

Донецк 2024

Рабочая программа дисциплины «Полупроводниковая и физическая электроника» для обучающихся по направлению подготовки 03.03.03 Радиофизика (Профиль: Радиофизика), составлена на основании Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования – бакалавриат по направлению подготовки 03.03.03 Радиофизика, утвержденного приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 7 августа 2020 г. № 912 (с изм. и доп.). Порядка организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам высшего образования – программам бакалавриата, программам специалитета, программам магистратуры, утвержденного приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 06 апреля 2021 г. № 245 (с изм. и доп.), в соответствии с учебным планом, утвержденным Ученым советом ФГБОУ ВО «ДонГУ» для набора 2024 года.

Разработчик:


Ст. преподаватель
кафедры радиофизики
и инфокоммуникационных технологий



В.В. Долбещенков

Рабочая программа утверждена на заседании кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий
Протокол от 26.03.2024 г. № 16

Заведующий кафедрой



В.В. Данилов

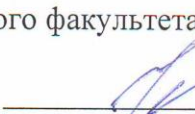
СОГЛАСОВАНО:

И.о. декана физико-технического факультета
28.03.2024 г.



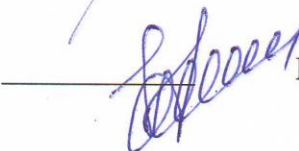
С.А. Фоменко

Учебно-методическая комиссия физико-технического факультета
Протокол от 27.03.2024 г. № 2
Председатель



В. Н. Котенко

Руководитель основной профессиональной образовательной программы
д-р тех. наук, проф.
26.03.2024 г.



В.В. Данилов

1. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

1.1. Требования к предварительной подготовке обучающихся, предшествующие и сопутствующие дисциплины, на которых основывается изучение данной дисциплины: Математический анализ, Электричество и магнетизм, Колебания и волны, оптика, Радиотехнические цепи и сигналы, Радиоэлектроника, Статистическая радиофизика, Квантовая радиофизика.

1.2. Дисциплины, курсовые работы и практики, для которых освоение данной дисциплины необходимо как предшествующее:

Электроника СВЧ, Функциональная электроника, Производственная практика: преддипломная практика.

2. ОПИСАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

2.1. Общая характеристика

Наименование показателя	Значение показателя
Название образовательной программы	03.03.03. Радиофизика (Профиль: Радиофизика)
Шифр и название в соответствии с учебным планом	Б1.Б.М2.7 Полупроводниковая и физическая электроника
Часть образовательной программы	Базовая часть
Количество зачетных единиц / всего часов	5 / 180

2.2. Распределение часов по периодам обучения

Форма обучения	курс	семестр	Общее количество часов					Форма контроля
			лекционных	лабораторных	практических	самостоятельной работы + контроль	всего	
Очная	4	7	68	34	0	78	180	экзамен

3. ЦЕЛИ ДИСЦИПЛИНЫ

Изучение физики полупроводников, а также физических основ работы полупроводниковых элементов и устройств, достаточное для понимания и анализа работы функциональных узлов радиоэлектронной аппаратуры, ознакомлении с физическими процессами, происходящими с заряженными частицами в твердых телах, с законами движения этих частиц под действием электрических и магнитных полей.

4. КОМПЕТЕНЦИИ ОБУЧАЮЩЕГОСЯ, ФОРМИРУЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ КОМПОНЕНТА ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ, ИХ ИНДИКАТОРЫ И ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

Компетенции	Индикаторы	Результаты обучения
ОПК-1. Способен применять базовые знания в области физики и радиофизики и использовать их в профессиональной деятельности, в	ОПК-1.1. Обладает базовыми знаниями в областях физики, радиофизики, электроники.	ОПК-1.1.1. Знает теоретические основы движения носителей зарядов в электрическом и магнитном полях. ОПК-1.1.2. Умеет применять знание физических законов при анализе процессов, происходящих в полупроводниковых приборах.

