

УДК: 621.3.049.77:620.3

О.І. Филипенко, О.О. Чала, М.І. Відешин*Харківський національний університет радіоелектроніки***ТЕХНОЛОГІЧНІ ФАКТОРИ ВИРОБНИЦТВА, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ЯКІСТЬ ПОКРИТТІВ ДЗЕРКАЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ МОЕМС-ПЕРЕМИКАЧІВ**

Проаналізовано технологічні фактори, що впливають на якість покриттів функціональних відбиваючих поверхонь МОЕМС-перемикачів.

Ключові слова: мікрооптоелектромеханічні компоненти, оптичні перемикачі, оптичні дзеркала, технології, технології виробництва, кремній, втрати, кривизна оптичних поверхонь, технологічні дефекти, спотворення сигналу, технологічний контроль.

А.И. Филипенко, Е.А. Чалая, М.И. Видешин**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ПРОИЗВОДСТВА, ЧТО ВЛИЯЮТ НА КАЧЕСТВО ПОКРЫТИЙ ЗЕРКАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ МОЭМС-ПЕРЕКОЮЧАТЕЛЕЙ**

Проанализированы технологические факторы, что влияют на качество функциональных отражающих поверхностей МОЭМС-переключателей.

Ключевые слова: микрооптоэлектромеханические компоненты, оптические переключатели, оптические зеркала, технология производства, кремний, технологические покрытия, потери, кривизна оптических поверхностей, технологические дефекты, искажение сигнала, технологический контроль.

О. Filipenko, O. Chala, M. Videshyn**TECHNOLOGICAL FACTORS OF PRODUCTION, WHICH INFLUENCE THE QUALITY OF MIRROR SURFACE COATINGS OF MOEMS TRANSFERRINGERS**

Technological factors that affect the quality of the functional reflecting surfaces of MOEMS switches are analyzed.

Keywords: mikrooptoelektromehanichni components, optical switches, optical mirrors, technology, manufacturing technology, silicon, loss, curvature of the optical surfaces, technological defects, signal distortion, technological control.

Постановка проблеми. МЕМС-технологія виготовлення оптичних дзеркал передбачає нанесення, частіше за все на кремнієву основу (в яку можуть бути додані метали в малих кількостях для додання певних властивостей), як правило, – металічних покриттів.

В якості функціональних відбиваючих поверхонь використовуються різні метали, багат шарові структури металів, силіциди металів, склоемалі, полікристалічний кремній, вуглецеві нанотрубки, полімерні й інші матеріали. Використання декількох технологічних режимів призводить до різного роду неминучих дефектів, що вносяться самою технологією виготовлення функціональних відбиваючих поверхонь МОЕМС-перемикачів.

Постановка завдань. В роботі поставлено мету: узагальнити та систематизувати відомі технологічні фактори виробництва, які можуть призвести до значних помилок в роботі системи, що характеризуються не тільки уповільненням передачі даних чи сканування, зменшенням величин потужності, що передається, та збільшенням втрат, але й спотворенням оптичного сигналу, повною або частковою втратою інформації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наскільки відомо авторам формування якісної багат шарової металізації відбиваючих дзеркальних поверхонь МОЕМС-перемикачів ґрунтується на правильному підборі матеріалів і технологічних процесів для їх виготовлення. На рис. 1 представлено структуру багат шарової металізації, яка проводиться на основі закривних електродів 7, контактів 11 до областей джерела 2 та стоку 10, сполучних провідників 5, 9 та ізолюючих шарів 4, 6.

Також полісайдні структури виготовляють осадженням плівки силіциду металу на поверхню полікремнієвої плівки. Поверхню полісайдної структури пасивують шаром двоокису кремнію (SiO₂), вирощеним шляхом сухого або вологого окислювання багатого кремнієм силіциду [1]

Плівки силіцидів тугоплавких металів можна одержати також хімічним осадженням з парової фази при взаємодії силана або дихлорсилана із хлоридом або фторидом металу. Дзеркала виготовляють на основі різних матеріалів і покривають оптичними покриттями, з високим коефіцієнтом відбиття.

