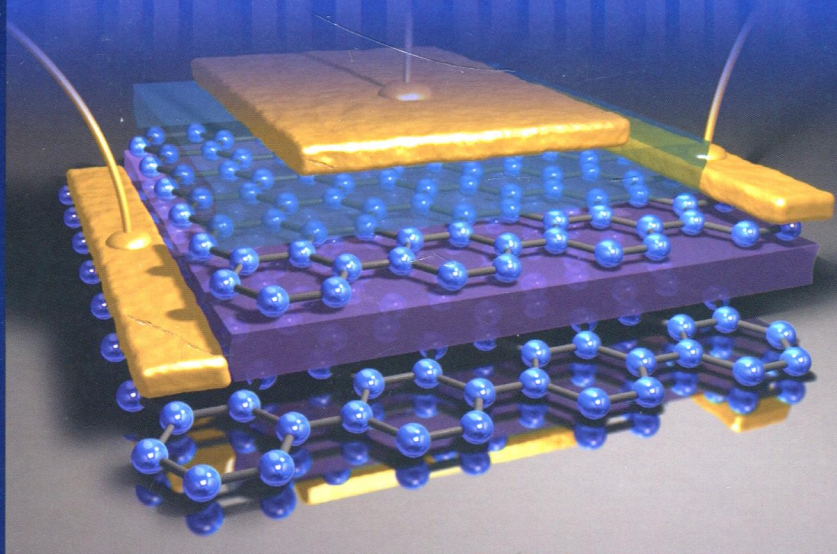


А. Д. Григорьев

ТЕРАГЕРЦЕВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА



А.Д. Григорьев

ТЕРАГЕРЦЕВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА



**МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ®
2020**

УДК 621.38
ББК 32.8.51.1
Г 83



Издание осуществлено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по проекту 20-18-00001, не подлежит продаже

Григорьев А. Д. **Терагерцевая электроника.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2020. — 308 с. — ISBN 978-5-9221-1882-8.

В книге рассматриваются свойства электромагнитных колебаний и волн терагерцевого диапазона, особенности их взаимодействия с веществом и причины образования так называемого «терагерцевого провала». Изложены принципы действия, элементы теории, конструкции и параметры источников и детекторов терагерцевого излучения, основанных как на квантовых эффектах, так и на процессах транспорта носителей заряда в различных средах. Рассматриваются лазеры терагерцевого диапазона, источники и детекторы, основанные на фотопроводимости; полупроводниковые, сверхпроводящие и вакуумные источники и детекторы. Подробно описаны проблемы продвижения «классических» микроволновых электровакуумных приборов в терагерцевый диапазон.

Автор надеется, что книга будет полезна разработчикам приборов и аппаратуры терагерцевого и микроволнового диапазонов, аспирантам и студентам, изучающим микроволновую электронику, а также ученым и инженерам, использующим терагерцевое излучение в своей деятельности.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	7
Введение	9
Глава 1. Взаимодействие терагерцевого излучения с веществом	13
1.1. Распространение ТГЧ-волн	13
1.2. Преломление и отражение волн	15
1.3. Характеристики ТГЧ-излучения	17
1.4. Распространение в атмосфере Земли	18
1.5. Взаимодействие с диэлектриками	20
1.6. Взаимодействие с металлами	23
1.7. Взаимодействие со сверхпроводниками	27
1.8. Взаимодействие с полупроводниками.	32
1.8.1. Полупроводниковые материалы	32
1.8.2. Нелинейная поляризация	34
1.8.3. Внутренний фотоэффект	34
1.8.4. Эффект Дембера	35
1.8.5. Явление отрицательной дифференциальной подвижности (ОДП)	35
1.8.6. Явления на потенциальных барьерах	39
1.9. Взаимодействие с 2D-структурами	40
1.10. Взаимодействие с биологическими объектами	41
Глава 2. Квантовые источники терагерцевого излучения	43
2.1. Эффективность лазеров в ТГЧ-диапазоне.	43
2.2. Молекулярные лазеры с оптической накачкой	44
2.3. Квантовые каскадные лазеры	49
2.3.1. Принцип действия	49
2.3.2. Дизайны ККЛ	52
2.3.3. Структура ККЛ	54
2.3.4. Резонаторы ККЛ	58
2.3.5. Условия самовозбуждения	59
2.3.6. Перестройка частоты	60
2.3.7. Повышение рабочей температуры ККЛ	60

