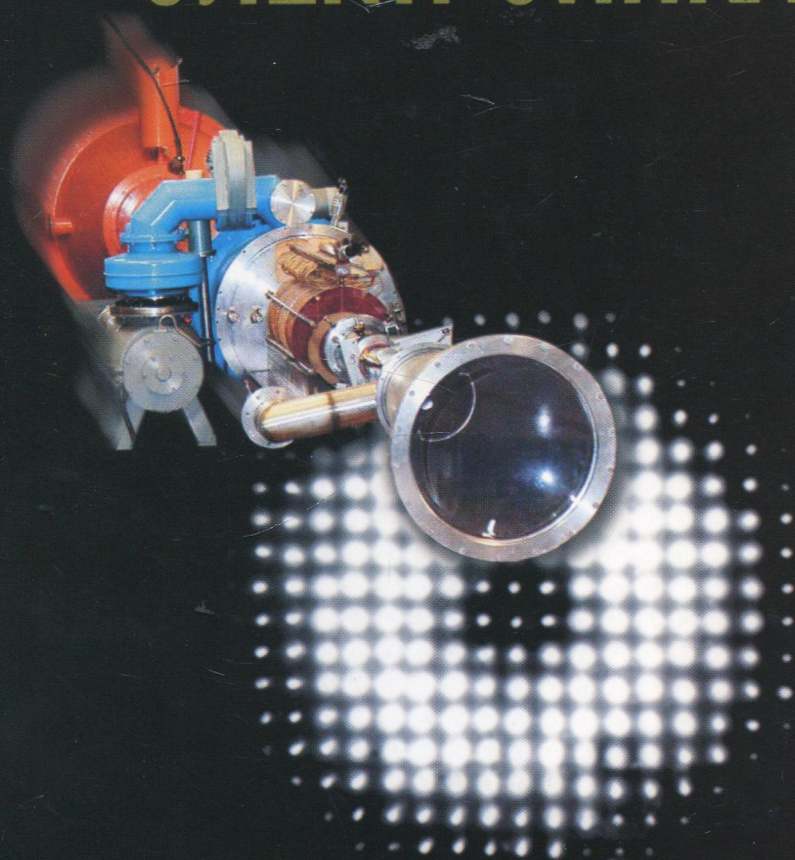


Г. А. Месяц

ИМПУЛЬСНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОНИКА



Г.А. Месяц

**ИМПУЛЬСНАЯ
ЭНЕРГЕТИКА
И
ЭЛЕКТРОНИКА**



МОСКВА НАУКА 2004

УДК 621.37
ББК 31.264.5
М53

Месяц Г.А.

Импульсная энергетика и электроника / Г.А. Месяц. – М.: Наука, 2004. – 704 с.

ISBN 5-02-033049-3

Книга посвящена генерированию мощных наносекундных импульсов. Рассмотрены краткая теория электрических цепей; физика разрядов в вакууме, газах и жидкостях. Описаны мощные замыкающие и размыкающие плазменные, полупроводниковые и магнитные коммутаторы; методы генерирования и преобразования импульсов; методы получения пучков электронов и ионов, а также импульсов рентгеновского, лазерного, СВЧ и сверхширокополосного излучения.

Для изучающих физику плазмы и разрядов, электрофизику, радиофизику, электротехнику, технику высоких напряжений, силовую электронику и т.д.

По сети АК

Mesyats G.A.

Pulsed Power and Electronics / G.A. Mesyats. – Moscow: Nauka, 2004. – 704 p.

ISBN 5-02-033049-3

This book is devoted to the generation of nanosecond high-power pulses. A concise theory of electric circuits and the physics of electrical discharges in vacuum, gases, and liquids are considered. A description is given to closing and opening plasma, semiconductor, and magnetic switches; methods of pulse generation and transformation, and methods of production of electron and ion beams as well as pulsed x rays, laser beams, microwaves, and ultrawideband radiation.

The book may be of use to those who studies plasma and discharge physics, electrophysics, radiophysics, electrical engineering, high voltage technology, high current electronics, and the like.