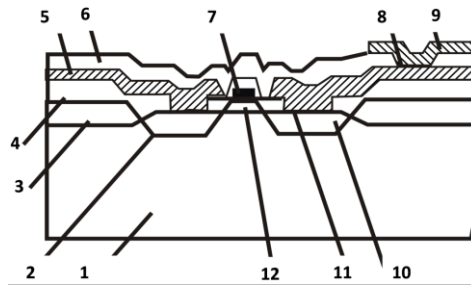


Рис. 1. - Багатшарова металізація

1 – кремнієва пластина; 2, 10 – області джерела та стоку; 3 – діоксид кремнію;
4, 6 – ізолюючий шар; 5 – сполучні провідники першого шару металізації;
7 – закривний електрод; 8 – контакт між шарами металізації; 9 – сполучні провідники другого шару металізації; 11 – контакт до області стоку; 12 – підзакривний діелектрик

Викладення основного матеріалу. Металеві покриття є найбільш поширеними покриттями функціональних відбиваючих поверхонь для оптичних компонентів, як правило найчастіше використовують: алюміній, золото, срібло, нікель та мідь [2].

Дзеркала, з нанесеними випаровуванням у вакуумі алюмінієвими покриттями на лицьовій поверхні функціональних відбиваючих покриттів, широко застосовуються в оптичних приладах внаслідок того, що вони не тьмяніють і мають високий коефіцієнт відбиття.

Ці властивості притаманні не тільки випаровуваним алюмінієвим плівкам. Міцні дзеркала з високим коефіцієнтом відображення можуть бути отримані також шляхом електролітичного полірування масивного металу. Однак для отримання високого відбивання цим способом необхідно, щоб метал мав високий ступінь очищення [3]. Протравлюється алюміній ортофосфорною кислотою або сумішшю ортофосфорних, оцтових, азотної кислот і води [4]. Покриття з алюмінію мають порівняно добру адгезію до слоїв з кремнію та його оксидів [5].

Технологія одержання плівок з алюмінію і його сплавів також накладає обмеження на їхнє використання в оптиці. Плівки, отримані випаруванням або розпиленням, погано покривають вертикальні бічні стінки контактних вікон, що викликає появу тріщин на краю сходинки оксиду. Деяке поліпшення якості досягається осадженням плівки на нагріту до $200^{\circ} - 300^{\circ} \text{C}$ пластину. Використання способу хімічного осадження з парової фази дозволяє одержувати менш дефектні плівки, однак такі плівки мають більш грубу поверхню та низький коефіцієнт відбиття в порівнянні із плівками, отриманими випаруванням і розпиленням, що створює певні труднощі при фотолітографічній обробці.

У якості недоліків плівок чистого алюмінію (також вольфраму), треба відмітити схильність до виникнення дефектів у формі крапок чи горбинок (hillocks) на поверхні плівок при термічній дії в контакті з шарами двоокису кремнію SiO_2 .

Наявність взаємної дифузії та взаємного розчинення алюмінію та кремнію при температурах осадження алюмінію, сприяє виникненню в кремнії пустот, що заповнюються алюмінієм (рис. 2) [1, 6].

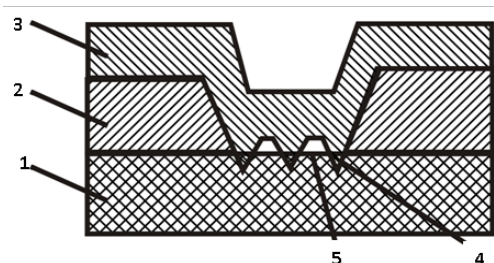


Рис. 2. - Утворення каналів взаємодії алюмінію із кремнієм

1 – кремній джерела або стоку, 2 – діоксид кремнію, 3 – алюмінієва металізація, 4 – канал взаємодії, 5 – оксид на поверхні кремнію

Додавання міді знижує дифузію атомів алюмінію по границях зерен і тим самим перешкоджає утворенню горбинок, бульбашок і порожнеч. Вміст міді в сплаві змінюється в межах 0,5 – 4 %.

