энергетические уровни искривляются настолько сильно, что нижняя граница дна зоны проводимости области n-типа оказывается ниже верхней границы потолка валентной зоны области p-типа, и так как переход очень узкий, то носители заряда могут переходить из одной области в другую без изменения своей энергии, просачиваться сквозь потенциальный барьер, т. е. туннелировать (рис. 3.2, б). В состоянии равновесия потоки носителей из одной области в другую одинаковы, поэтому результирующий ток равен нулю. Под воздействием внешнего поля энергетическая диаграмма изменится. При подключении прямого напряжения уровень Ферми и положение энергетических зон сместится относительно равновесного состояния в сторону уменьшения потенциального барьера и при этом степень – перекрытия между потолком валентной зоны материала r-типа и дном зоны проводимости материала n-типа уменьшится (рис. 3.2, в). При этом в зоне проводимости материала n-типа уровни, заполненные электронами (ниже уровня Ферми) окажутся против незаполненных уровней в валентной зоне материала r-типа, что приведет к появлению тока, обусловленного большим количеством электронов, переходящих из n-области в r-область.

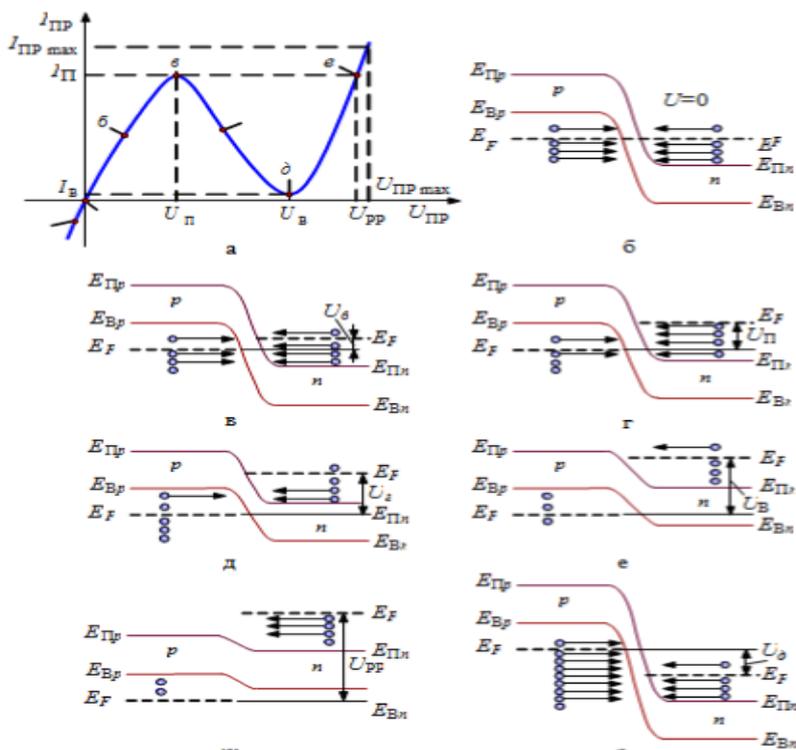


Рис. 3.2. Зонные энергетические диаграммы, поясняющие особенности вольт-амперной характеристики туннельного диода

Максимальное значение этого тока будет тогда, когда уровень Ферми материала *p*-типа и потолок валентной зоны материала *p*-типа будут совпадать (рис. 3.2, г). При дальнейшем увеличении прямого напряжения туннельное перемещение электронов из *p*-области в *p*-область начнет убывать (рис. 3.2, д), так как количество их уменьшается по мере уменьшения степени перекрытия между дном зоны проводимости материала *p*-типа и потолком валентной зоны материала *p*-типа. В точке, где эти уровни совпадают, прямой ток *p*–*p*-перехода достигнет минимального значения (рис. 3.2, е), а затем, когда туннельные переходы электронов станут невозможны (рис. 3.2, ж), носители заряда будут преодолевать потенциальный барьер за счет диффузии и прямой ток начнет возрастать, как у обычных диодов.

При подаче на туннельный диод обратного напряжения потенциальный барьер возрастает, и электрическая диаграмма будет иметь вид, показанный на (рис. 3.2, з). Так как количество электронов с энергией выше уровня Ферми незначительно, то обратный ток *p*–*p*-перехода в этом случае будет возрастать в основном за счет электронов, туннелирующих из *p*-области в *p*-область, причем, поскольку концентрация электронов в глубине валентной зоны *p*-области велика, то даже небольшое увеличение обратного напряжения и связанное с этим незначительное смещение энергетических уровней, приведет к существенному росту обратного тока.

Рассмотренные процессы позволяют сделать вывод, что туннельные диоды одинаково хорошо проводят ток при любой полярности приложенного напряжения, т. е. они не обладают вентиляемыми свойствами. Более того, обратный ток у них во много раз больше обратного тока других диодов. Это свойство используется в другом типе полупроводникового прибора – обращенном диоде.

3.2. Параметры туннельного диода

При увеличении напряжения в прямом направлении от 0 до U_1 и от U_2 до U_3 ток через туннельный диод увеличивается. Это указывает на то, что дифференциальная проводимость (наклон касательной в каждой точке характеристики) диода является величиной положительной, т. е. на этих участках туннельный диод ведет себя, как обычное нелинейное сопротивление, не проявляя никаких усилительных.

В интервале же напряжений от U_1 до U_2 вольт-амперная характеристика имеет падающий участок. С ростом напряжения ток падает, что указывает на наличие отрицательного дифференциального сопротивления. Этот участок характеристики и является наиболее ценным при использовании туннельного диода в радиотехнических схемах.

Дифференциальное сопротивление определяется как отношение приращения напряжения к приращению тока. Если с ростом напряжения (положительное приращение) наблюдается уменьшение тока (отрицательное приращение), то сопротивление между данными точками схемы или прибора, равное отношению этих приращений, будет отрицательным. Уменьшение напряжения с ростом тока и, наоборот, уменьшение тока с ростом напряжения эквивалентно сдвигу фазы между указанными величинами на 180° . Поэтому переменные составляющие тока и напряжения направлены в отрицательном сопротивлении навстречу друг другу. Следовательно, мощность переменного сигнала, равная произведению тока на напряжение, будет иметь отрицательный знак. Это показывает, что отрицательное сопротивление не потребляет мощности переменного сигнала, а отдает ее во внешнюю цепь. Поскольку падающий участок характеристики всегда ограничен по току и напряжению, то любой прибор, обладающий отрицательным сопротивлением, может отдавать во внешнюю цепь только ограниченную мощность.

С помощью отрицательного сопротивления можно скомпенсировать потери, вносимые в схему положительным сопротивлением, и, таким образом, в зависимости от постав-

ленной задачи осуществить схему усилителя, генератора или преобразователя электрических колебаний.

В радиотехнике понятие отрицательного сопротивления известно давно. Вольт-амперные характеристики с падающим участком наблюдаются при динаatronном и транзистронном эффектах в многоэлектродных лампах. В литературе неоднократно давалось описание конкретных схем, в которых указанные явления были использованы для создания генераторов незатухающих колебаний.

Принцип действия таких генераторов очень прост. Для того чтобы возбудить незатухающие колебания в колебательном контуре, образованном из емкости C , индуктивности L и сопротивления r (рис. 3.3), необходимо скомпенсировать в нем все активные потери, которые складываются из потерь в емкости, индуктивности и сопротивлении проводов (на рис. 3.3 все эти потери сосредоточены в одном сопротивлении r). Наиболее просто скомпенсировать эти потери, включив, как показано на рис. 3.3, а, последовательно в цепь отрицательное сопротивление, равное по абсолютной величине сопротивлению r , т. е. $|R|=r$.

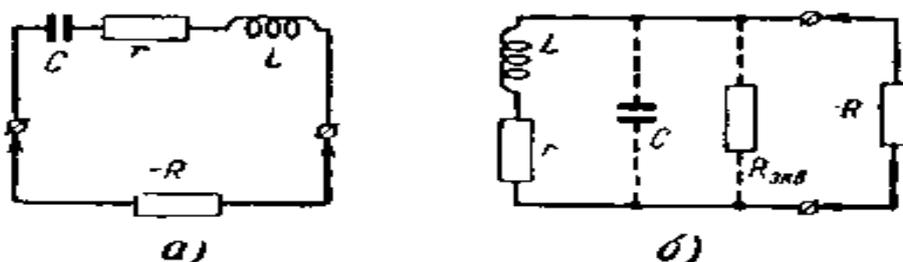


Рис. 3.3. Подключение отрицательного сопротивления к колебательному контуру, а – последовательный контур; б – параллельный контур

Чтобы выполнить ту же задачу в случае параллельного контура, представленного на рис. 3.3, б, необходимо подключить к его зажимам отрицательное сопротивление, равное по абсолютной величине некоторому эквивалентному сопротивлению параллельного контура $R_{\text{экв}}$.

Как известно, на резонансной частоте $R_{\text{экв}}=rQ^2$, где Q – добротность контура. Заменив в этом выражении Q на $\sqrt{L/C/r}$, получим $R_{\text{экв}}=L/rC$

Последнее выражение хорошо известно в радиотехнике и является не чем иным, как резонансным сопротивлением параллельного контура. Таким образом, для возбуждения незатухающих колебаний в параллельном колебательном контуре к нему достаточно подключить отрицательное сопротивление, равное его резонансному сопротивлению $R_{\text{экв}}$, т. е.

$$|R| = R_{\text{экв}} = \frac{L}{rC} \quad (3.1)$$

Посмотрим, каким должно быть это сопротивление для контура, используемого, например, в каскадах промежуточной частоты $f=460$ кГц. Обычно такие контуры имеют добротность Q порядка 50, индуктивность $L=1$ мГн и емкость $C=100$ пФ. Тогда $\sqrt{L/CQ}=150$ кОм. Таким образом, если мы хотим возбудить колебания в этом контуре, то наклон падающего участка характеристики в рабочей точке у используемого нами туннельного диода должен соответствовать 150 кОм.

Рассмотрим теперь другой пример. Пусть контур имеет следующие параметры: $L=10$ мкГн, $C=10$ мкФ и $r=1$ Ом. Ясно, что контур, обладающий такими параметрами, является очень плохим, так как его добротность $Q=\sqrt{L/C/r}=1$. Чтобы возбудить в нем незатухающие колебания, активный элемент схемы, будь то лампа, транзистор или туннельный диод, дол-

жен «вложить» в него очень много энергии, чтобы скомпенсировать потери. Согласно формуле (3.1.) к этому контуру необходимо подключить отрицательное сопротивление в 1 ом. Переходя к более привычному для радиоспециалистов понятию, это означает, что крутизна в рабочей точке на падающем участке характеристики должна быть равна $S=1/|R|=1000$ мА/В. Такой крутизной не обладают даже транзисторы, не говоря уже о лампах. Но изготовить туннельный диод с такой крутизной не составляет особого труда.

Действительно, для возбуждения довольно хорошего контура промежуточной частоты, использованного в первом примере, требуется элемент с отрицательным сопротивлением в 150 кОм, т. е. крутизной порядка 0,01 мА/В. Такие контуры без всякого труда возбуждаются в схемах с электронными лампами.

Для возбуждения же плохого контура с добротностью $Q=1$ необходимо иметь отрицательное сопротивление в 1 Ом. Понятно, что с помощью такого элемента можно без труда «заставить» генерировать любой контур, обладающий более высокой добротностью. Поэтому условие (3.1) правильнее записать в форме следующего неравенства:

$$|R| \leq R_{\text{экв}} = \frac{L}{rC}$$

Чем сильнее выполняется последнее неравенство, тем больше амплитуда и, следовательно, больше гармоник. Это связано с тем, что колебания начинают «захватывать» участки характеристики с большей нелинейностью (рис. 4.4). В предельном случае, когда $|R| \leq R_{\text{экв}}$, колебания будут близки к прямоугольным. Такое явление имеет место и в ламповых генераторах, когда мы увеличиваем положительную обратную связь между контуром в цепи сетки и цепью анода. При этом увеличивается «подкачка» энергии в контур, что равноценно уменьшению некоторого эквивалентного отрицательного сопротивления, подключаемого параллельно контуру.

Отрицательное дифференциальное сопротивление является важным параметром туннельного диода. Поскольку на падающем участке вольт-амперная характеристика сильно нелинейна, величина этого сопротивления может изменяться в широких пределах. Наиболее линейным является участок, расположенный в районе точки перегиба характеристики, соответствующей напряжению U_0 на рис. 3.4. В этой точке дифференциальное сопротивление минимально. У туннельных диодов значение этого сопротивления (R_0) может быть сделано от сотых долей ома до сотен ом. Напряжение U_0 для германиевых диодов обычно лежит в интервале 60–100 мВ. Ток $I_{\text{макс}}$ в зависимости от назначения диода может колебаться от сотен микроампер до сотен миллиампер. Не представляет особого труда изготовить диод и с током $I_{\text{макс}}$ в несколько ампер, но в этом случае его частотные свойства будут заметно хуже.

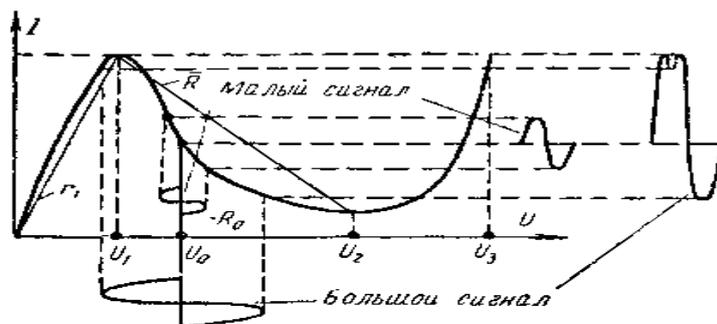


Рис. 3.4. Искажение формы тока при различных амплитудах напряжения на туннельном диоде

Другим важным параметром туннельного диода является отношение $I_{\text{макс}}/I_{\text{мин}}$. У германиевых диодов, например, это отношение обычно составляет 5–10. Напряжение $U_1 \approx 50\text{--}80$ мВ, а $U_2 \approx 250\text{--}350$ мВ.

Мы уже упоминали, что такие параметры, как емкость р-п-перехода и сопротивление потерь, играют определяющую роль при оценке частотных свойств туннельных диодов. На рисунке 3.5 показана простейшая эквивалентная схема туннельного диода с учетом этих параметров. Емкость р-п-перехода очень напоминает емкость плоского конденсатора, заполненного диэлектриком. Роль диэлектрика в данном случае выполняет область полупроводника, обедненная носителями тока, а роль пластин – двойной слой разноименных зарядов по обе стороны р-п-перехода.

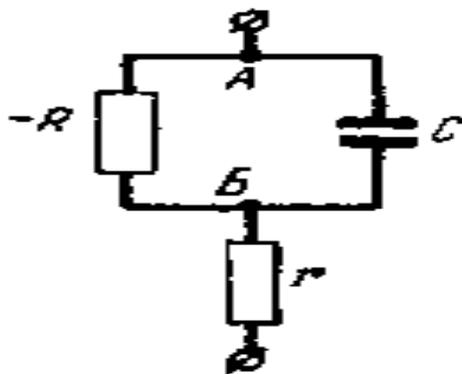


Рис. 3.5. Эквивалентная схема туннельного диода

Емкость C , являющаяся важнейшим параметром туннельного диода, зависит от свойств полупроводникового материала и площади р-п-перехода. Характеристикой материала с этой точки зрения служит отношение C (в пикофарадах) к $I_{\text{макс}}$ (в миллиамперах). Для лучших туннельных диодов, изготовленных из германия типа р и п арсенида галлия, это отношение менее единицы.

Сопротивление потерь r включено последовательно с цепочкой $|R|C$, так как оно характеризует все активные потери, заключенные в выводящих проводниках и однородных областях полупроводника типов р и п.

На очень низких частотах, когда сопротивление конденсатора велико, результирующее сопротивление переменному току между зажимами туннельного диода определяется разностью $|r-R|$. Поэтому туннельный диод будет обладать отрицательным сопротивлением только в том случае, если сопротивление потерь r будет меньше, чем абсолютное значение $|R|$. Отсюда, в частности, следует ограничение на минимальное допустимое значение сопротивления $|R|$. Если величина r составляет, например, 0,1 Ом, то для того, чтобы диод работал достаточно эффективно, его отрицательное сопротивление должно быть по крайней мере на порядок больше, т. е. примерно 1 Ом.

С повышением частоты емкость C начинает все более сильно шунтировать сопротивление $|R|$. На некоторой предельной частоте действительная часть сопротивления между точками А и Б станет равной по абсолютной величине сопротивлению потерь r . В этом случае результирующее дифференциальное сопротивление между выходными зажимами диода обратится в нуль. Другими словами, на предельной частоте туннельный диод перестанет быть активным элементом, т. е. он уже не будет обладать отрицательным сопротивлением.

Несложные расчеты показывают, что предельная частота оказывается равной

$$f = \frac{1}{2\pi |R| C} \sqrt{\frac{|R|}{r} - 1}. \quad (3.2)$$

Из этой формулы непосредственно следует, что предельная частота возрастает с уменьшением постоянной времени $|R|C$ и сопротивления потерь r . Для высокочастотных германиевых диодов с типовыми данными $|R|=20$ Ом, $C=10$ пФ и $r=1$ ом предельная частота согласно формуле (3.2) будет равна 3,5 ГГц, что соответствует длине волны около 9 см.

Современные туннельные диоды способны работать до миллиметровых волн включительно.

Задание 3.1. Получение ВАХ туннельного диода

В данной работе в качестве туннельного диода используется АИЗ0. В начале требуется определить его параметры.

Параметры туннельного диода АИЗ01. Таблица 3.1

Тип прибора	Предельные значения параметров при $T=25^{\circ}\text{C}$						Значения параметров при $T=25^{\circ}\text{C}$			$T_{\text{к.мах}}$ (Тп.) $^{\circ}\text{C}$
	$I_{\text{п.}}$ ($DI_{\text{п.}}$) мА	$U_{\text{п.}}$ ($U_{\text{пр.}}$) мВ	$C_{\text{д.}}$ пФ	$L_{\text{д}}$ ($L_{\text{кор}}$) нГн	$r_{\text{п.}}$ Ом	$I_{\text{п.}}/I_{\text{в.}}$	$U_{\text{пр.}}$ мВ	при $I_{\text{пр.}}$ мА	$I_{\text{обр.}}$ мкА	
АИЗ01А	2,0 (0,4)	180	< 12	1,5	–	8,0	–	1,2	–	70
АИЗ01Б	5,0 (0,5)	180	< 25	1,5	–	8,0	–	1,2	–	70
АИЗ01В	5,0 (0,5)	180	< 25	1,5	–	8,0	–	2,7	–	70
АИЗ01Г	10,0 (1,0)	180	< 50	1,5	–	8,0	–	5,5	–	70

Эта процедура необходима чтобы, исключить превышение максимальных значений напряжения и тока при получении ВАХ туннельного диода. Нельзя подавать на туннельный диод напряжение, обуславливающее протекание тока больше максимального тока. Это может привести к тепловому пробую и выхода из строя диода.

С другой стороны студенты должны приобрести навыки поиска данных для различных элементов электроники, приобрести знания о маркировке и классификации их.

Туннельные диоды являются быстродействующими полупроводниковыми приборами и применяются в генераторах высокочастотных колебаний и импульсных переключателях. Основными параметрами туннельного диода является ток пика $I_{\text{п.}}$. И отношение тока пика к току впадины $I_{\text{п.}}/I_{\text{в.}}$. Для выпускаемых в промышленности диодов

$$I_{\text{п.}} = 0,1 \pm 100 \text{ мА} \text{ и } I_{\text{п.}}/I_{\text{в.}} = 5 \pm 20$$

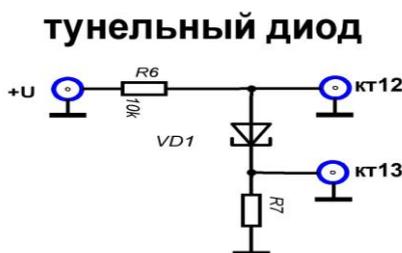


Рис. 3.6. Схема изучения туннельного диода

Порядок измерения ВАХ туннельного диода:

1. Подать напряжение с гнезда блока питания стенда «+U» на вход схемы туннельного диода «+U». Для этого необходимо с помощью соответствующего шнура с коаксиальным разъёмом, соединить вышеуказанные точки. Причем, с помощью тройника, параллельно с данным точкам необходимо подавать напряжение на вольтметр (на мультиметр в режиме измерения постоянного напряжения), чтобы контролировать напряжение, подаваемое на вход схемы туннельного диода (рис. 1).

2. При увеличении напряжения на входе схемы «+U» начиная с нуля (на самом деле она начинается около 0,7 В), с помощью потенциометра $U_{пит}$ на нижней части стенда, она распределяется между R_6 , туннельным диодом и R_7 . Поэтому напряжение, подаваемое на туннельный диод, снимаем в контрольной точке КТ12 с помощью второго вольтметра (второго мультиметра в режиме измерения постоянного напряжения). Ток, проходящий через туннельный диод, снимается в контрольной точке КТ13 с помощью амперметра (третьего мультиметра в режиме измерения постоянного тока).

3. Показания заносятся в таблицу 3.2. (снимаем значение тока амперметром (красный разъем) и заполняем следующую таблицу):

- в первую строку заносятся значения напряжения питания с «+U» ;
- во вторую строку записываются значения напряжения с контрольной точки КТ12;
- в третью строку записываются значения тока с контрольной точки КТ13. Причем шаг измерений определяется изменением тока.

ВАХ туннельного диода. Таблица 3.2

n/n	1	2	...	N
«+U», В				
$U_{тд}$, В				
$I_{пр}$, мкА				

4. Используя данные второй и третьей строк, строится ВАХ туннельного диода (желательно на Excel). Делается анализ ВАХ туннельного диода, сравниваются её реальные параметры и паспортные данные. Определяются различия между идеальными и реальными ВАХ, объясняются причины их различия. Необходимо построить первой и второй строки и объяснить поведение изменения напряжений друг от друга.

Задание 3.2.

Получение осциллограмм параметров туннельного диода

Для изучения динамики изменения параметров в изучаемой схеме необходимо получить осциллограммы сигналов.

- При этом на вход схемы «+U» с генератора подается пилообразный сигнал.
- Для получения осциллограммы сигналов напряжений со входа схемы («+U») и с туннельного диода КТ12 используется электронный осциллограф АКИИП. Сигнал со входа схемы («+U») подается на 1 вход осциллографа (синяя линия) и с контрольной точки КТ12 на второй вход электронного осциллографа. Характерные осциллограммы представлены на рисунке 3.8.

