

В.П. РАЗИНКИН,  
В.А. ХРУСТАЛЕВ, С.Ю. МАТВЕЕВ

# ШИРОКОПОЛОСНЫЕ УПРАВЛЯЕМЫЕ СВЧ УСТРОЙСТВА ВЫСОКОГО УРОВНЯ МОЩНОСТИ



НОВОСИБИРСК  
2 0 1 4

УДК 621.382.2.029.6  
Р 173

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. *А.Н. Сычев*,  
д-р техн. наук, проф. *Г.Н. Девятков*

**Разинкин В.П.**

Р 173 Широкополосные управляемые СВЧ устройства высокого уровня мощности : монография / В.П. Разинкин, В.А. Хрусталеv, С.Ю. Матвеев. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2014. – 316 с. (серия «Монографии НГТУ»).

ISBN 978-5-7782-2326-4

Рассмотрены вопросы построения многоканальных управляемых СВЧ устройств высокого уровня мощности, выполненных с использованием диодов и транзисторов различного типа. Описаны методы синтеза согласующе-компенсирующих цепей в сосредоточенном и распределенном базисах, полоса рабочих частот которых близка к предельно допустимой. Приведены результаты экспериментального исследования широкополосных управляемых устройств дециметрового и сантиметрового диапазонов на уровень мощности до 1 кВт в непрерывном режиме.

Книга предназначена для специалистов в области телевизионного вещания, радиолокации и систем связи, а также для студентов старших курсов, обучающихся по направлениям «Радиотехника» и «Телекоммуникационные системы».

УДК 621.382.2.029.6

ISBN 978-5-7782-2326-4

© Разинкин В.П., Хрусталеv В.А.,  
Матвеев С.Ю., 2008, 2014

© Новосибирский государственный  
технический университет, 2008, 2014

V.P. RAZINKIN,  
V.A. KHRUSTALEV, S.YU. MATVEEV

# BROADBAND MICROWAVE HIGH-POWER CONTROLLABLE DEVICES



NOVOSIBIRSK

2 0 1 4

UDC 621.382.2.029.6  
R 173

Reviewers:

Prof. *A.N. Sychev*, D.Sc. (Eng.),  
Prof. *G.N. Devjatkov*, D.Sc. (Eng.)

**Razinkin V.P.**

R 173 Broadband Microwave High-Power Controlled Devices : monograph / V.P. Razinkin, V.A. Khrustalev, S.Yu. Matveev. – Novosibirsk : NSTU Publisher, 2014. – P. 316 (“NSTU Monographs” series).

ISBN 978-5-7782-2326-4

Design principles of multichannel microwave high-power controlled devices based on various diodes and transistors are proposed. Methods of synthesizing matching-compensating circuits in lumped and distributed bases, with operating frequency bands being near maximum permissible widthbands, are described. Experimental results of investigating broadband micro- and centimeter- wave controlled devices up to 1kW under continuous operation are presented.

The book is intended for specialists in television broadcasting, radio-location and communication systems as well as for senior students specializing in radio engineering and telecommunication systems.

UDC 621.382.2.029.6

ISBN 978-5-7782-2326-4

© Razinkin V.P., Khrustalev V.A.,  
Matveev S.Yu., 2008, 2014  
© Novosibirsk State  
Technical University, 2008, 2014

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	13
ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ .....	17
Глава 1. ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ УПРАВЛЯЕМЫХ СВЧ УСТРОЙСТВ.....	20
1.1. Управляемые СВЧ устройства и их применение.....	20
1.2. Полупроводниковые управляющие элементы .....	29
1.3. Схемное построение и характеристики управляемых СВЧ устройств .....	40
Глава 2. ОБОБЩЕННАЯ КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ УУ СВЧ ВЫСОКОГО УРОВНЯ МОЩНОСТИ.....	54
2.1. Методы повышения максимально допустимой СВЧ мощности.....	54
2.2. Обобщенная концепция построения УУ СВЧ высокого уровня мощности .....	56
Глава 3. ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭФФЕКТОВ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ СЕКЦИЯХ.....	70
3.1. Нелинейный анализ управляемых секций методом гармониче- ского баланса .....	70
3.2. Нелинейные процессы в управляемой секции с последова- тельно включенным $p-i-n$ -диодом.....	78
3.3. Анализ переходных процессов в управляемых секциях на $p-i-n$ -диодах.....	88
3.4. Спектральный анализ управляемых секций на основе управ- ляющих элементов с комплексной нелинейностью.....	93

