



В.В. Петров, А.А. Крючин,  
Ю.А. Куницький, В.М. Рубіш,  
А.С. Лапчук, С.О. Костюкевич

# МЕТОДИ НАНОЛІТОГРАФІЇ

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ РЕЄСТРАЦІЇ ІНФОРМАЦІЇ

В.В. ПЕТРОВ, А.А. КРЮЧИН,  
Ю.А. КУНИЦЬКИЙ, В.М. РУБІШ,  
А.С. ЛАПЧУК, С.О. КОСТЮКЕВИЧ

# МЕТОДИ НАНОЛІТОГРАФІЇ

*ПРОЕКТ  
«НАУКОВА КНИГА»*

КИЇВ НАУКОВА ДУМКА 2015

Викладено результати перспективних технологій виготовлення нанорозмірних структур, а також досліджень авторів зі створення оптичних систем з високою роздільною здатністю та методів формування рельєфних наноструктур. Визначено технології, які можна використовувати при виготовленні носіїв інформації майбутніх поколінь. Визначено вимоги до систем формування нанорозмірних структур на підкладках оптичних і магнітних носіїв інформації. Наведено результати досліджень зі створення фоточутливих матеріалів з високою роздільною здатністю і методів запису інформації на них.

Для наукових та інженерно-технічних співробітників, які займаються проблемами наноелектроніки і технологіями реєстрації інформації.

**Р е ц е н з е н т и :**

член-кореспондент НАН України,  
доктор фізико-математичних наук,  
професор *В.С. Лисенко*  
доктор технічних наук, професор *В. В. Данилов*

Відповідальний редактор  
доктор технічних наук, професор *О.Г. Додонов*

*Затверджено до друку вченою радою  
Інституту проблем реєстрації інформації НАН України  
(протокол № 11 від 24.06.2014р.)*

***Видання здійснено частково за державним замовленням  
на випуск видавничої продукції***

Науково-видавничий відділ фізико-математичної  
та технічної літератури  
Редактор *О.А. Микитенко*

© В.В. Петров, А.А. Крючин, Ю.А. Куницький,  
В.М. Рубіш, АС. Лапчук, С.О. Костюкевич, 2015  
© НВП «Видавництво “Наукова думка” НАН  
України», дизайн, 2015

# ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА .....	3
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ .....	5
ВСТУП .....	7
<b>Р О З Д І Л 1 МОЖЛИВОСТІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЙ ФОРМУВАННЯ НАНОРОЗМІРНИХ МАТЕРІАЛІВ І НАНОСТРУКТУР .....</b>	<b>12</b>
1.1. Перспективи вдосконалення елементної бази інформатики та оп- тоелектроніки на базі наноматеріалів .....	12
1.2. Типи нанолітографічних технологій .....	19
1.3. Методи формування темплатів.....	32
1.4. Фізико-хімічні властивості наночастинок та наноструктурованих поверхневих шарів .....	40
1.5. Методи отримання поверхневих наноструктур.....	42
<b>Р О З Д І Л 2. ТЕРМОЛІТОГРАФІЧНИЙ ЗАПИС НАНОРОЗМІРНИХ СТРУКТУР....</b>	<b>54</b>
2.1. Реєстрація нанорозмірних структур на нелінійних фоторезистах .....	54
2.2. Аналіз можливостей термолітографічного запису .....	55
2.3. Фоточутливі матеріали для термолітографічного запису нанорозмір- них структур .....	59
2.4. Неорганічні фоторезисти на базі халькогенідних склоподібних на- півпровідників для реєстрації нанорозмірних структур .....	65
2.5. Технології створення перспективних нелінійних фоторезистів .....	81
2.6. Аналіз вимог до оптичних систем термолітографічного запису.....	86
<b>Р О З Д І Л 3 МЕТОДИ ОПТИЧНОЇ НАНОЛІТОГРАФІЇ, ЯКІ ДАЮТЬ ЗМОГУ ДОЛАТИ ДИФРАКЦІЙНУ МЕЖУ .....</b>	<b>94</b>
3.1. Технологія імерсійного запису нанорозмірних структур .....	94
3.2. Можливості і досягнення інтерференційної літографії.....	98
3.3. Поверхнева плазмонна інтерференційна нанолітографія .....	108
3.4. Технології підвищення роздільної здатності оптичної проекційної літографії .....	114