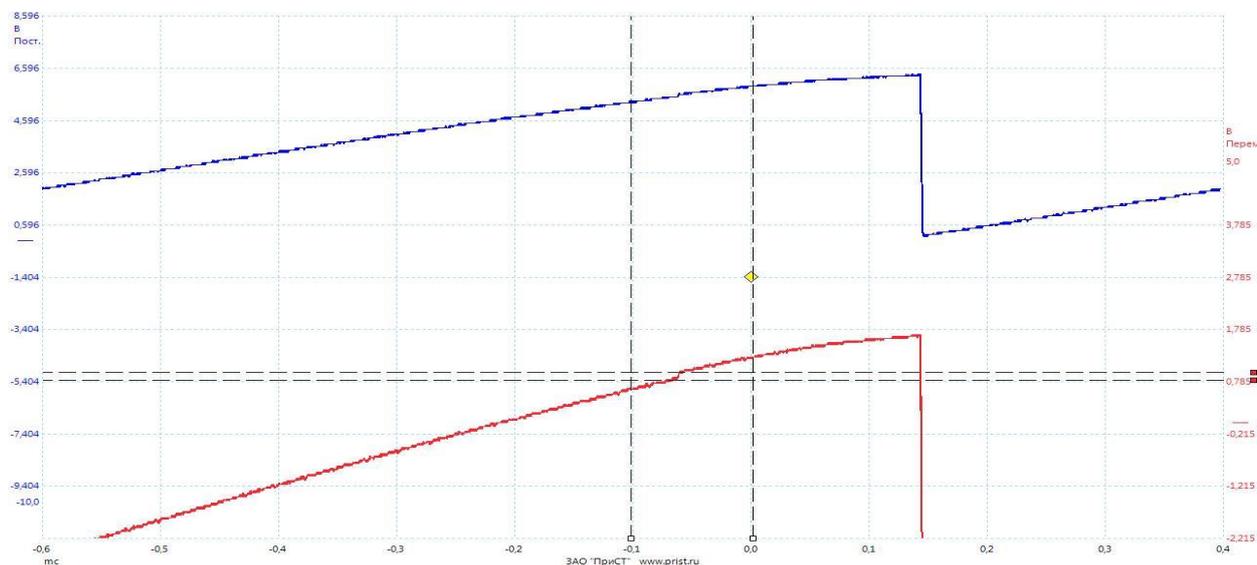


Рис. 3.8. Осциллограмма напряжений на входе схемы («+U») и на туннельном диоде для случая $U < U_1$

Осциллограмма входного (синяя линия) имеет более высокий уровень и максимальное значение порядка 6,5 В (определяется по правому вертикальному осяю). Осциллограмма выходного сигнала (красная линия), имеет более низкий уровень и в максимуме достигает около 1,75 В. Но форма сигнала на туннельном диоде повторяет форму сигнала на входе схемы. Это для случая, когда сигнал на туннельном диоде не превышает напряжение наступления U_1 участка с отрицательным сопротивлением.

Аналогичные осциллограммы для случая, когда на туннельном диоде напряжение больше U_1 , приведены на рисунке 3.9. Отсюда видно, что при напряжении на туннельном диоде равной 3 В, происходит резкое падение напряжение, что соответствует участку с отрицательным сопротивлением. Падение напряжения происходит до значения 2,3 В и затем снова идет постепенное увеличение напряжения.

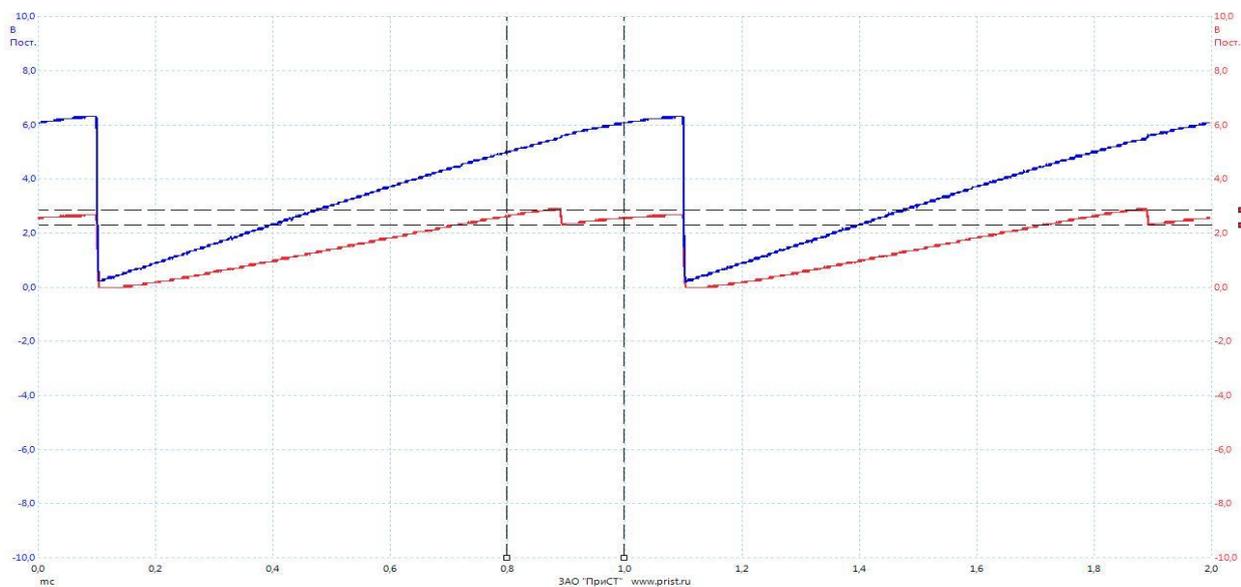


Рис. 3.9. Осциллограмма напряжений на входе схемы («+U») и на туннельном диоде для случая $U \geq U_1$

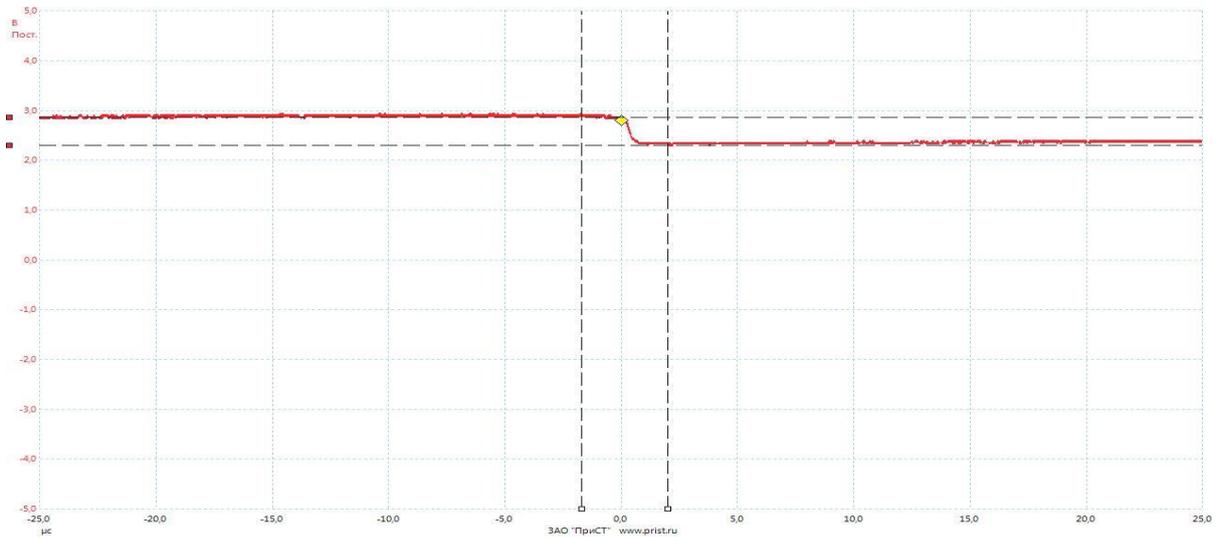


Рис. 3.10. Осциллограмма тока на туннельном диоде для случая $U \geq U_1$

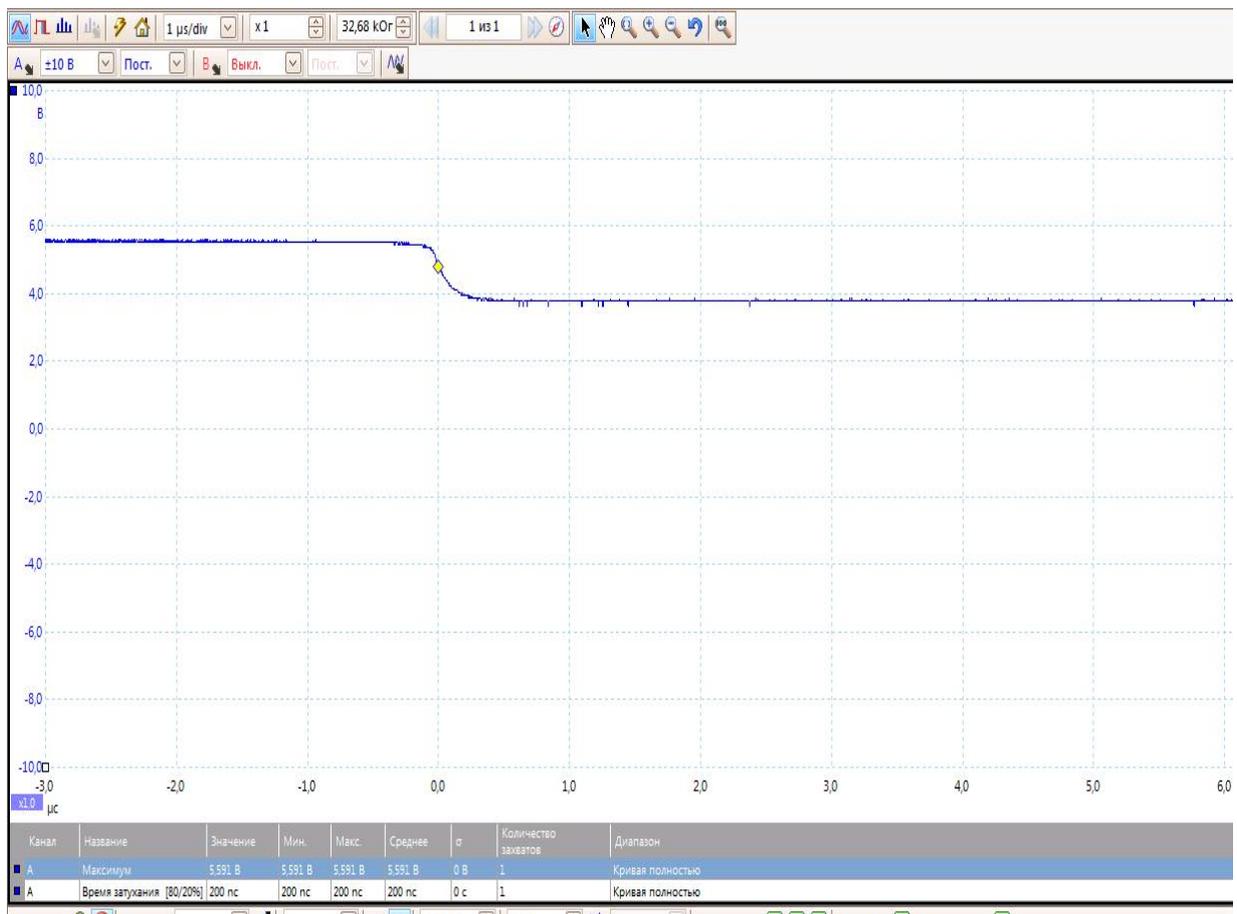


Рис. 3.11. Осциллограмма тока на туннельном диоде для случая $U \geq U_1$

3.4. Тиристоры

Тиристор – полупроводниковый прибор с тремя или более взаимодействующими р–п-переходами, вольт-амперная характеристика которого имеет участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением и который используется для переключения. Тиристор,

имеющий два вывода, называется диодным тиристором (динистором). Тиристор, имеющий два основных вывода и один управляющий вывод, называется триодным тиристором (тринистором). Тиристор, имеющий симметричную относительно начала координат вольт-амперную характеристику, называется симметричным тиристором (симистором).

Динистор представляет собой монокристалл полупроводника, обычно кремния, в котором созданы четыре чередующиеся области с различным типом проводимости р–п–р–п (рис. 3.12, а). На границах раздела этих областей возникнут р–п-переходы: крайние переходы (П1 и П3) называются эмиттерными, а области, примыкающие к ним, – эмиттерами; средний р–п-переход (П2) называется коллекторным. Внутренние n_1 – и p_2 –области структуры называется базами. Область p_1 , в которую попадает ток из внешней сети, называется анодом (А), область n_2 –катодом (К).

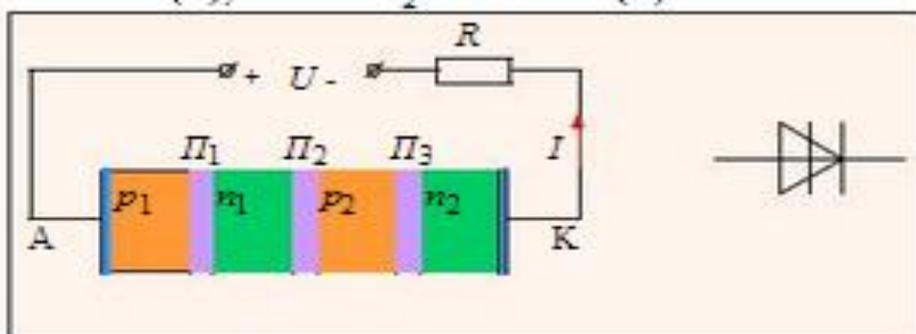


Рис. 3.12. Структура динистора и его условное обозначение

Рассмотрим процессы, происходящие в тиристоре при подаче прямого напряжения, т. е. «+» на анод, «-» на катод. В этом случае крайние р–п-переходы П1 и П3 смещены в прямом направлении, средний переход П2 смещен в обратном направлении. Соответственно динистор можно представить в виде двухтранзисторной структуры (рис. 3.12). Так как переходы П1 и П3 смещены в прямом направлении, из них в области баз инжектируются носители заряда: дырки из области p_1 , электроны из области n_2 . Эти носители заряда диффундируют в областях баз n_1 и p_2 , приближаясь к коллекторному переходу, и перебрасываются его полем через переход П2. Дырки, инжектированные из области p_1 , и электроны из области n_2 движутся через переход П2 в противоположных направлениях, создавая общий ток I .

При малых значениях внешнего напряжения все оно практически падает на коллекторном переходе П2. Поэтому к переходам П1 и П3, имеющим малое сопротивление, приложена малая разность потенциалов и инжекция носителей заряда невелика. В этом случае ток I мал и равен обратному току через переход П2.

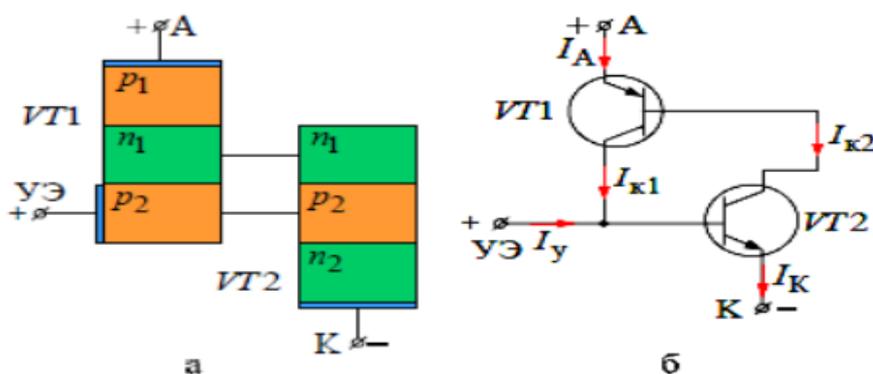


Рис. 3.13. Структура (а) и схема двухтранзисторного эквивалента динистора (б)

При увеличении внешнего напряжения ток в цепи сначала изменяется незначительно. При дальнейшем увеличении напряжения, по мере увеличения ширины перехода П2, все большую роль начинают играть носители заряда, образовавшиеся вследствие ударной ионизации. При определенной величине напряжения носители заряда ускоряются настолько, что при столкновении с атомами р-п-перехода П2 ионизируют их, вызывая лавинное размножение носителей заряда. Образовавшиеся при этом дырки под влиянием электрического поля переходят в область p_2 , а электроны в область n_1 . Ток через переход П2 увеличивается, а его сопротивление и падение напряжения на нем уменьшаются. Это приводит к повышению напряжения, приложенного к переходам П1 и П3 и увеличению инжекции через них, что вызывает дальнейший рост коллекторного тока и токов инжекции. Процесс протекает лавинообразно и сопротивление перехода П2 становится малым. Носители заряда, появившиеся в областях вследствие инжекции и лавинного размножения, приводят к уменьшению сопротивления всех областей динистора, и падение напряжения на нем становится незначительным. На вольт-амперной характеристике этому процессу соответствует участок 2 с отрицательным дифференциальным сопротивлением (рис. 3.14). После переключения вольт-амперная характеристика аналогична ветви характеристики диода, смещенного в прямом направлении (участок 3). Участок 1 соответствует закрытому состоянию динистора.

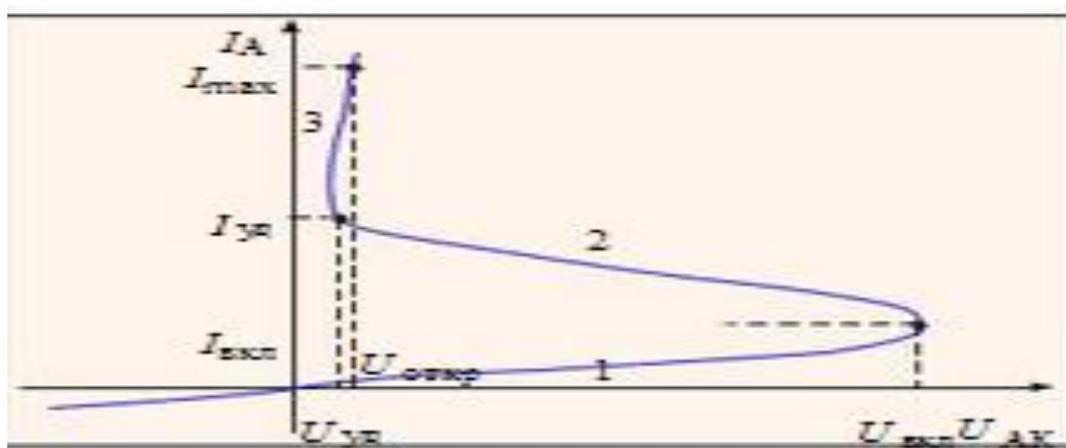


Рис. 3.14. ВАХ тиристора

Динистор характеризуется максимально допустимым значением прямого тока I_{\max} (рис. 3.14), при котором на приборе будет небольшое напряжение $U_{\text{откр}}$. Если уменьшать ток через прибор, то при некотором значении тока, называемом удерживающим током $I_{\text{уд}}$, ток резко уменьшается, а напряжение резко повышается, т.е. динистор переходит обратно в закрытое состояние, соответствующее участку 1. Напряжение между анодом и катодом, при котором происходит переход тиристора в проводящее состояние, называют напряжением включения $U_{\text{вкл}}$.

При подаче на анод отрицательного напряжения коллекторный переход П2 смещается в прямом направлении, а эмиттерные переходы в обратном направлении. В этом случае не возникает условий для открытия динистора и через него протекает небольшой обратный ток.

3.5. Триодные тиристоры

Триодный тиристор (тринистор) отличается от динистора наличием вывода от одной из баз. Это вывод называется управляющим электродом (рис. 1.12).

Если подключить внешний источник $U_{вн}$ так, как показано на рис. 3.15, то получим, что р–n- переходы П1 и П3 будут смещены внешним источником в прямом направлении, а средний р–n-переход П2 будет смещен в обратном направлении, и во внешней цепи будет протекать только исчезающе маленький обратный ток коллекторного перехода П2 . Подключим другой внешний источник U_y (источник управления) между катодом и управляющим электродом (УЭ). Тогда ток управления, протекающий под действием источника управления, при определенной своей величине может привести к лавинообразному нарастанию тока в полупроводниковой структуре до тех пор, пока он не будет ограничен резистором R в цепи источника питания $U_{вн}$. Произойдет процесс включения тиристора.

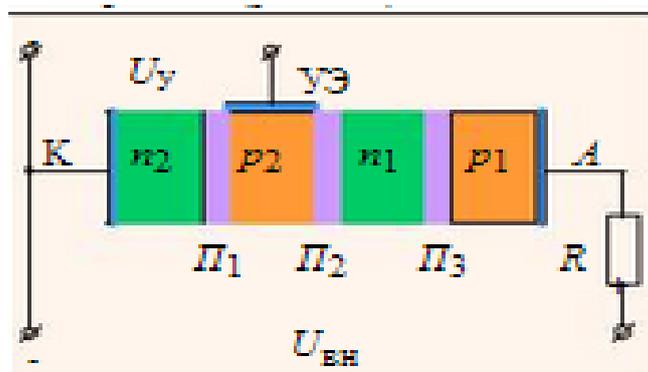


Рис. 3.15. Структура тиристора

Для рассмотрения этого явления представим тиристор в виде двух, объединенных в одну схему транзисторов VT1 и VT 2 (рис. 3.16, а), типа р–n–р и n–р–n, соответственно. Оба транзистора включены по схеме с общим эмиттером (рис. 3.16, б).

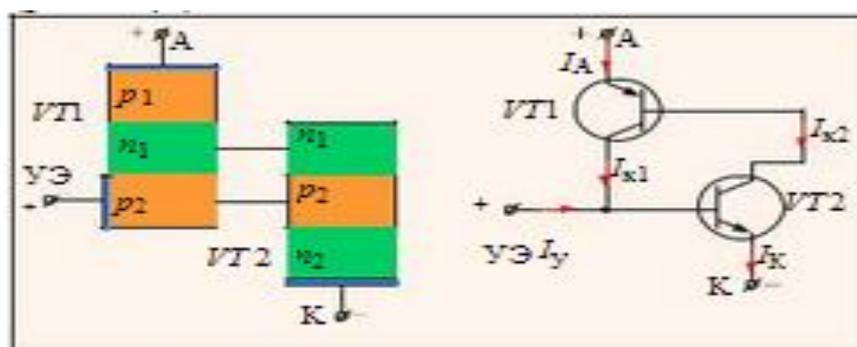


Рис. 3.16. Структура (а) и схема двухтранзисторного эквивалента тиристора

При создании разности потенциалов между анодом (А) и катодом (К) в прямом направлении («+» на аноде, «-» на катоде) оба транзистора будут закрыты, так как базовые токи их будут отсутствовать. При подключении источника управления U_y во входной цепи транзистора VT 2 потечет базовый ток, являющийся током управления тиристора I_y . Под действием этого тока в коллекторной цепи транзистора VT2 потечет ток $I_{к2} = b_2 I_y$, где b_2 – коэффициент передачи по току транзистора VT2 . Но этот ток $I_{к2}$ протекает по цепи «эмиттер – база» транзистора VT1 и является его входным, базовым током $I_{б1} = I_{к2}$. Под воздействием этого тока $I_{б1}$ в выходной коллекторной цепи транзистора VT1 потечет коллекторный ток:

$$I_{к1} = b_1 I_{б1} = b_1 I_{к2} = b_1 b_2 I_y, \quad (3.3)$$

т. е. коллекторный ток $I_{к1}$ является усиленным в $b_1 b_2$ раз током управления I_y , и протекает ток $I_{к1}$ опять по базовой цепи транзистора VT 2, там, где протекает и ток I_y . Поскольку $I_{к1}$ оказывается значительно больше тока I_y , процесс взаимного усиления транзисторами токов продолжается до тех пор, пока оба транзистора не войдут в режим насыщения, что соответствует включению тиристора. Описанный процесс является процессом внутренней положительной обратной связи, под действием которой и происходит лавинообразное нарастание тока в цепи тиристора.

