

В43



А.Г. БЕЛОУС

ВЫСОКОДОБОРОТНЫЕ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ



•

НАЦИОНАЛЬНАЯ
АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ОБЩЕЙ
И НЕОРГАНИЧЕСКОЙ ХИМИИ
ИМ. В. И. ВЕРНАДСКОГО

•

NATIONAL ACADEMY
OF SCIENCES OF UKRAINE
V. I. VERNADSKII INSTITUTE
OF GENERAL AND INORGANIC
CHEMISTRY

•

A. G. BELOUS

HIGH-Q MICROWAVE DIELECTRICS

“SCIENTIFIC BOOK”.
PROJECT

KYIV
NAUKOVA DUMKA
2016

А. Г. БЕЛОУС

ВЫСОКОДОБРОТНЫЕ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ

ПРОЕКТ
“НАУКОВА КНИГА”

КИЕВ
НАУКОВА ДУМКА
2016

Развитие мобильной и спутниковой связи требует разработки новых СВЧ-диэлектриков. На их основе создаются диэлектрические резонаторы, диэлектрические подложки, которые являются элементной базой при разработке устройств беспроводной связи. В монографии систематизированы результаты исследований важных классов СВЧ-диэлектриков, изложены методы синтеза и изучения электрофизических свойств, приведены различные классы высокочастотных СВЧ-диэлектриков на основе сложных оксидных систем различной кристаллической структуры, в частности, калиево-вольфрамовой бронзы, перовскита, колумбита. Рассмотрены композиционные СВЧ-диэлектрики. Приведена краткая информация о природе электрофизических свойств СВЧ-диэлектриков и возможных областях их применения.

Для научных сотрудников, инженеров, аспирантов, студентов, занимающихся синтезом и исследованием свойств СВЧ-диэлектриков.

Розвиток мобільного і супутникового зв'язку потребує розробки нових НВЧ-діелектриків. На їх основі створюються діелектричні резонатори, діелектричні підкладки, які є елементною базою при розробці пристроїв бездротового зв'язку. В монографії систематизовано результати досліджень важливих класів НВЧ-діелектриків, викладено методи синтезу і вивчення електрофізичних властивостей, наведено різні класи високодобротних НВЧ-діелектриків на основі складних оксидних систем різної кристалічної структури, зокрема, калієво-вольфрамової бронзи, перовскіту, колумбіту. Розглянуто композиційні НВЧ-діелектрики. Наведено коротку інформацію про природу електрофізичних властивостей НВЧ-діелектриків і можливих сферах їх застосування.

Для наукових співробітників, інженерів, аспірантів, студентів, які займаються синтезом і дослідженням властивостей НВЧ-діелектриків.

Рецензенты :

академик НАН Украины *С. В. Волков*,
член-корреспондент НАН Украины *А. В. Рагуля*

*Рекомендовано к печати ученым советом Института общей
и неорганической химии им. В. И. Вернадского
НАН Украины (протокол № 9 от 01.09.2014 г.)*

***Видання здійснено за державним контрактом
на випуск наукової друкованої продукції***

Научно-издательский отдел медико-биологической,
химической и геологической литературы

Редактор *Н. А. Серебрякова*

© А. Г. Белоус, 2016

© НВП «Видавництво “Наукова думка”
НАН України», дизайн, 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
Г Л А В А 1. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДИЭЛЕКТРИКОВ В СВЧ-ДИАПАЗОНЕ	10
1.1. Измерения в короткозамкнутом волноводе	11
1.2. Метод “полубесконечного” слоя.....	12
1.3. Волноводно-резонансный метод	13
1.4. Нерезонансные методы СВЧ-исследования с помощью коаксиальных измерительных линий	15
1.5. Основные параметры высокочастотных СВЧ-диэлектриков (ϵ , $\text{tg } \delta$, τ_e , τ_f)	32
Г Л А В А 2. МЕТОДЫ СИНТЕЗА СВЧ-ДИЭЛЕКТРИКОВ	35
2.1. Твердофазный синтез СВЧ-диэлектриков.....	36
2.2. Осаждение из водных растворов	38
Г Л А В А 3. СВЧ-ДИЭЛЕКТРИКИ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ BaO-TiO₂.....	46
3.1. BaTi ₅ O ₁₁	47
3.2. Ba ₂ Ti ₉ O ₂₀	49
3.3. BaTi ₄ O ₉	50
Г Л А В А 4. СВЧ-ДИЭЛЕКТРИКИ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ ZrO₂-TiO₂-SnO₂	55
Г Л А В А 5. СВЧ-ДИЭЛЕКТРИКИ НА ОСНОВЕ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ (La,Sr,Ca)(Ti,Al)O₃	62
Г Л А В А 6. БАРИЙ-ЛАНТАНОИДНЫЕ ТИТАНАТЫ	69
Г Л А В А 7. СВЧ-ДИЭЛЕКТРИКИ НА ОСНОВЕ МАТЕРИАЛОВ A (B'_{1/3}B''_{2/3}) O₃	86
7.1. Ba(Zn _{1/3} Ta _{2/3})O ₃ (BZT).....	87
7.2. Ba(Mg _{1/3} Ta _{2/3})O ₃ (BMT)	96
7.3. Ba(Zn _{1/3} Nb _{2/3})O ₃ (BZN)	101
7.4. Ba(Co _{1/3} Nb _{2/3})O ₃ (BCN)	103
7.5. Ba(Mg _{1/3} Nb _{2/3})O ₃ (BMN)	103
7.6. Влияние нестехиометрии в катионных подрешетках ниобийсодержащих перовскитов на добротность	104