## Зміст

<b>РОЗДІЛ 4 МЕТОДИ ФОРМУВАННЯ НАНОРОЗМІРНИХ СТРУКТУР ЗОНДОВИМИ СКАНУВАЛЬНИМИ МІКРОСКОПАМИ</b> .....	125
4.1. Механічна модифікація поверхні атомно-силовим мікроскопом .....	127
4.2. Польове випаровування .....	134
4.3. Нанолітографія методом локального анодного окислення .....	135
4.4. Dip-pen літографія .....	137
<b>РОЗДІЛ 5 БЛИЖНЬОПОЛЬОВА ОПТИЧНА НАНОЛІТОГРАФІЯ</b> .....	143
5.1. Зонди ближньопольових мікроскопів .....	143
5.2. Лазерне наноструктурування сканувальним ближньопольовим оптичним мікроскопом .....	148
5.3. Ближньопольова нанолітографія на самоорганізованих молекулярних моношарах .....	159
5.4. Ближньопольова нанолітографія на базі високоефективних зондів .....	164
<b>РОЗДІЛ 6 МЕТОДИ ФОРМУВАННЯ НАНОСТРУКТУР ЗА ПРИНЦИПОМ «ЗНИЗУ ВГОРУ»</b> .....	173
6.1. Можливості і перспективи наноімпринтної літографії .....	173
6.2. Саморегульовальні процеси створення наноструктурних об'єктів .....	186
6.3. Лазерна наносферна літографія .....	197
6.4. Двофотонна нанолітографія .....	204
<b>РОЗДІЛ 7 ДОСЯГНЕННЯ ОПТИЧНОЇ НАНОЛІТОГРАФІЇ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШОГО РОЗВИТКУ</b> .....	210
7.1. Перспективи нанолітографії в екстремальному УФ-діапазоні .....	210
7.2. Перспективи електронно-променевої літографії .....	214
7.3. Прилади електроніки та оптоелектроніки, створені з використанням наноматеріалів .....	221
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	227
<b>ПІСЛЯМОВА</b> .....	229
<b>SUMMARY</b> .....	234
<b>СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ</b> .....	238

# CONTENTS

PREFACE .....	3
LEGEND .....	5
INTRODUCTION .....	7
<b>P A R T 1 POSSIBILITIES AND PERSPECTIVES FOR DEVELOPMENT OF TECHNOLOGIES PROVIDING FORMATION OF NANODIMENSIONAL MATERIALS AND NANOSTRUCTURES .....</b>	<b>12</b>
1.1. Perspectives for improving the elemental base of informatics and optoelectronics based on nanomaterials .....	12
1.2. Varieties of nanolithographical technologies .....	19
1.3. Methods for formation of templates.....	32
1.4. Physical-and-chemical properties of nanoparticles and nanostructured surface layers.....	40
1.5. Methods for preparation of surface nanostructures .....	42
<b>P A R T 2. THERMOLITHOGRAPHIC RECORDING OF NANODIMENSIONAL STRUCTURES.....</b>	<b>54</b>
2.1. Registration of nanodimensional structures by using nonlinear photoresists .....	54
2.2. Analysis of capabilities for thermolithographic recording .....	55
2.3. Photosensitive materials for thermolithographic recording of nanodimensional structures .....	59
2.4. Non-organic photoresists based on chalcogenide vitreous semiconductors for preparation of nanodimensional structures .....	65
2.5. Technologies for creation of promising nonlinear photoresists .....	81
2.6. Analysis of requirements of optical systems in thermolithographic recording .....	86
<b>P A R T 3 METHODS OF OPTICAL NANOLITHOGRAPHY THAT ALLOW TO OVERCOME THE DIFFRACTION LIMIT .....</b>	<b>94</b>
3.1. Technology for immerse recording the nanodimensional structures.....	94
3.2. Capabilities and achievements of interferential lithography .....	98
3.3. Surface plasmon interferential nanolithography .....	108
3.4. Technology for enhancement of resolving power in optical projection lithography .....	114

## Contents

<b>P A R T 4 METHODS FOR FORMATION OF NANODIMENSIONAL STRUCTURES BY USING PROBE SCANNING MICROSCOPES</b> .....	125
4.1. Mechanical modification of surface with atomic-force microscope .....	127
4.2. Field evaporation .....	134
4.3. Nanolithography based on the method of local anode oxidation .....	135
4.4. Dip-pen lithography .....	137
<b>P A R T 5 NEAR-FIELD OPTICAL NANOLITHOGRAPHY</b> .....	143
5.1. Probes of near-field microscopes .....	143
5.2. Laser nanostructuring by using the scanning near-field optical microscope .....	148
5.3. Near-field nanolithography based on self-organized molecular nanolayers .....	159
5.4. Near-field nanolithography based on probes of high efficiency .....	164
<b>P A R T 6 METHODS FOR PREPARATION OF NANOSTRUCTURES IN ACCORD WITH THE PRINCIPLE «FROM BOTTOM TO TOP»</b> .....	173
6.1. Capabilities and perspectives of nanoimprinting lithography .....	173
6.2. Self-controlled processes in creation of nanostructures objects .....	186
6.3. Laser nanosphere lithography .....	197
6.4. Two-photon nanolithography .....	204
<b>P A R T 7 ACHIEVEMENTS OF OPTICAL NANOLITHOGRAPHY AND PERSPECTIVES FOR ITS FURTHER IMPROVEMENT</b> .....	210
7.1. Perspectives of nanolithography in the extreme UV range .....	210
7.2. Perspectives of electron-beam lithography .....	214
7.3. Facilities of electronics and optoelectronics created by using nanomaterials .....	221
CONCLUSIONS .....	227
SUMMARY IN UKRAINIAN .....	229
SUMMARY .....	234
REFERENCES .....	238