После того, как тиристор включился, он сам себя поддерживает в открытом состоянии, так как при условии $I_{к2} > I_y$ внутренняя обратная связь остается положительной, и в этом случае источник управления уже оказывается ненужным. С учетом (3.3) это условие записывается в виде:

$$b_1 b_2 I_y > I_y. \quad (3.4)$$

Отсюда условие не включения тиристора:

$$b_1 b_2 > 1. \quad (3.5)$$

Для того, чтобы выключить тиристор, необходимо прервать ток, протекающий в его силовой цепи, на короткий промежуток времени, достаточный для рассасывания неосновных носителей в зонах полупроводника и восстановления управляющих свойств. Чтобы снова включить тиристор, необходимо снова пропустить в его цепи управления ток I_y , чтобы снова запустить процесс внутренней положительной обратной связи. Таким образом, тиристор представляет собой бесконтактный ключ, который может быть только в двух устойчивых состояниях: либо в выключенном, либо во включенном.

При изменении полярности приложенного к тиристорному напряжению, эмиттерные p–n-переходы П1 и П3 будут смещены в обратном направлении, тиристор будет закрыт, а вольт-амперная характеристика будет представлять собой обратную ветвь вольт-амперной характеристики обыкновенного диода.

Семейство таких характеристик представлено на рисунке 3.17. Обычно в справочниках приводятся предельные характеристики (1 и 2). Кривая 1 соответствует прибору с максимальным сопротивлением цепи управления и максимально допустимой температурой. Кривая 2 – прибору с минимальным сопротивлением управляющей цепи и минимальной температуре. Сверху и справа диаграмма ограничивается прямыми, соответствующими предельно допустимым значениям тока и напряжения в цепи управления. Внизу диаграммы указывается область, которая ограничена минимальными значениями тока и напряжения, необходимыми для отпириания тиристором данного типа. Кроме того, на диаграмме обычно приводятся кривые допустимой мощности на управляющем электроде для различных значений длительности управляющих импульсов (кривые 3 и 4).

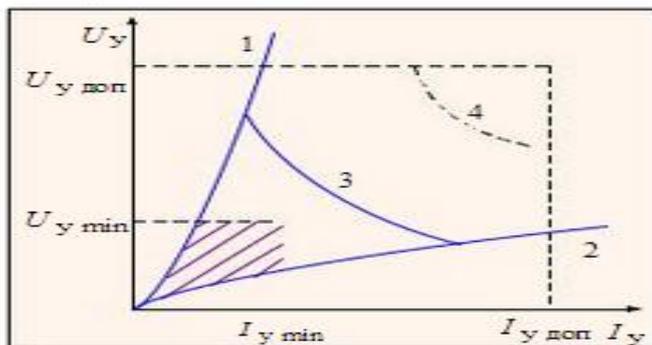


Рис. 3.17. Вольт-амперная характеристика управляющей цепи

Таким образом, тиристор представляет собой частично управляемый клапан, который можно перевести в проводящее состояние при наличии одновременно двух факторов: положительный потенциал анода относительно катода; подача управляющего сигнала в виде тока управления в цепи управляющего электрода. Если хотя бы один из этих факторов отсутствует, то тиристор будет оставаться в закрытом состоянии.

Частичная управляемость тиристора заключается в том, что после включения тиристора, цепь управления становится ненужной, так как он сам себя поддерживает во включенном состоянии. Выключить обычный тиристор по цепи управления невозможно. Поэтому он называется однооперационным тиристором или в зарубежной терминологии SCR (Silicon Controlled Rectifier). Для запираания тиристора необходимо каким-либо способом снизить анодный ток до нуля и удерживать его на нулевом уровне в течение времени рассасывания неосновных носителей, накопившихся в базах транзисторов VT1 и VT2.

На электрических принципиальных схемах незапираемые тиристоры обозначаются условными графическими обозначениями, представленными на рисунке 3.18.

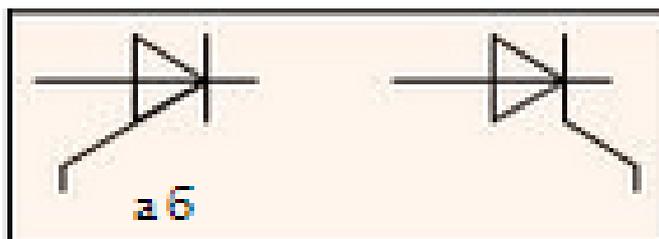


Рис. 3.18. Условные обозначения незапираемых тиристоров с управлением по аноду (а), с управлением по катоду (б)

3.6. Способы запираания тиристоров

Как уже было показано выше, после включения тиристора он сам себя поддерживает во включенном состоянии за счет внутренней положительной обратной связи, а цепь управления становится неэффективной. Для выключения тиристора нужно каким-либо способом снизить его прямой ток до нуля на некоторый промежуток времени, определенный временем рассасывания неосновных носителей. Это в основном и отличает тиристор-прибор с частичной, неполной управляемостью от, например, транзистора – полностью управляемого прибора, который можно и включить и выключить по цепи управления (базовой цепи).

Выключение проводящего ток тиристора можно осуществлять различными способами. Проще всего выключать тиристор, если он работает в цепи переменного тока. Тогда под действием переменного напряжения питающей сети ток тиристора сам снижается до нуля и происходит его выключение (коммутация). Такой способ коммутации получил название естественной и широко применяется в силовых преобразовательных устройствах переменного тока. Сложнее обстоит дело в цепях постоянного тока.

Там необходимы специальные устройства, обеспечивающие принудительное выключение тиристора в нужный момент времени. Такие устройства называют узлами принудительной коммутации или просто коммутационными узлами. В основе построения коммутационных узлов лежат следующие способы:

1. Создание искусственных колебаний тока в цепи тиристора, например, введением в его цепь колебательных LC – контуров (последовательных или параллельных) (рис. 3.19, а, б). Тиристор закрывается в момент перехода через нуль тока в колебательном контуре.

2. Выключение тиристора путем изменения полярности напряжения между катодом и анодом. Для этого используют предварительно заряженный конденсатор С, который в нужный момент времени подключают между анодом и катодом тиристора в запирающей поляр-

ности (рис. 3.19, в) путем замыкания ключа К. Существует большое количество схем различных коммутационных узлов, использующих данный способ запираания тиристоров.

3. Запираание тиристора путем введения в его цепь противоЭДС, под действием которой прямой ток тиристора снизится до нуля (рис. 3.19, г). Это можно осуществить при помощи генератора импульсов ГИ, подключаемого через трансформатор Т в силовую цепь тиристора. В нужный момент времени генератор формирует импульс напряжения, который наводит во вторичной обмотке трансформатора импульс с полярностью, встречной по отношению к тиристор, что приведет к снижению прямого тока тиристора до нуля.

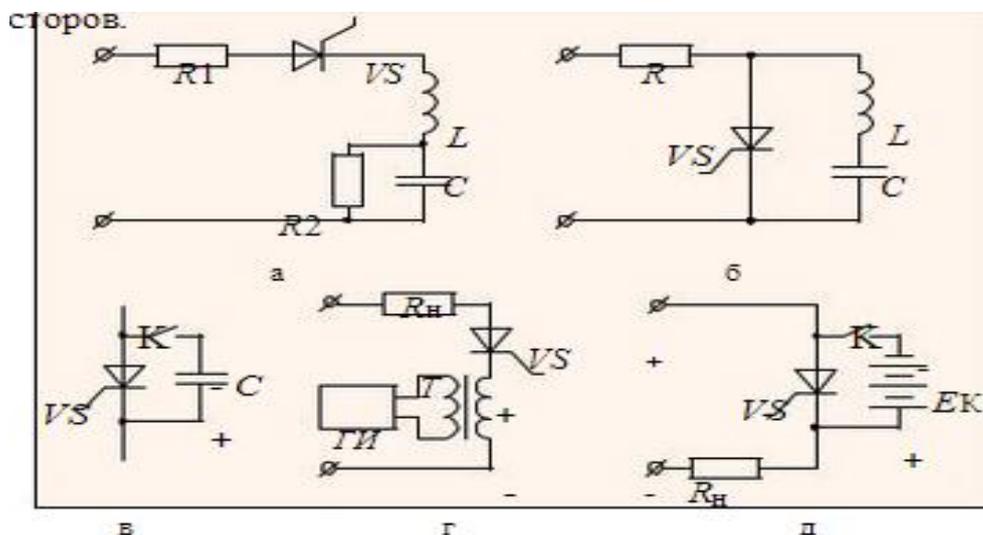


Рис. 3.19. Схемы запираания тиристоров

4. Подключение параллельно тиристор источника коммутирующей ЭДС (рис. 3.19, д). Выключение тиристора осуществляется замыканием в нужный момент времени ключа К на короткий промежуток времени, определяемый временем рассасывания неосновных носителей в зонах полупроводника.

Описанными способами удастся придать тиристор свойства полностью управляемого вентиля.

3.7. Запираемые тиристоры

В настоящее время разработаны новые типы тиристоров, так называемые двухоперационные тиристоры или запираемые тиристоры. Они являются полностью управляемыми полупроводниковыми приборами, которые можно и включить и выключить по цепи управления. Такой тиристор в зарубежной терминологии получил обозначение GTO-тиристор (Gate Turn – Off). Это достигается благодаря тому, что в областях анода и катода такой прибор состоит из большого числа технологических ячеек, представляющих отдельные тиристоры, которые включены параллельно.

Физические процессы, протекающие в запираемых тиристорах, во многом аналогичны уже рассмотренным для однооперационного тиристора. Исключение составляет процесс выключения отрицательным током управления. Во включенном состоянии все переходы тиристора находятся в состоянии насыщения. При достаточной величине и длительности управляющего тока, а также равномерности его распределения по всем ячейкам, избыточная концентрация неосновных носителей заряда сначала снижается до нуля вблизи коллекторного перехода тиристора. При этом коллекторный переход смещается в обратном направлении,

воспринимаемая часть внешнего напряжения. Так, оба транзистора начинают работать в активном режиме, и в структуре возникает положительная обратная связь при отрицательном базовом токе в $n-p-n$ -транзисторе $VT2$. Вследствие лавинообразного уменьшения зарядов в базовых областях анодный ток начинает снижаться. Транзистор $VT2$ $n-p-n$ -типа первый входит в режим отсечки. Действие положительной обратной связи прекращается, и дальнейший спад анодного тока определяется рекомбинацией в n -базе тиристора.

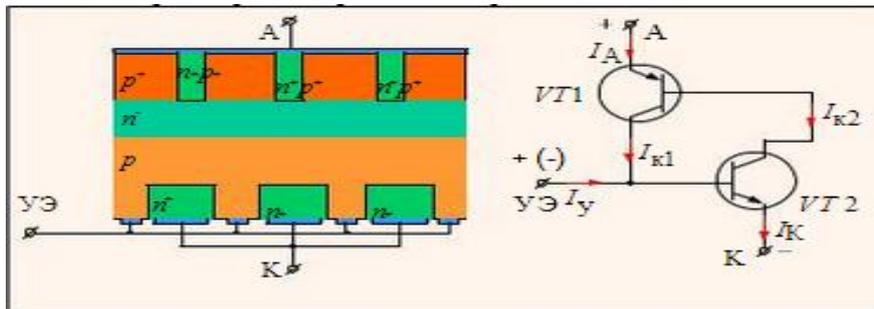


Рис. 3.20. Структура запираемого тиристора (а) и двухтранзисторный эквивалент (б) одной из ячеек тиристора

Вольт-амперная характеристика запираемого тиристора аналогична характеристике незапираемого тиристора (рис. 3.21).

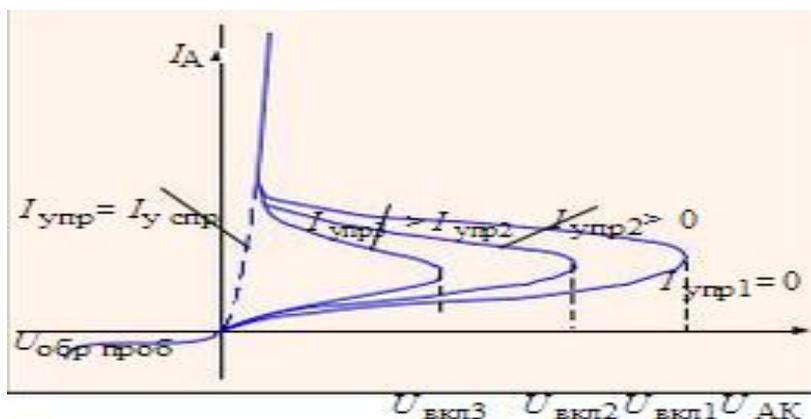


Рис. 3.21. ВАХ двухоперационного тиристора

На электрических принципиальных схемах запираемые тиристоры обозначаются условными обозначениями, представленными на рис. 3.21.

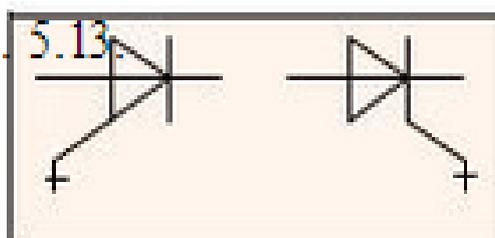


Рис. 3.21. Условные обозначения запираемых тиристоров с управлением по аноду и с управлением по катоду

3.8. Снятие и анализ характеристик тиристора

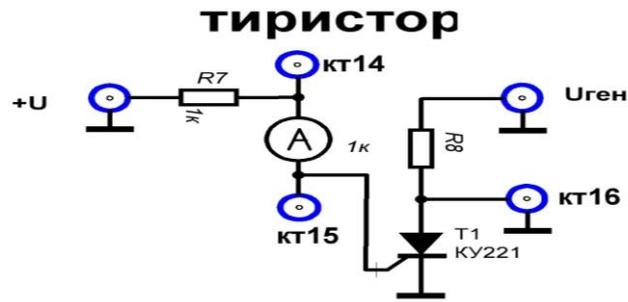


Рис. 3.22. Схема измерения характеристик тиристора

Задание 3.3.

Изучение влияния тока управления I_y на открывание тиристора

На вход $+U$ подаем постоянное напряжение, которое можно регулировать, что в свою очередь меняет ток управления (рис. 3.22). Амперметром замеряем этот ток. На выход $U_{ген}$ подаем прямоугольные импульсы и на КТ16 смотрим осциллограммы.

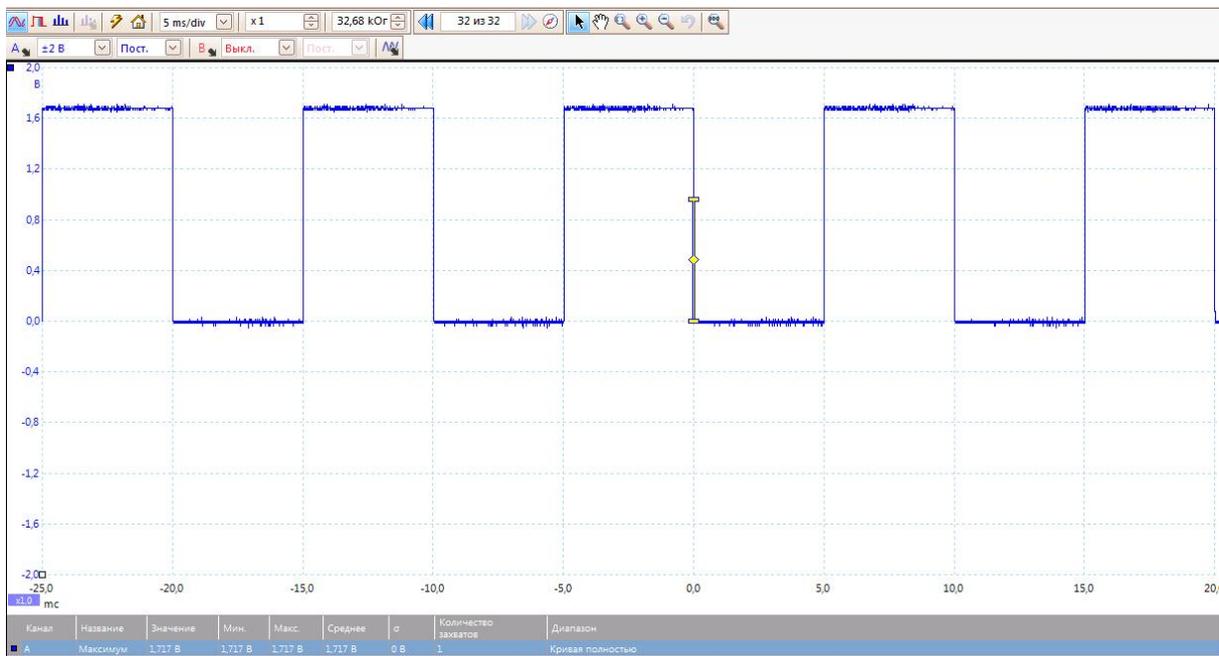
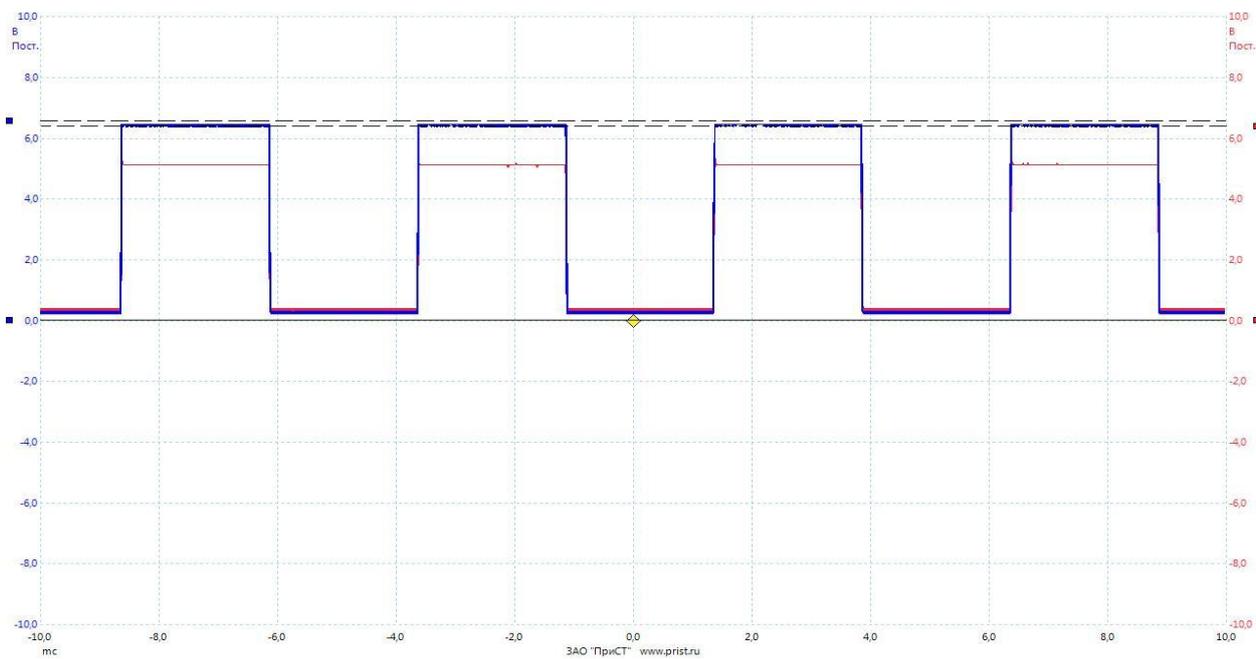
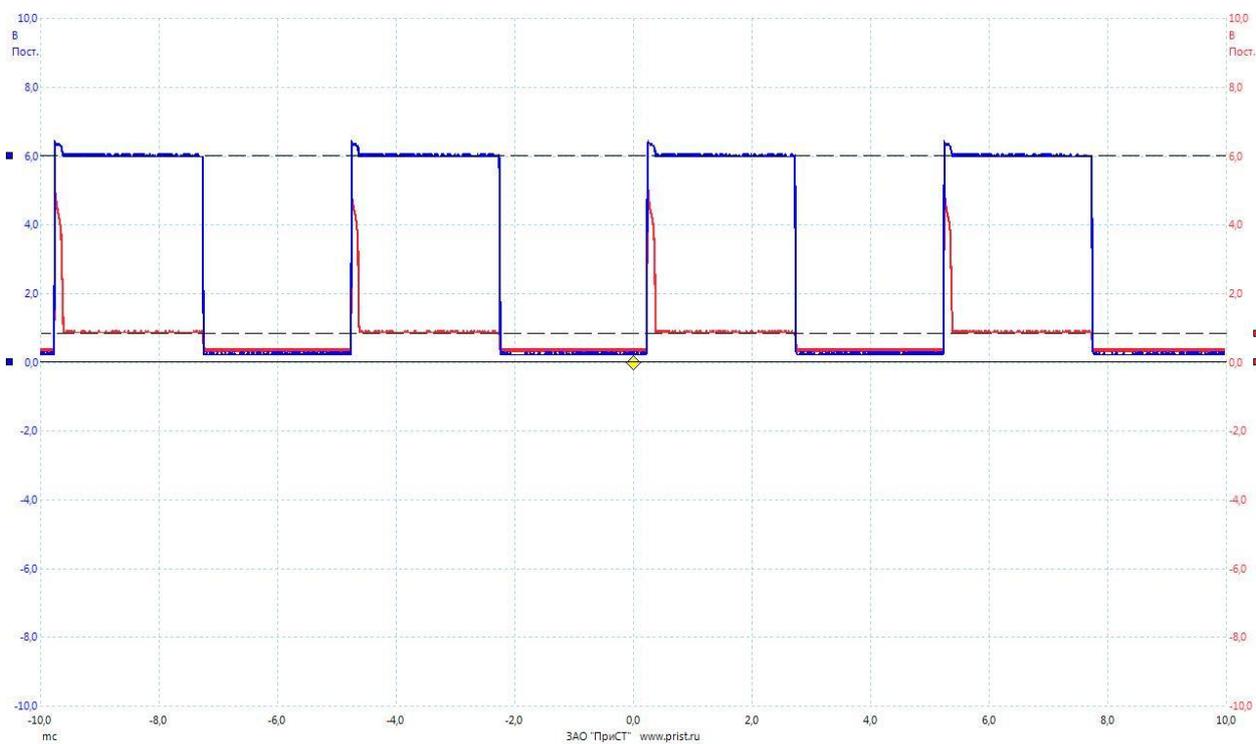