Плівки сплаву алюмінію з міддю одержують випаром електронним променем, індукційним нагріванням або магнетронним розпиленням. Кращу стійкість до електроміграції мають металеві плівки, отримані електронно-променевим випаром з осадженням на окислену кремнієву пластину, нагріту до температури 310⁰ – 330 °С.

Алюміній, випаровується на лицьову поверхню дзеркал, також повинен володіти високим ступенем чистоти. Зазвичай використовується алюміній який має дві градації чистоти: технічно чистий (99%) і надчистий (99,99%).

Для визначення впливу чистоти алюмінію на якість дзеркал проводилося випаровування двох зразків (чистого і з домішками): одночасно в одній вакуумній установці з двох вольфрамових випарників, що забезпечували потрапляння алюмінію на кожну з підкладок тільки з одного випарника [7]. Значення коефіцієнтів відбиття функціональних відбиваючих покриттів, наведені в табл. 1, виміряні безпосередньо після видалення дзеркал з вакуумної камери (I) і після 8-денного впливу атмосфери (II). Дані являють собою середні значення коефіцієнта відбивання трьох дзеркал, покритих окремо [8, 9].

Таблиця 1.

Значення коефіцієнтів відбиття функціональних відбиваючих покриттів

Коефіцієнт відбивання λ , нм	Al (99,9%)		Al (99,9%)	
	R, % (I)	R, % (II)	R, % (I)	R, % (II)
460	92	89,5	89	86
530	92	89,5	89	86
570	93	88,5	91	85
600	93	88,0	90	86

Збільшення швидкості випаровування алюмінію зменшує забруднення покриття оксидами і забезпечує отримання дрібнозернистої плівки. На практиці алюмінієві дзеркала високої якості отримують шляхом швидкого випаровування після попереднього розплавлення алюмінію в тиглі.

Той факт, що висока швидкість осадження є основним фактором для виготовлення алюмінієвих плівок з високим коефіцієнтом відбивання, ілюструє рис. 3.

Дані представлені для трьох груп плівок, осаджених при різних тисках. Перша група була осаджена при тиску $(1,3 \div 2,6) \cdot 10^{-3}$ Па, друга – при $(1,3 \div 2,6) \cdot 10^{-2}$ Па, а третя – при $1,3 \cdot 10^{-1}$ Па. Всі плівки були майже непрозорі і мали товщину 60 – 70 нм.

Коефіцієнти відбиття цих плівок були виміряні в межах однієї години після виготовлення покриттів. Криві на рис. 3 показують, що швидкість осадження має великий вплив на відбиваючу здатність алюмінію у довгохвильовому діапазоні.

Збільшення часу осадження для непрозорих покриттів від 7 секунд (що ще не є оптимальною швидкістю осадження) до 180 секунд при тиску $P=(1,3 \div 2,6) \cdot 10^{-3}$ Па, призводить до зменшення коефіцієнта відбиття при $\lambda = 220$ нм від 91% до 62%, але при $\lambda = 550$ нм відбиваюча здатність зменшується тільки на 1% [8, 9].

