

УДК 621.382  
ББК 32.852  
Д92

А

**Дьяконов, Владимир Павлович.**  
Д92 Сверхскоростная твердотельная электроника. Т. 1 : Приборы общего назначения / В. П. Дьяконов. — 2-е изд., эл. — 1 файл pdf : 601 с. — Москва : ДМК Пресс, 2023. — Систем. требования: Adobe Reader XI либо Adobe Digital Editions 4.5 ; экран 10". — Текст : электронный.

ISBN 978-5-89818-390-5

В первом томе описана элементная база твердотельных электронных устройств общего назначения нано- и пикосекундного диапазона времен — от туннельных и диодов с накоплением заряда, биполярных, полевых и лавинных транзисторов до новых S-диодов, лавинных обострителей, дрейфовых диодов с резким восстановлением, SOS-диодов и интегральных микросхем. Особое внимание уделено измерительным приборам для их исследования: широкодиапазонным генераторам синусоидальных, импульсных и произвольных сигналов, скоростным аналоговым, цифровым и стробоскопическим электронным осциллографам, а также их аксессуарам и опциям. Детально описаны характеристики новейших приборов ведущих фирм мира.

Для широкого круга читателей — инженеров, научных работников, студентов, аспирантов и преподавателей университетов и вузов физического и технического профилей.

УДК 621.382  
ББК 32.852

**Электронное издание на основе печатного издания:** Сверхскоростная твердотельная электроника. Т. 1 : Приборы общего назначения / В. П. Дьяконов. — Москва : ДМК Пресс, 2013. — 600 с. — ISBN 978-5-94074-915-8. — Текст : непосредственный.

Все права защищены. Любая часть этой книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами без письменного разрешения владельцев авторских прав.

Материал, изложенный в данной книге, многократно проверен. Но поскольку вероятность технических ошибок все равно существует, издательство не может гарантировать абсолютную точность и правильность приводимых сведений. В связи с этим издательство не несет ответственности за возможные ошибки, связанные с использованием книги.

В соответствии со ст. 1299 и 1301 ГК РФ при устранении ограничений, установленных техническими средствами защиты авторских прав, правообладатель вправе требовать от нарушителя возмещения убытков или выплаты компенсации.

ISBN 978-5-89818-390-5

© Дьяконов В. П., 2013  
© Оформление, ДМК Пресс, 2013

А



Предисловие .....	14
Благодарности и адреса для переписки.....	22

## ▼ Глава 1

Генерация ВЧ- и СВЧ-синусоидальных и модулированных сигналов .....	23
1.1. Критерии скорости протекания процессов.....	23
1.2. Синусоидальные и близкие к ним сигналы и их свойства .....	25
1.2.1. Колебательные системы, создающие синусоидальные колебания.....	25
1.2.2. Математическое представление синусоидальных сигналов.....	25
1.2.3. Стационарные и модулированные синусоидальные сигналы.....	27
1.2.4. Мощность синусоидальных сигналов.....	28
1.2.5. Параметры переменных напряжений и токов .....	29
1.2.6. Колебания в нелинейных системах .....	30
1.2.7. Типы источников синусоидальных сигналов.....	32
1.3. Основы построения высокочастотных генераторов синусоидальных сигналов .....	33
1.3.1. Обобщенная схема генератора с обратной связью .....	33
1.3.2. Стабилизация амплитуды у генераторов синусоидальных сигналов .....	34
1.3.3. Методы и виды модуляции синусоидальных сигналов .....	35
1.4. Основные типы генераторов высокочастотных синусоидальных сигналов .....	37
1.4.1. RC-генераторы.....	37