Оглавление

7.6.1. Исследование систем $Ba_{1+x}(M^{2+}_{1/3}Nb_{2/3})O_{3+x}$, где M^{2+} — Co, Mg, Zn ($-0,1 \leq x \leq 0,01$)	105
7.6.2. Исследование систем $Ba(M^{2+}_{(1+y)/3}Nb_{2/3})O_{3+y/3}$, где M^{2+} — Co, Mg, Zn ($-0,15 \leq y \leq 0,03$)	106
Г Л А В А 8. СВЧ-ДИЭЛЕКТРИКИ НА ОСНОВЕ НИОБАТОВ СО СТРУКТУРОЙ КОЛУМБИТА	109
8.1. Структура колумбита	109
8.2. Синтез ниобийсодержащей керамики со структурой колумбита	110
8.3. СВЧ-диэлектрические свойства колумбитов	117
Г Л А В А 9. КОМПОЗИЦИОННЫЕ СВЧ-ДИЭЛЕКТРИКИ	129
9.1. Композиционные материалы на основе $MgTiO_3$	131
9.2. Композиционные материалы на основе Mg_2TiO_4	134
9.3. Композиционные СВЧ-диэлектрики на основе $MgSiO_4$	142
9.4. Композиционные материалы	146
Г Л А В А 10. ФИЗИКА СВЧ-ДИЭЛЕКТРИКОВ	150
10.1. Механизмы поляризации диэлектриков	150
10.2. Диэлектрическая проницаемость	151
10.3. Диэлектрические потери	152
10.4. Температурный коэффициент диэлектрической проницаемости (τ_c)	157
Г Л А В А 11. ПРИМЕНЕНИЕ СВЧ-КЕРАМИКИ	160
11.1. Диэлектрические резонаторы	162
11.2. Фильтры на диэлектрических резонаторах	169
11.3. Устройства СВЧ на диэлектрических резонаторах	172
СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ	179
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	180

CONTENTS

INTRODUCTION	5
C H A P T E R 1. METHODS FOR THE INVESTIGATION OF THE ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF DIELECTRICS IN THE MICROWAVE RANGE	10
1.1. Measurements in a short-circuit waveguide	11
1.2. "Semi-infinite" layer method	12
1.3. Waveguide-resonance method	13
1.4. Nonresonance methods of microwave research by means of coaxial measuring lines	15
1.5. Main parameters of high-Q microwave dielectrics (ϵ , $\text{tg } \delta$, τ_e , τ_f)	32
C H A P T E R 2. METHODS FOR THE SYNTHESIS OF MICROWAVE DIELECTRICS	35
2.1. Solid-phase synthesis of microwave dielectrics	36
2.2. Precipitation from aqueous solutions	38
C H A P T E R 3. MICROWAVE DIELECTRICS BASED ON THE BaO-TiO₂ SYSTEM	46
3.1. BaTi ₅ O ₁₁	47
3.2. Ba ₂ Ti ₉ O ₂₀	49
3.3. BaTi ₄ O ₉	50
C H A P T E R 4. MICROWAVE DIELECTRICS BASED ON ZrO₂-TiO₂-SnO₂	55
C H A P T E R 5. MICROWAVE DIELECTRICS BASED ON (La,Sr,Ca)(Ti,Al)O₃ SOLID SOLUTIONS	62
C H A P T E R 6. BARIUM-LANTHANIDE TITANATES	69
C H A P T E R 7. MICROWAVE DIELECTRICS BASED ON A (B'_{1/3}B''_{2/3}) O₃ MATERIALS	86
7.1. Ba(Zn _{1/3} Ta _{2/3})O ₃ (BZT)	87
7.2. Ba(Mg _{1/3} Ta _{2/3})O ₃ (BMT)	96
7.3. Ba(Zn _{1/3} Nb _{2/3})O ₃ (BZN)	101
7.4. Ba(Co _{1/3} Nb _{2/3})O ₃ (BCN)	103
7.5. Ba(Mg _{1/3} Nb _{2/3})O ₃ (BMN)	103
7.6. Effect of nonstoichiometry in the cation sublattices of niobium-containing perovskites on the Q value	104

Contents

7.6.1. Investigation of $Ba_{1+x}(M^{2+}_{1/3}Nb_{2/3})O_{3+x}$, где M^{2+} — Co, Mg, Zn ($-0,1 \leq x \leq 0,01$)	105
7.6.2. Investigation of $Ba(M^{2+}_{(1+y)/3}Nb_{2/3})O_{3+y/3}$, где M^{2+} — Co, Mg, Zn ($-0,15 \leq y \leq 0,03$)	106
CHAPTER 8. MICROWAVE DIELECTRICS BASED ON NIOBATES WITH COLUMBITE STRUCTURE	109
8.1. Columbite structure	109
8.2. Synthesis of niobium-containing ceramics with columbite structure	110
8.3. Microwave dielectric properties of columbites	117
CHAPTER 9. MICROWAVE COMPOSITE DIELECTRICS	129
9.1. MgTiO ₃ -based composite materials	131
9.2. Mg ₂ TiO ₄ -based composite materials	134
9.3. MgSiO ₄ -based microwave composite dielectrics	142
9.4. Composite materials	146
CHAPTER 10. PHYSICS OF MICROWAVE DIELECTRICS	150
10.1. Dielectrics polarization mechanisms	150
10.2. Permittivity	151
10.3. Dielectric loss	152
10.4. Permittivity temperature coefficient (τ_e)	157
CHAPTER 11. APPLICATIONS OF MICROWAVE CERAMICS	160
11.1. Dielectric resonators	162
11.2. Dielectric resonator filters	169
11.3. Microwave devices with dielectric resonators	172
LIST OF ADOPTED ABBREVIATIONS	179
REFERENCES	180