

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Transporta un mašīnzinību fakultāte

Mašīnbūves tehnoloģijas institūts

Ingūna STRAZDIŅA

Doktora studiju programmas „Aparātu inženierija” doktorante

**CAURSPĪDĪGU VADOŠU OKSĪDU VAKUUMA
NANOPĀRKLĀJUMU RAKSTURLIELUMU PĒTĪŠANA**

Nozare: Mašīnzinātne

Apakšnozare: Mašīnbūves tehnoloģija

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji:

Dr. habil. sc. ing., profesors

J.RUDZĪTIS

Dr.phys.

V.KOZLOVS

Rīga 2012

UDK 621.793(043)
St 704 c

Strazdiņa I. Caurspīdīgu vadošu oksīdu vakuuma nanopārklājumu raksturlielumu pētīšana. Promocijas darba kopsavilkums.-R.:RTU, 2012.-29 lpp.

Iespiests saskaņā ar MTI institūta 2012.gada 30.augusta lēmumu, protokols Nr. 5.

Šis darbs ir izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā „Atbalsts RTU doktora studijas īstenošanai”

PROMOCIJAS DARBS
IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI
RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2012.gada Rīgas Tehniskās universitātes Transporta un mašīnzinību fakultātē, Ezermalas ielā 6, 405.auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors, Dr.habil.phys. Jurijs Dehtjars
Rīgas Tehniskā universitāte

Profesors, Dr.habil.math. Aleksandrs Šostaks
Latvijas universitāte

Profesors, Dr.habil. Sigitas Tamulevičius
Kauņas Tehnoloģiskā universitāte, Lietuva

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis doto promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

Ingūna Strazdiņa(Paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 4 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 4 pielikumus, 62 attēlus, 7 tabulas, kopā 100 lappuses. Literatūras sarakstā ir 90 nosaukumi.

SATURS

PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS	5
Tēmas aktualitāte	5
Darba mērķis un uzdevumi	5
Pētījuma metodes un izmantotā aparatūra	5
Zinātniskā novitāte	6
Aizstāvēšanai izvirzītie pētījuma rezultāti	6
Praktiskais pielietojums	6
Darba aprobācija	6
Publikācijas	7
Promocijas darba apjoms un struktūras apraksts	8
PROMOCIJAS DARBA SATURS	9
Darbā izmantotie apzīmējumi un saīsinājumi	9
1.nodaļa LITERATŪRAS APSKATS	9
1.1. Caurspīdīgi vadoši oksīda pārklājumi	9
1.2. Vakuuma pārklājuma uznešanas metodes	10
1.3. Nanopārklājumu pētīšanas un mērīšanas metodes	12
2.nodaļa FAZILOĢIKAS MODELIS ITO PĀRKLĀJUMA ELEKTRISKĀS PRETESTĪBAS PROGNOZĒŠANAI	13
2.1. Faziloģikas izmantošana eksperimentu plānošanā	13
2.2. Eksperimentāla ITO pārklājuma (izmantojot HIPIMS barošanas avotu) virsmas pretestības prognozēšanas modeļa izstrāde	13
2.3. Datu defazifikācija un prognozēšanas modelis	15
3.nodaļa NANOPĀRKLĀJUMU UZNEŠANA, MĒRĪŠANA, ANALĪZE	15
3.1. ITO pārklājuma uznešana	15
3.2. AZO pārklājuma uznešana	21
4.nodaļa TCO NANOPĀRKLĀJUMU UZNEŠANAS EKONOMISKIE ASPEKTI	24
SECINĀJUMI UN PRIEKŠLIKUMI	26
LITERATŪRA	27

PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Pēdējos gados, attīstoties dažādiem inovatīviem elektronikas izstrādājumiem, izmantojot lokanas pamatnes, liela uzmanība tiek pievērsta jaunu caurspīdīgu, vadošu oksīdu materiālu pētījumiem. Šiem materiāliem piemīt unikālas īpašības, tie ir elektrovadoši un vienlaicīgi arī optiski caurspīdīgi, kas ir būtiski priekšnosacījumi lokanu displeju, skārienjūtīgo ekrānu un citu elektronisku izstrādājumu ražošanā. Līdz šim viens no izplatītākajiem caurspīdīgiem, vadošiem oksīda materiāliem ir bijis indija alvas oksīds, bet indija straujais cenu pieaugums un bažas par resursu nepietiekamību nākotnē liek meklēt jaunus tehnoloģiskos un alternatīvu materiālu risinājumus.