Глава 4. ВЕКТОРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ЕМКОСТЕЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ УПРАВЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ .....	111
4.1. Применение векторно-параметрического метода для расчета потенциала заряженного электрода .....	111
4.2. Расчет межэлектродной емкости управляющих элементов с электродами дисковой формы .....	114
4.2.1. Расчет емкости управляющих элементов с учетом конечной толщины дисковых электродов .....	127
4.2.2. Приближенный расчет емкости управляющих элементов с бесконечно тонкими дисковыми электродами .....	129
4.2.3. Влияние межэлектродной емкости на полосу рабочих частот и максимальную мощность .....	132
4.3. Расчет емкости управляющих элементов с электродами прямоугольной формы .....	135
4.4. Расчет межэлектродной емкости управляющих элементов с кольцевой формой электродов .....	146
Глава 5. АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СОГЛАСУЮЩЕ-КОМПЕНСИРУЮЩИХ ЦЕПЕЙ НА ОСНОВЕ ФИЛЬТРУЮЩИХ СТРУКТУР .....	149
5.1. Компенсация влияния емкости управляющих элементов с помощью сосредоточенных фильтров нижних частот .....	149
5.2. Компенсация влияния емкости управляющих элементов с помощью полосно-пропускающих сосредоточенных фильтров .....	164
5.3. Компенсация влияния емкости управляющих элементов с помощью полураспределенных полосно-пропускающих структур .....	168
5.4. Синтез согласующе-фильтрующих структур с учетом диссипативных потерь .....	175
5.5. Синтез согласующе-фильтрующих структур распределенного типа с учетом диссипативных потерь .....	190
Глава 6. СИНТЕЗ КОМПЕНСИРУЮЩИХ ЦЕПЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРАНСФОРМАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ .....	193
6.1. Частотные свойства компенсирующих цепей с трансформацией характеристического сопротивления .....	193

6.2. Синтез компенсирующих цепей на основе ФНЧ, ФВЧ и понижающих трансформаторов Нортонa.....	196
6.3. Синтез компенсирующих цепей на основе ППФ, ФВЧ и понижающих трансформаторов Нортонa.....	202
6.4. Синтез компенсирующих цепей на основе ППФ и повышающих трансформаторов Нортонa.....	205
6.5. Синтез компенсирующих цепей на основе ППФ с высоким характеристическим сопротивлением.....	208
6.6. Синтез трансформирующих схем компенсации, выполненных на отрезках линий передачи.....	210
6.7. Применение рядов Фурье для параметрического синтеза трансформирующих схем компенсации на отрезках линий передачи.....	214
6.8. Синтез трансформирующей схемы компенсации на отрезках линий передачи с короткозамкнутыми корректирующими шлейфами.....	220
<b>Глава 7. ШИРОКОПОЛОСНЫЕ УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ АМПЛИТУДОЙ И ФАЗОЙ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ.....</b>	<b>228</b>
7.1. СВЧ аттенюаторы повышенной мощности на основе направленных ответвителей.....	228
7.2. Полупроводниковые СВЧ аттенюаторы мостового типа.....	235
7.3. Полупроводниковые управляемые устройства сантиметрового и миллиметрового диапазонов.....	245
7.4. Широкополосные аттенюаторы на сосредоточенных элементах.....	260
7.5. Переключатели и коммутаторы высокого уровня мощности... ..	263
7.6. Полупроводниковые СВЧ коммутаторы инверсного типа.....	269
7.7. Дифференциальные СВЧ фазовращатели.....	278
7.8. СВЧ фазовращатели на основе перестраиваемых фильтров....	286
7.9. Дискретное изменение параметров в управляемых СВЧ устройствах.....	291
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>298</b>
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....</b>	<b>300</b>

