

**PREPARATION OF METAL–DIELECTRIC–SEMICONDUCTOR
STRUCTURES BASED ON METAL OXIDE THIN FILMS AND
THEIR PHYSICAL PROPERTIES**

Solijonov Davronbek Otabek ugli

Master's Student, Andijan State University

Gulomov Bakhtiyor Dilmurod ugli

PhD, Andijan State University

A'zamjonova Gulyora Nodirbek qizi

Master's Student, Namangan State University

e-mail: solijonovdavronbek38@gmail.com

Abstract

This article presents a scientific analysis of the fabrication technology and physical properties of metal–insulator–semiconductor structures based on metal oxide thin films. The functional roles of transparent and semiconducting oxides such as ZnO, TiO₂, SnO₂, and In₂O₃, as well as high-k dielectrics including Al₂O₃, HfO₂, and ZrO₂, are considered for MIS/MOS structures. Magnetron sputtering, sol-gel/spin-coating, chemical deposition, and atomic layer deposition are comparatively discussed as key routes for metal oxide film formation. Film thickness, surface morphology, crystal structure, interface states, oxygen vacancies, dielectric permittivity, leakage current, capacitance–voltage, and current–voltage characteristics are identified as the main parameters determining the quality and reliability of MIS structures. The study emphasizes the importance of thickness uniformity, cleanroom conditions, repeated measurements, measurement uncertainty, and normalization of electrical parameters to the electrode area for obtaining reproducible and internationally comparable results.

Keywords: metal oxide thin film, MIS structure, MOS, high-k dielectric, ZnO, TiO₂, HfO₂, Al₂O₃, surface morphology, interface states, C–V characteristics, I–V characteristics.



Аннотация

Mazkur maqolada metalloksid yupqa plyonkalar asosida metall–dielektrik–yarimo‘tkazgich (MDY, xalqaro adabiyotlarda MIS/MOS) tuzilmalarni tayyorlash texnologiyasi va ularning fizik xossalari ilmiy jihatdan tahlil qilindi. Tadqiqotda ZnO, TiO₂, SnO₂, In₂O₃ kabi shaffof va yarimo‘tkazgich oksidlar hamda Al₂O₃, HfO₂, ZrO₂ singari high-k dielektriklarning MDY tuzilmalardagi funksional vazifasi ko‘rib chiqildi. Metalloksid qatlamlarni shakllantirishda magnetron purkash, sol-gel/spin-coating, kimyoviy cho‘ktirish va atom qatlamli cho‘ktirish texnologiyalarining imkoniyatlari qiyosiy baholandi. Qatlam qalinligi, sirt morfologiyasi, kristall tuzilma, interfeys holatlari, kislorod vakansiyalari, dielektrik singdiruvchanlik, sizib o‘tuvchi tok, C–V va I–V xarakteristikalar MDY tuzilma sifatini belgilovchi asosiy omillar sifatida izohlandi. Natijalarning ishonchliligini ta’minlash uchun qalinlik bir jinsliligi, toza xona sharoiti, takroriy o‘lchovlar, o‘lchov noaniqligi va elektr parametrlarni elektrod yuzasiga nisbatan normalashtirish zarurligi asoslandi.

Kalit so‘zlar: metalloksid plyonka, MDY tuzilma, MIS, MOS, high-k dielektrik, ZnO, TiO₂, HfO₂, Al₂O₃, sirt morfologiyasi, interfeys holatlari, C–V xarakteristika, I–V xarakteristika.

Аннотация

В статье научно проанализированы технология формирования металл–диэлектрик–полупроводниковых структур на основе тонких металлоксидных плёнок и их основные физические свойства. Рассмотрены функциональные особенности прозрачных и полупроводниковых оксидов ZnO, TiO₂, SnO₂, In₂O₃, а также high-k диэлектриков Al₂O₃, HfO₂ и ZrO₂ в МДП/MIS/MOS-структурах. Проведена сравнительная оценка методов магнетронного распыления, золь-гель/spin-coating технологии, химического осаждения и атомно-слоевого осаждения. Показано, что толщина слоя, морфология поверхности, кристаллическая структура, интерфейсные состояния, кислородные вакансии,



диэлектрическая проницаемость, ток утечки, $C-V$ и $I-V$ характеристики являются ключевыми параметрами качества МДП-структур. Обоснована необходимость контроля однородности толщины, чистоты технологической среды, повторяемости измерений, метрологической неопределённости и нормирования электрических параметров по площади электрода.