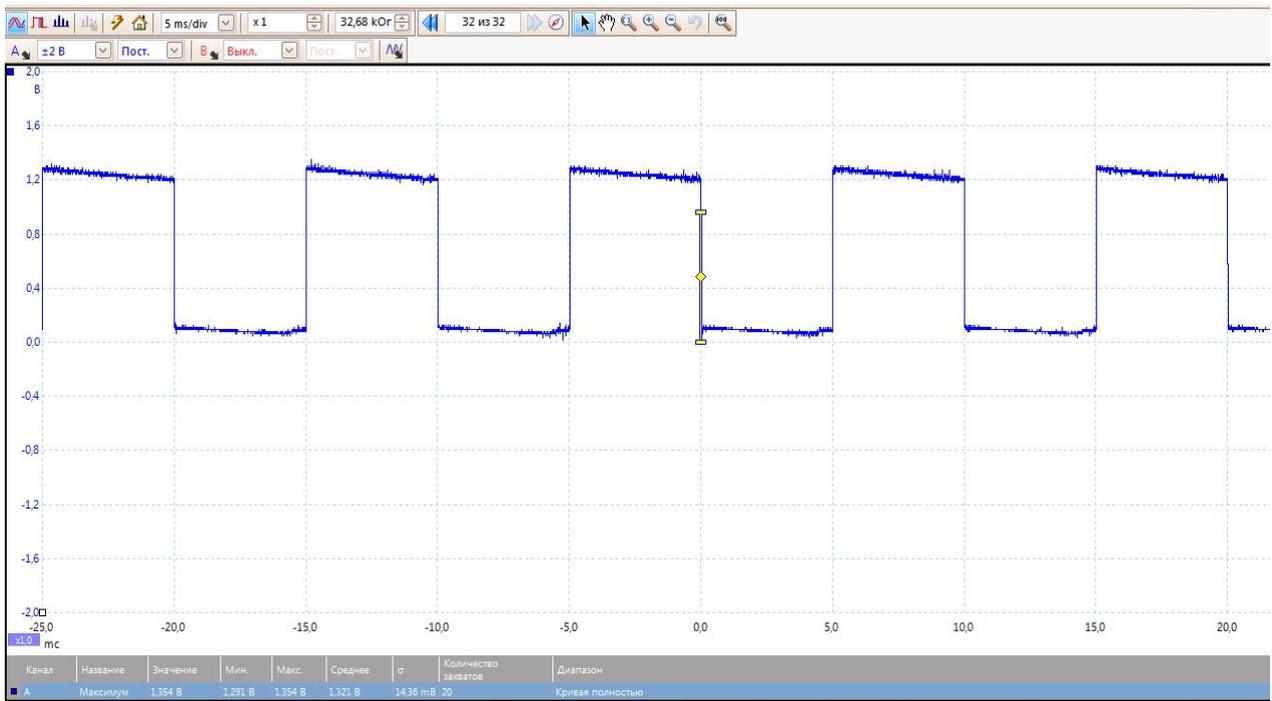
Рис. 3.23. Осциллограмма на тиристоре при: $+U = 0$, $I_y = 0$
Напряжение на тиристоре практически равно напряжению генератора



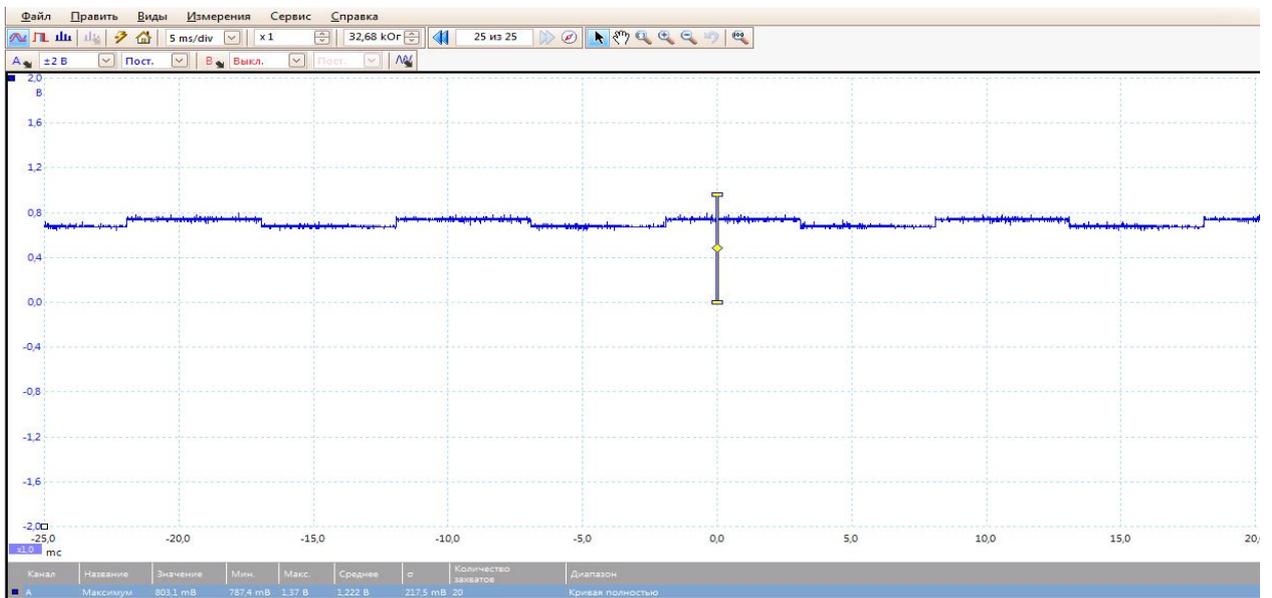
*Рис. 3.24. Осциллограмма на тиристоре при: $I_{\gamma}=1,95 \text{ мА}$
 Напряжение генератора (синяя линия), напряжение на тиристоре (красная линия)*



*Рис. 3.24. Осциллограмма на тиристоре при: $I_{\gamma}= 2 \text{ мА}$
 Напряжение генератора (синяя линия), напряжение на тиристоре (красная линия)*



*Рис. 3.25. Осциллограмма на тиристоре при: $I_y = 5,5 \text{ mA}$;
Напряжение на тиристоре примерно 1,3–1,2 В (почти открыт).*



*Рис. 3.26. Осциллограмма на тиристоре при: $I_y = 11,5 \text{ mA}$;
Напряжение на тиристоре 0,6–0,7в (полностью открыт)*

Задание 3.4. Подача на тиристор (точка $U_{ген}$) синусоидального сигнала

Подбирая ток управления, добиваемся следующей осциллограммы.

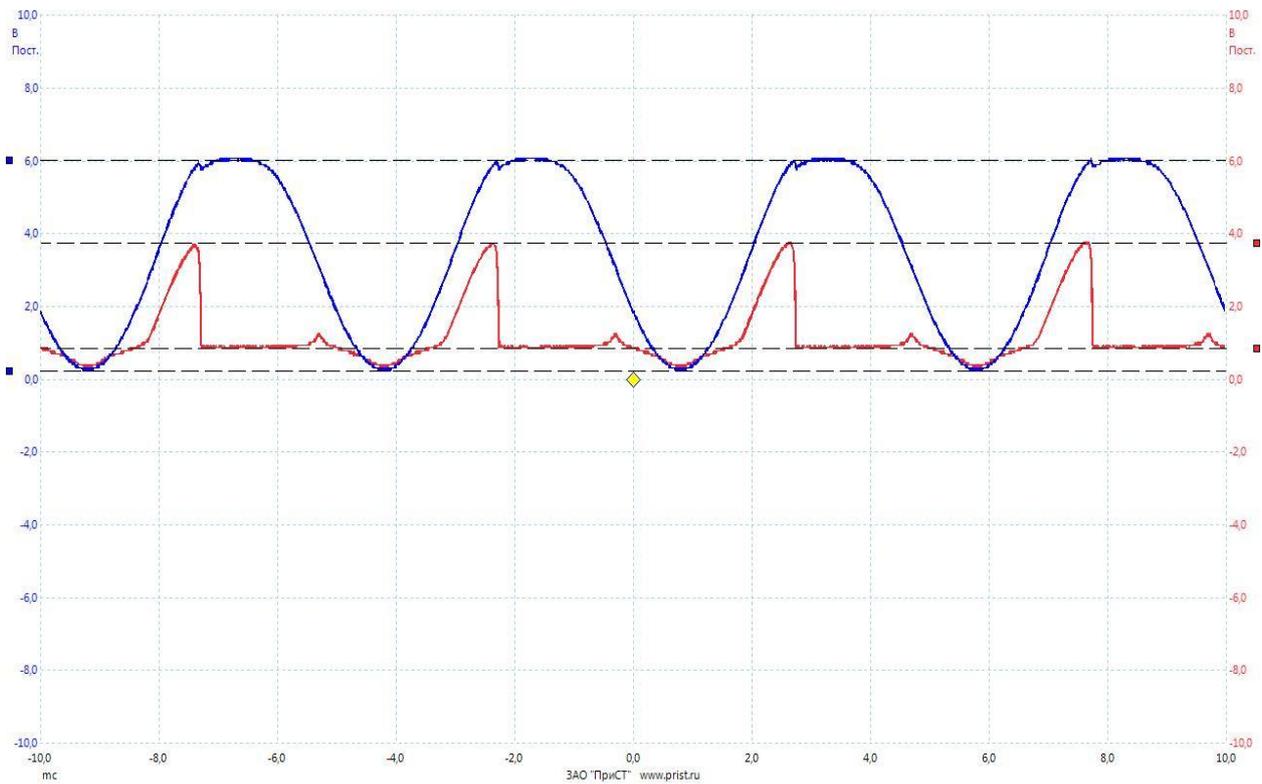


Рис. 3.27. Осциллограмма при подаче синусоидального сигнала на тиристор: синяя линия – напряжение в точке $U_{ген}$, красная линия – напряжение на тиристоре

Задание 3.5. Измерение времени включения и выключения транзистора

Подадим в точку $U_{ген}$ прямоугольные импульсы 20 кГц (синяя линия), подбирая ток управления добьемся следующего рисунка (красная линия – напряжение на тиристоре).

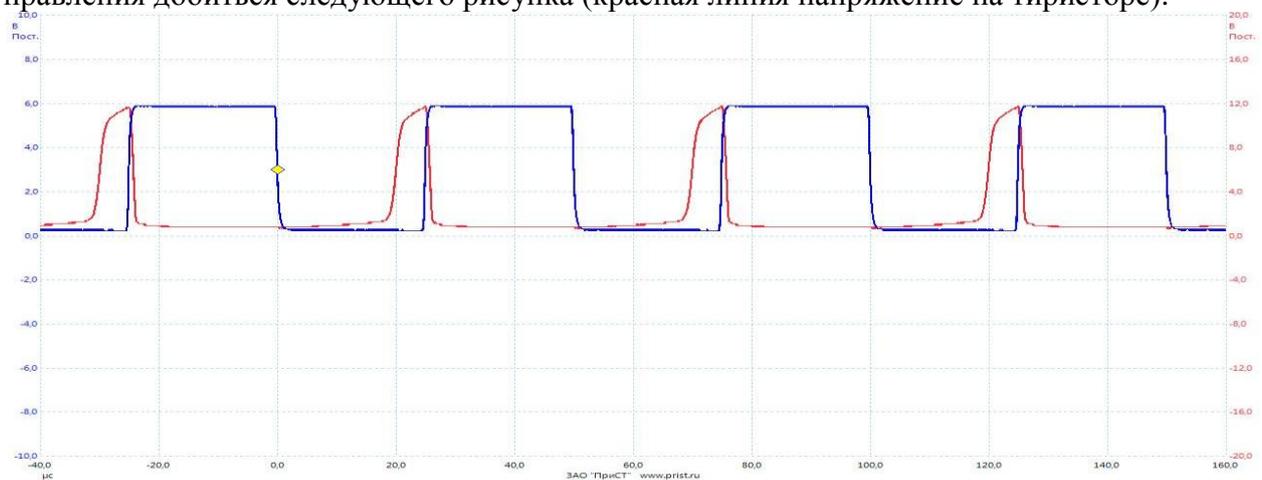


Рис. 3.28. Осциллограмма выключения сигнала на тиристоре: синяя линия – прямоугольный импульс в точке $U_{ген}$, красная линия – напряжение на тиристоре

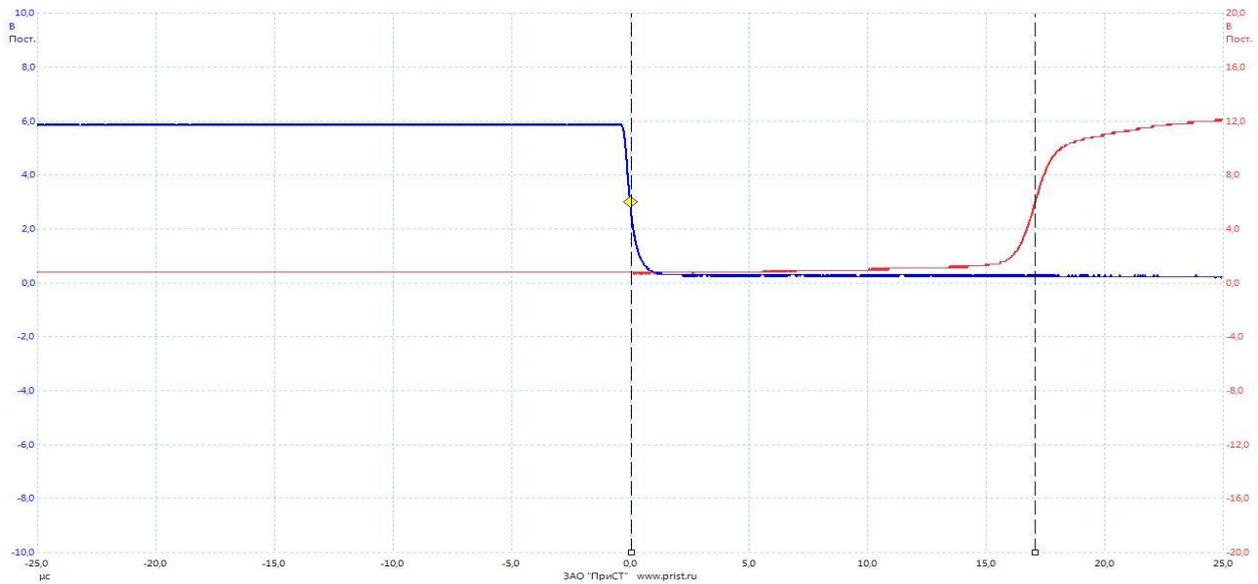


Рис. 3.29. Осциллограмма по измерению времени выключения тиристора: синяя линия – напряжение в точке $U_{ген}$, красная линия напряжение на тиристоре

Время выключения равно примерно $17\mu\text{C}$, подобным образом определить время включения.

Можно еще поэкспериментировать, например, подать на вход тиристора пилу и посмотреть, при каком напряжении (токе) происходит открывание тиристора при данном анодном напряжении.

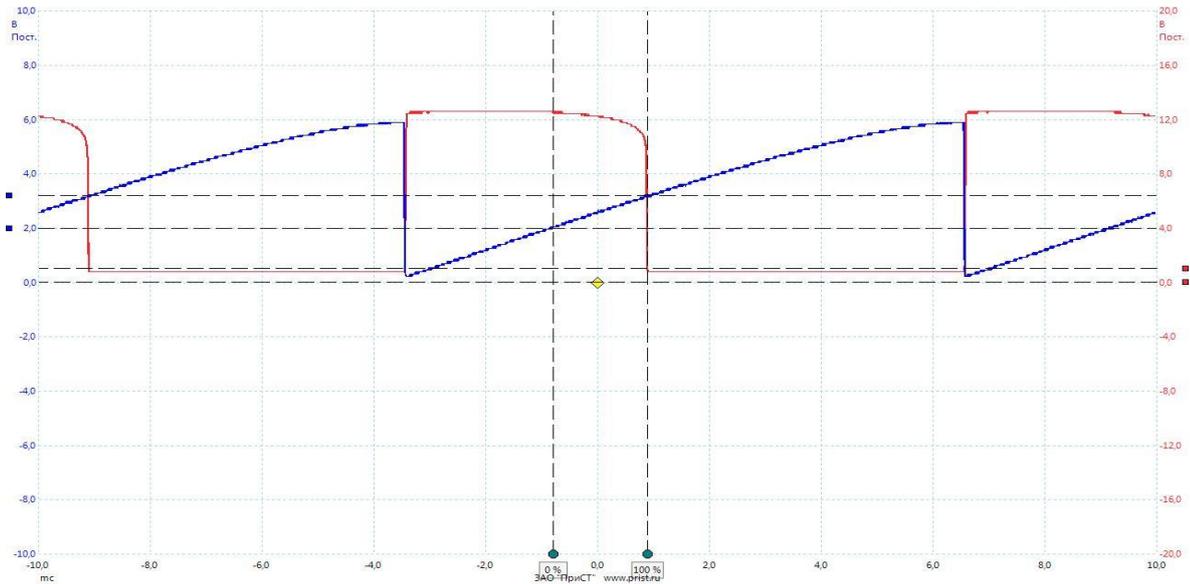


Рис. 3.30. Осциллограмма при подаче пилообразного сигнала на тиристор: синяя линия – напряжение в точке $U_{ген}$, красная линия напряжение на тиристоре

Лабораторная работа 4. ИЗУЧЕНИЕ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Приборы и устройства оптоэлектроники, выполняющие функции элементов связи и коммутации, датчиков и устройств оптической обработки и хранения информации, находят широкое применение в вычислительных системах и сетях, системах телекоммуникации.

Новые разработки оптоэлектронных приборов (ОЭП) обеспечивают принципиально новые потребительские свойства электронной аппаратуры: помехозащищенность от сильных электромагнитных полей, совместимость разнородных блоков в едином комплексе, функциональную, схемотехническую гибкость, выполнение функций, не реализуемых на обычных радиотехнических принципах (например, высокоскоростная параллельная обработка информации).

Значимость ОЭП и устройств определяется не только уникальностью выполняемых ими функций, но и тем, что это направление науки и техники уже получило реальное промышленное воплощение, характеризующееся массовым производством приборов и их применением во всех сферах народной и специальной техники.

В качестве объекта изучения в данной работе был выбран прибор оптоэлектроники – оптопара. Приборы, в которых содержатся излучатели и приемники, взаимодействующие друг с другом в единой конструкции, называются оптопарами или оптронами. Важным признаком является конструктивное исполнение оптрона: если в конструкции создать воздушный зазор между излучателем и фотоприемником, то прибор может быть использован для считывания информации с перфоносителей; если излучатель и фотоприемник соединены гибким стекловолоконным светопроводником, то прибор становится аналогом электрического кабеля. Следовательно, конструкция оптопары, при одинаковой электрической схеме, определяет функциональное назначение прибора.

4.1. Элементы оптоэлектроники

К основным элементам оптоэлектронных устройств относятся источники излучения (некогерентного или когерентного), оптические среды и приемники излучения. Эти элементы в разных устройствах применяются как в виде различных комбинаций, так и в виде автономных устройств и узлов с самостоятельными частными задачами. Оптоэлектроника отличается от вакуумной и полупроводниковой электроники наличием в цепи сигнала оптического звена (оптической связи). Поэтому достоинства оптоэлектроники определяются, в первую очередь, преимуществами оптической связи по сравнению с электрической, а так же теми возможностями, которые открываются в результате использования разнообразных физических явлений, обусловленных взаимодействием излучения с веществом.

4.2. Принцип работы фотоприемников

Работа фотоприемных приборов (фотоприемников) основана на использовании внутреннего фотоэффекта в твердых телах. Поглощаемые полупроводником кванты освобождают носители заряда либо атомы решетки, либо атомы примеси. Поскольку для каждого из этих переходов требуется некоторая минимальная энергия, характерная для данного материала, каждый тип фотоприемника имеет определенную длинноволновую границу $\lambda_{гр}$, определяемую формулой

$$\lambda_{гр} = 1,24 / (E_2 - E_1), \quad (4.1)$$

где $\lambda_{гр}$ – выражается в мкм; E_2, E_1 – в эВ.

Разность $E_2 - E_1$ – энергетический зазор при переходе «зона-зона» или «примесный уровень-зона» (рис. 4.1, а).

Рассмотрим принцип действия фотоприемного прибора на основе перехода (рис. 4.1, б). При поглощении фотона в полупроводнике образуются пары электрон-дырка. При их разделении возникает фототок, причем электроны перемещаются в n-области, а дырки – в р-области.

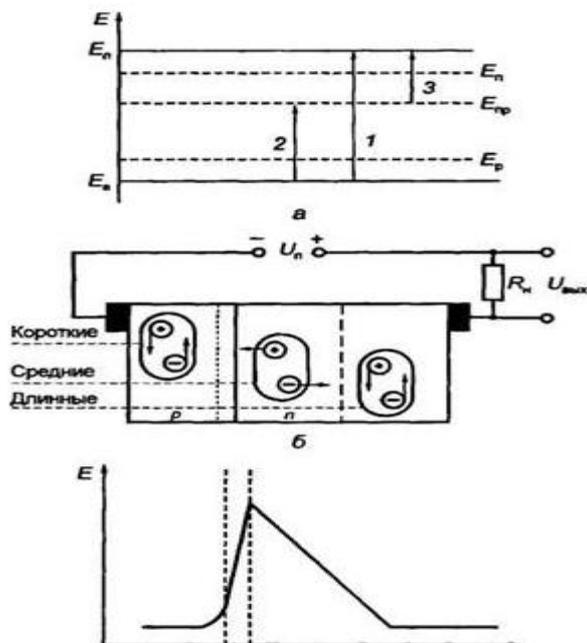


Рис. 4.1. Принцип действия фотоприемного прибора:
 а – энергетическая диаграмма; б – процессы в р-п-переходе;
 в – распределение электрического поля в структуре; р – энергия примесного уровня;
 1 – переход «зона-зона»; 2 – переход «валентная зона-примесный уровень»;
 3 – переход «примесный уровень-зона проводимости»

Вероятность разделения созданной фотоном пары электрон-дырка выше в том случае, если эта пара образуется в области полупроводника, находящейся под воздействием электрического поля. Альтернативой разделения является обычная рекомбинация пары электрон-дырка, при которой не происходит какого-либо смещения заряда и, таким образом, не вносится вклад в фототок. Электрическое поле распределяется в кристалле полупроводникового прибора неравномерно. В диффузионных областях р- и n-типа поле намного слабее, чем в области между ними, известной под названием *обедненного слоя*. Для эффективной работы фотоприемника необходимо, чтобы наибольшее число фотонов поглощалось в обедненном слое, т. е. фотоны не должны поглощаться, пока не вышли за пределы обедненного слоя.