том числе в сфере педагогической деятельности.		ОПК-1.1.3. Имеет представление о физических процессах, лежащих в основе работы полупроводниковых активных и пассивных элементов электронной техники
--	--	---

5. ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Название темы	Краткое содержание темы (вопросы темы)
Раздел 1. Физические основы полупроводниковой электроники	
Введение.	Краткие сведения из истории развития электроники. Место дисциплины в профессиональной подготовке бакалавра радиофизики. Задачи дисциплины и связь ее с другими общепрофессиональными и специальными дисциплинами.
Сведения из физики твердого тела и физики полупроводников	Зонная структура полупроводников. Терминология и основные понятия. Статистика электронов и дырок в полупроводниках. Распределение квантовых состояний в зонах. Концентрация носителей заряда и положение уровня Ферми.
Собственные и примесные полупроводники.	Концентрация электронов и дырок в собственном полупроводнике. Концентрация электронов и дырок в примесном полупроводнике. Определение положения уровня Ферми. Проводимость полупроводников. Токи в полупроводниках. Неравновесные носители. Уравнение непрерывности.
Контакт металл – полупроводник.	Ток термоэлектронной эмиссии. Термодинамическая работа выхода в полупроводниках р- и n-типов. Эффект поля. Концентрация электронов и дырок в области пространственного заряда. Дебаевская длина экранирования. Барьер Шоттки. Зонная диаграмма барьера Шоттки при внешнем напряжении. Распределение электрического поля и потенциала в барьере Шоттки. Вольт-амперная характеристика барьера Шоттки.
Электронно–дырочный переход (р-n переход).	Электронно-дырочный р-n переход. Распределение свободных носителей в р-n переходе. Поле и потенциал в р-n переходе. Компоненты тока и квазиуровни Ферми в р-n переходе. Вольт-амперная характеристика р-n перехода.
Гетеропереходы.	Физические процессы в контактах полупроводников с различной шириной запрещенной зоны (гетеропереходы). Энергетическая диаграмма гетероперехода. Примеры применения гетеропереходов.

Физика поверхности и МДП-структуры.	Область пространственного заряда (ОПЗ) в равновесных условиях. Заряд в области пространственного заряда. Емкость области пространственного заряда. Влияние вырождения на характеристики ОПЗ полупроводника.
Вольт-фарадные характеристики структур МДП.	Устройство МДП-структур и их энергетическая диаграмма. Уравнение электронейтральности. Емкость МДП-структур. Экспериментальные методы измерения вольт-фарадных характеристик. Определение параметров МДП-структур на основе анализа C-V характеристик.
Раздел 2. Полупроводниковые приборы	
Полупроводниковые диоды.	Вольт – амперная характеристика (ВАХ) полупроводникового диода. Инжекция носителей. Тепловой и электрический пробой диода. Выпрямительные диоды. Стабилитроны. Физические причины инерционных процессов в реальных диодах. Импульсные диоды. Области применения полупроводниковых диодов.
Туннельные диоды.	Вырожденные и невырожденные полупроводники. Распределение Ферми-Дирака для вырожденных полупроводников. Принцип работы туннельного диода. Прямая и обратная ветви вольт-амперной характеристики диода. Параметры и характеристики туннельного диода. Применения туннельного диода.
Биполярные транзисторы.	Основные физические процессы в биполярных транзисторах. Биполярный транзистор в схеме с общей базой. Зонная диаграмма и токи. Формулы Молла – Эберса. Вольт-амперные характеристики биполярного транзистора в активном режиме в схеме с общей базой. Дифференциальные параметры биполярных транзисторов в схеме с общей базой. Биполярный транзистор в схеме с общим эмиттером. Эквивалентная схема биполярного транзистора. Эффект оттеснения тока эмиттера. Составные транзисторы. Дрейфовые транзисторы. Параметры транзистора как четырехполюсника. Связь h-параметров с физическими параметрами. Частотные и импульсные свойства транзисторов. Биполярные транзисторы с гетеропереходами.
Полевые транзисторы.	Типы и устройство полевых транзисторов. Принцип работы МДП-транзистора. Выбор знаков напряжений в МДП-транзисторе. Характеристики МДП-транзистора в области