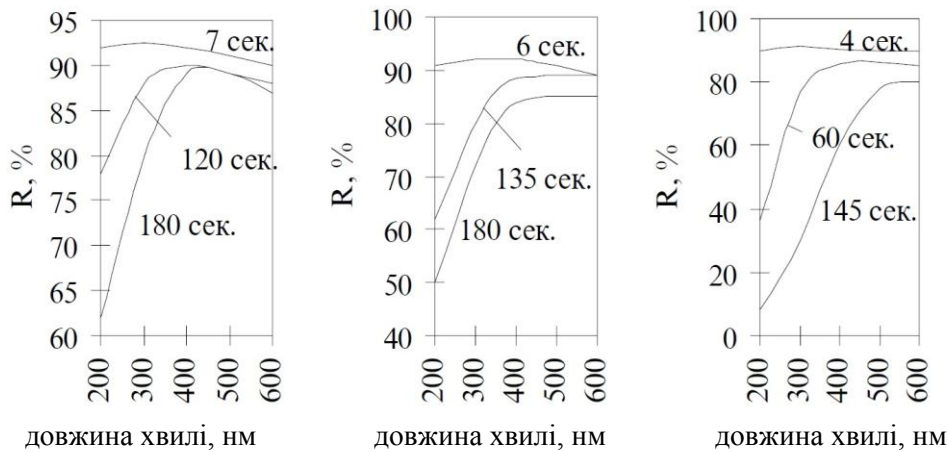
Однак плівки з дуже високим коефіцієнтом відбиття можуть бути також виготовлені при тиску $P=1,3 \cdot 10^{-2}$ Па і навіть при $P=1,3 \cdot 10^{-1}$ Па.

При високому тиску відбивання зменшується швидше зі збільшенням часу осадження, ніж це відбувається при більш низькому тиску. Непрозоре покриття, осаджене за 180 секунд при тиску $P=1,3 \cdot 10^{-2}$ Па, відображає 40% на 220 нм, а покриття, виготовлене за $P=1,3 \cdot 10^{-1}$ Па, має тільки 12% відображення на тій же довжині хвилі [10].

Із силіцидів найбільш широко застосовуються силіциди платини. Однак силіцид платини має низьку стабільність за високих температур (вище 850°C). Крім того, при нагріванні вище 350°C він взаємодіє з алюмінієм [11].

Одна з основних технічних проблем – отримання якісної оптичної поверхні на берилії.

Берилій – елемент з малою міжатомною відстанню і, введенням більшості домішок у вигляді легуючих добавок, створює значні спотворення кристалічних ґрадок.



$$a) P = (1,3 \div 2,6) * 10^{-3} \text{ Па} \quad б) P = (1,3 \div 2,6) * 10^{-2} \text{ Па} \quad в) P = 1,3 * 10^{-1} \text{ Па}$$

Рис. 3. - Вплив швидкості осадження алюмінію на відбиваючу здатність функціональних дзеркальних поверхонь

Існує технологія [12, 13] отримання конструкційних скляних покриттів на виробках діаметром до 1000 мм, що не містять дефектів у вигляді тріщин і газових бульбашок, здатних піддаватися обробці шліфуванням і поліруванням та зберігають свою цілісність при заданих впливах динамічних навантажень і перепадів температур [14].

Молібден – якісний матеріал для дзеркал. Він найбільш довговічний у порівнянні з алюмінієм та міддю, і може бути рекомендований для промислового застосування, абразивні і пилові впливи можуть викликати гострі проблеми з іншими типами дзеркал.

Молібден характеризується високою відбивною здатністю, низьким тепловим розширенням і високою твердістю. Відбивна здатність дзеркал з молібдену без покриття на довжині хвилі $10,6 \text{ мкм} > 98\%$, так що ці дзеркала застосовують як з відбиваючим покриттям, так і без нього.

Молібденові дзеркала без покриття представляють інтерес в оптичних системах, де відбивна здатність не є першорядним, але де важлива довговічність.

Функціональна поверхня молібденового дзеркала досить довговічна і витримує менш кваліфіковану і більш грубу очистку, ніж, наприклад, срібне покриття, яке вимагає захисту [15].

На відбиваючих функціональних поверхнях у якості дзеркальної поверхні на кремнієвій підкладці можна використовувати не тільки металеві, а й напівпровідникові матеріали.