Глубина проникновения фотона в полупроводник до поглощения зависит от его длины волны. Фотоны с малой длиной волны поглощаются вблизи поверхности, а фотоны с большей длиной волны могут проникать через всю толщу кристалла. Поэтому для обеспечения широкой спектральной характеристики необходимо, чтобы кристалл фотодиода имел очень тонкий р-слой, допускающий проникновение фотонов с малой длиной волны, и толстый обедненный слой для получения максимального фототока от длинноволновых фотонов. Толщина обедненной области зависит от удельного сопротивления полупроводника в этой области и от обратного смещения. Обедненный слой существует и в том случае, когда обратное смещение не приложено. Это обусловлено наличием «встроенного» поля, которое образуется вследствие диффузии через переход неосновных носителей. Напряжение обратного смещения расширяет обедненную область.

Размеры обедненного слоя при любом напряжении больше в тех приборах, у которых вблизи перехода материал имеет более высокое удельное сопротивление. В то же время на

обеих противоположных поверхностях кристалла для изготовления омических контактов требуется низкое удельное сопротивление. Фотоприемники с переходом, например солнечные батареи, изготавливают методом диффузии примеси р- типа в материал n-типа с низким удельным сопротивлением. Малая толщина диффузионного р- слоя обеспечивает высокую чувствительность к фотонам с малой длиной волны, но, чтобы расширить обедненную область для создания высокой чувствительности к фотонам с большой длиной волны, требуется относительно высокое обратное смещение. Глубокая диффузия примеси р-типа ухудшает чувствительность к излучению с малой длиной волны, но благодаря созданию «плавного» перехода дает возможность уменьшить напряжение смещения, необходимой для обеспечения хорошей чувствительности к излучению с большой длиной волны. Для повышения чувствительности к фотонам с малой и большой длинами волн при низком обратном смещении между р- и n-областями используют слой с высоким удельным сопротивлением, получивший название *i*-слоя. Фотоприемники, имеющие *i*-слой, получили название р-*i*-n-структур. Такой прибор имеет тонкую диффузионную n-область (на которую падает поток излучения) и более толстую диффузионную *i*-область с другой стороны высокоомной кремниевой пластины.

В фотоприемниках с р-*i*-структурой *i*-слой имеет такое высоко удельное сопротивление, что даже при нулевом смещении обедненный слой распространяется от n-слоя примерно на половину глубины *i*-слоя. При обратном смещении до 5 В обеднение распространяется вплоть до р-слоя и наблюдается эффект «смыкания». Поскольку пробивное напряжение превышает 200 В, часто желательно устанавливать режим работы при обратных напряжениях, превышающих напряжение смыкания, чтобы поддерживать полное обеднение *i*-слоя даже при высоких уровнях потока излучения. Это обеспечивает наилучшую линейность и быстрдействие.

Качество фотоприемника может быть оценено введением параметра квантовая эффективность. В идеальном случае каждый фотон должен генерировать один электрон фототока. Квантовая эффективность, таким образом, измеряется как число электронов на фотон. На практике часто используют в качестве основного рабочего параметра фоточувствительность 0.5 А/Вт.

4.3. Фоторезистор

Фоторезистором называют полупроводниковый резистор, сопротивление которого чувствительно к электромагнитному излучению в оптическом диапазоне спектра. Схематическое изображение структуры фоторезистора приведено на рис. 4.2 а, а условное графическое изображение – на рис. 4.2, б.

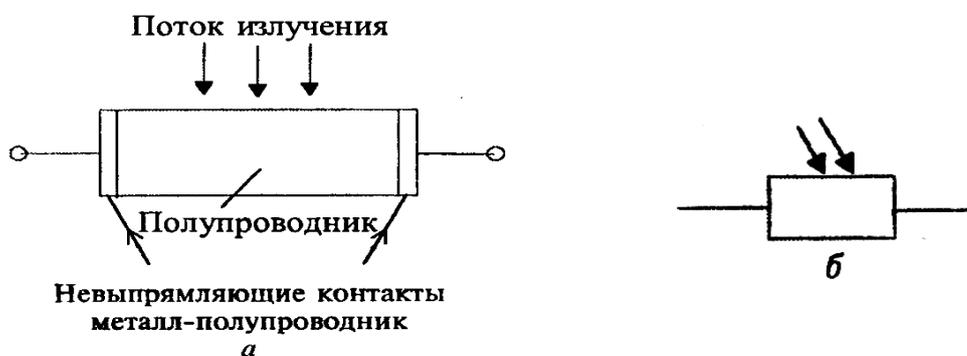


Рис. 4.2. Структура (а) и схематическое обозначение (б) фоторезистора

Поток фотонов, падающих на полупроводник, вызывает появление пар электрон-дырка, увеличивающих проводимость (уменьшающих сопротивление). Это явление называют внутренним фотоэффектом (эффектом фотопроводимости). Фоторезисторы часто харак-

теризуются зависимостью тока i от освещенности E при заданном напряжении на резисторе. Это так называемая люкс-амперная характеристика (рис. 4.3).

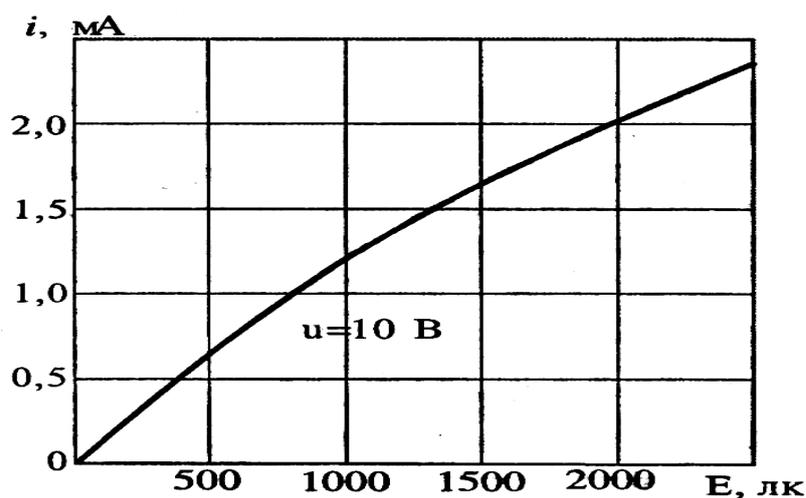


Рис. 4.3. Люкс-амперная характеристика фоторезистора ФСК-Г7

Часто используют следующие параметры фоторезисторов:

- номинальное темновое (при отсутствии светового потока) сопротивление (для ФСК-Г7 это сопротивление равно 5 МОм);
- интегральную чувствительность (чувствительность, определяемая при освещении фоторезистора светом сложного спектрального состава).

Интегральная чувствительность (токовая чувствительность к световому потоку) S определяется выражением:

$$S = \frac{i_{\Phi}}{\Phi}, \quad (4.1)$$

где i_{Φ} – так называемый фототок (разность между током при освещении и током при отсутствии освещения);

Φ – световой поток.

Для фоторезистора ФСК-Г7 $S=0,7\text{ А/лм}$.

4.4. Фотодиод

Упрощенная структура фотодиода приведена на рисунке 4.4 а, а его условное графическое изображение – на рисунке 4.4, б.

Физические процессы, протекающие в фотодиодах, носят обратный характер по отношению к процессам, протекающим в светодиодах. Основным физическим явлением в фотодиоде является генерация пар электрон-дырка в области p - n -перехода и в прилегающих к нему областях под действием излучения.

Генерация пар электрон-дырка приводит к увеличению обратного тока диода при наличии обратного напряжения и к появлению напряжения $u_{ак}$ между анодом и катодом при разомкнутой цепи. Причем $u_{ак} > 0$ (дырки переходят к аноду, а электроны – к катоду под действием электрического поля p - n -перехода).

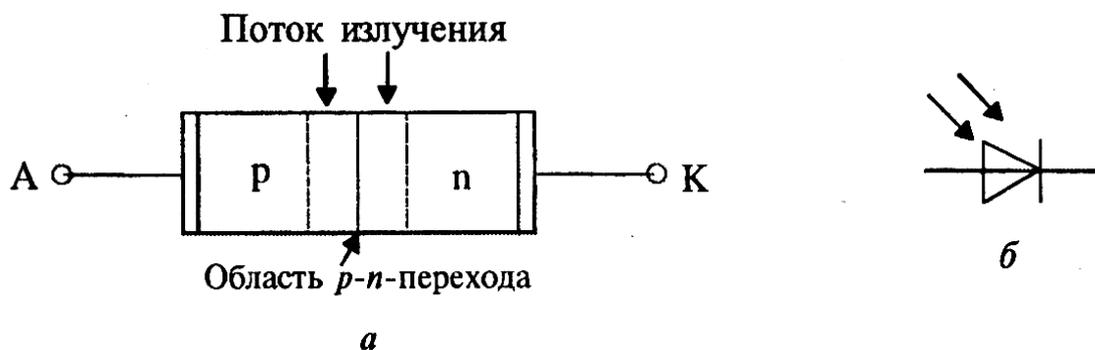


Рис. 4.4. Структура (а) и обозначение (б) фотодиода

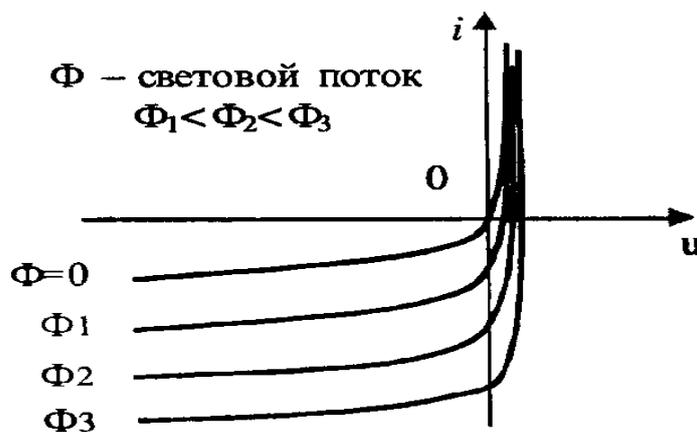


Рис. 4.5. Вольт-амперные характеристики фотодиода

Фотодиоды удобно характеризовать семейством вольт-амперных характеристик, соответствующих различным световым потокам (световой поток измеряется в люменах, *лм*) или различным освещенностям (освещенность измеряется в люксах, *лк*). Вольт-амперные характеристики (ВАХ) фотодиода представлены на рисунке 4.5.

Пусть вначале световой поток равен нулю, тогда ВАХ фотодиода фактически повторяет ВАХ обычного диода. Если световой поток не равен нулю, то фотоны, проникая в область *p-n*-перехода, вызывают генерацию пар *электрон-дырка*. Под действием электрического поля *p-n*-перехода носители тока движутся к электродам (дырки – к электроду слоя *p*, электроны – к электроду слоя *n*). В результате между электродами возникает напряжение, которое возрастает при увеличении светового потока. При положительном напряжении анод-катод ток диода может быть отрицательным (четвертый квадрант характеристики). При этом прибор не потребляет, а вырабатывает энергию.

На практике фотодиоды используют и в так называемом режиме фотогенератора (фотогальванический режим, вентильный режим), и в так называемом режиме фотопреобразователя (фотодиодный режим).

В режиме фотогенератора работают солнечные элементы, преобразующие свет в электроэнергию. В настоящее время коэффициент полезного действия солнечных элементов достигает 20 %. Пока энергия, полученная от солнечных элементов, примерно в 50 раз дороже энергии, получаемой из угля, нефти или урана.

Режим фотопреобразователя соответствует ВАХ в третьем квадранте. В этом режиме фотодиод потребляет энергию ($u \cdot i > 0$) от некоторого обязательно имеющегося в цепи внешнего источника напряжения (рис. 4.6). Графический анализ этого режима выполняется при

использовании линии нагрузки, как и для обычного диода. При этом характеристики обычно условно изображаются в первом квадранте (рис. 4.7).

Фотодиоды являются более быстродействующими приборами по сравнению с фоторезисторами. Они работают на частотах 10^7 – 10^{10} Гц.

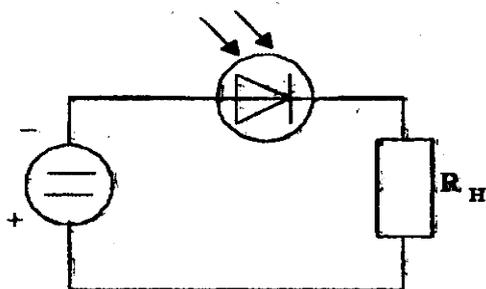


Рис. 4.6

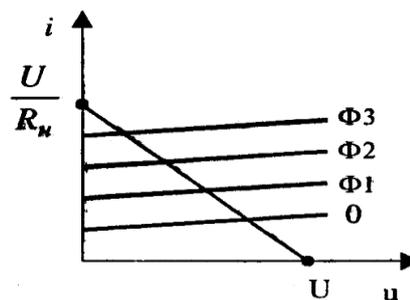


Рис. 4.7

Фотодиод часто используют в оптопарах *светодиод-фотодиод*. В этом случае различные характеристики фотодиода соответствуют различным токам светодиода (который при этом создает различные световые потоки).

4.5. Фототранзистор

Фототранзистором называют полупроводниковый прибор с двумя p-n переходами, преобразующий световой поток в электрический ток и обладающий свойством усиления.

Фототранзистор, как и обычный транзистор, конструктивно представляет собой полупроводниковый кристалл с чередующимися областями электронной и дырочной электропроводностью p-n-p или n-p-n. На рис. 4.8 приведена структура фототранзистора типа p-n-p с освещением базовой области. Практически может освещаться любая область: базовая, эмиттерная, коллекторная или все области. При этом световой поток может падать на кристалл параллельно p-n переходам или перпендикулярно. Наибольшая эффективность достигается при перпендикулярном направлении светового пучка переходу коллектор-база и при освещении базовой области.

Фототранзистор можно включать в измерительные схемы как обычный транзистор в схеме с общим эмиттером, общей базой и общим коллектором и как диод с отключенной базой, эмиттером или коллектором (рис. 4.9). При включении фототранзистора как двухполосника, последние две схемы не отличаются от схемы включения фотодиода в фотодиодном режиме.

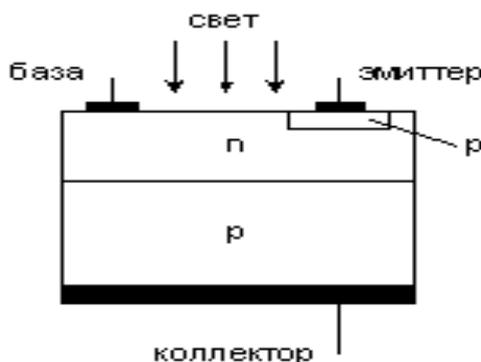


Рис. 4.8. Структура фототранзистора

Наибольшее распространение получила схема включения фототранзистора с общим эмиттером и отключенной или подключенной базой.

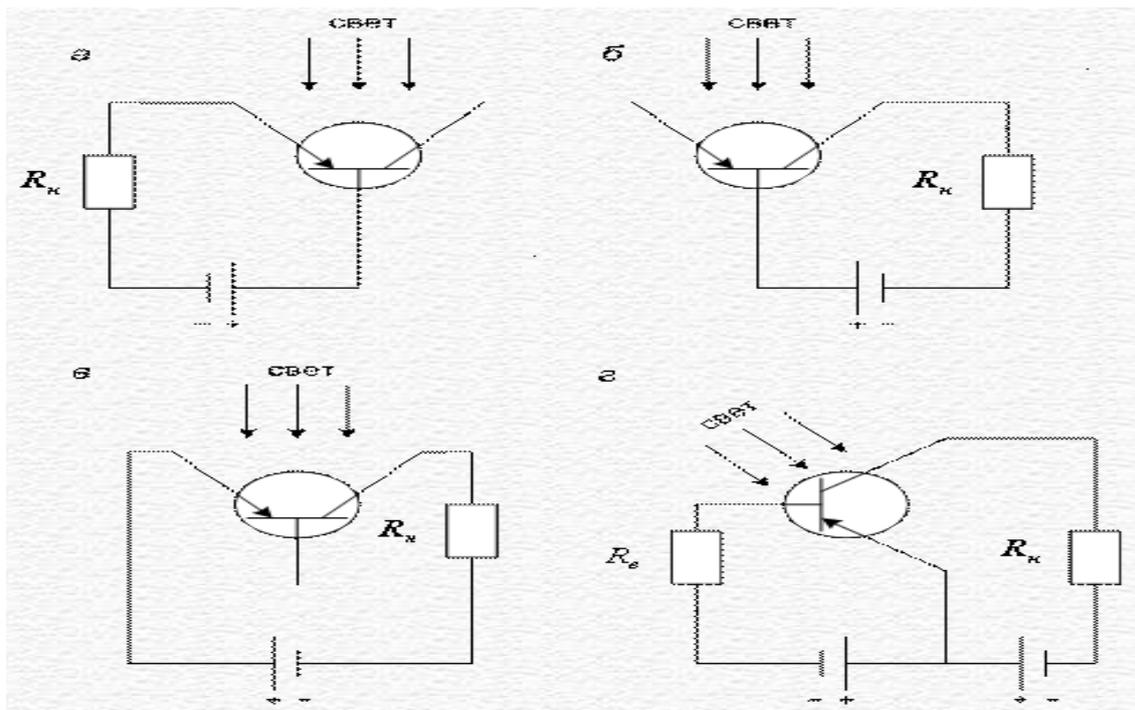


Рис. 4.9. Схемы включения фототранзистора : а – со свободным коллектором; б – со свободным эмиттером; в – со свободной базой; г – с общим эмиттером

Рассмотрим работу фототранзистора при отключенной базе (рис. 4.9, в). К коллекторному переходу приложено обратное напряжение, а эмиттерный переход смещен в прямом направлении. В области базы при освещении возникают электронно-дырочные пары. Неосновные носители диффундируют к коллекторному и эмиттерному переходам и под действием их электрических полей переносятся в коллекторную и эмиттерную области. В базовой области происходит накопление основных неравновесных носителей, при этом изменяется ее заряд, а, следовательно, и потенциал между эмиттерной и базовой областями.

Это приводит к увеличению потока носителей, переходящих в базу из эмиттера. Часть носителей рекомбинируют в базе, а большая часть переходит в коллекторную область.

4.6. Фототиристор

Фототиристором называют специальный тиристор, в корпусе которого (в случае дискретного исполнения) предусмотрено окно, в которое вместо подачи сигнала на управляющий электрод подаётся сигнал в виде потока лучистой энергии (рис. 4.10). При облучении всего полупроводникового кристалла, либо только участка между катодом и управляющим электродом тиристора под действием фотонов возникает фотогенерация носителей заряда, и чем интенсивнее будет световой поток, тем больше станет ток, протекающий по тиристор. При достаточной освещённости ток через выводы анод-катод тиристора лавинообразно возрастает, что вызывает открывание тиристора.

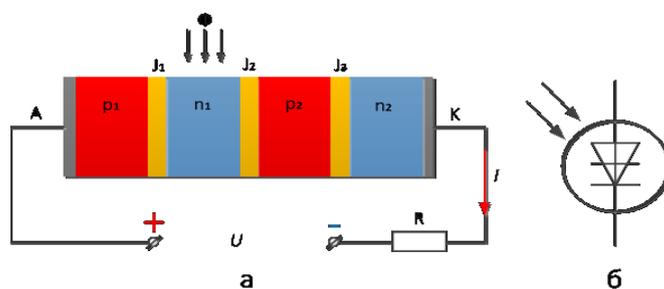


Рис. 4.10. Структура фототиристора – а и его условное графическое обозначение – б

Длительность включения фототиристора может достигать несколько микросекунд. Следует отметить, что спектр света, которым облучают полупроводниковую структуру, должен быть согласован с определённой длиной волны, к облучению которой фототиристор максимально чувствителен. Материалом фототиристора, как и типовых тиристора, обычно выступает кремний. Редко в качестве основного материала маломощных быстродействующих тиристора выступает арсенид галлия. Все остальные характеристики такого тиристора аналогичны характеристикам обычного тиристора с электрическим управлением. На рисунке 4.11 представлена вольт-амперная характеристика фототиристора. Фототиристоры используются для коммутации световым сигналом электрических сигналов большой мощности. Сопротивление фототиристора изменяется от 10^8 Ом (в запертом состоянии) до 10^{-1} Ом в открытом состоянии. Время переключения тиристора лежит в пределах $10^{-5} \dots 10^{-6}$ секунды.

Некоторые фототиристоры позволяют коммутировать токи силой до сотен ампер при напряжениях анод-катод в десятки киловольт и обеспечивают гальваническую развязку системы управления и исполнительной цепи. В результате между устройством управления и фототиристором не нужно включать дорогой, ненадёжный и крупногабаритный высоковольтный трансформатор, который был бы необходим для гальванической развязки обычного тиристора, включённого в цепь с высоким напряжением относительно земли.

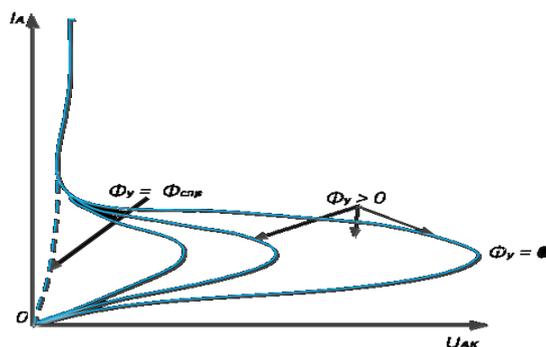


Рис. 4.11. Вольт-амперная характеристика фототиристора

4.7. Источники света

Свет – это электромагнитное излучение, которое вызывает зрительные ощущения. Природа света достаточно сложна. Изучать образование света мы будем в старших классах. А сейчас можно сказать следующее: свет образуется в результате процессов, происходящих внутри атомов.

Искусственные источники света разделяют на тепловые и люминесцирующие. Тепловые – лампа накаливания, зажженная свеча. Люминесцирующие – лампа дневного света. Как

правило, мы говорим о протяженных источниках света. То есть само тело, непосредственно излучающее свет, имеет достаточно большие размеры.

