

ОПТИЧНИ СИСТЕМИ ЗА МИКРО- И НАНО-ФОКУСИРАНЕ НА БАЗАТА НА ОПТИЧНИ МАТЕРИАЛИ РАБОТЕЩИ В ИНФРАЧЕРВЕНИЯ ДИАПАЗОН

Васил Кавърджиков¹, Десислава Пашкулева¹, Иван Николов², Михаил Чурбанов³

¹Институт по механика – Българска академия на науките

²Физически факултет – Софийски университет „Св. Кл. Охридски“

³Институт по химия на високочистите вещества, Руска Академия на науките
e-mail: kavarj@imbm.bas.bg; dessip@imbm.bas.bg;

Ключови думи: Микро-оптични системи, халкогенидно стъкло, метрология на микро-леци

Резюме: Производството на микро-оптични елементи е сложна и многопланова задача. Тя започва със синтеза на оптичния материал. Следва определянето на неговите оптико-механични характеристики. Един от основните етапи е създаването на технология за производство на микро-оптични елементи. Друг важен етап е контролът и изпитанията на готовия продукт.

В работата са представени резултатите от експериментите по определяне на механичните и оптични характеристики на образци от халкогенидно стъкло. Представена е също и методика за контрол на отклонението на кривината на микро-леци произведени по съвременни технологии.

OPTICAL SYSTEMS FOR MICRO- AND NANO-FOCUSING ON THE BASIS OF OPTICAL MATERIALS APPLIED IN INFRARED AREA

Vasil Kavardzhikov¹, Dessislava Pashkouleva¹, Ivan Nikolov², Mikhail Churbanov³

¹Bulgarian Academy of Sciences, Institute of Mechanics

²Sofia University, Faculty of Physics, Dept. of Optics and Spectroscopy

³Russian Academy of Sciences, Institute of Chemistry of High Purity Substances
e-mail: kavarj@imbm.bas.bg; dessip@imbm.bas.bg;

Keywords: Micro-optical systems, chalcogenide glass, micro-lenses metrology

Abstract: The production of micro-optical elements is complex and multilayer task. It begins with the synthesis of the optical material. Optical and mechanical properties are determined after that. One important stage is the establishment of technology for the production of micro - optical elements. Another important stage is the control and testing of the finished product.

The experimental results for determination of the mechanical and optical characteristics of the samples of chalcogenide glass are presented in this report. A method for control of the micro-lens curvature produced by modern technology is also included.

Въведение

Микрооптиката [1] е голям раздел от съвременната оптиката. Тя работи в целия оптичен спектър и обхваща, както отражателната, така и дифракционната оптика. Размерите на дискретният микро-оптичен елемент са в границите – от няколко mm до десетки nm. Микрооптиката притежава значителни предимства, като високоефективно използване на светлината, изключителна гъвкавост на оптичния дизайн, създаване на прибори с по-ниско тегло и габарити, лесно производство на елементи с голяма апертура или обхващащи голяма площ.

Методите за изготвянето на микрооптика излизат от рамките на класическите оптични технологии и включват в себе си микролитографски технологии, включително електронна литография и йонноплазмени процеси, горещо пресоване при формиране на оптичните

елементи. Лазерните технологии (аблация, модификация) също така заемат все по-широк дял в производството на микрооптични елементи. Що се отнася до влакнестата оптика, тя се основава изключително на процеси на изтегляне от стопилка или чрез екструзия. Развитието на технологиите за масово производство на микро- и нано-структури е свързано, преди всичко, със съвременното развитие на фотониката и информационните технологии. Микро-лещите са основен елемент в системите за микро-фокусиране в оптичните микро-електро-механични системи (MEMS), в цифровите камери, лазерните принтери, фотокопирни и факс-апаратите [2-4]. Матриците от микро-лещи се използват в литографията, оптичните комуникационни системи, оптичните сензори и дисплеи, в съвременните оптични дискови устройства за запис на информация и др. [5-8].