	<p>плавного канала. Характеристики МДП-транзистора в области отсечки. Влияние типа канала на вольт-амперные характеристики МДП-транзисторов. Эффект смещения подложки. Малосигнальные параметры. Эквивалентная схема и быстродействие МДП-транзистора. Методы определения параметров МОП ПТ из характеристик. Топологические реализации МДП-транзисторов. МДП-транзистор как элемент памяти. Полевой транзистор с затвором в виде р-п перехода. СВЧ полевые транзисторы с барьером Шоттки.</p>
Тиристоры и однопереходные транзисторы.	<p>Вольт-амперная характеристика диодного. Феноменологическое описание ВАХ диодного тиристора. Зонная диаграмма и токи диодного тиристора в открытом состоянии. Двухтранзисторная модель тиристора. Тринистор. Симметричные тринисторы. Однопереходные транзисторы. Применения тиристоры и лднопереходных транзисторов.</p>
Лавинно-пролетные диоды.	<p>Устройство и зонная диаграмма. Малосигнальные характеристики. Использование ЛПД для генерации СВЧ-колебаний. Коммутационные рin-диоды.</p>
Диоды Ганна.	<p>Требования к зонной структуре полупроводников. Статическая ВАХ арсенида галлия. Зарядовые неустойчивости в приборах с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Генерация СВЧ-колебаний в диодах Ганна.</p>
Полупроводниковые светодиоды и лазеры.	<p>Оптические переходы. Излучательная рекомбинация. Методы инъекции. Светодиоды. Зонная диаграмма и конструкция полупроводникового лазера. Лазеры на гетероструктурах</p>
Фотоприемники.	<p>Статистические параметры фотодетекторов. Материалы для фотоприемников. Фоторезисторы. Фотодиоды на основе р-п перехода. Фототранзисторы. МДП-фотоприемники с неравновесным обеднением</p>
Квантовый эффект Холла.	<p>Зависимость ЭДС Холла от параметров инверсионного канала. Циклотронная частота. Спектр энергии двумерных электронов в поперечном магнитном поле. Число состояний для электронов на уровне Ландау. Плотность электронов в 2D электронном газе в сильном магнитном поле. Эффект Холла для 2D электронов в сильном магнитном поле.</p>
Раздел 3. Интегральная и вакуумная электроника	
Технологические основы микроэлектроники	<p>Подготовительные операции. Эпитаксия. Термическое окисление. Легирование.</p>

	Травление. Техника масок. Нанесение тонких пленок. Металлизация. Сборочные операции
Гибридные интегральные схемы (ИС).	Технология тонкопленочных гибридных ИС. Технология толстопленочных гибридных ИС. Элементы пленочных ИС. Конструкции резисторов, конденсаторов и индуктивностей в гибридных ИС.
Элементы полупроводниковых ИС.	Изоляция элементов. Транзисторы n-p-n. Разновидности n-p-n-транзисторов. Транзисторы p-n-p. Интегральные диоды. Полевой транзистор. МДП-транзисторы. Полупроводниковые резисторы. Полупроводниковые конденсаторы.
Вакуумные приборы	Общее понятие о вакуумных приборах. Особенности вакуумных приборов. Общее устройство и классификация вакуумных приборов. Работа выхода. Виды электронной эмиссии. Термоэлектронная эмиссия. Вторичная электронная эмиссия. Электровакуумные фотоэлектронные приборы.
Движение электронов в поле	Движение электронов в статическом электрическом поле. Движение электронов в статическом магнитном поле. Движение электронов в скрещенных электрическом и магнитном полях. Динамическое управление электронным потоком. Модуляция по скорости и по плотности.

6. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

6.1. Форма обучения – очная, курс – 4, семестр – 7

Наименования разделов и тем	Количество часов				
	Лекц.	Лабор.	Практ.	СРС	Всего
Раздел 1. Физические основы полупроводниковой электроники	26	10	0	26	62
Введение.	2	2		2	6
Сведения из физики твердого тела и физики полупроводников	4	4		4	12
Собственные и примесные полупроводники.	4	4		4	12
Контакт металл – полупроводник.	4			4	8
Электронно–дырочный переход (p-n переход).	4			4	8
Гетеропереходы.	2			2	4
Физика поверхности и МДП-структуры.	4			4	8
Вольт-фарадные характеристики структур МДП.	2			2	4
Раздел 2. Полупроводниковые приборы	24	24	0	34	82
Полупроводниковые диоды.	2	4		4	10
Туннельные диоды.	2	4		4	10

Биполярные транзисторы.	4	4		4	12
Полевые транзисторы.	4	4		4	12
Тиристоры и однопереходные транзисторы.	2			2	4
Лавинно-пролетные диоды.	2			2	4
Диоды Ганна.	2			2	4
Полупроводниковые светодиоды и лазеры.	2			4	6
Фотоприемники.	2	4		4	10
Квантовый эффект Холла.	2	4		4	10
Раздел 3. Интегральная и вакуумная электроника	18	0	0	18	36
Технологические основы микроэлектроники	4			4	8
Гибридные интегральные схемы (ИС).	2			2	4
Элементы полупроводниковых ИС.	4			4	8
Вакуумные приборы	4			4	8
Движение электронов в поле	4			4	8
ИТОГО ПО КОМПОНЕНТУ ОПОП	68	34	0	78	180

7. ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ (СРЕДСТВА) ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

7.1. Контрольные вопросы

Раздел 1

1. Зонная структура полупроводников
2. Статистика электронов и дырок в полупроводниках
3. Распределение квантовых состояний в зонах
4. Концентрация носителей заряда и положение уровня Ферми.
5. Концентрация электронов и дырок в собственном полупроводнике.
6. Концентрация электронов и дырок в примесном полупроводнике.
7. Определение положения уровня Ферми.
8. Проводимость полупроводников.
9. Токи в полупроводниках.
10. Неравновесные носители.
11. Уравнение непрерывности.
12. Ток термоэлектронной эмиссии.
13. Термодинамическая работа выхода в полупроводниках р- и n-типов.
14. Эффект поля.
15. Дебаевская длина экранирования.
16. Барьер Шоттки.
17. Зонная диаграмма барьера Шоттки при внешнем напряжении.
18. Распределение электрического поля и потенциала в барьере Шоттки.
19. Вольт-амперная характеристика барьера Шоттки.
20. Электронно-дырочный р-n переход.
21. Распределение свободных носителей в р-n переходе.
22. Поле и потенциал в р-n переходе.
23. Компоненты тока и квазиуровни Ферми в р-n переходе.
24. Вольт-амперная характеристика р-n перехода.
25. Гетеропереходы.
26. Вольт-фарадные характеристики структур МДП.
27. Устройство МДП-структур и их энергетическая диаграмма.

28. Емкость МДП-структур.

Раздел 2

29. Характеристики идеального диода на основе p-n перехода.
30. Выпрямление в диоде.
31. Эквивалентная схема диода.
32. Варикапы.
33. Влияние температуры на характеристики диодов.
34. Стабилитроны.
35. Туннельный пробой в полупроводниках.
36. Лавинный пробой в полупроводниках.
37. Туннельный и обращенный диоды.
38. Биполярный транзистор, его виды, режимы работы.
39. Объяснить следующие физические процессы: инжекция, диффузия, рекомбинация и экстракция. Как они связаны с биполярным транзистором?
40. Зонная диаграмма и схема биполярного транзистора в схеме с общей базой.
41. Дифференциальный коэффициент передачи тока эмиттера.
42. Коэффициент инжекции и коэффициент переноса в схеме с общей базой.
43. Коэффициент обратной связи в схеме с общей базой.
44. Параметры биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером.
45. Вольт-амперные характеристики биполярного транзистора.
46. Эквивалентная схема биполярного транзистора.
47. Составные транзисторы.
48. Дрейфовые транзисторы.
49. Система h-параметров транзистора как четырехполюсника.
50. Связь h-параметров с физическими параметрами транзистора.
51. Частотные и импульсные свойства транзисторов.
52. Типы и устройство полевых транзисторов.
53. Принцип работы МДП-транзистора.
54. Выбор знаков напряжений в МДП-транзисторе.
55. Влияние типа канала на вольт-амперные характеристики МДП-транзисторов.
56. Эквивалентная схема и быстродействие МДП-транзистора.
57. Что такое пороговое напряжение и напряжение отсечки МДП-транзистора?
58. Как распределяются заряды в МДП-транзисторе?
59. Влияние напряжения на подложке на характеристики МДП-транзистора.
60. МДП-транзистор как элемент памяти.
61. Назовите условия, необходимые для генерации когерентного излучения в полупроводниковых лазерах на основе p-n перехода.
62. В чем преимущество полупроводникового лазера с двойным гетеропереходом?
63. Светодиоды.
64. Зонная диаграмма и конструкция полупроводникового лазера.
65. Фоторезисторы.
66. Фотодиоды.
67. Фототранзисторы.