Чтобы изучать световые явления, требуется небольшой источник света. Точечный источник света – такой источник света, размерами которого можно пренебречь по сравнению с расстоянием, на которое распространяется свет от него. Еще одно важное понятие – это световой луч.

Световым лучом называют линию, вдоль которой распространяется световая энергия. Геометрической оптикой называется раздел оптики, основанный на понятии луча.

4.7.1. Светодиоды

Светодиод – полупроводниковый прибор, излучающий свет определенного цвета. Он кардинально отличается от традиционных источников света, таких как лампы накаливания, люминесцентные лампы и разрядные лампы высокого давления. В светодиоде нет газа и нити накала, он не имеет хрупкой стеклянной колбы и потенциально ненадежных подвижных деталей.

Как и любой диод, светодиод включает в себя один полупроводниковый p-n-переход (электронно-дырочный переход). С помощью процесса, носящего название легирование, материал n-типа обогащается отрицательными носителями заряда, а материал p-типа – положительными носителями заряда. Атомы в материале n-типа приобретают дополнительные электроны, а атомы в материале p-типа приобретают дырки – места на внешних электронных орбитах атомов, в которых отсутствуют электроны.

При приложении к диоду электрического поля электроны и дырки в материалах p- и n-типа устремляются к p-n-переходу. Когда носители заряда подходят к p-n-переходу, электроны инжектируются в материал p-типа. При подаче отрицательного напряжения со стороны материала n-типа через диод протекает электрический ток в направлении от материала n-типа в материал p-типа. Это называется *прямым смещением*.

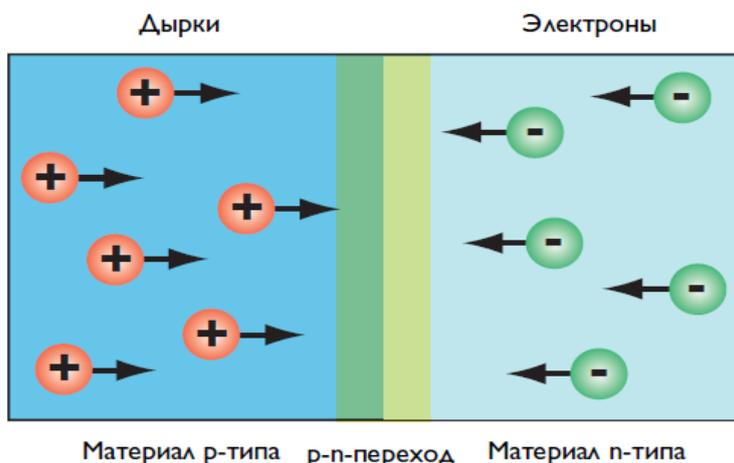


Рис. 4.12. Носители заряда

Когда избыточные электроны переходят из материала n-типа в материал p-типа и рекомбинируют с дырками, происходит выделение энергии в виде фотонов, элементарных частиц (квантов) электромагнитного излучения. Все диоды испускают фотоны, но не все диоды испускают видимый свет.

Материал, из которого изготавливается светодиод, выбирается таким образом, чтобы длина волны испускаемых фотонов находилась в пределах видимой области спектра излуче-

ния. Разные материалы испускают фотоны с разными длинами волн, что соответствует разным цветам испускаемого света.



Рис. 4.13. Светодиод

Пучок видимого света, испускаемого светодиодом, является холодным, но так как в светодиодах имеются потери, то на р-п-переходе генерируется тепло, иногда достаточно большое. Ограничение температуры р-п-перехода с помощью правильно сконструированного теплоотвода и других методов контроля температуры является критичным для обеспечения нормальной работы светодиода, оптимизации его светового потока и повышения срока службы.

4.7.2. Полупроводниковые лазеры

Полупроводниковый лазер – твердотельный лазер, в котором в качестве рабочего вещества используется полупроводник. В таком лазере, в отличие от лазеров других типов (в том числе и других твердотельных), используются излучательные переходы не между изолированными уровнями энергии атомов, молекул и ионов, а между разрешенными энергетическими зонами или подзонами кристалла. В полупроводниковом лазере накачка осуществляется:

- непосредственно электрическим током (прямая накачка);
- электронным пучком;
- электромагнитным излучением.

Под именем полупроводниковые часто встречается гибридный лазер из мощного светодиода накачки и наклеенного на него твердотельного активного элемента. Преимущество таких лазеров в том, что светодиодную структуру накачки можно сделать довольно протяженной и, соответственно, мощной. Механические деформации от нагрева меньше сказываются на активном элементе. «Полупроводниковые» лазеры с мощностями единицы-десятки ватт делают в основном именно по такой технологии. Визуально отличить гибридный лазер от полупроводникового довольно сложно.

Поскольку в полупроводниковом лазере возбуждаются и излучают коллективно атомы, составляющие кристаллическую решётку, сам лазер может обладать очень малыми размерами.

Другими особенностями полупроводниковых лазеров являются высокий КПД, малая инерционность, простота конструкции.

Типичным представителем полупроводниковых лазеров является лазерный диод – лазер, в котором рабочей областью является полупроводниковый р-п переход. В таком лазере излучение происходит за счет рекомбинации электронов и дырок.

4.8. Оптопары

Оптопарой называют оптоэлектронный прибор, в котором конструктивно объединены в общем корпусе излучатель и фотоприёмник, взаимодействующие друг с другом оптически и электрически. Связи между компонентами оптопары могут быть прямыми или обратными, положительными или отрицательными, одна из связей (электрическая или оптическая) может отсутствовать. В состав единого прибора вместе с оптопарой или несколькими оптопарами могут входить еще и дополнительные микроэлектронные или оптические элементы. И конструктивно, и функционально такие приборы существенно отличаются от элементарной оптопары, поэтому в литературе принято использовать для их названия термин «оптрон», при этом имеется в виду оптоэлектронный прибор любого произвольного вида с внутренними оптическими связями.

Оптопара с прямой оптической и оборванной электрической связью (рис. 4.14, а) используется как элемент развязки, она получила очень широкое распространение. Оптрон с прямой электрической и оборванной оптической связью (рис. 4.14, б), т. е. оптрон с оптическим входом и выходом, представляет преобразователь световых сигналов: это может быть простое усиление (ослабление) интенсивности света, преобразование спектра или направления поляризации, преобразование некогерентного излучения в когерентное и т. п. Если в таком оптроне фотоприемник и излучатель многоэлементные, то он может выполнять функцию преобразователя изображений.

Основные функциональные разновидности этих приборов представлены на рис. 4.14.

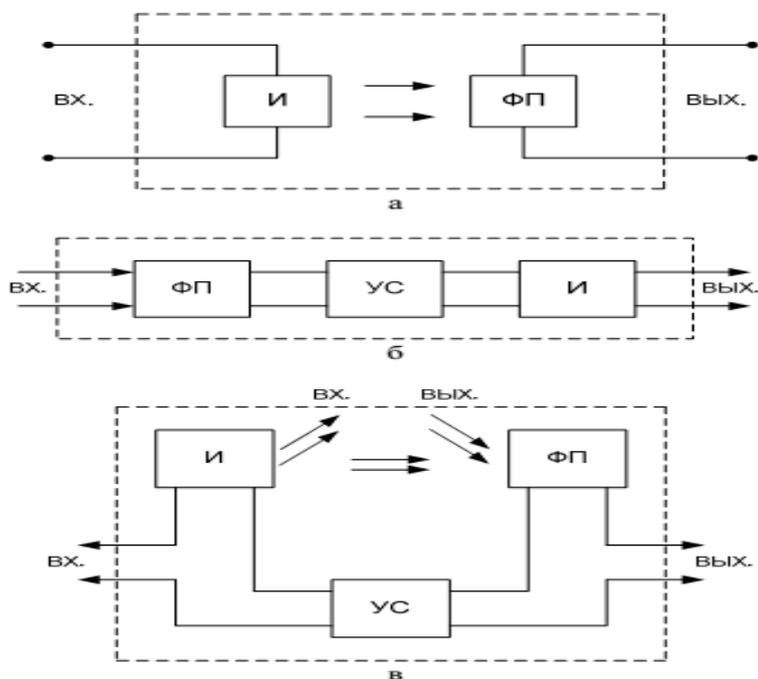


Рис. 4.14. Электрические и оптические связи в оптронах:
а – оптопара для электрической развязки; б – оптрон с оптическим входом и выходом;
в – регенеративный оптрон; И – излучатель; ФП – фотоприемник;
УС – электронное устройство связи

В оптроне с электрической и оптической связями (рис. 4.14, в) при определенных условиях может осуществляться частичная или полная регенерация (восстановление) входного сигнала за счёт энергии обратной связи, в силу чего на вольт-амперной характеристике появляется падающий участок или несколько участков. Такой прибор получил название *ре-*

генеративного оптрона. В нем могут реализовываться любые комбинации видов входных и выходных сигналов (электрических и оптических).

Важным элементом оптопары является оптический канал между излучателем и фотоприемником. Существуют три его разновидности: простой светопровод (в виде прозрачной иммерсионной среды), предназначенный для передачи энергии излучения на фотоприемник; зазор между излучателем и фотоприемником имеет доступ извне такая оптопара называется оптопарой с открытым оптическим каналом. Иммерсионная среда может быть выполнена из материала, светопропускание которого изменяется при внешних воздействиях – такая оптопара называется *оптопарой с управляемым оптическим каналом*. Оptron в общем случае состоит из четырех функциональных частей, для описания которых используются следующие параметры:

Si, Вт/А – эффективность излучателя, определяемая видом выбранного излучателя, режимом его возбуждения, температурой;

SФ, А/Втt , – чувствительность фотоприемника, зависящая от внутреннего усиления прибора;

Копт – передаточная функция оптического канала (например, с учетом поглощения, геометрических факторов и т.д.);

Кус – передаточная характеристика электронного устройства связи (например, коэффициент усиления).

В качестве элементов электрической развязки оптопары (рис. 4.14, а) получили широкое распространение благодаря тому, что для их успешного функционирования высокий КПД не обязателен, а также из-за многих принципиальных достоинств этих приборов, таких как идеальная электрическая развязка, высокое напряжение изоляции, однонаправленность распространения информации, широкополосность. Совместимость оптопар с изделиями микроэлектроники (технологическая, эксплуатационная, по уровням входных и выходных сигналов) также способствовала их широкому применению. Наиболее широко используются для электрической развязки оптопары с фотоприемником в виде фототранзистора, фотодиода, фототиристора, фоторезистора. На рисунке 4.15. представлены основные виды оптопар.



Рис. 4.15. Основные виды оптопар: а – транзисторная; б – диодная; в – резисторная; г – с составным транзистором; д – тиристорная; е – дифференциальная диодная

Диодные и транзисторные оптопары применяются главным образом в цепях передачи цифровых информационных сигналов; критерием качества служит комбинированный параметр $K_i/tзд$;

где K_i – коэффициент передачи по току, $tзд$ – время задержки распространения сигнала).

По этому параметру диодные оптопары значительно опережают транзисторные. Этим обусловлено наиболее широкое применение диодных оптопар в ЭВМ, в технике обработки и передачи цифровой информации. Диодные оптопары имеют низкий коэффициент передачи тока и требуют обязательного усиления выходного сигнала, поэтому они используются либо в составе оптоэлектронных микросхем, либо с дополнительным электронным обрамлением.

Важной разновидностью диодных оптопар являются так называемые дифференциальные оптопары – приборы, в которых один излучатель воздействует на два идентичных фотодиода. Подобие выходных характеристик двух каналов такой оптопары позволяет использовать эти приборы для неискажённой передачи аналоговых сигналов: непосредственно для передачи применяется один канал, а другой служит для организации цепи отрицательной обратной связи, корректирующей температурные, деградационные и другие изменения мощности излучателя.

В устройствах бесконтактного управления удобны транзисторные оптопары, а для оптической коммутации высоковольтных силовых цепей – тиристорные. Критерий качества таких управляющих оптопар, определяемый отношением коммутируемой мощности в выходной цепи к мощности на входе, достигающий 10^6 – 10^7 .

Быстродействие транзисторных и тиристорных оптопар характеризуется временем переключения, типичные значения которого 5...50 мкс, в лучших образцах удается получить 1 мкс.

Очевидная перспектива развития транзисторных оптопар связана с использованием в качестве фотоприемников гетеротранзисторов, при этом реально снижение времени переключения до 1...10 нс. Транзисторные оптопары – наиболее массовый тип элементов электрической развязки.

Резисторные оптопары также получили широкое распространение. Фоторезисторы, в отличие от фотоприемников с р-п-переходами, характеризуются высокой линейностью и симметричностью вольт-амперной характеристики, отсутствием внутренних ЭДС, низким уровнем шумов. Их выходное сопротивление при изменении режима входной цепи может изменяться в 10^7 – 10^8 раз. Это и обуславливает удобство и незаменимость резисторных оптопар в аналоговых устройствах. Недостатки резисторных оптопар – низкое быстродействие (0,01...1 с) и сильная температурная нестабильность параметров – ограничивают применение этих приборов в технике обработки информации.

Перспективны оптоэлектронные коммутаторы силовой нагрузки -микросхемы или устройства, выполняющие функции реле переменного и постоянного токов и содержащие оптическое звено в цепи управления. В них обычно применяют транзисторные и тиристорные оптопары.



Рис. 4.16. Оптопары с открытым оптическим каналом:
 а – целевого типа, б – отражательная

В оптронах с открытым оптическим каналом (рис. 4.16) излучатель и фотоприемник смонтированы отдельно друг от друга, и специфика оптопары проявляется лишь в обеспечении наилучшей светопередачи. В оптроне с управляемым оптическим каналом между излучателем и фотоприемником содержится элемент, величина светопропускания которого может регулироваться. Чаще всего это может быть светонепроницаемая шторка или электрооптический (жидкий кристалл, сегнетокерамика) или магнитооптический материал, в котором управление свойствами канала осуществляется электрическим или магнитным полем.

Задание 4.1. Измерение вольт-амперной характеристики оптопары с открытым оптическим каналом щелевого типа

Для измерения ВАХ светодиода воспользуемся следующей схемой (рис. 4.17).

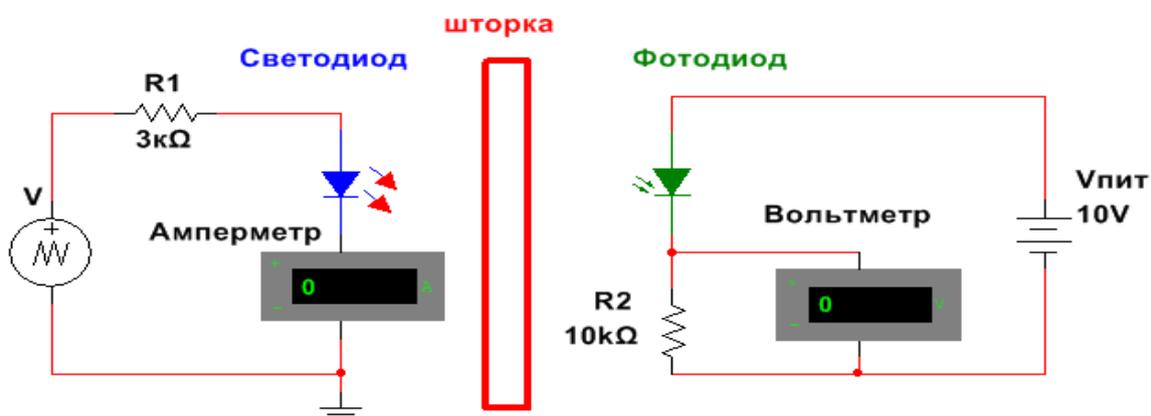


Рис. 4.17. Схема измерения ВАХ оптопары с открытым оптическим каналом щелевого типа

Изменяя напряжение с помощью источника питания V , замеряем ток через светодиод с помощью амперметра, полученная вольт-амперная характеристика показана на рисунке 4.18. Так же замеряем напряжение, при котором фотодиод откроется, и на резисторе R_2 появится потенциал источника питания. Перекрывая световой поток от светодиода, убеждаемся в том, что фотодиод закрылся.

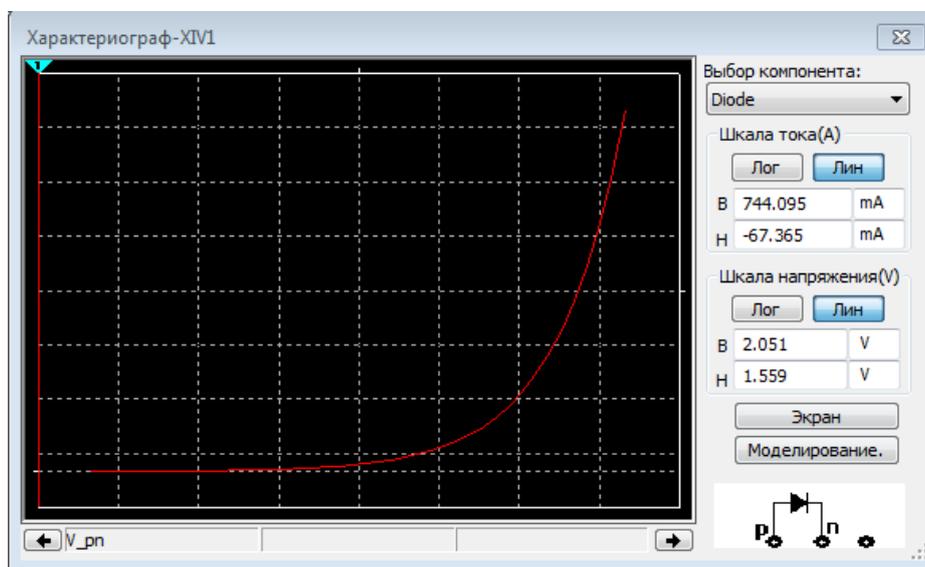


Рис. 4.18. ВАХ светодиода оптопары с открытым оптическим каналом щелевого типа

Задание 4.2. Измерения ВАХ диодной оптопары ЗОД101

Для измерения ВАХ диодной оптопары была разработана схема (см. рис. 4.19). Изменяя напряжение с помощью источника питания V, замеряем ток через светодиод с помощью амперметра, полученная вольт-амперная характеристика показана на рис. 4.20. По ней видно, что светодиод начинает открываться при напряжении на нем равном примерно 1,03 В.

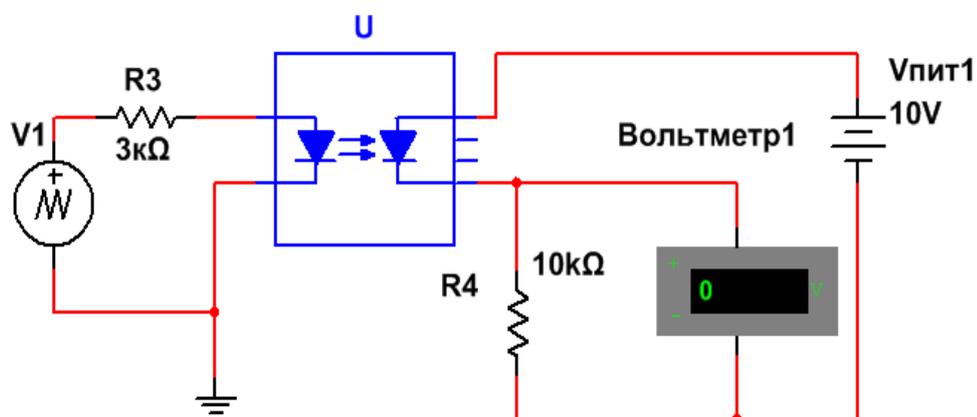


Рис. 4.19. Схема для измерения ВАХ диодного оптрона

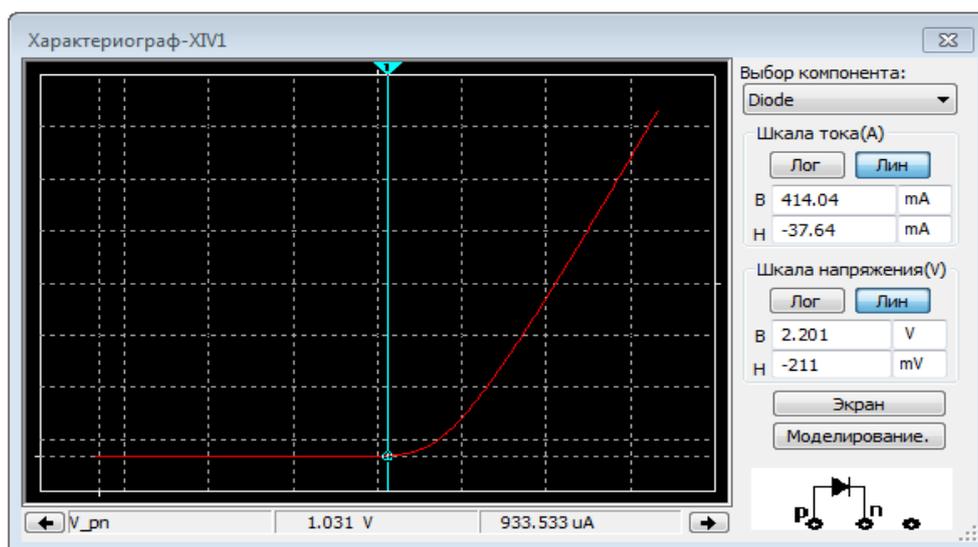


Рис. 4.20. ВАХ светодиода диодной оптопары

Так же замеряем напряжение при котором фотодиод полностью откроется и на резисторе R4 появится потенциал источника питания.

Задание 4.3. Осциллограммы работы диодного оптрона 3ОД101 при различном напряжении на светодиоде

Для более наглядного изучения данного режима была разработана следующая схема (рис. 4.21).

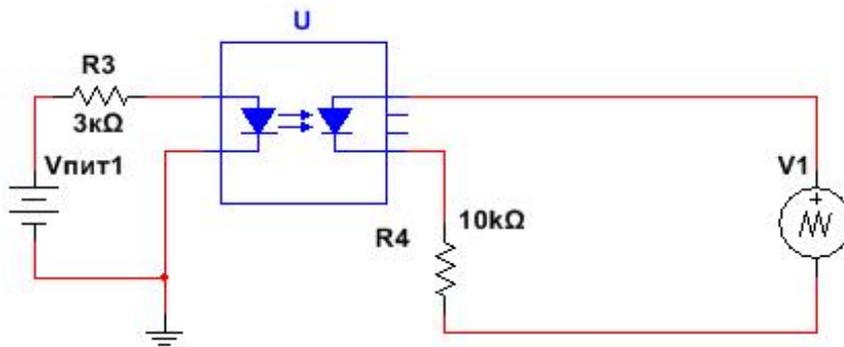


Рис. 4.21. Схема показывающая работу диодного оптрона при различном напряжении на светодиоде

Подадим на разъём Uген, стенда “Схемотехника на основе диодов” (рис.1 блок “диодный оптрон”), напряжение равное 3 В, а на разъём +U, напряжение с генератора. Полученная осциллограмма показана на рисунке 4.22. Как мы видим сигнал на фотодиоде (КТ13), практически отсутствует.