Спектралния диапазон обхващащ дължините на вълната от 750 nm до 15 μm (инфрачервено лъчение) е от особен интересен тъй като е в основата на важни технически приложения. Оптичните елементи и системи, работещи в него са част от такива отрасли, като комуникационните и информационни технологии, системи за сигурност на базата на инфрачервеното детектиране, авангардни сензорни технологии, MEMS, микро-флуидните системи, спектроскопия, медицинска техника и т.н. С това не се изчерпват настоящите и бъдеще области на приложения, при постоянно нарастващите изисквания към миниатюризация, бързина на действие, ниска стойност на изделието, масово и бързо настройващо се ново производство.

От многото материали за инфрачервена микрооптика за нас интерес представляват т.н. халкогенидни стъкла [9] – две, три или четири компонентни съединения от As-S, As-Te-I, As-Te-Ge, As-Se-Te-Sb, As-Te. Този клас материали са добре изучени. Съществуват широки възможности за синтезиране и на нови 3 и 4 компонентни стъкла (GASIR™, AMTIR™). Синтезът им позволява получаването на нови материали с желани оптични и механични свойства. Основно предимство на халкогенидните стъкла в сравнение с други материали при производството на оптични микроелементи е сравнително ниската им себестойност и ниската им температура на размекване, което ги прави много подходящи при прилагането на високо ефективната технология за горещо пресоване [10].

Производството на микрооптични системи е сложна и многопланова задача. Тя започва със синтеза на оптичния материал. Следва определянето на неговите оптико-механични характеристики. Един от основните етапи е технологията за производство на микрооптични елементи. Друг важен етап е контрола и изпитанията на готовия продукт.

В института по химия на високочистите вещества към Руската Академия на Науките е разработен метод за получаване на високочисти халкогенидни стъкла и се произвеждат влакнести светодиоди от тях, с малки оптични загуби в инфрачервения диапазон. Областите на приложение на тези светодиоди са в медицинската и техническа диагностика, както и в прибори за газов контрол за екологични цели. Развитието на халкогенидните стъклени вълноводи дава възможност за интеграцията на вълноводите с оптико-електронни компоненти. Те са добра база за изграждането фотонни интегрални схеми и оптични компоненти за ИЧ-област, които ще намерят широко приложение в космическите комуникационни системи, химични и биологични оптични сензори за мониторинг на околната среда и др.

В работата са представени резултатите от експериментите по определянето на механичните и оптични характеристики на образци от халкогенидни стъкла, подготвени в Институт по химия на високочистите вещества, РАН. Механичните изпитания са направени в Института по механика, БАН, а оптичните измервания – в Института по оптични материали и технологии, БАН.

Представена е също и методика за контрола на отклонението на кривината на повърхността на сферични микро-лещи произведени по съвременни технологии като например реактивно йонно ецване [11] или горещо пресоване [10], чрез използването на атомно силов микроскоп (АСМ).

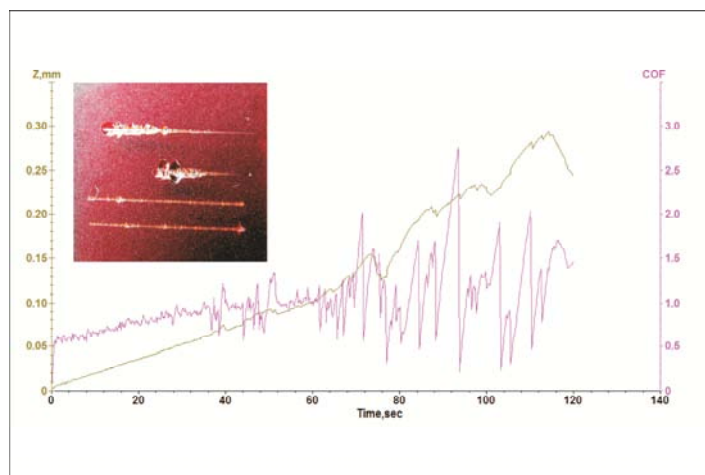
Изследване на физико-механични и спектрални характеристики на халкогенидните стъкла за инфрачервената оптика

Изследваните образци от халкогенидно стъкло (As_4S_6) са с размери: дължина и ширина съответно 12 mm и 15 mm и дебелина 3 mm.