Promocijas darbā tiek pētīti abi virzieni, tiek aprakstīts risinājums indija alvas oksīda (turpmāk – ITO) pārklājuma uznešanai uz plēves, izmantojot lielas jaudas (līdz pat 8 megavatiem) impulsa magnetronu izputināšanas (High Power Impulse Magnetron Sputtering - turpmāk HIPIMS) barošanas avotu, un tiek pētīta cinka oksīda, legēta ar alumīniju (turpmāk – AZO), uznešana kā alternatīvs risinājums indija alvas oksīda aizstāšanai. Līdz ar to darba tēma šodien ir aktuāla un būtiska.

Pārklājumu pētījumos tiek izmantota ražošanas apstākļus imitējošas laboratorijas iekārta, kas nodrošina izstrādātās tehnoloģijas vieglāku pārklājuma uznešanas tehnoloģijas pārneši uz liela izmēra ražošanas iekārtām.

Darba mērķis un uzdevumi

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt un pilnveidot caurspīdīgu, vadošu oksīdu pārklājumu uznešanas procesu ražošanas apmēros. Tas ietver nepieciešamo procesa parametru un to lielumu noteikšanu indija alvas oksīda pārklājuma uznešanai uz polimēra plēves, izmantojot HIPIMS barošanas avotu un cinka oksīda pārklājumu uznešanai uz polimēra plēves, izmantojot tradicionālos barošanas avotus.

Promocijas darbā uzstādītā mērķa sasniegšanai ir izvirzīti sekojoši uzdevumi:

1. Izstrādāt indija alvas oksīda pārklājuma, kas uzputināts izmantojot HIPIMS barošanas avotu, elektriskās pretestības prognozēšanas faziloģikas modeli;
2. Atrast nepieciešamos procesa parametrus, ar kādiem var magnetroniski uzputināt indija alvas oksīdu uz polimēra plēves, izmantojot HIPIMS barošanas avotu;
3. Pilnveidot cinka oksīda, kas legēta ar alumīniju, pārklājuma uzputināšanas procesu uz polimēra plēves, izmantojot tradicionālos barošanas avotus un nodrošinot indija alvas oksīdam konkurētspējīgas pārklājuma īpašības;

Pētījuma metodes un izmantotā aparatūra

Izmantojot faziloģiku, balstoties uz promocijas darba laikā veiktajiem eksperimentālajiem pētījumiem un to laikā iegūtajiem datiem un rezultātiem, ir veikta faziloģikas modeļa izstrāde pārklājuma elektriskās pretestības prognozēšanai. Faziloģikas modeļa izstrādei un rezultātu grafiskai attēlošanai tika izmantota datorprogramma FuzzyTECH 5.54.

Pārklājumu īpašību novērtēšanai tika izmantotas sekojošas iekārtas: skenējošais elektronu mikroskops LEO 1530 (Fraunhoferas institūts, Vācija), optiskais mikroskops Leitz Metallux 3 (Fraunhoferas institūts, Vācija), 4 punktu virsmas pretestības noteikšanas iekārta – (AS SIDRABE, Latvija), Filmertrics UV20 (AS SIDRABE), Photometer Perkin Elmer Labda 950 (Fraunhoferas institūts, Vācijā), Hola mērījumu stacija, izgatavota un aprīkota Fraunhoferas inistitūtā, Vācijā, atomspēku mikroskops Asylum Research MFP-3D (Latvijas Universitātes Ķīmiskās fizikas institūts). Iespēju robežās, katrs mērījums ir veikts 3 reizes, un ir ar precizitāti $\pm 5\%$.

Zinātniskā novitāte

1. Pirmo reizi tiek izmantota faziloģika caurspīdīga vadoša oksīda pārklājuma, kas uzņests ar HIPIMS barošanas avotu uz plēves, virsmas pretestības prognozēšanai;
2. Pirmo reizi tiek atrastas likumsakarības, kas nodrošina ITO pārklājuma uznešanu uz plēves, izmantojot HIPIMS barošanas avotu rūpnieciskā mērogā;
3. Pilnveidots AZO pārklājuma uznešanas process uz plēves, kas nodrošina ITO pārklājumam līdzvērtīgas īpašības.