Ключевые слова: металлоксидная плёнка, МДП-структура, MIS, MOS, high-k диэлектрик, ZnO, TiO₂, HfO₂, Al₂O₃, морфология поверхности, интерфейсные состояния, $C-V$ характеристика, $I-V$ характеристика.

Kirish

Металлоксид yupqa plyonkalar zamonaviy mikroelektronika, optoelektronika, sensorika va energiya qurilmalarida muhim funksional qatlam sifatida keng qo'llaniladi. Ularning keng taqiqlangan zona, yuqori optik shaffoflik, kimyoviy va termik barqarorlik, boshqariladigan elektr o'tkazuvchanlik hamda dielektrik xossalarga ega bo'lishi elektron qurilmalar konstruktsiyasida yangi imkoniyatlar yaratadi [1–3]. Ayniqsa metall–dielektrik–yarimo'tkazgich tuzilmalar zamonaviy yarimo'tkazgich texnologiyasining asosiy elementlaridan biri bo'lib, ular kondensator, tranzistor darvoza dielektrigi, fotodetektor, gaz sensori va xotira elementi sifatida xizmat qiladi.

MDY tuzilma odatda metall elektrod, dielektrik metalloksid qatlam va yarimo'tkazgich taglikdan iborat bo'ladi. Bunday tizimda metalloksid qatlam elektr maydonni boshqaruvchi dielektrik to'siq, sirtni passivlashtiruvchi himoya qatlam yoki ayrim hollarda optik faol yarimo'tkazgich qatlam vazifasini bajaradi. ZnO, SnO₂, In₂O₃, TiO₂, NiO va CuO kabi oksidlar yarimo'tkazgich hamda shaffof optik material sifatida, Al₂O₃, HfO₂ va ZrO₂ esa yuqori sifatli dielektrik qatlamlar sifatida alohida ahamiyatga ega [2,4].

Tadqiqotning dolzarbligi shundaki, MDY tuzilmalarning elektr va optik xossalari faqat tanlangan materialga emas, balki plyonkaning qalinligi, morfologiyasi, kristall tuzilishi, donachalar o'lchami, kislorod vakansiyalari, interfeys holatlari va tayyorlash



texnologiyasiga ham kuchli bog'liq. Qatlamdagi mikro- va nanoo'lchamli nuqsonlar sizib o'tuvchi tokning ortishiga, C-V xarakteristikalarda histerezis paydo bo'lishiga, dielektrik teshilish kuchlanishining pasayishiga va qurilmaning uzoq muddatli barqarorligi susayishiga olib kelishi mumkin [1,5].

Ushbu maqolaning maqsadi metalloksid plyonkalar asosida MDY tuzilmalarni tayyorlashning ilmiy-texnologik asoslarini yoritish, ularning fizik xossalarini belgilovchi omillarni tahlil qilish hamda natijalarni OAK ro'yxatidagi ilmiy jurnallar talablariga yaqin rasmiylashtirish mezonlarini ko'rsatishdan iborat.

Adabiyotlar tahlili

So'nggi yillarda high-k dielektrik materiallar mikroelektronika va CMOS texnologiyalarida SiO₂ qatlamining fizik cheklovlarini bartaraf etuvchi muhim yo'nalish sifatida rivojlanmoqda. Robertson va Wallace tomonidan ko'rsatilganidek, HfO₂, ZrO₂, Al₂O₃ va TiO₂ kabi metalloksid dielektriklar yuqori sig'imni saqlagan holda tunnel tokini kamaytirish imkonini beradi [1]. Bu xususiyat MDY va MOS tuzilmalarda darvoza dielektrigining ishonchliligini oshirishda muhim omildir.

Spencer va hammualliflar transparent conducting and semiconducting oxides tizimlarida ZnO, SnO₂, In₂O₃, NiO, CuO va Al₂O₃ kabi oksidlarning kristall tuzilishi, elektron zona diagrammasi va optoelektronik xossalarini batafsil tahlil qilgan [2]. Ushbu tadqiqotlar metalloksid qatlamning bandgap qiymati, tashuvchilar konsentratsiyasi va defekt holatlari qurilma parametrlariga bevosita ta'sir qilishini ko'rsatadi.