1.4.2. LC-генераторы синусоидального напряжения и их математическое моделирование .....	38
1.4.3. Некоторые практические схемы транзисторных LC-генераторов .....	40
1.4.4. LC-генераторы на негатронах.....	43
1.4.5. LC-генераторы синусоидальных сигналов на интегральных микросхемах .....	45
1.4.6. Кварцевые резонаторы и генераторы .....	45
1.4.7. Пути улучшения параметров генераторов синусоидальных сигналов .....	51
1.4.8. Генераторы на основе синтезаторов частоты.....	54
1.5. Серийные аналоговые ВЧ-генераторы синусоидальных сигналов .....	56
1.5.1. Измерительные аналоговые генераторы ВЧ-синусоидальных сигналов.....	56
1.5.2. Измерительные аналоговые генераторы СВЧ-синусоидальных сигналов .....	60
1.5.3. Измерительные СВЧ-генераторы с цифровым синтезатором .....	61
1.5.4. Аналоговые генераторы фирмы Agilent Technologies .....	62
1.5.5. Генераторы синусоидальных сигналов фирмы RONDE&SCHWARE.....	67
1.6. Генераторы с прямым цифровым синтезом сигналов .....	72
1.6.1. Функциональные схемы генераторов сигналов с прямым цифровым синтезом сигналов .....	72
1.6.2. Шум синтезированного сигнала .....	74
1.7. Серийные генераторы с прямым цифровым синтезом сигналов .....	77
1.7.1. Простые генераторы с прямым цифровым синтезом.....	77
1.7.2. Обзор генераторов сигналов фирмы Tektronix.....	78
1.7.3. Генераторы сигналов произвольной формы Tektronix AFG 3000 .....	79
1.7.4. Создание сигнала с кодоимпульсной модуляцией.....	86
1.7.5. Монолитные микросхемы для кодоимпульсной модуляции/демодуляции.....	91
1.8. Векторные генераторы синусоидальных сигналов .....	94
1.8.1. Векторные генераторы фирмы R&S .....	94

1.8.2. Векторные генераторы фирмы Keithley .....	96
1.9. Новое поколение микросхем СВЧ-генераторов синусоидального сигнала компании Hittite .....	99
1.9.1. Микросхемы управляемых напряжением генераторов (VCO) с встроенным делителем частоты .....	99
1.9.2. Микросхемы VCO со встроенным буфером .....	102
1.9.3. Микросхемы VCO с двумя радиочастотными выходами.....	104
1.9.4. Широкополосные (Wideband) VCO .....	105
1.9.5. Монолитная микросхема генератора типа PLO .....	107
1.10. Монолитные микросхемы синтезаторов частоты компании Hittite.....	109
1.10.1. Монолитные микросхемы синтезаторов без VCO .....	109
1.10.2. Монолитные микросхемы PLL СВЧ-синтезаторов.....	116
1.10.3. Трехдиапазонные монолитные микросхемы синтезаторов .....	119
1.10.4. Широкодиапазонные монолитные микросхемы синтезаторов .....	121
1.10.5. Микросхемы HMC983/HMC983 для построения сверхширокополосных синтезаторов.....	124
1.10.6. Монолитные микросхемы широкодиапазонных синтезаторов HMC701/702/703 .....	128
1.10.7. Программное обеспечение монолитных микросхем синтезаторов .....	132

## ▼ Глава 2

Генераторы импульсов и сложных сигналов.....	135
2.1. Параметры и свойства импульсных сигналов .....	135
2.1.1. Типы импульсных сигналов .....	135
2.1.2. Параметры импульсных сигналов .....	136
2.1.3. Спектр импульсных сигналов .....	138
2.2. Основные методы и устройства генерации импульсных сигналов .....	142
2.2.1. Основные методы генерации импульсных сигналов.....	142
2.2.2. Импульсные схемы на биполярных и полевых транзисторах .....	143

2.2.3. Генераторы импульсов на интегральных микросхемах общего применения .....	144
2.3. Импульсные генераторы на интегральном таймере .....	144
2.3.1. Наследники классики – таймера 555 .....	145
2.3.2. Автоколебательный и ждущий релаксаторы на интегральном таймере.....	149
2.3.3. Типовые импульсные схемы на интегральных таймерах класса 555 .....	152
2.3.4. Характеристики прецизионных интегральных таймеров .....	157
2.3.5. Сдвоенные интегральные таймеры класса 556 .....	158
2.3.6. Одиночные интегральные таймеры на CMOS-транзисторах ....	159
2.3.7. Новейшие LinCMOS-таймеры TLC551 и TLC555 .....	160
2.4. Импульсные устройства на негатронах .....	164
2.4.1. Общая оценка .....	164
2.4.2. Импульсные устройства на однопереходных транзисторах ....	165
2.4.3. Появление лавинных транзисторов.....	168
2.4.4. Лавинно-инжекционные транзисторы .....	171
2.4.5. «Аномально быстрое» включение лавинного транзистора .....	175
2.4.6. Лавинные транзисторы с ограниченной областью объемного заряда (АТОООЗ).....	181
2.4.7. Моделирование релаксационных генераторов на лавинных транзисторах.....	183
2.4.8. Серийные лавинные транзисторы и их применение .....	184
2.4.9. Интегральное исполнение схем на лавинных транзисторах .....	186
2.5. Измерительные генераторы импульсов .....	187
2.5.1. Функциональная схема аналогового импульсного генератора .....	187
2.5.2. Серийные генераторы прямоугольных импульсов .....	188
2.6. Функциональные генераторы .....	195
2.6.1. Основные типы функциональных генераторов.....	195
2.6.2. Аналоговые функциональные генераторы .....	196
2.6.3. Функциональные генераторы, управляемые напряжением или током .....	198
2.6.4. Формирователи синусоидального сигнала из треугольного .....	201