Aizstāvēšanai izvirzītie pētījuma rezultāti

1. Izstrādātais faziloģikas modelis caurspīdīgu vadošu oksīdu elektriskās pretestības prognozēšanai;
2. Izstrādātais pārklājuma uznešanas process indija alvas oksīda magnetronu uzputināšanai uz polimēra plēves, izmantojot HIPIMS barošanas avotu;
3. Izstrādātais pārklājuma uznešanas process cinka, kas leģēts ar alumīniju, oksīda magnetronu uzputināšanai uz polimēra plēves;

Praktiskais pielietojums

Izstrādātais faziloģikas modelis caurspīdīgu vadošu oksīdu vakuuma pārklājumu īpašību prognozēšanai, kas parāda būtiskākās tendences konkrēto parametru ietekmei uz īpašībām, ļauj ekonomēt laiku un resursus turpmāku eksperimentu plānošanai. Modelis palīdz novērst nelietderīgu pārklājumu uznešanu, izmantojot procesa parametrus, ar ko tiek prognozēta neatbilstoša pārklājuma iegūšana.

Promocijas darbā izstrādātajam procesam indija alvas oksīda magnetronu uzputināšanai uz polimēra plēves, izmantojot HIPIMS barošanas avotu, ir būtiska nozīme caurspīdīgu vadošu oksīdu pārklājumu uznešanas tehnoloģijas attīstībai ražošanā, piemēram, displeju, skārienjūtīgo ekrānu ražošanai. Efektīvāka pārklājuma uznešana, kvalitatīvāks pārklājums ir svarīgi faktori, runājot par atbilstošas tehnoloģijas izmantošanu industriālos apjomos.

Kaut arī šobrīd populārākais no caurspīdīgiem vadošiem oksīda pārklājumiem ir indija alvas oksīds, un liela daļa industriālās iekārtas ir pielāgotas šī materiāla izmantošanai, nākotnes prognozes par izsīkstošajiem indija resursiem ražotājiem liek pakāpeniski pārorientēties uz citiem līdzvērtīgiem materiāliem, kur viens no perspektīvākajiem ir cinka oksīds, kas leģēts ar alumīniju. Šī materiāla izmantošana kļūst arvien nozīmīgāka, jo izmaksas un pieejamie resursu apjomi ir pretēji indijam, līdz ar to pilnveidota tehnoloģija, kas dod iespēju izgatavot cinka oksīda pārklājumu līdzvērtīgu vai tuvu indija alvas oksīda pārklājumam, ir būtisks ieguvums vakuuma pārklājumu uznešanas industrijā, lai izgatavotu displejus, „saules baterijas”, skārienjūtīgos ekrānus un citus elektronikas izstrādājumus, kur būtisks ir caurspīdīgs vadošs pārklājums.

Darba aprobācija

Promocijas darba rezultāti ir prezentēti un apspriesti 7 zinātniski pētnieciskās konferencēs:

1. Strazdina I., Kazuss J., Macevskis E., Kozlovs V., Hydrogen influence on ITO layer sputtering on polymeric film using HIPIMS, Functional materials and nanotechnologies, Rīga, Latvija, 17.- 20.aprīlis, 2012;
2. Klykov V., Strazdina I., Kozlov V. ZnO:Al transparent conductive layers on polymer substrate, E-MRS 2011 SPRING MEETING IUMRS ICAM 2011 & E-MRS / MRS BILATERAL CONFERENCE on ENERGY, 9.-13.maijs, 2011, Nīca, Francija;

3. Klykov V., Strazdina I., Kozlov V. Deposition of ZnO:Al transparent conductive layers on polymer substrate by magnetron sputtering, Functional materials and nanotechnologies, Rīga, Latvija, 5.-8.aprīlis, 2011;
4. Strazdina I., Macevskis E., Rudzitis J., Torims T. Mechanical properties of transparent conductive oxide coating on flexible substrate, 7th International Conference on Mechatronic Systems and Materials, 7.-9.jūlijs, 2011, Kauņa, Lietuva;
5. Strazdina I., Rudzitis J. Physical properties of Gallium doped Zinc oxide coating on two different roll to roll substrates. 6th International Conference on Mechatronic Systems and Materials 2010, Opole, Polija;
6. Strazdina I. „Nanotechnology in Institute of Mechanical Engineering Technologies of Riga Technical university, Latvia” 6th International Nanotechnology Conference, no 17. līdz 20.maijs, 2010, Grenoble, Francija;
7. Kozlovs V., Mačevskis E., Strazdiņa I. Peculiarities of Metal Coating Deposition on Polymer Fabric. 1st International EJC-PISE Workshop in Riga (Latvia), 2009.gada 9.-10. jūnijs, Latvija, Rīga.