Плътността на стъклото, от което са изрязани образците е $3,25 \text{ g/cm}^3$ при 20°C . Те бяха тествани с универсален уред за механични и трибологични изпитвания UMT-2M и уред за наноиdentация UNMT в Института по механика.

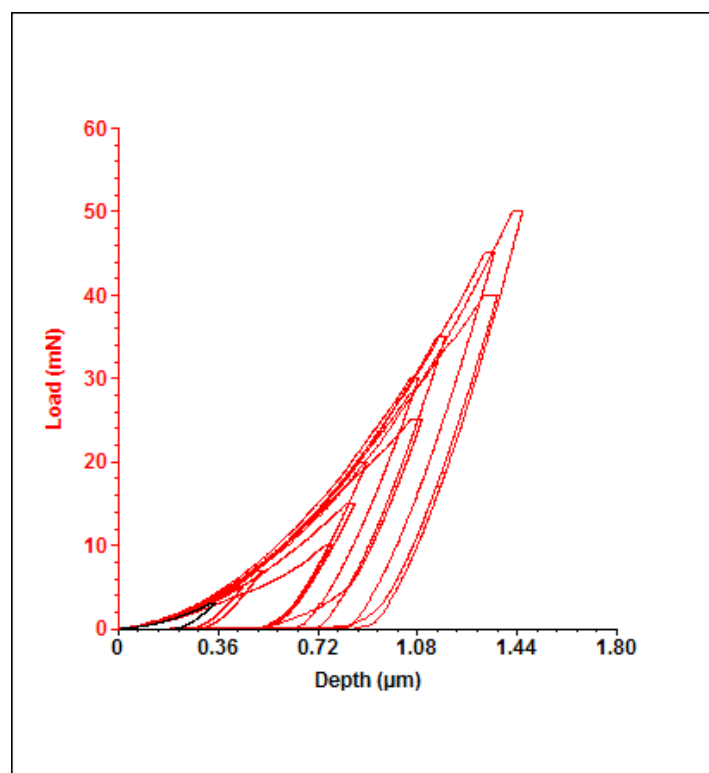
Бяха направени два теста на микро-надрасване: с постоянно (2 N) и с линейно нарастване на натоварването (0 – 4 N). Измерени бяха силата на триене F_x , нормалното

натоварване F_z и дълбочината z . На фиг. 1 са показани изследваните образци и изчисленият коефициент на триене чрез:



Фиг. 1. Тест на микро-надрасване с линейно нарастване на натоварване до 4 N

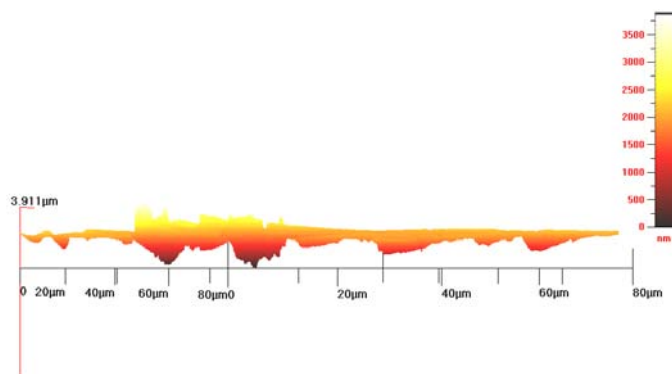
За определяне на механичните характеристики и модул на Юнг бе изпълнен тест на наноидентация чрез използване на Беркович тип индентор. Записаните по време на идентацията криви натоварване-дълбочина на проникване са представени на фиг. 2.