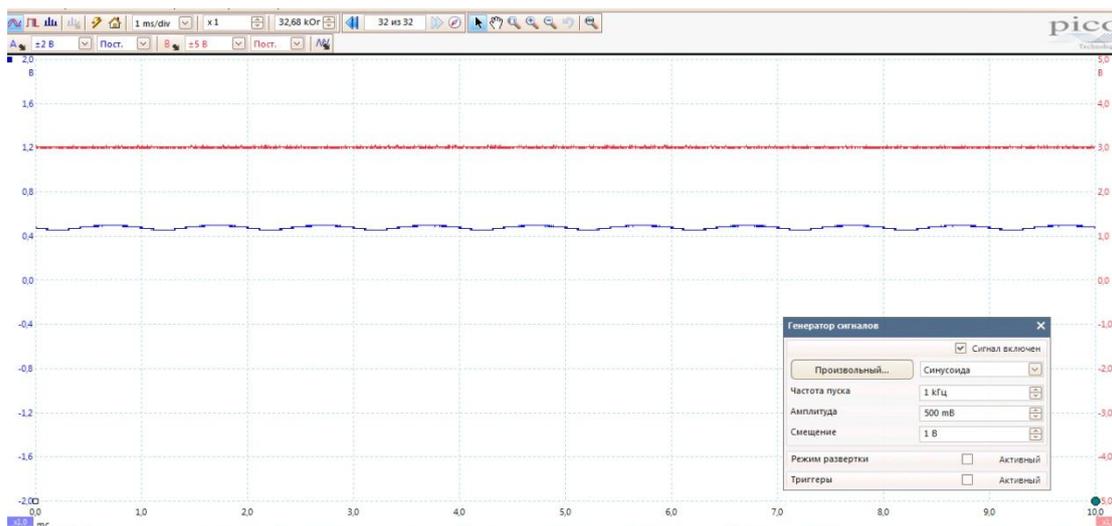


Рис. 4.22. Осциллограмма показывающая сигнал на выходе фотодиода при входном напряжении 3 В

Увеличим напряжение на светодиоде до 4,5 В (см. рис. 4.23). Видим, что на фотодиоде появился сигнал, но он еще искажен, т.к. фотодиод еще не полностью открывается.

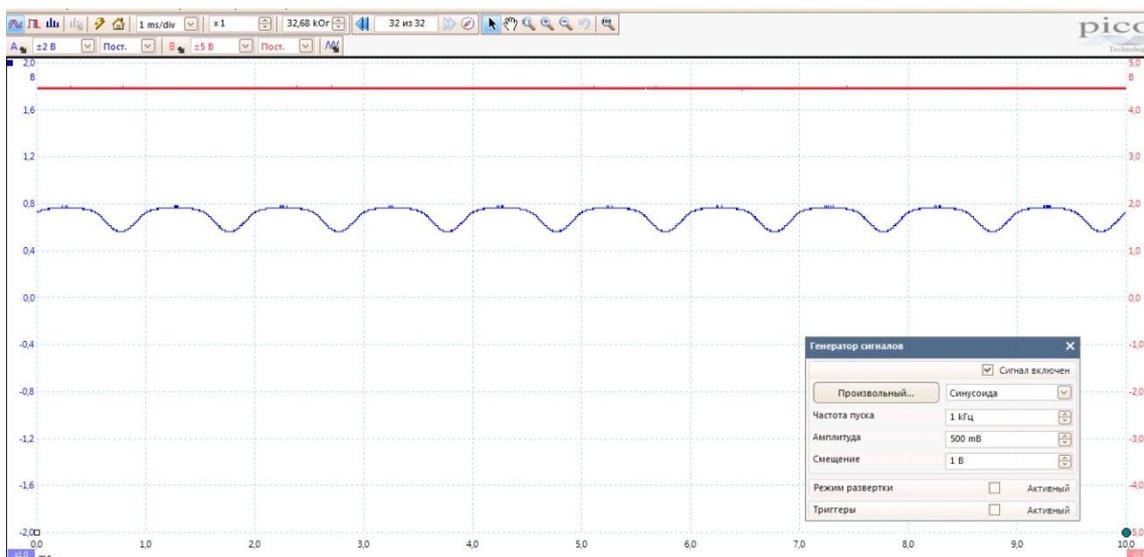


Рис. 4.23. Осциллограмма показывающая сигнал на выходе фотодиода при входном напряжении 4,5 В

Увеличим напряжение на светодиоде до 8В (см. рис. 4.24). Видим, что на фотодиоде есть неискаженный сигнал, говорящий о том, что фотодиод находится в нормальном рабочем режиме.

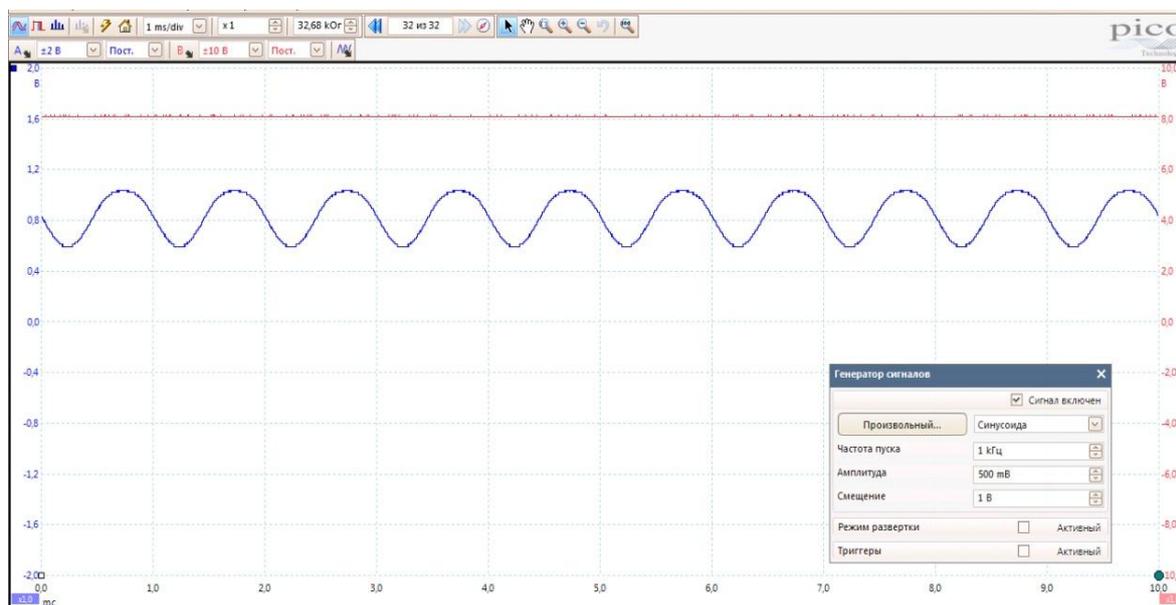


Рис. 4.24. Осциллограмма показывающая сигнал на выходе фотодиода при входном напряжении 8 В

Задание 4.4.

Динамические (длительность фронта и спада) характеристики диодной оптопары ЗОД101

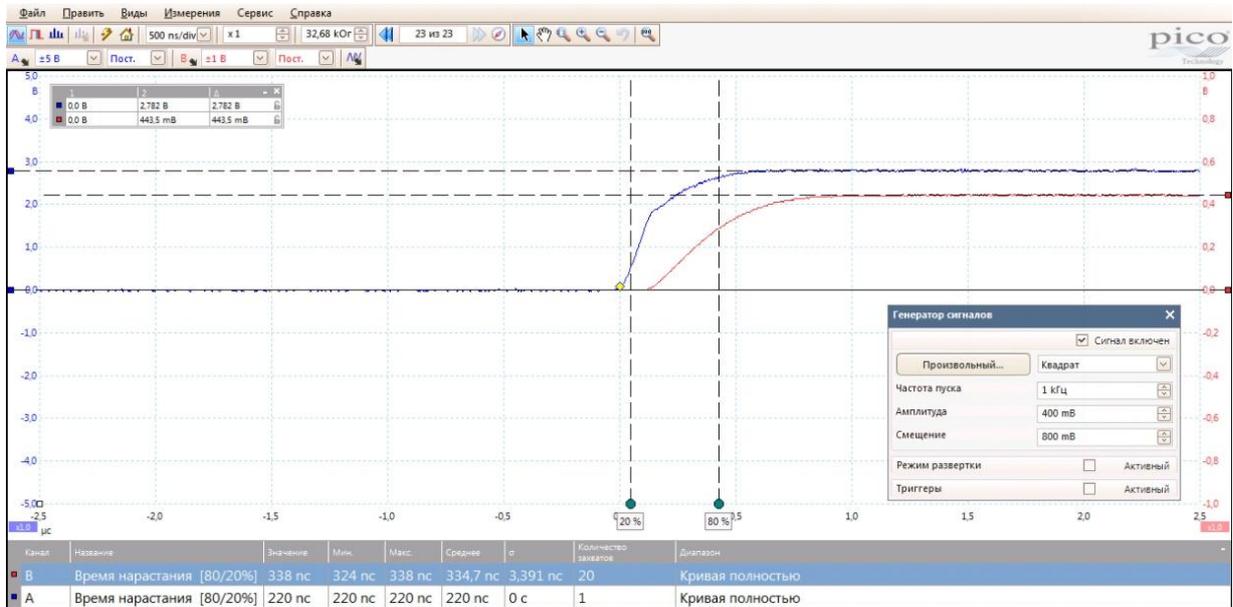


Рис. 4.25. Длительность фронта выходного сигнала на фотодиоде (КТ13) красная линия, при импульсном воздействии на светодиод (синяя линия)

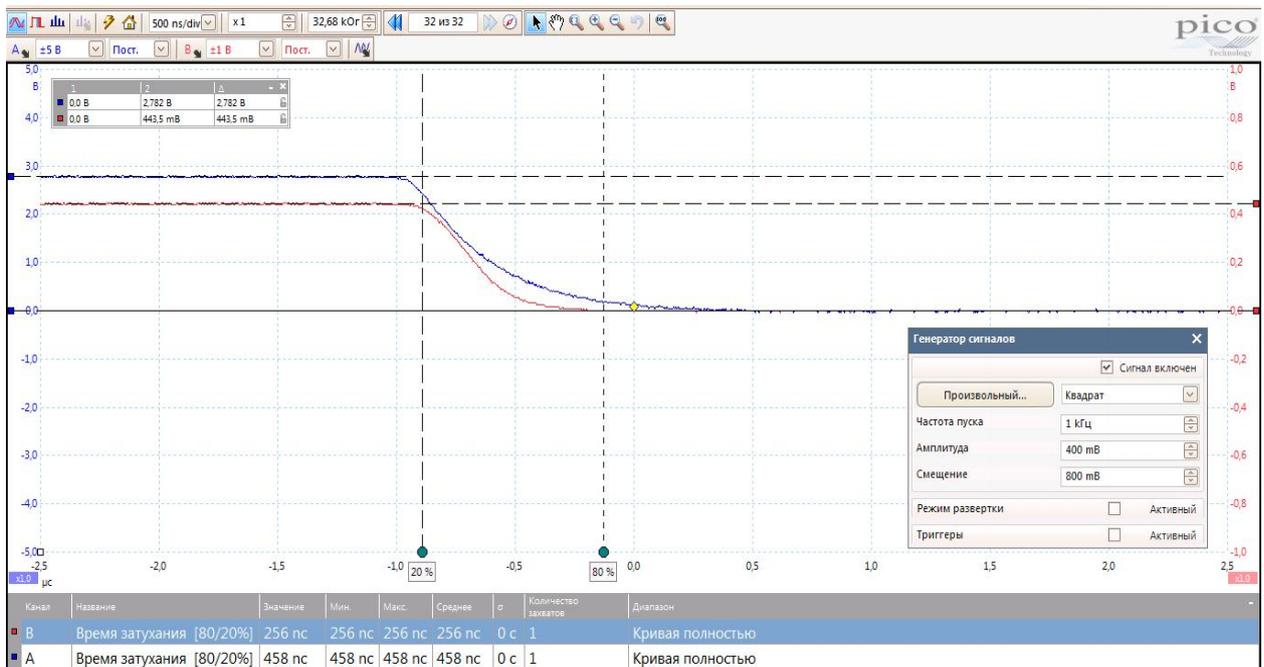


Рис. 4.26. Длительность спада выходного сигнала на фотодиоде (КТ13) красная линия, при импульсном воздействии на светодиод (синяя линия)

Задание 4.5. Измерения свойств транзисторной оптопары

Для измерения свойств транзисторной оптопары была разработана схема (см. рис. 4.27). Особенность транзисторной оптопары состоит в том, что она может работать как в ключевом, так и в линейном режимах. Так же она обладает усилительными свойствами.

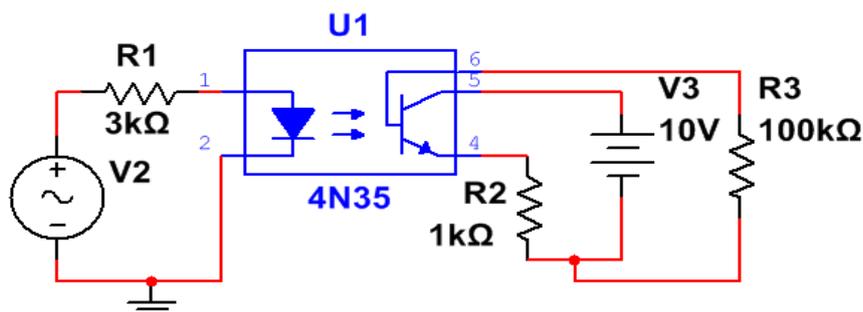


Рис. 4.27. Схема для снятия характеристик транзисторной оптопары

Изменяя напряжение питающее светодиод, можно осуществить работу оптопары в двух режимах. На рисунке 4.28 показана работа оптопары в ключевом режиме, когда небольшое изменение входного напряжения вызывает скачкообразное изменение выходного напряжения на транзисторе. На рисунке 4.28 показан линейный режим работы оптопары, когда выходной усиленный сигнал, повторяет входной.

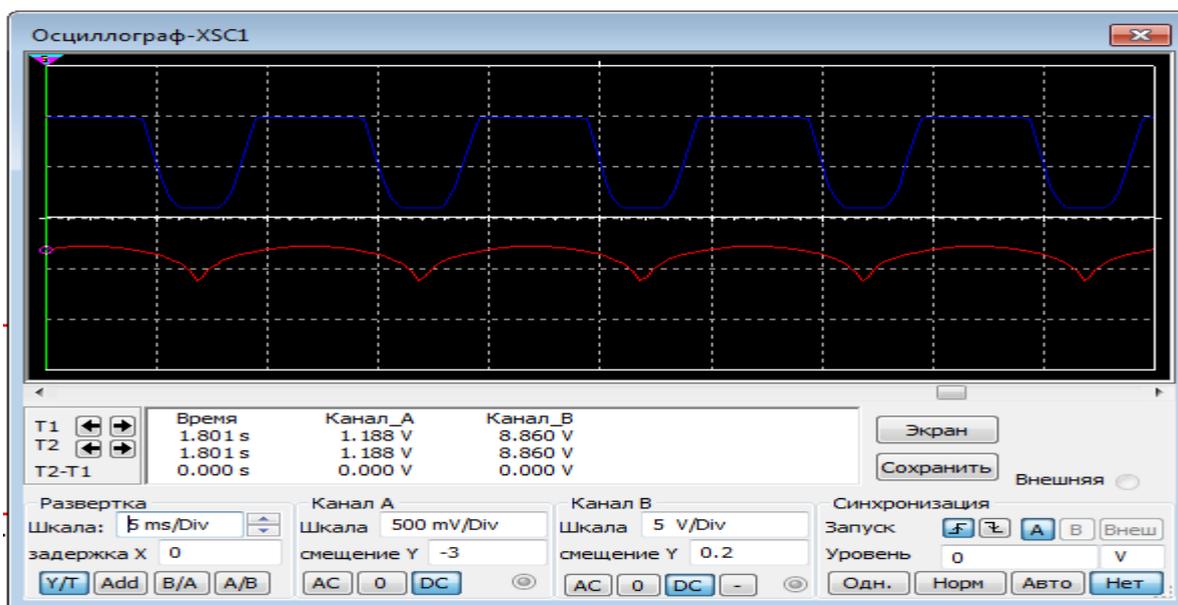


Рис. 4.28. Работа транзисторной оптопары в линейном режиме

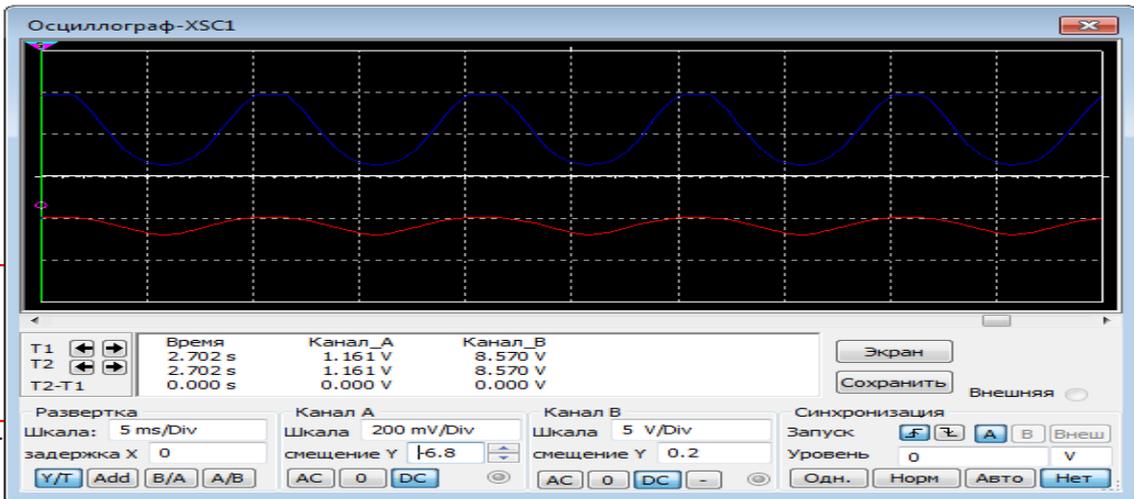


Рис. 4.29. Работа транзисторной оптопары в линейном (усилительном) режиме

Задание 4.6. Осциллограммы работы транзисторного оптрона АОТ110В при различном напряжении на светодиоде

Подадим на разъём Уген, стенда “Схемотехника на основе диодов” (блок “транзисторный оптрон”), напряжение равное 1,3 В, а на разъём +U, напряжение с генератора. Полученная осциллограмма показана на рисунке 4.30. Как мы видим сигнал на фототранзисторе (КТ14), практически отсутствует.

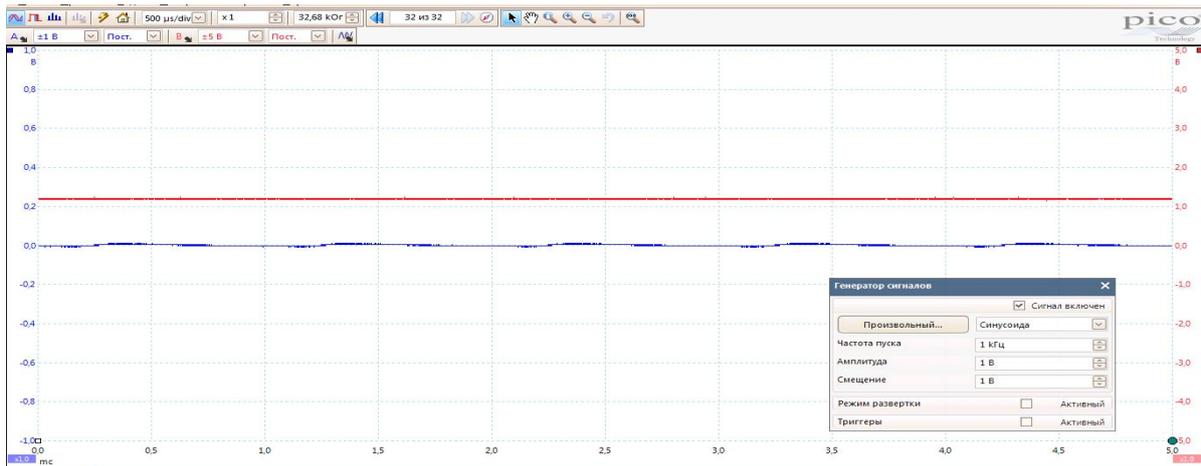


Рис. 4.30. Осциллограмма показывающая сигнал на выходе фототранзистора при входном напряжении 1,3 В

Увеличим напряжение на светодиоде до 2,5 В (см. рис. 4.31). Видим, что на фотодиоде появился сигнал, но он еще искажен, т.к. фототранзистор еще не полностью открывается.

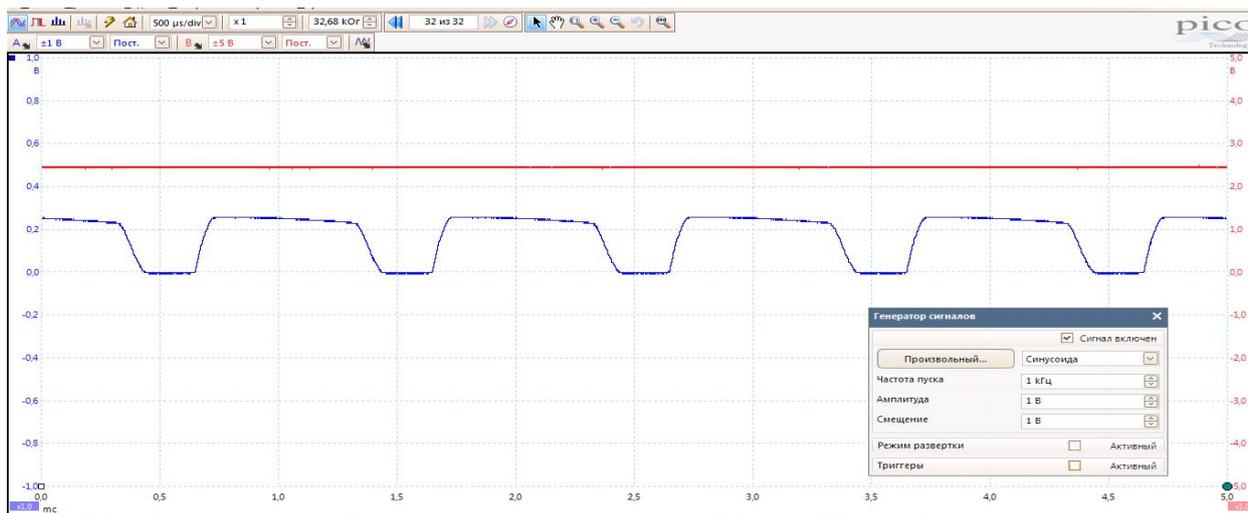


Рис. 4.31. Осциллограмма показывающая сигнал на выходе фототранзистора при входном напряжении 2,5 В

Увеличим напряжение на светодиоде до 4 В (см. рис. 4.32). Видим, что на фототранзисторе есть неискаженный сигнал, говорящий о том, что фототранзистор находится в нормальном рабочем режиме.