Promocijas darba rezultāti izmantoti mācību procesā, pasniedzot lekciju kursu „Nanomateriāli un nanotehnoloģijas mašīnbūvē”.

Publikācijas

Promocijas darba rezultāti ir publicēti 3 zinātniskajos žurnālos:

1. Rudzitis J., Kumermanis M., Strazdina I., Springis G. Basic principles of precision assessment of coated surfaces roughness 3D parameters // Production Engineering. – 2012. – 78.-83.lpp.;
2. Klykov V., Strazdina I., Kozlov V. Influence of hydrogen content and sputtering characteristics on the properties of ZnO:Al transparent conductive layers deposited on polymer substrate// Surface and Coating Technology. - 2011. – Nr.21. – 180.-183.lpp.;
3. Rudzitis J., Krizbergs J., Odītis I., Torims T., Kumermanis M., Muiznieks G., Strazdina I. Determination of 3D surface roughness parameters by using cross-section methods// RTU Zinātniskie rakstu krājums „Mašīnzinātne un Transports”. – 2009. - 6.sēr., 31.sēj. - 71.-74.lpp.

Promocijas darba rezultāti ir publicēti 7 konferenču tēžu krājumos:

1. Strazdina I., Torims T., Macevskis E., Kozlovs V. Scratch resistance of transparent conductive oxide film on polymer substrate// World Journal of Engineering. – 2011. - Nr.8. – 1073.-1074.lpp.;
2. Strazdina I., Kazuss J., Macevskis E., Kozlov V. Hydrogen influence on ITO layer sputtering on polymeric film using HIPIMS // Proceeding of “Functional materials and nanotechnologies” . – 2012. – 94.lpp.;
3. Klykov V., Strazdina I., Kozlov V. Deposition of ZnO:Al transparent conductive layers on polymer substrate by magnetron sputtering// Proceeding of “Functional materials and nanotechnologies”. - 2011. - 63.lpp.;
4. Strazdina I., Macevskis E., Rudzitis J., Torims T. Mechanical properties of transparent conductive oxide coating on flexible substrate // Proceeding of Mechanical properties of transparent conductive oxide coating on flexible substrate. – 2011. – 57.-58. lpp.;
5. Strazdina I., Rudzitis J. Physical properties of Gallium doped Zinc oxide coating on two different roll to roll substrates// 6th International Conference on Mechatronic Systems and Materials Abstracts. - 2010. – 190.-191.lpp.;

6. Torims T., Vilcāns J., Zariņš M., Strazdiņa I., Ratkus A. Implications of the New ISO Surface Roughness Standards on Production Enterprises // Annals of DAAAM for 2010 & Proceedings of the 21st International DAAAM Symposium "Intelligent manufacturing & automation: interdisciplinary solutions". - 2010. - 835.-836. lpp.;
7. Kozlovs V., Mačevskis E., Strazdiņa I. Peculiarities of Metal Coating Deposition on Polymer Fabric // 1st International EJC-PISE Workshop. - 2009. – CD 11pp.

Promocijas darba apjoms un struktūras apraksts

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 4 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 4 pielikumus, 62 attēlus, 7 tabulas, kopā 100 lapaspuses. Literatūras sarakstā ir 91 nosaukums.

PROMOCIJAS DARBA SATURS

Darbā izmantotie apzīmējumi un saīsinājumi

AFM – Atomic force microscope – atomspēku mikroskops;
AZO – Aluminum Zinc oxide – alumīnija cinka oksīds;
DC – direct current – līdzstrāva;
HIPIMS – High Power Impulse Magnetron Sputtering - lielas jaudas impulsa magnetronu izputināšana;
ITO – Indium Tin oxide – indija alvas oksīds;
RF – radio frekvence;
SEM – scanning electron microscope – skenējošais elektronu mikroskops;
TCO – transparent conductive oxide – caurspīdīgs vadošs oksīds;
CIGS – Copper indium gallium selenide - vara indija gallija selenīts – pusvadītāja materiāls;
LED – light-emitting diode - gaismas diode;
Scm – plūsmas mērvienība – standarta kubikcentimetrs minūtē;
MFC – masas plūsmas kontrolieris.