Фиг. 2. Наноидентация с натоварване до 50 mN

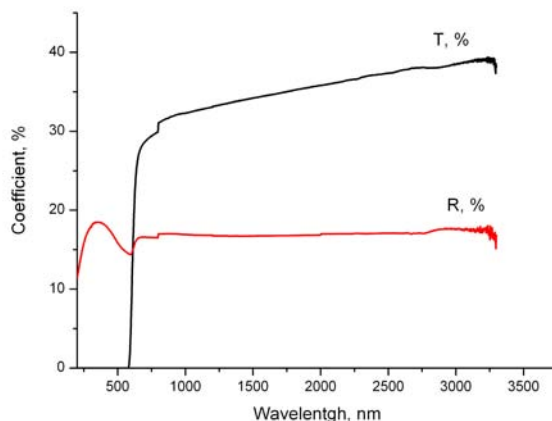
След това чрез метода на Оливър-Фар [12] са изчислени модула на еластичност и твърдостта от кривата на разтоварване, чрез определяне на контактната област. Изследваното халкогенидно стъкло има модул на Юнг 17,55 GPa и твърдост 1,48 GPa.

Веднага след идентацията отпечатъка се визуализира и охарактеризира чрез АСМ. С този уред бе измерена и грапавостта на материала преди идентацията (фиг. 3). Вижда се, че от гледна точка на изпитването за качеството на микрооптичните елементи, тези образци нямат необходимата гладка повърхност.



Фиг. 3. Блокова схема на контрол

На фиг. 4 са представени резултатите, получени при изследваните образци от халкогенидно стъкло. Коефициентите на пропускане T и отражение R стъкло са измерени в спектралния диапазон от 400 до 3500 nm със спектрофотометър Cary 5E. Графиките, представени на фиг. 4, илюстрират добрата прозрачност на халкогенидното стъкло за инфрачервената част от спектъра. Наблюдаваната трансмисия е над 30% до 3250 nm.



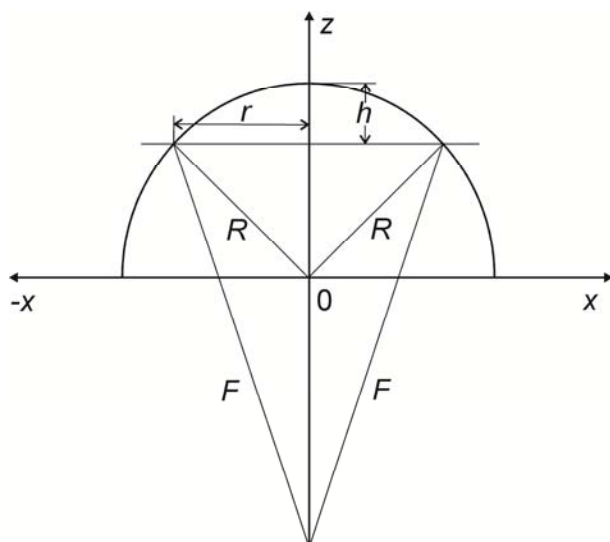
Фиг. 4. Криви на отражение и пропускане на халкогенидното стъкло

Технология за метрологичен контрол на радиуса на повърхността на микролеци

Лазерният микроинтерферометър, работещ на принципа на Твуман-Грийн, е подходящ за измерване и контрол на топологията и качеството на оптични повърхности на сферични микро-леци, които имат диаметър по-малък от 800 μm [13]. В много съвременни прибори се използват микро-леци с диаметри под 10 μm . Поради това се разработват и прилагат нано-оптични технологии за контрол на профила на радиуса на кривината на такива микро-леци. Една от тези техники използва АСМ, като средство за измерване [14]. При нея, чрез сканиране на повърхността на лещата с АСМ, се измерва нейната кривина. Профилът в няколко нейни сечения се сравнява с най-близкия профил на теоретична крива, генерирана в среда на „Матлаб“. В случая на сферична леща (фиг. 5), зависимостта на кривината на едно централно сечение на лещата, описана с параметъра z , от радиуса R на полусфера, сегмент от която е лещата, височината на лещата h , радиуса на лещата r и текущата координата x са представени с уравнението