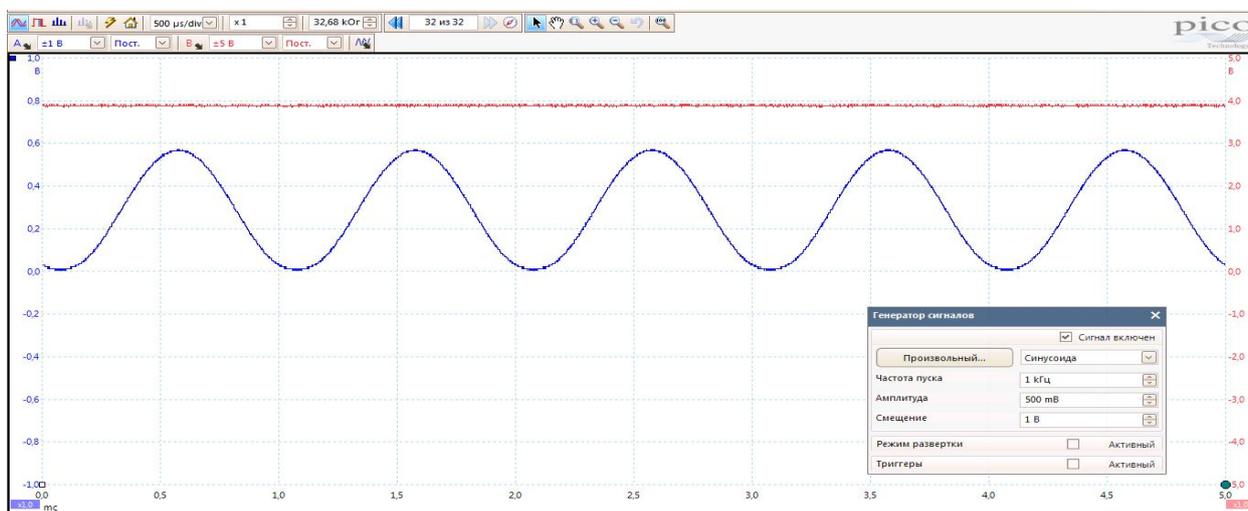


Рис. 4.32. Осциллограмма показывающая сигнал на выходе фототранзистора при входном напряжении 4 В

Сравнивая осциллограммы диодного и транзисторного оптронов можно сделать вывод, что транзисторный оптрон имеет большую чувствительность т.к. открывается при меньшем входном напряжении.

Задание 4.7.

Динамические (длительность фронта и спада) характеристики транзисторной оптопары АОТ110

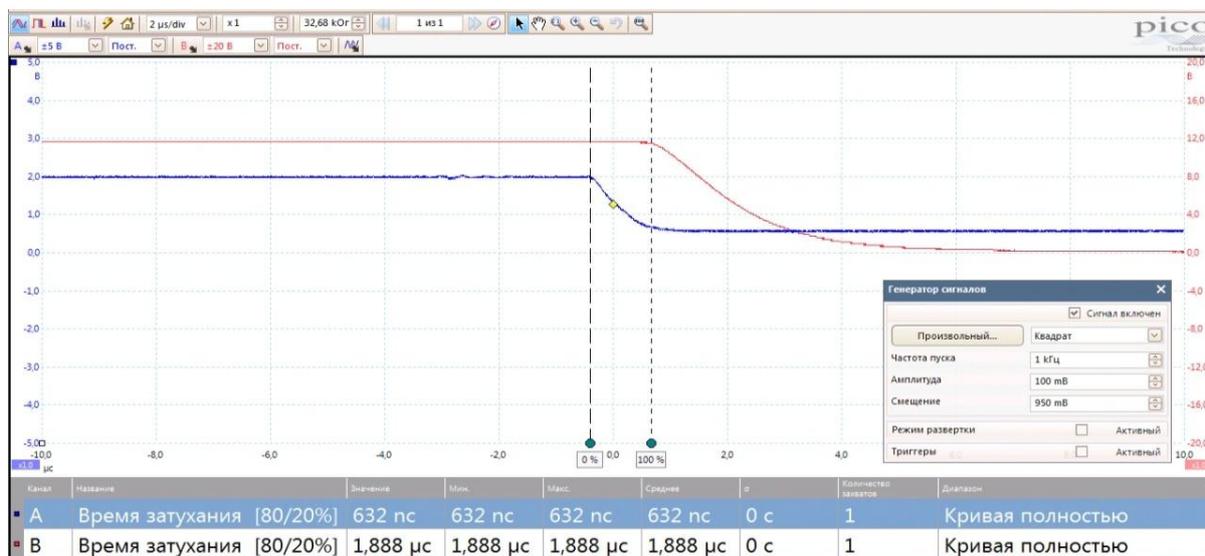


Рис. 4.33. Длительность спада выходного сигнала на фототранзисторе (КТ14) красная линия, при импульсном воздействии на светодиод (синяя линия)

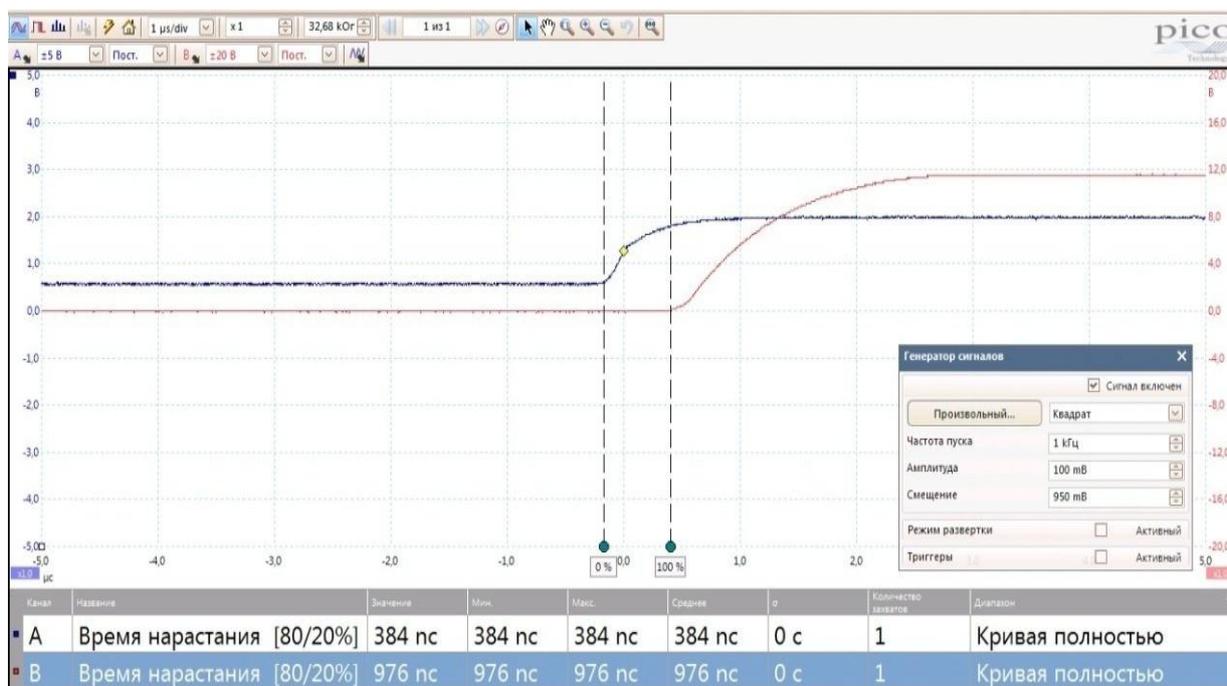


Рис. 4.34. Длительность фронта выходного сигнала на фототранзисторе (КТ14) (красная линия), при импульсном воздействии на светодиод (синяя линия)

Задание 4.9.

Амплитудно-частотная характеристика транзисторной оптопары АОТ110

Измерение АЧХ проводилось по схеме показанной на рисунке 4.27.

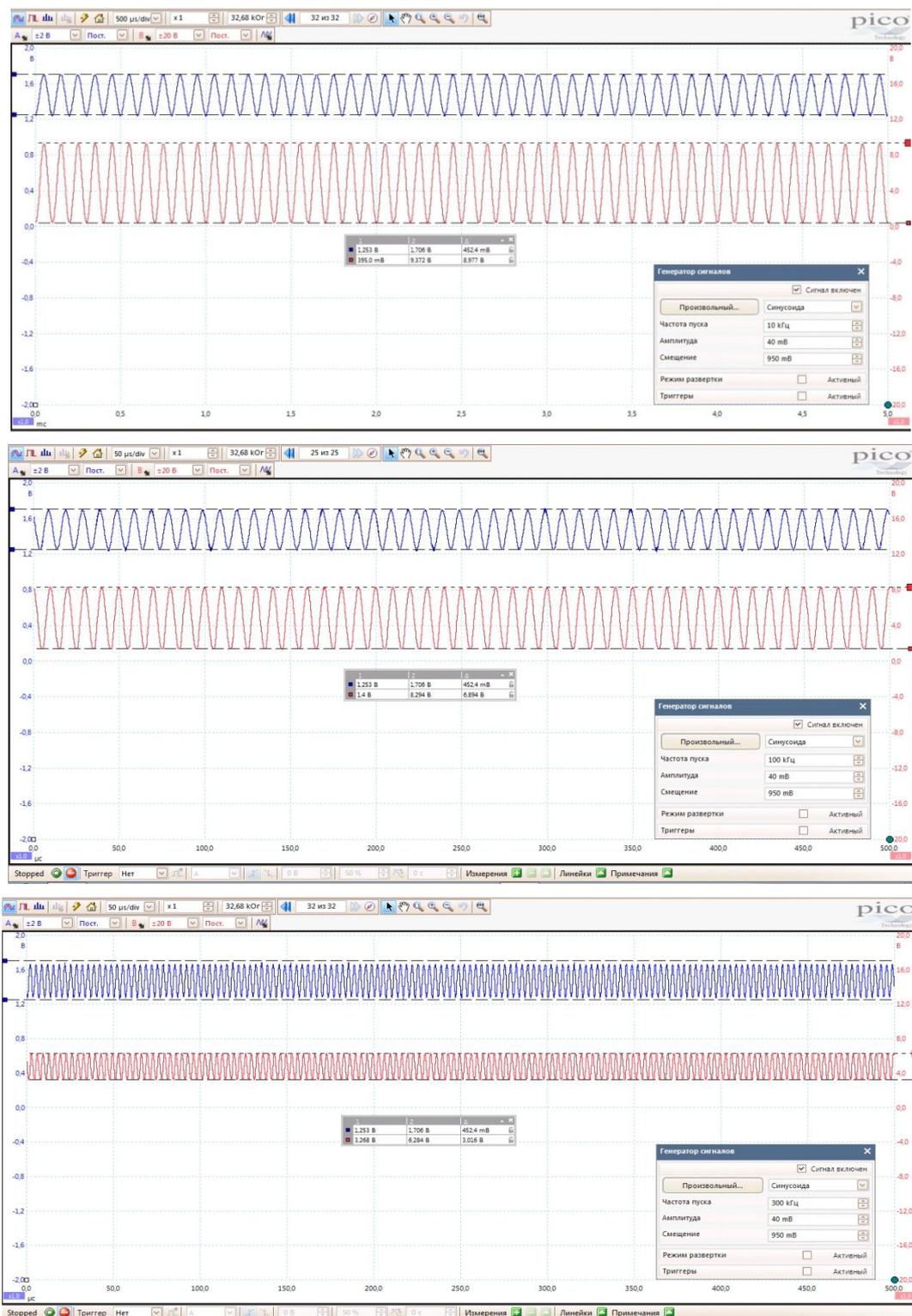


Рис. 4.35. Измерение АЧХ

Как видно из осциллограмм, оптрон АОТ110 оказался менее высокочастотным, нежели диодный оптрон ЗОД101, и уже при частоте входного сигнала 300 кГц размах напряжения уменьшается практически втрое с 8,9 В (частота 10 кГц) до 3В (частота 300 кГц).

Задание 4.10.

Осциллограммы работы оптоэлектронного реле РКПЗБ при различном напряжении на светодиоде

Подадим на разъём +U, стенда “Схемотехника на основе диодов” (блок “оптоэлектронное реле”), напряжение равное 1,2 В, а на разъём Uген, напряжение с генератора. Полученная осциллограмма показана на рис. 4.36. Как мы видим сигнал на реле (КТ15), практически отсутствует, т. е. реле находится в закрытом состоянии.

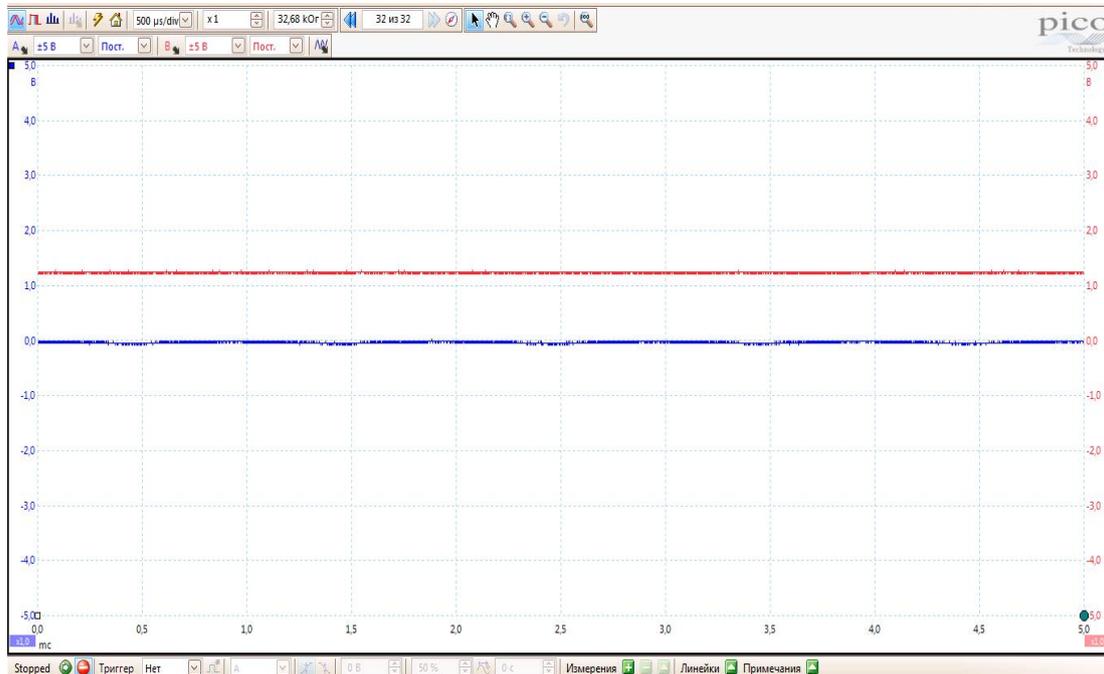


Рис. 4.36. Осциллограмма показывающая сигнал на выходе оптоэлектронного реле при входном напряжении 1,2 В

Увеличим напряжение на светодиоде до 1,5 В (см. рис. 4.37). Видим что на реле (КТ15) появился сигнал, но он еще искажен, т.к. фотореле еще не полностью открылось.

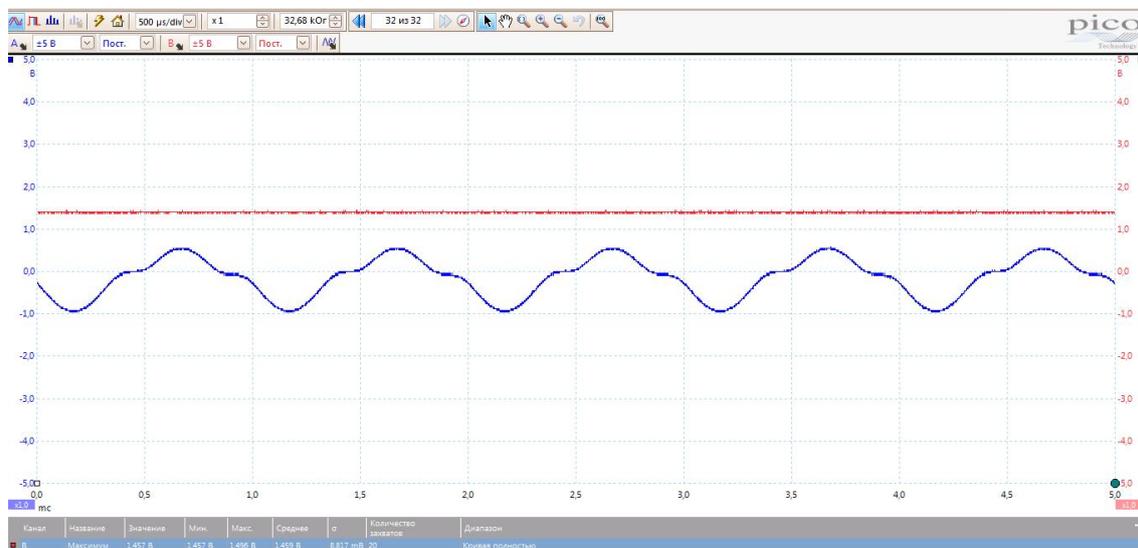


Рис. 4.37. Осциллограмма показывающая сигнал на выходе оптоэлектронного реле при входном напряжении 1,5 В

Увеличим напряжение на светодиоде до 1,8 В (см. рис. 4.38). Видим, что на реле (КТ15) появился неискаженный сигнал, и к тому же, в отличие от диодного и транзисторного оптронов, имеет двухполярную форму, что является значимым преимуществом.

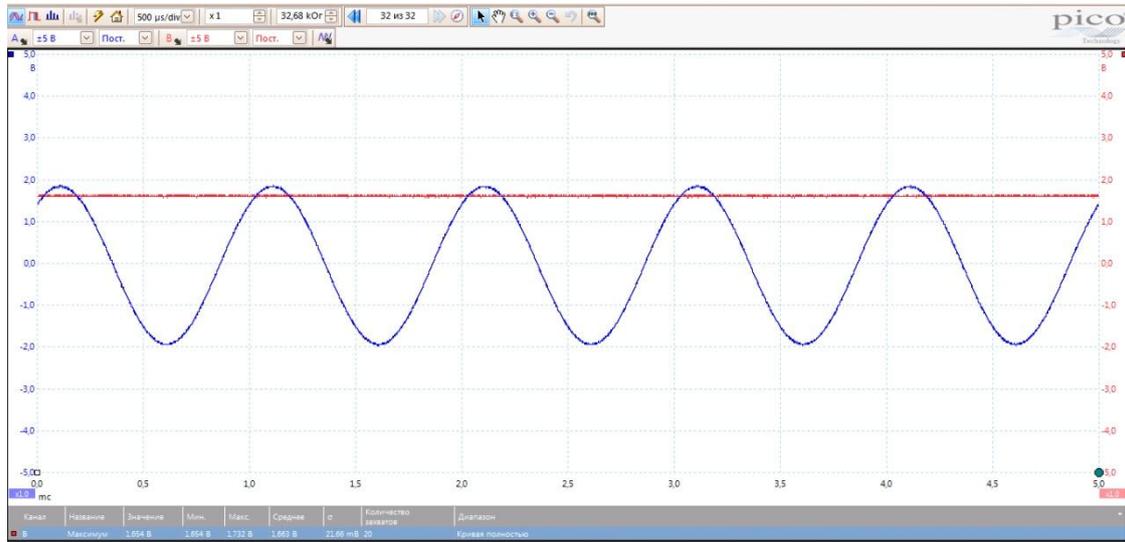


Рис. 4.38. Осциллограмма показывающая сигнал на выходе оптоэлектронного реле при входном напряжении 1,8 В

Литература

1. Интернет-ресурс: www.radio-1895.ru
2. Интернет-ресурс: www.tre.kai.ru
3. Интернет-ресурс: www.electricalschool.info
4. *Марченко А. Л.* Основы электроники, учебное пособие для вузов. Москва, 2009, 293 с.
5. <http://vtxs-sks.narod.ru/litra/3.4.doc>
6. <http://allrefs.net>
7. <http://b.my-city.com.ua>
8. <http://www.studfiles.ru>
9. <http://www.wikidocs.ru>
10. <http://tre.kai.ru>
11. *Савиных В. Л.* Физические основы электроники: учебное пособие. Новосибирск: 2003. 383 с.
12. *Марченко А. Л.* Основы электроники: учебное пособие для вузов. Москва: 2009. 293 с.
13. <http://radiolubitel.net>
14. <http://www.chipinfo.ru>
15. <http://www.radiolibrary.ru>
16. RNPO@Labstand.ru
17. <http://asest.com/412-parametry-tunnelnogo-dioda>
18. <http://www.texnic.ru/data/vd/vd0052.htm>
19. *Гребнев А.К., Гридин В.Н., Дмитриев В.П.* Оптоэлектронные элементы и устройства, издательство: Радио и связь, 1998 г., 336 с.
20. *Самохвалов М.К.* Элементы и устройства оптоэлектроники, учебное пособие. Ульяновск 2003 г., 126 с.
21. Интернет-ресурс :www.msd.com.ua
22. Интернет-ресурс :www.studopedia.org
23. Интернет-ресурс :www.helpikis.org
24. Интернет-ресурс :www.edu.dvgups.ru
25. Интернет-ресурс: www.pricl-electr.jimdo.com
26. Интернет-ресурс: www.interneturok.ru
27. Интернет-ресурс: www.specelec.ru
28. Интернет-ресурс: www.wikipedia.org

Составитель
Самат Алмазбекович Токтогонов

Учебно-методические указания
к лабораторным работам по Электронике
для студентов Кыргызского Российского Славянского университета
по направлению подготовки 690300 (11.03.02)
«Инфокоммуникационные технологии и системы связи»,
690100 «Электроника и наноэлектроника»

Редактор *Е.С. Свиридова*
Компьютерная верстка – *Г.Н. Кирпа*

Подписано в печать 6.05.2021.
Формат 60x84 ¹/₈
Офсетная печать. Объем 10,25 п.л.
Тираж 100 экз. Заказ 132

Отпечатано в типографии КРСУ
720048, г. Бишкек, ул. Анкара, 2а