1.nodaļa LITERATŪRAS APSKATS

1.1. Caurspīdīgi vadoši oksīda pārklājumi

Caurspīdīgi vadoši oksīda pārklājumi pārstāv materiālu grupu, kas nodrošina normālā gadījumā savā starpā nesaistītas materiālu īpašības: augstu elektrovadītspēju un augstu gaismas caurlaidību. Elektrovadītspēju parasti nodrošina metāla izmantošana, bet metāls nav caurspīdīgs, bez kā nevar iztikt caurspīdīgs vadošs oksīda pārklājums. Savukārt caurspīdīgiem materiāliem ir zema vadītspēja un citos gadījumos tie tiek izmantoti pat kā izolatori [7]. Materiāla elektrovadītspējas īpašību var saistīt ar brīvo lādiņnesēju koncentrāciju konkrētajā materiālā. Tādiem metāliem kā zelts, sudrabs, varš, lādiņnesēju koncentrācija ir tuvu 10^{23} cm^{-3} , savukārt pusvadītājiem Si un GaAs lādiņnesēju koncentrācija ir 10^{19} cm^{-3} . Viens no populārākajiem caurspīdīgiem vadošiem oksīda pārklājumiem – indija alvas oksīds ($\text{In}_2\text{Sn}_2\text{O}_3$) ir pa vidu šīm abām grupām ar 10^{21} cm^{-3} lielu lādiņnesēju koncentrāciju [7].

Lai nodrošinātu vienlaicīgi gan elektrovadītspēju, gan optisko caurlaidību, ir jāizpildās zināmām materiāla struktūras – kristāliskā režģa prasībām. Nepieciešamā struktūra piemīt daļai oksīdu, kam struktūrā ir nepieciešamais metālu katjona veids, izvietojums un koncentrācija, kā arī pašā struktūrā konkrētu iekšējo defektu vai piejaukumu (lēģēšanai) izmantošanas rezultātā radīto defektu esamība. Biežāk izmantotie caurspīdīgi vadoši oksīda materiāli ir lēģēts In_2O_3 , lēģēts SnO_2 , lēģēts ZnO un lēģēts CdO [13].

Visplašāk izmantotais caurspīdīgs vadošs oksīda pārklājuma materiāls ir indija oksīds, kas lēģēts ar alvu, tā saucamais, indija alvas oksīds jeb ITO. Bet pēdējo gadu laikā ir parādījušās bažas, ka pārāk augošais pieprasījums pēc indija novedīs, pirmkārt, līdz nepārtraukti augošam cenu pieaugumam, un otrkārt, līdz paša indija materiāla iztrūcumam indija ieguves specifikas dēļ. Tāpēc tiek meklēti dažādi alternatīvi materiāli, un kā viens no šobrīd labākajiem kandidātiem ITO aizstāšanā ir cinka oksīds, kas lēģēts ar alumīniju, tā saucamais cinka alumīnija oksīds jeb AZO [9, 13, 30].

ITO pārklājums šobrīd ieņem vadošo lomu TCO materiālu vidū. Tā galvenā noieta tirgus ir plakano paneļu ekrānu ražošana, CIGS saules baterijas un LED [22]. 50% no pārstrādātā indija tiek izmantoti ITO mērķu izgatavošanai [22]. Plakano paneļu ekrānu ražošanā tiek izmantoti 84% no kopējā indija mērķu daudzuma [3].

ITO galvenās priekšrocības ir:

- 1) Laba optisko un elektrisko īpašību kombinācija [27];
- 2) Labas pārklājuma īpašības var iegūt nesildot pamatni, kas ir būtisks faktors ITO pārklājuma uznešanai uz polimēra pamatnes [27];
- 3) ITO pārklājums ir rūpnieciski viegli izputināms no keramiska mērķa, process ir stabils, viegli vadāms un atkārtojams [14, 18].

Apkopojot literatūrā minētos ITO trūkumus, kā dažus no būtiskākajiem var minēt:

- 1) Indijs ir dārgs izejmateriāls un pastāv uzskats, ka sadārdzināšanās tendence nākotnē tikai turpinās pieaugt [8];
- 2) Indijs ir toksisks materiāls [4, 13];
- 3) Pārklājums ir mehāniski nenoturīgs – trausls, tas salūzt pie 1-2% izstiepšanas un šī tendence jo sevišķi palielinās, pieaugot pārklājuma biezumam [8].