Научное издание

Месяц Геннадий Андреевич

ИМПУЛЬСНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

*Утверждено к печати Ученым советом Центра естественно-научных исследований
института общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук*

Зав. редакцией *Н.А. Степанова*. Редактор *В.Д. Новиков*. Художник *Ю.И. Духовская*
Художественный редактор *В.Ю. Яковлев*

Компьютерный набор и верстка произведены в Институте электрофизики УрО РАН

Подписано к печати 01.04.2004. Формат 70×100¹/₁₆. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.
Усл.печ.л. 57,2. Усл.кр.-отг. 57,2. Уч.-изд.л. 59,2. Тираж 950 экз. (РФФИ – 500 экз.). Тип. Заказ 9919

Издательство «Наука». 117997, Москва, Профсоюзная ул., 90

E-mail: secret@naukaran.ru Internet: www.naukaran.ru

ППП «Типография «Наука». 121099, Москва, Шубинский пер., 6

ISBN 5-02-033049-3

© Российская академия наук, 2004

© Издательство «Наука»

(художественное оформление), 2004

Содержание

Предисловие	13
Основные обозначения	18
Список сокращений.....	20

Часть I ОСНОВЫ ИМПУЛЬСНОЙ ТЕХНИКИ

Глава 1 ВОПРОСЫ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ.....	23
§ 1.1 Основные законы электрических цепей	23
§ 1.2 Анализ Фурье.....	25
§ 1.3 Метод интеграла Дюамеля.....	28
§ 1.4 Метод преобразования Лапласа	29
Литература к главе 1	31
Глава 2 ДЛИННЫЕ ЛИНИИ.....	32
§ 2.1 Введение.....	32
§ 2.2 Анализ волновых процессов в линии.....	34
§ 2.3 Неоднородные линии	37
§ 2.4 Спиральные линии.....	40
§ 2.5 Искусственные линии	42
Литература к главе 2	43
Глава 3 ИМПУЛЬСНЫЕ УСТРОЙСТВА С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ.....	44
§ 3.1 Основные схемы генерирования импульсов	44
§ 3.2 Умножение и трансформация напряжения	46
Литература к главе 3	51

Глава 4	ГЕНЕРИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДЛИННЫХ ЛИНИЙ	52
§ 4.1	Генерирование наносекундных импульсов	52
§ 4.2	Умножение напряжения в генераторах с линиями	57
§ 4.3	Импульсные устройства со ступенчатой и неоднородной линиями	60
	Литература к главе 4	62

Часть II ФИЗИКА ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ

Глава 5	РАЗРЯД В ВАКУУМЕ	63
§ 5.1	Общие сведения	63
§ 5.2	Вакуумный пробой	64
5.2.1	Поверхность электродов	64
5.2.2	Критерии вакуумного пробоя	66
5.2.3	Инициирование вакуумного пробоя плазмой	68
§ 5.3	Электрический взрыв металла	70
§ 5.4	Эктон и его природа	75
§ 5.5	Искра в вакууме	78
§ 5.6	Разряд по поверхности диэлектрика в вакууме	86
5.6.1	Процессы в катодной области	86
5.6.2	Кинетика развития импульсного разряда	90
	Литература к главе 5	94
Глава 6	ИМПУЛЬСНЫЙ РАЗРЯД В ГАЗЕ	95
§ 6.1	Элементарные процессы в плазме газового разряда	95
6.1.1	Дрейф, диффузия и энергия электронов и ионов в плазме	95
6.1.2	Ионизация и возбуждение	98
6.1.3	Гибель и освобождение электронов	100
§ 6.2	Общие сведения о разрядах в газе	102
§ 6.3	Типы разрядов	107
6.3.1	Таунсендовский разряд. Закон Пашена	107
6.3.2	Стримерный разряд	110
6.3.3	Многолавиновый импульсный разряд	112
6.3.4	Одноэлектронное инициирование	116
6.3.5	Корона и длинные искры	118
§ 6.4	Ток искры и спад напряжения на промежутке	120
§ 6.5	Разряд в газе с прямой инъекцией электронов	125
6.5.1	Основные уравнения	125
6.5.2	Столб разряда	128
6.5.3	Контракция объемных разрядов	131
§ 6.6	Импульсный разряд по поверхности диэлектрика в газе	133
§ 6.7	Восстановление электрической прочности искрового промежутка	136
	Литература к главе 6	139

Глава 7 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЯД В ЖИДКОСТИ	141
§ 7.1 Общие сведения	141
§ 7.2 Импульсная электрическая прочность жидких диэлектриков	143
§ 7.3 Электрический разряд в воде	145
§ 7.4 Роль поверхности электродов	148
§ 7.5 Роль состояния жидкости	151
Литература к главе 7	154