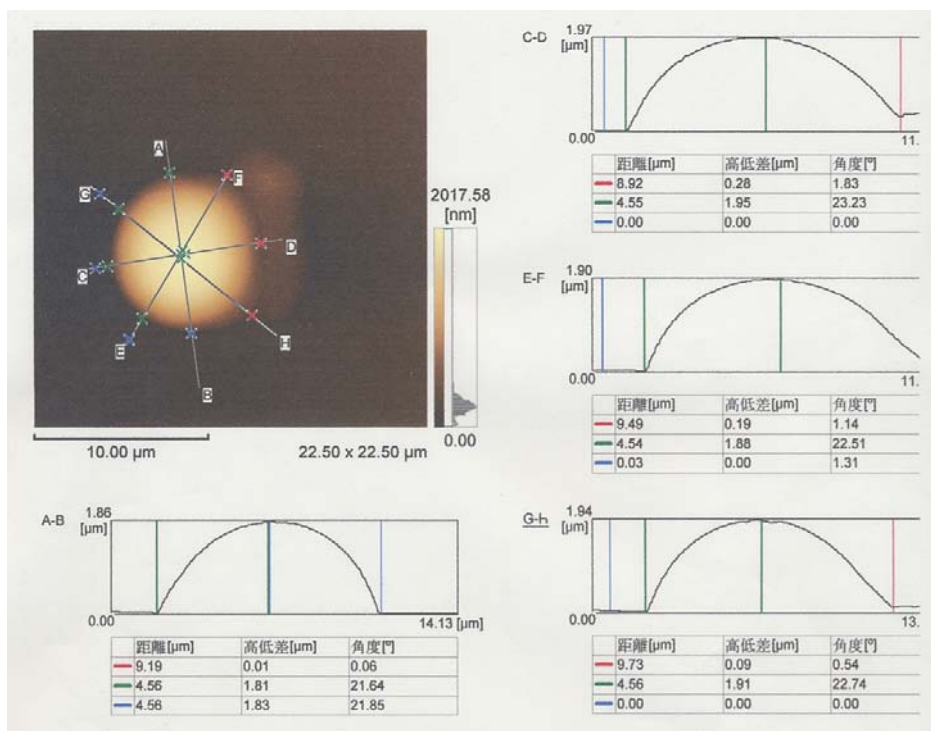
$$(1) \quad z = \sqrt{R^2 - x^2} - (R - h), \quad \text{при } x \in [-r, r]$$

Векторът \vec{h} е насочен по оста z и $h = |\vec{h}|$.



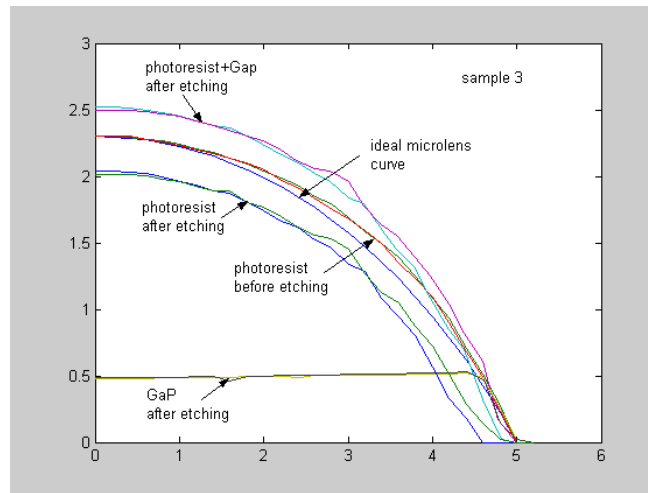
Фиг. 5. 2D представяне на кривината на сферична микролеца

На фиг. 6 са представени изображения на сферична микролеца с радиус $r = 6 \mu\text{m}$ и максимална височина $h = 2 \mu\text{m}$, получено с АСМ и профила на четири нейни централни сечения. Тази леца е една от матрицата с микролеци, създадена чрез фото-резистна технология описана в [15], върху повърхността на субстрат от GaP, преди „пренасянето“ им върху оптичния материал чрез реактивно йонно ецване.