Savukārt, kā viens no ITO potenciālajiem aizvietotājiem, AZO pārklājums arvien vairāk tiek izmantots stiklam, kas paredzēts ēku iestiklošanai ar specifisku siltuma caurlaidību [17, 21] un saules elementiem [17], jo sevišķi lokanajiem saules elementiem [21]. Ja ITO kā mīnuss tika minēts tā vājā mehāniskā noturība, kas ir būtiska rezistīvajiem skārienjūtīgajiem ekrāniem, tad šeit kā ITO alternatīvs risinājums jau svarīgu lomu ieņem AZO pārklājums [21]. Vēl pie AZO priekšrocībām tiek pieskaitītas:

- 1) Zemas materiāla izmaksas [5, 13, 30];
- 2) Nav toksisks – tas ir būtisks faktors, lai runātu ne tikai par AZO mērķu izgatavošanu, bet arī par paša materiāla ietekmi uz cilvēka veselību [13, 30];
- 3) Mehāniski stabils [5].

Kā AZO nepilnības var minēt:

- 1) Nestabilitāte apkārtējās vides ietekmē – šī īpašība ir izteikta pārklājumiem ar biezumu zem 100 nm [29], kā arī tas ir vājāk noturīgs kā ITO, ja nonāk saskarsmē ar ūdeni;
- 2) Sliktāka elektriskās pretestības un gaismas caurlaidības attiecība nekā ITO;
- 3) Nav tik plaši izpētīts kā ITO – nav pilnībā apzinātas iespējamās materiāla īpašības.

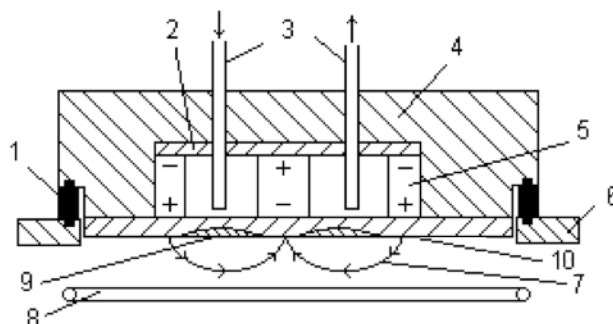
1.2. Vakuuma pārklājuma uznešanas metodes

Caurspīdīgu vadošu oksīdu pārklājumu uznešanai mūsdienās tiek piemērotas dažādas metodes, piemēram, ķīmiskā tvaiku uzklāšana, Sol-gel tehnika, izsmidzināšanas pirolīze, magnetroniskā uzputināšana, pulsējošā lāzer uzklāšana, molekulārā stara epitaksija u.c. [26]. Tā kā šī darba pētījumā tiks izmantota magnetroniskā vakuuma pārklājuma uzklāšana, tad turpmāk tiek apskatīta tieši magnetroniskā izputināšana.

Magnetroniskā izputināšana

Magnetrona izputināšanas darbības princips balstās uz tādām fizikālām parādībām, kā gāzu jonizācija, mirdzizlāde vakuumā, vielas izputināšana, bombardējot ar elektriskā laukā paātrinātiem joniem. Magnetrona shēma parādīta 1.1.attēlā.

Aiz izputināmā materiāla plāksnes (turpmāk - mērķis) atrodas pastāvīgu magnētu sistēma (5). Magnētiskā lauka spēka līnijas (7), noslēdzoties starp poliem, šķērso elektriskā lauka spēka līnijas. Zināms, ka uz lādiņu (elektronu), kas kustas sakrustotajā elektriskajā un magnētiskajā laukā, iedarbojas Lorenca spēks, kura virziens, saskaņā ar spēku saskaitīšanas likumu, ir atkarīgs no tā komponentu virzieniem. Pie tam daļa no spēka, ko nosaka magnētiskā lauka iedarbība, neveic darbu, bet tikai noliec daļiņas kustības trajektoriju.