Часть III СВОЙСТВА КОАКСИАЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Глава 8 КОАКСИАЛЬНЫЕ ЛИНИИ С ТВЕРДОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ	156
§ 8.1 Основные параметры коаксиальных линий	156
§ 8.2 Искажение импульсов коаксиальной линией	158
§ 8.3 Неоднородности в коаксиальных линиях	161
§ 8.4 Импульсная электрическая прочность твердой изоляции и коаксиальных линий	163
Литература к главе 8	167
Глава 9 ЛИНИИ С ЖИДКИМ ДИЭЛЕКТРИКОМ	168
§ 9.1 Общие сведения	168
§ 9.2 Типы жидкостных линий	169
§ 9.3 Физические свойства жидкостных линий	172
§ 9.4 Перекрытие опорных изоляторов	173
Литература к главе 9	176
Глава 10 ВАКУУМНЫЕ ЛИНИИ С МАГНИТНОЙ САМОИЗОЛЯЦИЕЙ	177
§ 10.1 Физика магнитной изоляции	177
§ 10.2 Квазистационарный режим	180
§ 10.3 Волновой режим	183
§ 10.4 Плазма и ионы в линии	188
§ 10.5 Применение линий с магнитной самоизоляцией	190
Литература к главе 10	192

Часть IV ИСКРОВЫЕ КОММУТАТОРЫ

Глава 11 РАЗРЯДНИКИ С ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ ГАЗА	195
§ 11.1 Параметры коммутаторов	195
§ 11.2 Двухэлектродные коммутаторы	198
§ 11.3 Трехэлектродные разрядники	200
§ 11.4 Тригатроны	204
§ 11.5 Разрядники с запуском от внешнего излучения	210
11.5.1 Ультрафиолетовый запуск	210
11.5.2 Лазерный запуск	211

11.5.3 Электронно-лучевой запуск.....	213
§ 11.6 Последовательный многоэлектродный разрядник.....	216
11.6.1 Принцип работы	216
11.6.2 Последовательный разрядник с микрозазорами	218
11.6.3 Разрядники для параллельного включения конденсаторов.....	220
11.6.4 Мегавольтные последовательные разрядники	225
Литература к главе 11	227
Глава 12 РАЗРЯДНИКИ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ	229
§ 12.1 Вакуумные разрядники	229
§ 12.2 Импульсные водородные тиратроны	231
§ 12.3 Псевдоискровые разрядники	238
Литература к главе 12	241
Глава 13 РАЗРЯДНИКИ С ПРОБОЕМ ТВЕРДОГО И ЖИДКОГО ДИЭЛЕКТРИКОВ	243
§ 13.1 Разрядники с пробоем в твердом диэлектрике.....	243
§ 13.2 Разрядники с пробоем по поверхности твердого диэлектрика	246
§ 13.3 Жидкостные коммутаторы.....	248
Литература к главе 13	253

Часть V ГЕНЕРАТОРЫ ИМПУЛЬСОВ С ЗАМЫКАЮЩИМИ ПЛАЗМЕННЫМИ КОММУТАТОРАМИ

Глава 14 ГЕНЕРАТОРЫ С ГАЗОРАЗРЯДНЫМИ КОММУТАТОРАМИ.....	255
§ 14.1 Принципы построения генераторов	255
§ 14.2 Генератор с накопительной линией	256
§ 14.3 Генераторы с разрядом конденсатора.....	261
§ 14.4 Искровые обострители	263
Литература к главе 14	269
Глава 15 ГЕНЕРАТОРЫ МАРКСА	271
§ 15.1 Наносекундные генераторы Маркса	271
§ 15.2 Зарядка емкостного накопителя от генератора Маркса	275
§ 15.3 Типы микросекундных генераторов Маркса.....	279
§ 15.4 Многосекционный генератор Маркса.....	286
§ 15.5 Численные методы анализа генераторов Маркса	290
§ 15.6 Мощные наносекундные импульсные устройства с генераторами Маркса	293
Литература к главе 15	296
Глава 16 ИМПУЛЬСНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ	298
§ 16.1 Введение.....	298
§ 16.2 Генераторы с трансформаторами Тесла	298
§ 16.3 Генераторы с автотрансформаторами.....	303