Раздел 3

68. Основные технологические операции при изготовлении ИМ.
69. Способы окисления кремния. В чем их различие?
70. В чем отличие термической диффузии из ограниченного и неограниченного источника?
71. Метод ионной имплантации.
72. Литография. Назначение, особенности, ограничения.

73. Методы нанесения тонких пленок. Их отличия.
74. Методы изоляции при изготовлении ИС, их достоинства и недостатки.
75. Варианты диодного включения биполярного транзистора.
76. Тонкопленочные и толстопленочные гибридные ИС Изготовление элементов гибридных ИС.
77. Работа выхода. Методы уменьшения работы выхода.
78. Виды электронной эмиссии. Фотоэлектронная эмиссия и ее законы.
79. Вторичная электронная эмиссия.
80. Законы движения электронов в скрещенных электрическом и магнитном полях.
81. Наведенный и конвекционный ток. Связь наведенного и конвекционного токов.
82. Принципы электростатической фокусировки электронного потока.
83. Электровакуумные фотоэлектронные приборы. Фотоэлектронный умножитель.

7.2. Образец содержания экзаменационного билета (при наличии экзамена по дисциплине)

Донецкий государственный университет	
Физико-технического факультета	
Кафедра радиофизики и инфокоммуникационных технологий	
Программа высшего образования	Программа бакалавриата
Направление подготовки	03.03.03 Радиофизика
Профиль подготовки	Радиофизика
Форма обучения	Очная
Семестр	Седьмой
Дисциплина	Полупроводниковая и физическая электроника

Экзаменационный билет № 1

1. Распределение свободных носителей в p-n переходе.
2. Связь h-параметров с физическими параметрами транзистора.
3. Виды электронной эмиссии. Фотоэлектронная эмиссия и ее законы.

Утверждено на заседании кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий, протокол № 14 от 21.02.2024 г.

Заведующий кафедрой

В.В. Данилов

Экзаменатор

В.В. Долбещенков

В случае ведения учебного процесса с использованием электронного обучения и дистанционных образовательных технологий, содержание билета может отличаться от приведенного.

8. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ БАЛЛОВ, КОТОРЫЕ ПОЛУЧАЮТ ОБУЧАЮЩИЕСЯ

Общая оценка знаний обучающихся по дисциплине проводится по 100-балльной шкале исходя из максимума, приведенного в таблице ниже. Организационно-учебная работа в аудитории оценивается на основе таких критериев как посещаемость занятий, активность во время проведения лекционных и практических занятий (участие в обсуждении текущего и пройденного материала, решение задач и т.п.).