2.6.5. Микросхемы аналоговых функциональных генераторов .....	202
2.6.6. Серийные аналоговые функциональные генераторы .....	208
2.7. Цифровые функциональные генераторы .....	216
2.7.1. Принципы построения функциональных генераторов с цифровым синтезом выходных сигналов .....	216
2.7.2. Простые цифровые функциональные генераторы .....	218
2.8. Цифровые генераторы сигналов произвольной формы .....	220
2.8.1. Назначение и особенности генераторов сигналов произвольной формы .....	220
2.8.2. Генераторы сигналов произвольной формы .....	221
2.9. Многофункциональные генераторы произвольных сигналов серии Tektronix AFG3000 .....	227
2.9.1. Органы управления генератора AFG3000 .....	227
2.9.2. Технические характеристики генераторов AFG3000 .....	229
2.9.3. Работа с генератором AFG3000 .....	229
2.9.4. Основные возможности генераторов AFG3101 .....	232
2.10. Генераторы серии DG5000 фирмы RIGOL .....	237
2.10.1. Основные возможности генераторов DG5000 .....	237
2.10.2. Возможности генерации сигналов с кодоимпульсной модуляцией .....	240
2.10.3. DG5000 в роли генератора качающейся частоты .....	242
2.11. Генераторы сигналов произвольной формы класса AWG .....	243
2.11.1. Сравнение генераторов класса AFG и AWG .....	243
2.11.2. Генераторы серии AWG7000 .....	244
2.11.3. Генераторы серии AWG5000 .....	246
2.12. Генераторы сигналов сложной формы (паттернов) .....	248
2.12.1. Функциональная схема генератора паттернов .....	248
2.12.2. Генераторы цифровых сигналов фирмы Tektronix .....	249
2.12.3. Генератор импульсов/паттернов серии 3400 фирмы Keithley .....	252

## ▼ Глава 3

Методы генерации и генераторы субнано- и пикосекундных импульсов .....	253
3.1. Методы генерации перепадов и импульсов сверхмалой длительности .....	253

3.1.1. Основные методы генерации импульсов сверхмалой длительности.....	253
3.1.2. Релаксаторы на водородных тиратронах и крайтронах .....	258
3.1.3. Генераторы коротких импульсов с разрядом формирующего двухполюсника или линии .....	260
3.1.4. Формирование субнаносекундных перепадов нелинейными линиями передачи с ударными волнами .....	263
3.1.5. Генераторы коротких импульсов на основе применения ударных волн в линиях передачи .....	265
3.2. Формирователи импульсов субнаносекундной длительности .....	268
3.2.1. Диодные и другие ограничители .....	268
3.2.2. Особенности сверхскоростных интегральных усилителей.....	269
3.2.3. Характеристики скоростных интегральных усилителей .....	270
3.2.4. Высокоскоростные интегральные компараторы .....	278
3.2.5. Сверхскоростные пикосекундные микросхемы корпорации Hittite Microwave .....	280
3.3. Регенеративные формирователи импульсов на туннельных диодах.....	285
3.3.1. Основная схема на туннельном диоде (ТД) .....	285
3.3.2. Моделирование генератора синусоидального сигнала на ТД.....	286
3.3.3. Моделирование ждущего релаксационного генератора на ТД.....	289
3.3.4. Моделирование триггера на ТД с отдельным запуском.....	289
3.3.5. Пример применения ТД для получения перепадов с длительностью 50 пс.....	292
3.4. Формирователи коротких перепадов и импульсов на диодах с накоплением заряда .....	296
3.4.1. Физика работы диода при переключении.....	296
3.4.2. Обостритель переднего фронта импульсов на ДНЗ.....	298
3.4.3. Генератор с формирователем прямоугольных импульсов на ДНЗ.....	299
3.5. Генераторы коротких перепадов и импульсов на лавинных транзисторах.....	301
3.5.1. Генераторы импульсов с субнаносекундными фронтами на лавинных транзисторах.....	301