2.4. Графеновые лазеры	64
2.5. Германиевые и кремниевые лазеры	66
2.5.1. Принцип действия	66
2.5.2. Лазеры на подзонных переходах	68
2.5.3. p -Ge-лазеры на циклотронном резонансе	71
2.5.4. Кремниевые лазеры	72
Глава 3. Сверхпроводящие источники терагерцевого излучения	74
3.1. Генераторы на эффекте Джозефсона	74
3.2. Излучатели на ВТСП	76
Глава 4. Излучатели с лазерной накачкой	82
4.1. Принцип действия излучателей на фотопроводимости	82
4.1.1. Фотопроводящая антенна	82
4.1.2. Материалы для ФП-излучателей	85
4.2. Конструкции и параметры импульсных генераторов на ФПА	87
4.3. Фотопроводящие смесители	91
4.3.1. Излучатели с большим эмиттером	93
4.3.2. Антенные смесители	95
4.3.3. Антенны	96
4.4. Другие типы фотопроводящих излучателей	97
4.4.1. Смесители на основе p - i - n -структур	97
4.4.2. Излучатели на эффекте Дембера	100
4.4.3. Излучатели на эффекте встроенного поля	101
4.4.4. Излучатели на ключах Остона	102
4.5. Излучатели на основе нелинейного выпрямления	103
4.5.1. Излучатели на диэлектриках	103
4.5.2. Излучатели на нелинейных полупроводниках	106
4.6. Излучатели на газах	107
Глава 5. Диодные источники ТГЧ-излучения	109
5.1. Умножители частоты на варакторах	109
5.1.1. Принцип действия	109
5.1.2. Варакторные диоды	110
5.1.3. Гетеробарьерные варакторы	114
5.1.4. Схемы умножителей частоты	117
5.2. Генераторы на туннельных диодах	124
5.2.1. Структура и принцип действия туннельного диода	124
5.2.2. Резонансный туннельный диод	129
5.2.3. Генераторы и усилители на ТД	130
5.3. Генераторы на лавинно-пролетных диодах	133
5.3.1. Принцип действия ЛПД	133
5.3.2. Структуры ЛПД	136
5.3.3. Генераторы на ЛПД	140

5.4. Усилители и генераторы на диодах Ганна	144
5.4.1. Принцип действия	144
5.4.2. Генераторы на диодах Ганна	148
Глава 6. Источники ТГц-излучения на транзисторах	153
6.1. Биполярные транзисторы	153
6.1.1. Принцип действия биполярного транзистора	153
6.1.2. Гетероструктурные БТ	158
6.1.3. Усилители и генераторы на биполярных транзисторах	161
6.2. Полевые транзисторы	162
6.2.1. Структура и принцип действия	162
6.2.2. Усилители на ТВПЭ	166
6.3. Другие типы транзисторов ТГц-диапазона	168
6.3.1. Графеновые транзисторы	168
6.3.2. Алмазные транзисторы	170
6.3.3. Резонансные туннельные транзисторы	170
6.3.4. Транзисторы с вакуумным каналом	173
Глава 7. Релятивистские источники излучения	175
7.1. Лазеры на свободных электронах	175
7.1.1. Устройство и принцип действия	175
7.1.2. Анализ процесса излучения	178
7.1.3. Параметры терагерцевых ЛСЭ	179
7.2. Гирорезонансные источники излучения	181
7.2.1. Устройство и принцип действия	181
7.2.2. Азимутальная группировка	184
7.2.3. Параметры и характеристики гиротронов ТГц-диапазона	186
Глава 8. Терагерцевые приборы М-типа	193
8.1. Магнетроны	193
8.1.1. Устройство и принцип действия	193
8.1.2. Взаимодействие электронов с высокочастотным электрическим полем	197
8.1.3. Магнетроны терагерцевого диапазона	199
8.2. Лампы бегущей и обратной волны типа М	202
Глава 9. Терагерцевые приборы О-типа	205
9.1. Усилительные клистроны	205
9.1.1. Устройство и принцип действия	205
9.1.2. Проблемы продвижения клистронов в ТГц-диапазон	208
9.1.3. Конструкция и параметры клистронов ТГц-диапазона	212
9.2. Лампы бегущей волны	222
9.2.1. Устройство и принцип действия	222
9.2.2. Конструкция и параметры ЛБВ терагерцевого диапазона	227

9.3. Лампы обратной волны	229
9.3.1. Устройство и принцип действия	229
9.3.2. Конструкция и параметры ЛОВ ТГЧ-диапазона	233
9.4. Оротроны	234
9.4.1. Устройство и принцип действия	234
9.4.2. Параметры и характеристики оротронов	236
9.5. Монотроны	238
9.5.1. Устройство и принцип действия	238
9.5.2. Конструкция и параметры	239
Глава 10. Детекторы терагерцевого излучения	242
10.1. Термоэлектрические преобразователи	242
10.1.1. Боллометры	242
10.1.2. Ячейки Голея	243
10.2. Фотонные детекторы	244
10.2.1. Сверхпроводящие детекторы	244
10.2.2. Детекторы на фотопроводящих антеннах	246
10.3. Детекторы на полупроводниковых диодах	247
10.3.1. Лавинные детекторы	247
10.3.2. Детекторы на квантовых точках	248
10.3.3. Туннельные детекторы	249
10.3.4. Детекторы на горячих электронах	249
10.3.5. Детекторы на диодах Шоттки	250
Заключение	253
Приложения	254
А. Электродинамические системы вакуумных терагерцевых приборов	254
А.1. Замедляющие системы	254
А.2. Резонаторы	264
Б. Электронно-оптические системы терагерцевых приборов типа О	273
Б.1. Электронные пучки	273
Б.2. Электронные пушки	276
Б.3. Магнитные фокусирующие системы	278
Б.4. Коллекторы	279
В. Технология изготовления деталей ТГЧ ЭП	280
В.1. Механическая обработка	280
В.2. Электроэрозионная обработка	281
В.3. LIGA-технология	282
В.4. DRIE-технология	285
Список литературы	288
Предметный указатель	301