Metalloksid plyonkalarni eritma asosida olish masalasi Cochran va hammualliflar ishlarida ko'rib chiqilgan. Ularning natijalariga ko'ra, solution processing, xususan, metall nitrat prekursorlari asosidagi sol-gel va spin-coating usullari arzon, katta yuzali va nisbatan past haroratli texnologiya sifatida elektronika hamda energiya qurilmalarida qo'llanishi mumkin [3]. Biroq bunday usullarda termik ishlov, organik qoldiqlarni chiqarish va sirt bir jinsliligini ta'minlash muhim texnologik shart bo'lib qoladi.



MDY kondensatorlarning C–V xarakteristikalarini tahlil qilishda Hiraiwa va hammualliflar keng taqiqlangan zonali yarimo‘tkazgichlarda interfeys holatlari va chuqur darajali nuqsonlarning o‘lchov natijalariga ta’sirini ko‘rsatgan [5]. Bu holat C–V natijalarni talqin qilishda chastota, yoritish sharoiti, harorat va kuchlanish skanerlash yo‘nalishini aniq ko‘rsatish zarurligini tasdiqlaydi.

Tadqiqot metodologiyasi

Maqola analitik-tahliliy yondashuvga asoslangan bo‘lib, unda metalloksid plyonkalar asosidagi MDY tuzilmalarning material tanlovi, texnologik shakllanishi va fizik parametrlarini baholash mezonlari umumlashtirildi. Metodologik jihatdan tahlil uch bosqichda olib borildi: birinchi bosqichda metalloksid materiallarning dielektrik va yarimo‘tkazgich xossalari o‘rganildi; ikkinchi bosqichda plyonka olish texnologiyalari solishtirildi; uchinchi bosqichda strukturaviy, morfologik va elektr o‘lchovlar orqali MDY tuzilma sifatini baholash mezonlari ishlab chiqildi.

Metalloksid plyonka sifatini baholash uchun XRD orqali kristall faza va donacha o‘lchami, SEM yoki AFM orqali sirt morfologiyasi, ellipsometriya yoki profilometriya orqali qalinlik, UV–Vis spektroskopiya orqali optik yutilish va taqiqlangan zona, C–V hamda I–V o‘lchovlari orqali dielektrik va elektr parametrlar aniqlanishi maqsadga muvofiq. O‘lchovlar kamida 3–5 ta namunada takrorlanib, natijalar o‘rtacha qiymat va standart og‘ish bilan berilishi ilmiy ishonchlilikni oshiradi.

1-jadval. MDY tuzilma tayyorlash bosqichlari va ilmiy-texnologik talablar

Jarayon bosqichi	Ilmiy-texnologik talab
Taglik tayyorlash	Organik, ion va chang aralashmalarni kamaytirish; deionizatsiyalangan suv, azot oqimi va zarur hollarda plazma/UV-ozon ishlovidan foydalanish.



Plyonka cho'ktirish	Qalinlik, harorat, bosim, kislorod ulushi, quvvat va cho'ktirish vaqtini aniq nazorat qilish.
Metall kontakt hosil qilish	Elektrod materiali, maydoni, geometriyasi va kontakt olish usulini ko'rsatish.
Strukturaviy tahlil	XRD, Raman, SEM yoki AFM natijalarini miqdoriy ko'rsatkichlar bilan berish.
Elektr o'lchovlar	C–V va I–V xarakteristikalarini chastota, harorat, kuchlanish diapazoni va skanerlash yo'nalishi bilan ko'rsatish.
Natijalarni rasmiylashtirish	O'rtacha qiymat, standart og'ish, takroriy o'lchovlar soni va o'lchov noaniqligini keltirish.

Natijalar va muhokama

1. Metalloksid plyonkalar asosidagi MDY tuzilmalarning fizik mohiyati

MDY tuzilmada tashqi kuchlanish metall elektrodga berilganda dielektrik metalloksid qatlam orqali yarimo'tkazgich sirtiga elektr maydon ta'sir qiladi. Bu maydon zaryad tashuvchilarning sirt yaqinida qayta taqsimlanishiga sabab bo'ladi va akkumulyatsiya, kambag'allashish yoki inversiya holatlarini yuzaga keltiradi. Ushbu holatlar C–V xarakteristika shakliga, yassi zona kuchlanishiga, chegaraviy kuchlanishga va qurilmaning ish rejimiga bevosita ta'sir qiladi.