Фиг. 6. Графично представяне на изображението на сферична микролеца

По формула (1) чрез „Матлаб“ е генерирана кривата показана на фиг. 5 със зададените параметри r и h . Резултатът от сравнението е показан на фиг. 7. Вижда се, че за тази микролеца има отклонения на получения от зададения сферичен профил.



Фиг. 7. Метрологичен контрол на микро-леца чрез АСМ

Заклучение

Изпълнените експерименти за определяне на оптико-механичните характеристики на приготвените в РАН образци от халкогенидни стъкла, дават информация нужна за учените и технолозите, които ги създават, при оптимизирането на техните свойства и качества в зависимост от технологиите за производство на оптични елементи и системи и от изискванията за техните приложения.

Представената методика за контрол на кривината на микро-леци чрез АСМ е създадена и тествана при леци с диаметри от 10 μm до 250 μm , произведени по технологията на реактивно йонно ецване от GaP в процеса на разработка на терабитова оптична памет, с участието на авторите, която приключи неотдавна. Тази методика може да се приложи и за контрола на микро-леци с различни профили и с по-големи диаметри, произведени от халкогенидни стъкла чрез горещо пресоване, за нуждите на съвременната фотоника. Освен АСМ, като измерителен уред при микро-лещите с по-големи размери, може да се използва и друг уред, работещ на принципа на сканиране като напр. лазерния конфокален микроскоп.

Литература:

1. Herzig, H. P. *Micro-Optics: Elements, Systems and Applications*. CRC Press. 1997
2. Gad-el-Hak, M. *MEMS: Design and Fabrication*. CRC Press. 2010
3. Javidi, B., F. Okano. *Three-Dimensional television, video and display technologies*. Springer. 2002
4. Kawal, S. *Handbook of optical interconnects*. Taylor&Francis Group. 2005
5. Volkel, R., H. P. Herzig, P. Nussbaum, R. Dandliker, W. B. Hugle. *Microlens array imaging system for photolithography*. *Opt. Eng.*, Vol. 38, pp. 870-878, 1999
6. Prather, D. *Design and application of subwavelength diffractive lenses for integration with infrared photodetectors*. *Opt. Eng.*, Vol. 35, pp. 3323-3330, 1996
7. Deqing, R., G. Dalton, R. Sharples, J. R. Allington-Smith, G. N. Dodsworth, D. J. Robertson. *Design and construction of a fiber bundle connector using microlenses*. *Opt. Eng.*, Vol. 40, pp. 2709-2717, 2001
8. US patent 6084848 Two-dimensional near-field optical memory head, Goto K. Tokyo, Japan 2000
9. Борисова, З. У. Халкогенидни полупроводниковые стекла. Ленингр. ун-та изд. 1983
10. Worgull, M. *Hot Embossing: Theory and Technology of Microreplication*. William Andrew Publ. 2009
11. Coburn, J. W. *Plasma etching and reactive ion etching*. American Institute of Physics Publ. 1982
12. Fischer-Cripps, A. *Nanoindentation*. Springer. 2011
13. Severi, M., P. Mottier. *Etching selectivity control during resist pattern transfer into silica for the fabrication of microlenses with reduced spherical aberration*. *Opt. Eng.*, Vol. 38, pp. 146-150, 1
14. Kavadjlov, V., K. Goto, I. Nikolov, D. Pashkuleva. *Optimization of a micro-lens fabrication technology*, *Nanoscience&Nanotechnology: Nanostructured materials and innovation transfer*, Issue 6, Heron Press, Sofia, pp. 253-255, 2006
15. Kurihara, K., I. D. Nikolov, S. Mitsugi, K. Nanri, K. Goto. *Design and Fabrication of Microlens Array for Near-Field Vertical Cavity Surface Emitting Laser Parallel Optical Head*. *Optical Review*, Vol. 10, pp. 89-95, 2003