8.1. Семестр 7

Номера разделов	Виды работ	Максимальное количество баллов
1-3	Организационно-учебная работа в аудитории	5
	Самостоятельная работа	10
	Лабораторные работы	35
ИТОГО		50
Экзамен		50
Общий итог за семестр		100

Соответствие баллов оценке

Количество баллов из 100	ECTS	Оценка по пятибалльной шкале	
		Экзамен, дифференцированный зачет	Зачет
90-100	A	отлично	зачтено
80-89	B	хорошо	зачтено
75-79	C		зачтено
70-74	D	удовлетворительно	зачтено
60-69	E		зачтено
35-59	FX	неудовлетворительно	не зачтено
0-34	F		не зачтено

9. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА

Учебные занятия проводятся в 4-м корпусе ДонГУ (г. Донецк, пр. Театральный, 13). Для проведения лекционных и практических занятий требуется аудитория, оборудованная меловой или маркерной доской, мультимедийный проектор и экран, ноутбук, комплект учебной мебели для студентов, рабочее место преподавателя, выход в Интернет – проводной или с использованием Wi-Fi. Для проведения лабораторных занятий требуется учебная лаборатория, укомплектованная необходимым оборудованием.

Для самостоятельной работы используются текстовые и электронные ресурсы Научной библиотеки университета и других электронных библиотечных баз данных.

При изучении дисциплины могут применяться электронное обучение и дистанционные образовательные технологии.

При использовании дистанционного образования осуществляется текущий контроль знаний обучающихся на основе тестирования и проверки результатов самостоятельной работы.

10. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

10.1. Основная литература

1. Гуртов, В. А. Твердотельная электроника: учебное пособие / В. Гуртов. - 2-е изд. - М.: Техносфера, 2005. - 406 с.

2. Степаненко, И. П. Основы микроэлектроники: Учеб. пособие для вузов / И.П. Степаненко; Техн. ун-т. - 2-е изд. - М. : Лаб. Баз. Знаний; СПб. : Невский диалект, 2001. - 488 с.

10.2. Дополнительная литература

1. Петров, К. С. Радиоматериалы, радиокомпоненты и электроника: [Учеб. пособие для студентов вузов по направлению 654200 "Радиотехника"] / К. С. Петров. - СПб. и др. : Питер, 2003. - 511 с. (2004. - 521 с.)

2. Епифанов, Г. И. Физические основы микроэлектроники: [учеб. пособие для вузов, по специальности "Конструирование и производство радиоаппаратуры"] / Г. И. Епифанов. - Москва: Сов. радио, 1971. - 375 с.
3. Росадо, Л. Физическая электроника и микроэлектроника / Л. Росадо ; пер. с исп. С. И. Баскакова ; под ред. В. А. Терехова. - Москва: Высш. шк., 1991. - 350, [1] с.
4. Электронные, квантовые приборы и микроэлектроника: Учеб. пособие для студентов вузов, обучающ. по специальности "Радио, радиовещание и телевидение" и др. / Ю. Л. Бобровский, С. А. Корнилов, И. А. Кратиров и др.; под ред. Н. Д. Федорова. - М.: Радио и связь, 2002. - 560 с.

11. ИНФОРМАЦИОННЫЕ РЕСУРСЫ

1. **Электронно-библиотечная система ДонГУ**: сайт / ФГБОУ ВО «ДонГУ». – Донецк, 2016- . – URL: <http://library.donnu.ru/> (дата обращения: 01.09.2023). – Режим доступа: свободный. – Текст: электронный.
2. **Электронный каталог** Научной библиотеки ДонГУ: раздел сайта / НБ ДонГУ. – Текст: электронный // ЭБС ДонГУ: сайт. – URL: <http://library.donnu.ru/catalog/> (дата обращения: 01.09.2023). – Режим доступа: поиск свободный, электронные документы – для пользователей ДонГУ.
3. **Электронный архив ДонГУ**: раздел сайта / НБ ДонГУ. – Текст: электронный // ЭБС ДонГУ: сайт. – URL: <http://repo.donnu.ru/> (дата обращения: 01.09.2023). – Режим доступа: свободный.

12. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

1. Windows 7 PRO (корпоративная лицензия ДонГУ № 46484614)
2. Microsoft Office (корпоративная лицензия ДонГУ № 46472919)
3. Microsoft Visual Studio (лицензия программы Dream Spark для высших учебных заведений)
4. Антивирус Касперского, Adobe Acrobat Reader, xPDF (лицензии GPL, Apache, BSD для свободного программного обеспечения).