Дуже цікавим та перспективним є використання германію – типового напівпровідника сіро-білого кольору з металевим блиском.

На рис. 4 показано СТМ-зображення (тунелюючій скануючий мікроскоп) піраміди, що утворена атомами германія на поверхні кремнію. Довжина піраміди 10 нм, висота 1,5 нм (рисунок витягнуто по вертикалі для більш чіткого зображення деталей поверхні піраміди). Піраміда складена з закруглених елементів, кожен із яких представляє собою атом германію.

Така піраміда утворюється самовільно, без зовнішніх технологічних стимулювань за декілька секунд, в результаті процесу названого «самозбирання атомів».

Як тільки на кристалічній поверхні кремнію осаджують достатню кількість атомів германія, вони починають взаємодіяти один з одним, в результаті чого спонтанно формуються структури типу піраміди.

Така схильність деяких матеріалів до утворення наноструктур самозбиранням атомів є одним з головних напрямів досліджень у сучасній наноауці.

Вона має на меті – вивчення механізмів керування збирання для того, щоб отримувати з атомів на поверхнях матеріалів більш складні «керовані» за формою структури [16].

У розглянутих технологічних процесах виготовлення багаточислової металізації функціональних відбиваючих поверхонь використовується діоксид кремнію.

На практиці застосовують також і інші матеріали: нітрид кремнію (Si_3N_4), а також полімерний матеріал (полімід) [1, 16, 17].

Багаточислова металізація – складна структура, тому необхідно обмежувати термічні й силові впливи при виконанні складальних операцій для запобігання ушкодженням.

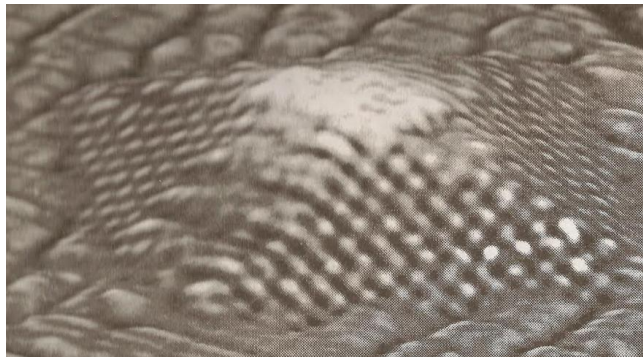


Рис. 4. - Зображення з СТМ квантової крапки, що утворена самозбиранням атомів – германієва піраміда

Розрізняють допустимі та недопустимі дефекти технологічних покриттів відбиваючих дзеркальних поверхонь МЕМС-компонентів (рис. 5), але для оптичних компонентів наявність навіть допустимих дефектів поверхонь таких, як «крапка» чи «подряпина» грає визначальну прямо пропорційну роль у величині втрат.