Ideal holatda oksid qatlam sig'imi quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$C_{ox} = \epsilon_0 \epsilon_r A / t_{ox}$$

bu yerda C_{ox} — oksid qatlam sig'imi, ϵ_0 — vakuum dielektrik doimiysi, ϵ_r — metalloksid materialning nisbiy dielektrik singdiruvchanligi, A — elektrod yuzasi, t_{ox}



— dielektrik qatlam qalinligi. Ifodadan ko‘rinadiki, qatlam qalinligi kamayganda yoki dielektrik singdiruvchanlik ortganda sig‘im oshadi. Ammo qalinlik haddan tashqari kichrayganda tunnel toki va dielektrik teshilish ehtimoli ortadi. Shu sababli high-k materiallardan foydalanish MDY tuzilmalarda muhim texnologik yechim hisoblanadi.

2. Metalloksid plyonkalarini tayyorlash texnologiyalari

Metalloksid plyonkalar fizik va kimyoviy usullar orqali tayyorlanadi. Magneton purkash sanoat miqyosida keng qo‘llanilib, yuqori yopishuvchanlik va nisbatan bir jinsli qoplama olish imkonini beradi. Jarayon davomida nishon materiali, plazma quvvati, ishchi gaz bosimi, kislorod ulushi va taglik harorati qatlamdagi defektlar zichligi hamda kristallanish darajasini belgilaydi.

Sol-gel va spin-coating usullari eritma kimyosiga asoslangan bo‘lib, arzonligi, katta yuzali tagliklarni qoplash imkoniyati va tarkibni nisbatan oson boshqarish bilan ajralib turadi. Biroq ushbu usullarda plyonka zichligi, yoriqlar hosil bo‘lishi, organik qoldiqlar va termik ishlov harorati alohida nazorat qilinishi kerak. Atom qatlamli cho‘ktirish (ALD) esa atom darajasida qalinlik nazorati, yuqori konformlik va murakkab geometriyali yuzalarda bir jinsli qatlam hosil qilish imkoniyati bilan high-k dielektriklar uchun eng istiqbolli texnologiyalardan biridir [6].

3. Qalinlik, sirt morfologiyasi va bir jinslilik

Metalloksid qatlam qalinligi MDY tuzilmaning sig‘imi, elektr maydoni, sizib o‘tuvchi toki va dielektrik teshilish kuchlanishini belgilovchi asosiy geometrik parametrdir. Shuning uchun qalinlik faqat nominal qiymat sifatida emas, balki o‘lchov noaniqligi bilan birga berilishi lozim. Masalan, “qatlam qalinligi 50 nm” degan bayon o‘rniga “qatlam qalinligi 50 ± 2 nm” shakli ilmiy jihatdan to‘g‘riroq hisoblanadi.

Qalinlik bo‘yicha bir jinslilik quyidagi nisbat orqali baholanishi mumkin:

$$U_t = [(t_{\max} - t_{\min}) / (2\bar{t})] \times 100\%$$

bu yerda U_t — qalinlik notekisligi, t_{\max} va t_{\min} — qatlamning maksimal va minimal qalinligi, \bar{t} — o‘rtacha qalinlik. Bir jinslilikning yomonlashishi lokal elektr



maydonlarning kuchayishiga, kontakt sohalarida tok zichligining notekis taqsimlanishiga va dielektrik teshilish kuchlanishining pasayishiga olib keladi.

Sirt morfologiyasi AFM yoki SEM yordamida baholanadi. MDY tuzilmalarda sirt g'adir-budurligining ortishi metall–oksid interfeysida lokal maydonlarni kuchaytiradi, bu esa sizib o'tuvchi tokni oshiradi va C–V xarakteristikalarda histerezis paydo bo'lishiga sabab bo'ladi. Shu bois sirtning o'rtacha g'adir-budurligi (S_a) va kvadratik o'rtacha g'adir-budurligi (S_q) kabi parametrlar maqolada albatta keltirilishi kerak.

4. High-k dielektriklar va ekvivalent oksid qalinligi

SiO₂ qatlamining fizik qalinligi kamaytirilganda tunnel toki keskin ortadi. Bu muammoni bartaraf etish uchun HfO₂, ZrO₂, Al₂O₃ va TiO₂ kabi high-k dielektriklar qo'llaniladi. Ular fizik jihatdan qalinroq bo'lsa ham, elektr jihatdan ingichka SiO₂ qatlamiga ekvivalent sig'im hosil qila oladi. Ekvivalent oksid qalinligi quyidagicha aniqlanadi:

$$EOT = (\kappa_{SiO_2} / \kappa_{high-k}) \cdot t_{high-k}, \quad \kappa_{SiO_2} \approx 3.9$$

Masalan, HfO₂ qatlami 10 nm qalinlikda bo'lib, uning dielektrik doimiysi taxminan 20 deb olinsa, EOT qiymati 1,95 nm atrofida bo'ladi. Bu holat yuqori sig'imni saqlagan holda sizib o'tuvchi tokni kamaytirishga xizmat qiladi. Ammo material tanlashda faqat dielektrik doimiy emas, balki taqiqlangan zona kengligi, energetik to'siq balandligi, kislorod vakansiyalari, termik barqarorlik va yarimo'tkazgich bilan interfeys sifati ham hisobga olinishi zarur [1].