3.5.2. Генератор прямоугольных импульсов с $t_{\phi} \approx 0,1$ нс .....	306
3.5.3. Генератор импульсов тока с амплитудой 25 А и длительностью 1,5 нс .....	308
3.5.4. Генераторы прямоугольных импульсов с разрядной линией .....	310
3.6. Генераторы коротких перепадов и импульсов на лавинных и полевых транзисторах .....	316
3.6.1. Формирователи коротких импульсов на лавинных и мощных СВЧ-биполярных транзисторах .....	316
3.6.2. Формирователи импульсов на двухполюснике с лавинным и мощным СВЧ МДП-транзисторами .....	320
3.6.3. Формирователи импульсов с запуском мощного СВЧ GaAs полевого транзистора от лавинного .....	323
3.6.4. Высокочастотный генератор импульсов .....	328
3.6.5. Генераторы импульсов на GaAs полевом транзисторе с запуском от GaAs-микросхемы .....	329
3.7. Генераторы коротких импульсов на новых полупроводниковых приборах .....	331
3.7.1. Генераторы коротких импульсов на лавинных S-диодах .....	331
3.7.2. Генераторы сверхкоротких импульсов на дрейфовых диодах и транзисторах с резким восстановлением .....	334
3.7.3. Генераторы импульсов на фотонно-инжекционных импульсных коммутаторах .....	337
3.8. Серийные генераторы импульсов с субнаносекундными фронтами .....	339
3.8.1. Генераторы импульсов – калибраторы осциллографов .....	339
3.8.2. Генераторы пикосекундных импульсов серии 4000 фирмы Picosecond Pulse Lab .....	342
3.8.3. Генераторы импульсов серии GFT .....	347
3.8.4. Генераторы сверхкоротких импульсов серий PF и PG .....	347
3.8.5. Высоковольтные импульсные модули HVS фирмы ALPHALAS .....	352
3.8.6. Нано- и субнаносекундная техника фирмы AVTECH .....	353
3.8.7. Генераторы импульсов для управления высоковольтными ячейками Поккельса .....	356
3.8.8. Оптико-электронные компоненты фирмы Leyshop .....	359



## ▼ Глава 4

Методы и приборы аналоговой электронной осциллографии.....	361
4.1. Электронно-лучевые трубки (ЭЛТ) .....	361
4.1.1. Устройство осциллографической электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) .....	361
4.1.2. Графическая скорость луча в ЭЛТ .....	364
4.1.3. Время установления отклоняющей системы.....	365
4.1.4. Отклоняющие системы осциллографических ЭЛТ .....	366
4.1.5. Осциллографические трубки специального назначения .....	369
4.2. Принцип действия и устройство аналогового осциллографа.....	372
4.2.1. Основные типы электронных осциллографов .....	372
4.2.2. Принцип действия аналогового осциллографа .....	372
4.2.3. Структурная схема аналогового осциллографа .....	373
4.2.4. Требования к усилителям осциллографа .....	376
4.2.5. Принципы построения генераторов развертки .....	383
4.2.6. Прочие узлы аналогового осциллографа .....	387
4.3. Аналоговые осциллографы.....	388
4.3.1. Сверхскоростные осциллографы без усилителей.....	388
4.3.2. Массовые советские транзисторные осциллографы 60-х годов.....	389
4.3.3. Современные аналоговые сервисные осциллографы.....	391
4.3.4. Отечественные универсальные аналоговые осциллографы .....	393
4.3.5. Зарубежные аналоговые универсальные осциллографы .....	397
4.3.6. Скоростные аналоговые осциллографы.....	400
4.3.7. Скоростные осциллографы АТТАКОМ-IWATSU .....	406
4.4. Работа с аналоговым осциллографом .....	411
4.4.1. Подготовка осциллографа к работе .....	411
4.4.2. Выбор режимов работы усилителей канала Y.....	413
4.4.3. Калибровка чувствительности .....	414
4.4.4. Учет влияния входной цепи осциллографа .....	416
4.4.5. Применение пробников в виде компенсированных делителей напряжения.....	418
4.4.6. Установка точной компенсации делителя.....	421