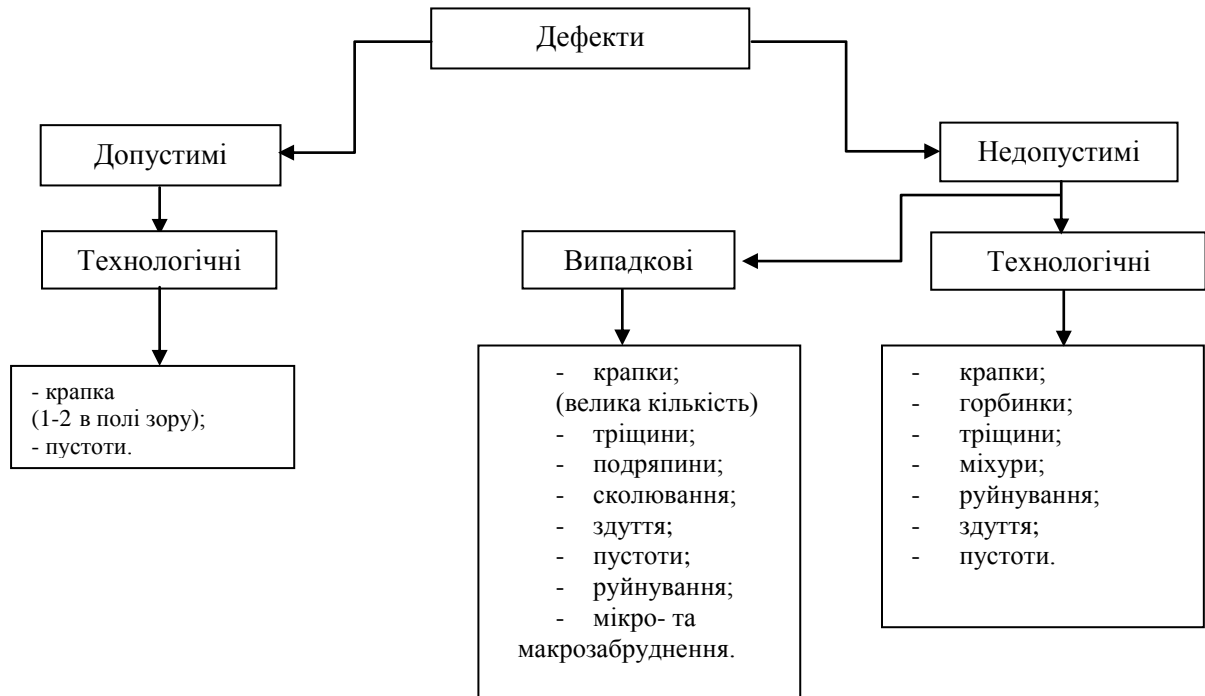


Рис. 5. - Схема технологічних дефектів функціональних відбиваючих дзеркальних поверхонь МОЕМС-перемикачів

Висновки.

Перераховані морфологічні типи дефектів функціональних відбиваючих дзеркальних покриттів оптичних дзеркал не вичерпують усього різноманіття природи. Тільки провівши повний цикл технологічних, кліматичних і ресурсних випробувань можна розширювати перелік технологічних типів дефектів.

Використання MEMS-оптичних перемикачів є альтернативним підходом до мініатюризації і поліпшення характеристик апаратури зв'язку, що обумовлює актуальність дослідження можливостей їх застосування і поліпшення існуючих характеристик [18, 19].

Для отримання виробів з високоточними заданими електрофізичними та оптичними параметрами, безвідмовною, довгостроковою, стабільною, коректною роботою в часі, а також високою надійністю окремих компонентів і вузлів необхідні: високоточний контроль якості функціональних відбиваючих покриттів для МЕМС-оптичних перемикачів, мінімізація часу

перебування їх в безвакуумному середовищі зі створенням спеціального технологічного мікроклімату, використання герметичного обладнання для транспортування та складальних операцій, ретельне очищення виробів від забруднень та високоточне полірування на всіх технологічних етапах виробництва і технологічного, операційного, приймального, суцільного, вимірювального контролю та комплексу організаційно-технічних заходів, спрямованих на забезпечення виробництва продукції із заданим рівнем якості у заданих обсягах.

Список використаних джерел:

1. Мікросистемна техніка та нанотехнології [Текст]: монографія/ І. Ш. Невлюдов, В. А. Палагін./ Київ НАУ, 2017.- 528 с.
2. Чалає Е.А., Влияние поляризационных эффектов на характеристики оптических переключателей [Текст]: Матеріали Всеукраїнської науково-практичної Internet-конференції «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у виробництві та світі: стан, досягнення, перспективи розвитку», м. Черкаси., 2015.- с. 49 – 51.
3. Wernick S. Electrolytic polishing and bright plating of metals, Alvin Redman, London, 1948, p. 67.
4. Черняев, В. Н. Технология производства интегральных микросхем [Текст] / В. Н. Черняев. - М.: Энергия, 1977. - 375 с.
5. В.Ю. Киреев Технология микроэлектроники. Химическое осаждение из газовой фазы [Текст]: В.Ю. Киреев, А.А. Столяров, Москва: Техносфера, 2006. – 192 с.
6. Handbook multilevel metallization for integrated circuits: materials, Technology and applications/ ed. by S.R. Wilson? C.J. Tracy, J.L. Freeman. Noyes Publications Ridge N.J., USA, 1993.
7. Holland L., Williams B.J. J. // Sci. Instrum., v. 32, 1955, p. 287.
8. Андреев С.В., Губанова Л.А., Исследование оптических постоянных металлов, Оптические и лазерные технологии, сборник статей, Санкт-Петербург, 2001, с. 74-83.
9. Андреев С.В., Губанова Л.А., Определение оптических постоянных металлических слоев, Оптические и лазерные технологии, сборник статей, Санкт-Петербург, 2001, с. 198-205.
10. McCrackin F.L., Passaglia E., Stromberg R.R., Steinberg H.L. // J. Res. Nall. Bur. Std., 76A, 1993, p. 363.
11. Handbook of Semiconductor Interconnection Technology/ ed. by G.C. Schwartz, K.V. Srikrishnam and A. Bross. Marceii Dekker Inc., N.Y. USA, 1998.
12. Любарский С.В. Зеркала из нетрадиционных для оптики материалов [Текст] / С.В. Любарский // Оптический журнал. 1996. № 4. С. 33-39.
13. Сизенев В.С. Оптические свойства полированного бериллия в условиях воздействия факторов космического пространства [Текст] / В.С. Сизенев, И.Л. Струля, А.В. Григорьевский, В.М. Просвириков, В.Я. Менделеев, С.Н. Сковородко // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. 2010. № 1. С. 21-27.
14. Андреев С.В., Карасев Н.Н., Определение оптических постоянных тонких металлических покрытий по спектрофотометрическим измерениям [Текст]: НТКППС, СПБИТМО (ТУ), тезисы докладов, часть 1, Санкт-Петербург, 2000, с. 41-42.
15. Производственная компания ООО «Электростекло». [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.elektrosteklo.ru>.
16. M.C. Rocco, W.S Bainbridge, B. Tonn, and G. Whitesides, eds. 20013. Converging knowledge, technology, and society: Beyond convergence of nano-bio-cognitive technologies. Dordrecht, Heidelberg, New York, London, Springer.
17. Ефимов, Н. Е. Микроэлектроника: физические и технологические основы, надежность [Текст]: учеб. пособие для приборостроит. спец. вузов. / Н. Е. Ефимов, Н. Я. Козырев, Ю. Н. Горбунов. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Высш. шк., 1996. - 404 с.
18. Филипенко О.І., Чала О.О. Конструктивно-технологічні фактори втрат в оптичних перемикачах на основі MOEMS-компонентів, [Текст]: Міжнародна науково-практична конференція «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи», 10-16 березня 2014 року, Київ, Україна.
19. Чалає Е.А. Потери в оптических микрзеркалах [Текст]: Матеріали 19-го Міжнародного молодіжного форуму «Радіоелектроніка та молодь в ХХІ сторіччі», Міжнародна конференція «Автоматизовані системи та комп'ютеризовані технології радіоелектронного приладобудування», Том 2, 20-22 квітня, 2015 року, Харків, Україна.

Рецензенти

1. **Сіногін А.М.** професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій автоматизації та мехатроніки, д.т.н., доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки.
2. **Куліш С. М.**, доцент кафедри виробництва радіоелектронних систем літальних апаратів, к.т.н., доц. Харківський авіаційний інститут ім. М.С.Жуковського.

Стаття надійшла до редакції 15.03.2017