1.1.att. Magnetoniskās izputināšanas sistēmas ar plakanu katodu shēma, kur 1 – izolators; 2 – magnētisks materiāls; 3 – ūdens dzesēšanas sistēma; 4 – katoda mezgla korpusis; 5 – pastāvīgais magnēts; 6 – vakuuma sistēmas sienīņa; 7 – magnētiskā lauka spēka līnijas; 8 – apļveida ūdens dzesējams anods; 9 – izputināmā materiāla erozijas zona; 10 – mērķis [26]

Elektroni, kas ir emitēti no katoda un veidojušies jonizācijas rezultātā, lokalizējas tieši pie izputināmā materiāla virsmas noslēgtā magnētiskā lauka ietekmē. Tie it kā iekļūst lamatās, ko no vienas puses rada magnētiskais lauks, kas piespiež elektronus kustēties pa cikloidālām trajektorijām virsmas tuvumā un, no otras puses - tos atgrūž elektriskais lauks virzienā no katoda uz anodu. Elektronu sadursmju ar argona molekulām skaits un varbūtība strauji pieaug. Elektrisko un magnētisko lauku nehomogenitātes dēļ piekatoda zonā jonizācijas intensitāte dažādos apgabalos ir atšķirīga. Maksimālā vērtība tiek novērota apgabalos, kur magnētiskā lauka indukcijas līnijas ir perpendikulāras elektriskā lauka intensitātes vektoram, bet minimālā - tur, kur to virzieni sakrīt. Plazmas lokalizācija piekatoda zonā dod iespēju sasniegt ievērojami augstu jonu plūsmas blīvumu pie zemākiem darba spiedieniem un attiecīgi nodrošināt lielus izputināšanas ātrumus.

Magnetronu izputināšanu var veikt no divu veidu materiālu mērķiem:

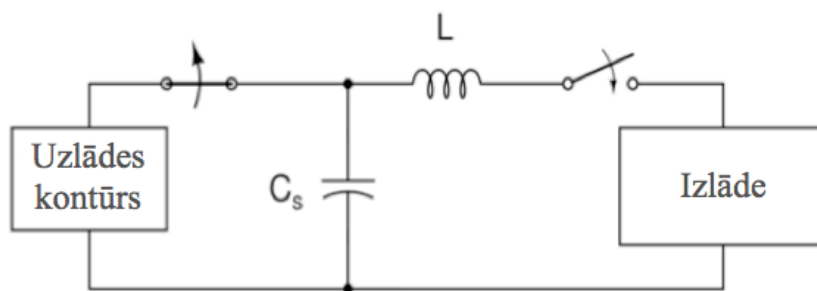
- 1) no keramiskajiem mērķiem, kur nepieciešamā materiāla ķīmiskais sastāvs ir atbilstošs pārklājuma materiāla sastāvam. Šādā procesā reaktīvā gāze (skābeklis) tiek izmantota 10-100 reizi mazāk, nekā pārklājuma izputināšanas laikā no metāla mērķa, kas padara pārklāšanas uzvešanas procesu vieglāk kontrolējamu un vadāmu [14, 18]. Šādi mērķi ir dārgāki un samazina iespēju variēt ar pārklājuma materiāla sastāvu;
- 2) no metāla mērķiem, kur to sastāvā ir pārklājumam nepieciešamās metāla komponentes. Oksīda ķīmiskais savienojums tiek iegūts procesa laikā papildus inertajai gāzei pievadot arī reaktīvo gāzi – skābekli. Šādi mērķi ļauj variēt ar pārklājuma ķīmisko sastāvu un līdz ar to arī mainīt pārklājuma īpašības.

HIPIMS barošanas avota izmantošana

Mūsdienu jaunākās tendences pārklājumu uzvešanas procesa efektīvākai nodrošināšanai un kvalitatīvā pārklājuma iegūšanai ir cieši saistītas ar magnetrona barošanas avota izvēli. Šī brīža pētījumi un lielas cerības tiek saistītas ar HIPIMS barošanas avota izmantošanu pārklājumu uzvešanas industrijā.

HIPIMS barošanas avotu izmantošanas pamatā ir augsta blīvuma plazmas izveidošana pie mērķa un palielināta izsmidzināto daļiņu koncentrācija un jonizācija. To ir iespējams panākt, palielinot izsmidzināšanas jaudu. Tā kā jaudu var palielināt līdz zināmai robežai, ko nosaka mērķa termiskās īpašības, tad izsmidzināšanu veic impulsu režīmā: impulsā ir liela jauda, tāpēc ir nepieciešams zems impulsa samērs, līdz ar to vidējais jaudas lielums paliek pieļaujamajā intervālā, tādā pašā līmenī kā tradicionālajiem barošanas avotiem.