5. Interfeys holatlari va elektr xossalar

Real MDY tuzilmalarda eng muhim muammolardan biri metalloksid–yarimo'tkazgich chegarasida yuzaga keladigan interfeys holatlaridir. Interfeys holatlari yarimo'tkazgich taqiqlangan zonasida joylashgan energetik sathlar bo'lib, ular zaryad tashuvchilarni ushlab qolishi yoki qayta chiqarishi mumkin. Natijada yassi zona kuchlanishi siljiydi, C–V xarakteristikada histerezis kuzatiladi va qurilma parametrlarining vaqt bo'yicha barqarorligi pasayadi.



Elektr o‘lchovlarda tok qiymatini oddiy amper birligida berish yetarli emas, chunki turli namunalar elektrod maydoniga ega bo‘lishi mumkin. Shu sababli tok zichligi quyidagicha hisoblanadi:

$$J = I / A$$

bu yerda J — tok zichligi, I — o‘lchangan tok, A — elektrod yuzasi. Dielektrik teshilish maydoni esa teshilish kuchlanishini qatlam qalinligiga nisbatan normalashtirish orqali aniqlanadi:

$$E_{bd} = V_{bd} / t_{ox}$$

Demak, “teshilish kuchlanishi 20 V” deb yozish ilmiy jihatdan yetarli emas. Uni qatlam qalinligiga nisbatan normalashtirib, odatda MV/cm birlikda ifodalash lozim. Bu yondashuv turli qalinlikdagi va turli texnologiyalar bilan olingan namunalarni o‘zaro taqqoslash imkonini beradi.

6. Ko‘p qatlamli metalloksid dielektriklar

So‘nggi yillarda bitta metalloksid qatlam o‘rniga ko‘p qatlamli dielektrik tizimlardan foydalanish kuchaymoqda. Al_2O_3/HfO_2 , HfO_2/ZrO_2 , TiO_2/Al_2O_3 va HfO_2/Al_2O_3 kabi nanolaminat qatlamlar turli materiallarning afzalliklarini birlashtiradi. Masalan, Al_2O_3 interfeys passivatsiyasi va past sizib o‘tuvchi tok nuqtayi nazaridan qulay bo‘lsa, TiO_2 yoki HfO_2 yuqori dielektrik doimiy orqali sig‘imni oshiradi. Shuning uchun ko‘p qatlamli yondashuv sig‘im, sizib o‘tuvchi tok va interfeys barqarorligi o‘rtasida optimal muvozanatga erishish imkonini beradi.

2-jadval. Metalloksid asosidagi MDY tuzilmalarni baholash mezonlari

Parametr	Baholash mezonlari
Qatlam qalinligi	nm yoki μm da, o‘lchov noaniqligi bilan.
Qalinlik bir jinsliliigi	Bir nechta nuqtada o‘lchangan qalinliklar bo‘yicha foizda.
Sirt morfologiyasi	AFM/SEM natijalari, S_a va S_q qiymatlari bilan.



Kristall tuzilma	XRD difraktogramma, faza tarkibi va donacha o'lchami.
Optik xossalar	Yutilish spektri, shaffoflik va optik taqiqlangan zona.
C–V xarakteristika	Chastota, kuchlanish oralig'i, histerezis va yassi zona kuchlanishi.
I–V xarakteristika	Tok zichligi, sizib o'tuvchi tok va teshilish maydoni.
Takrorlanuvchanlik	Kamida 3–5 ta namunada takroriy o'lchov.
Xatolik	O'rtacha qiymat \pm standart og'ish ko'rinishida.