§ 16.4	Линейный импульсный трансформатор	307
§ 16.5	Трансформаторы с использованием длинных линий	315
	Литература к главе 16	320

Часть VI ГЕНЕРАТОРЫ С РАЗМЫКАЮЩИМИ ПЛАЗМЕННЫМИ КОММУТАТОРАМИ

Глава 17	ИМПУЛЬСНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ВЗРЫВОМ ПРОВОДНИКА	322
§ 17.1	Введение	322
§ 17.2	Выбор проводников для обрыва тока	324
§ 17.3	Магнитогидродинамический метод расчета схем с ЭВП	328
§ 17.4	Метод подобия в исследовании генераторов с ЭВП	330
§ 17.5	Описание импульсных генераторов с ЭВП	335
	Литература к главе 17	342
Глава 18	ИМПУЛЬСНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ С ПЛАЗМЕННЫМИ ПЕРЕРЫВАТЕЛЯМИ ТОКА	344
§ 18.1	Генераторы с наносекундными плазменными прерывателями тока	344
§ 18.2	Генераторы с микросекундными ППТ	349
§ 18.3	Экспериментальное исследование ППТ	355
	18.3.1 Фаза проводимости	355
	18.3.2 Фаза обрыва тока	360
§ 18.4	Мощные наносекундные импульсные генераторы с МППТ	362
	Литература к главе 18	368
Глава 19	ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ КОММУТАТОРЫ С ЭЛЕКТРОННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ	371
§ 19.1	Введение	371
§ 19.2	Инжекционный тиратрон. Режим включения	372
§ 19.3	Инжекционный тиратрон. Режим обрыва тока	379
	Литература к главе 19	385

Часть VII ГЕНЕРАТОРЫ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСОВ С ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ КОММУТАЦИЕЙ

Глава 20	ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ ВКЛЮЧАЮЩИЕ КОММУТАТОРЫ	386
§ 20.1	Тиристоры микросекундного диапазона	386
§ 20.2	Импульсные тиристоры наносекундного диапазона	391
§ 20.3	Субнаносекундный диапазон	395
§ 20.4	Тиристоры, управляемые лазером	397
	Литература к главе 20	400

Глава 21	ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ВЫКЛЮЧАЮЩИЕ КОММУТАТОРЫ	402
§ 21.1	Общие сведения	402
§ 21.2	Физика полупроводниковых прерывателей тока	404
§ 21.3	Импульсные устройства с приборами на основе ДДРВ	409
§ 21.4	Разработка SOS-диодов	412
§ 21.5	Мощные наносекундные импульсные устройства на основе SOS-диодов	419
	Литература к главе 21	422
Глава 22	ГЕНЕРАТОРЫ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСОВ В СХЕМАХ С МАГНИТНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ	424
§ 22.1	Свойства магнитных элементов в импульсных магнитных полях	424
§ 22.2	Схемы генераторов мощных импульсов	426
§ 22.3	Генерирование мощных наносекундных импульсов	433
§ 22.4	Магнитные генераторы с использованием SOS-диодов	440
	Литература к главе 22	446
Глава 23	ДЛИННЫЕ ЛИНИИ С НЕЛИНЕЙНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ	448
§ 23.1	Введение	448
§ 23.2	Образование ударных электромагнитных волн путем набегания	450
§ 23.3	Диссипативный механизм образования ударных электромагнитных волн	453
§ 23.4	Конструкции линий с ударными электромагнитными волнами	457
§ 23.5	Генерирование мощных наносекундных импульсов с использованием УЭВ	461
	Литература к главе 23	463

Часть VIII ЭЛЕКТРОННЫЕ И ИОННЫЕ ДИОДЫ И УСКОРИТЕЛИ НА ИХ ОСНОВЕ

Глава 24	ЭЛЕКТРОННЫЕ ПУЧКИ БОЛЬШОГО СЕЧЕНИЯ	465
§ 24.1	Введение	465
§ 24.2	Структура пучков большого сечения	466
	24.2.1 Эффект экранировки	466
	24.2.2 Эффект подхвата	468
	24.2.3 Эффект «мазков»	469
§ 24.3	Катоды диодов для пучков большого сечения	471
	24.3.1 Многоострийные катоды	471
	24.3.2 Жидкометаллические катоды	474
§ 24.4	Металлодиэлектрические катоды	475
	24.4.1 Взрывная эмиссия электронов из тройной точки	475
	24.4.2 Конструкции металлодиэлектрических катодов	478
§ 24.5	Физические процессы в диодах для пучков большого сечения	482
	24.5.1 Наносекундные пучки	482