## CONTENTS

NOTATION .....	13
Chapter 1. DESIGN PRINCIPLES AND METHODS OF MICROWAVE CONTROLLED DEVICES .....	20
1.1. Microwave controlled devices and their application .....	20
1.2. Semiconductor control elements.....	29
1.3. Circuit design and characteristics of microwave controlled devices .....	40
Chapter 2. GENERALISED DESIGN CONCEPT OF MICROWAVE HIGH- POWER CONTROLLED DEVICES.....	54
2.1. Methods of increasing maximum permissible microwave power .....	54
2.2. Generalised design concept of microwave high-power controlled devices .....	56
Chapter 3. NONLINEAR EFFECTS IN SEMICONDUCTOR CON- TROLLED DEVICES.....	70
3.1. Nonlinear analysis of controlled sections by harmonic balance method .....	70
3.2. Nonlinear processes in controlled $p-i-n$ -diode sections.....	78
3.3. Transient process analysis in controlled $p-i-n$ -diode sections .....	88
3.4. Spectral analysis of controlled sections based on control ele- ments with complex nonlinearity.....	93

---

Chapter 4. VECTOR-PARAMETRIC CALCULATION METHOD OF SEMICONDUCTOR CONTROL ELEMENT CAPACI- TANCE .....	111
4.1. Application of vector-parametric method for charged electrode potential calculation.....	111
4.2. Calculation of interelectrode capacitance of disc electrode con- trol elements.....	114
4.2.1. Calculation of control element capacitance with regard to disc electrode finite thickness.....	127
4.2.2. Approximate capacity calculation of control elements with infinitely thin disc electrodes.....	129
4.2.3. Effects of interelectrode capacitance on operating fre- quency bands and maximum power.....	132
4.3. Calculation of rectangular electrode control element capacitance.....	135
4.4. Calculation of interelectrode capacitance of ring electrode con- trol elements.....	146
Chapter 5. ANALYSIS AND SYNTHESIS OF MATCHING-COMPENSA- TING CIRCUITS BASED ON FILTER ELEMENTS .....	149
5.1. Compensation of control element effects by lumped lower fre- quency filters .....	149
5.2. Compensation of control element effects by lumped band-pass filters.....	164
5.3. Compensation of control element effects by lumped semidistrib- uted pass-band structures .....	168
5.4. Synthesis of matching-filtering structures with regard to dissipa- tive losses.....	175
5.5. Synthesis of matching-filtering distributed structures with regard to dissipative losses.....	190
Chapter 6. COMPENSATING CIRCUIT SYNTHESIS BASED ON CHAR- ACTERISTIC IMPEDANCE TRANSFORMATION.....	193
6.1. Frequency characteristics of compensating circuits with charac- teristic impedance transformation.....	193
6.2. Compensating circuit synthesis based on low-pass and high-pass filters and Norton step-down transformers .....	196

6.3. Compensating circuit synthesis based on band-pass and high-pass filters and Norton step-down transformers.....	202
6.4. Compensating circuit synthesis based on band-pass filters and Norton step-up transformers.....	205
6.5. Compensating circuit synthesis based on band-pass filters with high characteristic impedance.....	208
6.6. Synthesis of transforming compensating circuits on transmission line sections .....	210
6.7. Fourier series in parametric synthesis of transforming compensating circuits on transmission line sections .....	214
6.8. Synthesis of transforming compensating circuits on transmission line sections with short-circuit correction stubs.....	220
Chapter 7. BROADBAND DEVICES FOR FREQUENCY AND AMPLITUDE CONTROL OF HIGH-FREQUENCY OSCILLATIONS.....	228
7.1. Microwave high-power attenuators based on directional couplers.....	228
7.2. Semiconductor microwave bridge-type attenuators.....	235
7.3. Centimeter- and millimeter-wave semiconductor controlled devices .....	245
7.4. Broadband lump element attenuators.....	260
7.5. High-power switches and commutators.....	263
7.6. Inverse microwave semiconductor commutators.....	269
7.7. Microwave differential phase switchers .....	278
7.8. Microwave variable filter phase switchers .....	286
7.9. Discrete parameter changes in microwave controlled devices.....	291
CONCLUSIONS.....	298
REFERENCES.....	300