Xulosa

Metalloksid plyonkalar asosidagi metall–dielektrik–yarimo'tkazgich tuzilmalar zamonaviy elektronika, optoelektronika, sensorika va energiya texnologiyalari uchun muhim funksional tizim hisoblanadi. Bunday tuzilmalarda metalloksid qatlam dielektrik to'siq, yarimo'tkazgich kanal, optik faol qatlam yoki sirt passivatsiyasi vazifasini bajarishi mumkin. ZnO, TiO₂, SnO₂ va In₂O₃ kabi oksidlar shaffof va yarimo'tkazgich materiallar sifatida, Al₂O₃, HfO₂ va ZrO₂ esa high-k dielektriklar sifatida yuqori ilmiy va amaliy ahamiyatga ega.

MDY tuzilmalarning fizik xossalari qatlam qalinligi, sirt morfologiyasi, kristall tuzilma, interfeys holatlari, kislorod vakansiyalari va tayyorlash texnologiyasiga kuchli bog'liq. Ayniqsa C–V va I–V xarakteristikalar orqali sig'im, sizib o'tuvchi tok, interfeys nuqsonlari va dielektrik teshilish kabi muhim parametrlar aniqlanadi. Ilmiy jihatdan ishonchli natija olish uchun elektr parametrlar elektrod yuzasi va qatlam qalinligiga nisbatan normalashtirilishi, o'lchov sharoitlari esa aniq ko'rsatilishi lozim.



Umuman olganda, metalloksid plyonkalar asosidagi MDY tuzilmalarni tayyorlashda material tanlash, texnologik rejim, toza sirt hosil qilish, interfeys muhandisligi va metrologik nazorat birgalikda qaralishi zarur. Bunday yondashuv metalloksid asosidagi tuzilmalarni oddiy laboratoriya namunasi emas, balki yuqori ishonchlilikka ega mikroelektronik, sensor va optoelektronik qurilma elementi sifatida baholash imkonini beradi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Robertson J., Wallace R. M. High-K materials and metal gates for CMOS applications // *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2015. Vol. 88. P. 1–41. DOI: 10.1016/j.mser.2014.11.001.
2. Spencer J. A., Mock A. L., Jacobs A. G., Schubert M., Zhang Y., Tadjer M. J. A review of band structure and material properties of transparent conducting and semiconducting oxides // *Applied Physics Reviews*. 2022. Vol. 9. 011315. DOI: 10.1063/5.0078037.
3. Cochran E. A., Woods K. N., Johnson D. W., Page C. J., Boettcher S. W. Unique chemistries of metal-nitrate precursors to form metal-oxide thin films from solution: materials for electronic and energy applications // *Journal of Materials Chemistry A*. 2019. Vol. 7. P. 24124–24149. DOI: 10.1039/C9TA07727H.
4. Fortunato E., Barquinha P., Martins R. Oxide semiconductor thin-film transistors: a review of recent advances // *Advanced Materials*. 2012. Vol. 24. P. 2945–2986. DOI: 10.1002/adma.201103228.
5. Hiraiwa A., Okubo S., Ogura M., Yu F., Kawarada H. Capacitance–voltage characterization of metal–insulator–semiconductor capacitors formed on wide-bandgap semiconductors with deep dopants such as diamond // *Journal of Applied Physics*. 2022. Vol. 132. 125702. DOI: 10.1063/5.0104016.
6. George S. M. Atomic Layer Deposition: An Overview // *Chemical Reviews*. 2010. Vol. 110. P. 111–131. DOI: 10.1021/cr900056b.



7. Leskelä M., Ritala M. Atomic layer deposition chemistry: recent developments and future challenges // *Angewandte Chemie International Edition*. 2003. Vol. 42. P. 5548–5554. DOI: 10.1002/anie.200301652.
8. Kukli K., Ritala M., Leskelä M. Atomic layer deposition of high-k oxide thin films // *Journal of The Electrochemical Society*. 2000. Vol. 147. P. 222–228.
9. Nomura K., Ohta H., Takagi A., Kamiya T., Hirano M., Hosono H. Room-temperature fabrication of transparent flexible thin-film transistors using amorphous oxide semiconductors // *Nature*. 2004. Vol. 432. P. 488–492. DOI: 10.1038/nature03090.
10. Sze S. M., Ng K. K. *Physics of Semiconductor Devices*. 3rd ed. Hoboken: Wiley, 2007.
11. ASTM B487. Standard Test Method for Measurement of Metal and Oxide Coating Thickness by Microscopical Examination of Cross Section. ASTM International.
12. ISO 14644-1:2015. Cleanrooms and associated controlled environments — Part 1: Classification of air cleanliness by particle concentration.
13. ISO 25178. Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Areal. International Organization for Standardization.