24.5.2 Пучки большого сечения микросекундной и большей длительности	485
§ 24.6 Схемы и конструкции ускорителей с пучками большого сечения	488
Литература к главе 24	492
Глава 25 ТРУБЧАТЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ПУЧКИ	495
§ 25.1 Принцип работы диодов	495
§ 25.2 Устройство электронных пушек для КДМИ	498
§ 25.3 Катодная плазма в магнитном поле	500
25.3.1 Образование катодной плазмы и ее свойства	500
25.3.2 Движение катодной плазмы	504
§ 25.4 Формирование пучков электронов	510
§ 25.5 КДМИ с неоднородным магнитным полем	515
Литература к главе 25	520
Глава 26 ПЛОТНЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ПУЧКИ И ИХ ФОКУСИРОВКА	523
§ 26.1 Особенности работы диодов	523
§ 26.2 Диоды с плоскими электродами	524
§ 26.3 Диоды с ножевыми катодами	529
§ 26.4 Фокусировка электронных пучков	535
Литература к главе 26	541
Глава 27 МОЩНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ ПУЧКИ ИОНОВ	543
§ 27.1 Общие сведения	543
§ 27.2 Диоды с отражением электронов и пинч-диоды	545
§ 27.3 Магнито-изолированные диоды	549
§ 27.4 Источники ионов в диодах	552
Литература к главе 27	557

Часть IX МОЩНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Глава 28 МОЩНЫЕ ИМПУЛЬСЫ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	559
§ 28.1 К истории проблемы	559
§ 28.2 О физике рентгеновского излучения	561
§ 28.3 Характеристики рентгеновских импульсов	570
§ 28.4 Генераторы мощных рентгеновских импульсов	574
28.4.1 Рентгеновские трубки	574
28.4.2 Компактные импульсные рентгеновские аппараты	580
§ 28.5 Генераторы сверхмощных рентгеновских импульсов	584
§ 28.6 Мощные импульсные генераторы длинноволнового рентгеновского излучения	591
Литература к главе 28	596

Глава 29	МОЩНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ ГАЗОВЫЕ ЛАЗЕРЫ	598
§ 29.1	Принципы работы импульсных газовых лазеров.....	598
29.1.1	Общие сведения о газовых лазерах.....	598
29.1.2	Типы газовых лазеров	600
§ 29.2	Методы накачки мощных импульсных газовых лазеров	604
29.2.1	Общие сведения.....	604
29.2.2	Электроразрядные лазеры.....	606
29.2.3	Накачка МИГ-лазеров электронным пучком.....	609
29.2.4	Электроионизационные лазеры.....	613
§ 29.3	Конструкция и работа CO ₂ -лазеров.....	614
§ 29.4	Конструкция и работа эксимерных лазеров	622
§ 29.5	Лазер на самоограниченных переходах молекулы азота	627
	Литература к главе 29	631
Глава 30	ГЕНЕРИРОВАНИЕ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСОВ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ	634
§ 30.1	Общие сведения.....	634
§ 30.2	Эффекты, лежащие в основе релятивистской СВЧ-электроники.....	636
§ 30.3	Экспериментальное исследование карсинотронов	640
§ 30.4	Виркаторы	648
§ 30.5	Генераторы мощных СВЧ-импульсов	652
§ 30.6	Радар на базе релятивистского наносекундного карсинотрона	660
	Литература к главе 30	663
Глава 31	ГЕНЕРИРОВАНИЕ МОЩНЫХ ПИКОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ	667
§ 31.1	О физике пикосекундных процессов	667
§ 31.2	Схемы и конструкции пикосекундных генераторов.....	671
§ 31.3	Импульсно-периодические генераторы.....	676
§ 31.4	Пикосекундные электронные пучки, СВЧ и рентгеновские импульсы.....	679
	Литература к главе 31	684
Глава 32	ГЕНЕРИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСОВ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	686
§ 32.1	Общие сведения.....	686
§ 32.2	Схемы для генерирования биполярных импульсов.....	689
§ 32.3	Антенны для СШП излучения.....	691
§ 32.4	Конструкции мощных СШП генераторов	696
	Литература к главе 32	703