4.4.7. Работа с разверткой и ее синхронизация .....	423
4.5. Основные осциллографические измерения сигналов.....	425
4.5.1. Измерение амплитуды и уровней сигнала.....	425
4.5.2. Измерение сдвига фазы сигналов по их временному сдвигу .....	428
4.5.3. Измерение фазового сдвига с помощью фигур Лиссажу.....	429
4.5.4. Сравнение частот с помощью фигур Лиссажу.....	430
4.5.5. Осциллограф в роли характериографа .....	431
4.5.6. Курсорные измерения .....	433
4.6. Наблюдение высокоскоростных процессов аналоговыми осциллографами.....	435
4.6.1. Проверка переходной характеристики осциллографа .....	435
4.6.2. Проверка частотной характеристики осциллографа.....	437
4.6.3. Подключение осциллографа к источникам сигналов .....	438
4.6.4. Влияние провода заземления пробника .....	443
4.6.5. Время нарастания системы пробник–осциллограф .....	445
4.6.6. Применение активных пробников .....	447
4.6.7. Осциллографирование высоковольтных сигналов.....	449
4.6.8. Измерение токовых сигналов.....	451
4.6.9. Измерения в режиме согласования линий передачи сигнала .....	453

## ▼ Глава 5

Скоростные цифровые и стробоскопические осциллографы .....	456
5.1. Цифровое представление аналоговой информации.....	456
5.1.1. О выборе числа отсчетов и восстановлении сигналов.....	456
5.1.2. Дискретизация сигнала – равномерная и неравномерная.....	458
5.1.3. Функциональные схемы цифровых осциллографов .....	461
5.1.4. Достоинства и недостатки цифровых запоминающих осциллографов.....	464
5.1.5. Специальные параметры цифровых осциллографов.....	467
5.1.6. Об интерполяции в цифровых осциллографах.....	469
5.1.7. Имитация аналогового послесвечения (технология цифрового фосфора) .....	470

5.1.8. Автоматические измерения .....	475
5.2. Цифровые осциллографы в роли анализаторов спектра .....	478
5.2.1. Дискретный спектральный анализ.....	478
5.2.2. Оконное быстрое преобразование Фурье и типы окон .....	479
5.2.3. Реализация спектрального анализа на цифровых осциллографах .....	481
5.3. Принципы построения стробоскопических осциллографов.....	486
5.3.1. Принцип действия стробоскопического осциллографа.....	486
5.3.2. Генераторы стробирующих импульсов .....	488
5.3.3. Устройства выборки сигналов .....	489
5.4. Серийные цифровые осциллографы .....	491
5.4.1. Проблема выбора аналого-цифровых преобразователей .....	491
5.4.2. Цифровые осциллографы с полосой частот до 1 ГГц .....	495
5.4.3. ЦЗО фирмы Tektronix с закрытой архитектурой .....	502
5.4.4. ЦЗО фирмы Tektronix на базе открытой платформы ПК .....	513
5.4.5. ЦЗО фирмы LeCroy .....	522
5.4.6. Цифровые осциллографы фирмы Agilent Technologies.....	530
5.5. Осциллографы смешанных сигналов.....	540
5.5.1. Назначение осциллографов смешанных сигналов .....	540
5.5.2. Осциллографы смешанных сигналов фирмы Agilent Technologies.....	540
5.5.3. Осциллографы смешанных сигналов серии MSO4000 фирмы Tektronix.....	541
5.5.4. Осциллографы смешанных сигналов фирмы RIGOL .....	544
5.5.5. Применение осциллографа WavePro фирмы LeCroy с опцией логического анализатора .....	548
5.6. Стробоскопические осциллографы .....	550
5.6.1. Отечественные стробоскопические осциллографы.....	550
5.6.2. Стробоскопический осциллограф – приставка к ПК С1-24.....	551
5.6.3. Стробоскопический осциллограф TDS8000B фирмы Tektronix.....	555
5.6.4. Стробоскопический осциллограф 86100C DCA-J фирмы Agilent.....	556
5.6.5. Стробоскопические осциллографы серии Wave Expert с полосой до 100 ГГц.....	557

5.7. Особенности работы со скоростными цифровыми осциллографами .....	561
5.7.1. Пробники с коррекцией частотной характеристики .....	561
5.7.2. Эволюция конструкции осциллографических пробников .....	564
5.7.3. Пробники с оптической развязкой .....	566
5.7.4. Токовые пробники для цифровых осциллографов.....	567
5.7.5. Выбор входного сопротивления у осциллографов .....	569
5.7.6. Назначение современных активных пробников .....	572
5.7.7. Широкополосные активные пробники .....	574
5.7.8. Дифференциальные пробники для ЦЗО .....	576
5.7.9. Конфигурация измерительной головки пробников .....	578
5.7.10. Пробники для анализаторов сигналов.....	580
 Литература.....	 583