HIPIMS barošanas avota darbības princips parādīts 1.2.attēlā. Kondensatora bloks C_S uzlādējas līdz spriegumam U_1 , un pēc izlādes caur plazmu iegūst spriegumu U_2 [11].



1.2. att. HIPIMS barošanas avota principiālā shēma [11]

Mērķa izpudināšana un pārklājuma uzvešana notiek tikai impulsa laikā, līdz ar to skābekļa patēriņš ir daudz lielāks salīdzinot ar tradicionālajiem barošanas avotiem. Starp impulsiem skābeklis netiek izmantots, tas tiek novadīts atsūkņēšanas sistēmā.

1.3. Nanopārklājumu pētīšanas un mērīšanas metodes

Veicot nanopārklājumu pētījumus, tai skaitā mērījumus, viens no svarīgiem faktoriem ir objekta lielums. Nanopārklājumam šie objektu izmēri ir divu veidu: makroizmēra objekts – pamatne un nanoizmēra objekts – pārklājuma biezums. Kaut arī pārklājuma izmēri ir mērāmi nanometros, tas spēj mainīt makroobjekta (pamatnes) īpašības, kur fizikālo raksturlielumu tradicionālās mērīšanas metodes nemainās [26].

Nanopārklājumiem specifiski raksturlielumi ir saistīti tieši ar virsmas struktūru, kas dod iespēju pētīt un aprakstīt struktūras virsējos slāņus. Pārklājuma virsmas pētījumiem tiek izmantots gan optiskais mikroskops makro-raksturlielumu noteikšanai (plaisu, skrāpējumu pētīšanai), gan arī skenējošais elektronu mikroskops un atomspēku mikroskops nano izmēru raksturošanai. Ja nepieciešams pētīt dziļākus pārklājuma slāņus, tad metodes mainās un tiek izmantota rentgenstaru difrakcijas analīze.

Tā kā nanopārklājumam tikai viena izmēra dimensija ir mērāma nano-izmēros, bet pārējās makro-izmēros, savukārt pamatnei visi izmēri tiek uzskatīti par makro-izmēriem, tad paraugu mērīšanai tiek izmantotas arī tradicionālās mērīšanas metodes. Pie tādām tiek pieskaitītas [26]:

- Pārklājuma biezuma noteikšana – speciāli sagatavojot paraugu, pārklājuma biezumu var noteikt ar profilometru, kas, pārvietojot mēraparāta adatu pa parauga virsmu, spēj nolasīt profila izmaiņas starp pamatni ar vai bez pārklājuma. Savukārt otrs veids, kas tiek arī izmantots pētījumā pārklājuma biezuma noteikšanai, ir fotometra izmantošana, kura darbības princips ir balstīts uz interferences parādību izmaiņām plānām plēvēm.
- Elektrovadītspējas noteikšana – šīs caurspīdīgu, vadošu oksīdu pārklājumu īpašības noteikšanai tiek izmantota 4 zondu metode un šinu metode, lai nomērītu virsmas pretestību. Savukārt īpatnējā pretestība tiek aprēķināta, izmantojot virsmas pretestības un pārklājuma biezuma lielumus.
- Optisko īpašību noteikšana – ar speciālām iekārtām tiek noteikts parauga gaismas caurlaidības un atstarošanās spektrs. Zinot pamatnes optiskās īpašības ir iespējams izdalīt arī pārklājuma optiskās īpašības.

Šajā nodaļā dotais literatūras apkopojums sniedz ieskatu par caurspīdīgu vadošu oksīdu nanopārklājumu materiālu klasi, magnetroniskās uzpudināšanas darbības pamatprincipiem un nanopārklājumu īpašību noteikšanas metodēm. Tas ļauj spriest, ka šodien ir aktuāli vismaz divi pētnieciskie virzieni šādu materiālu izgatavošanai:

- 1) Šobrīd plaši izplatītā indija alvas oksīda jaunu tehnoloģisko risinājumu izmantošana pārklājuma uznešanā, kas turpmākajā darbā tiek apskatīta ITO pārklājumu uznesot uz polimēra pamatnes, procesa laikā izmantojot HIPIMS barošanas avotu;
- 2) Indija alvas oksīdam alternatīvo materiālu meklējumi, kur viens no perspektīvākajiem ir legēts cinka oksīds. Darbā tiek pētīts un pilnveidots cinka oksīda, kas legēts ar alumīniju, uznešanas process, lai iegūtu indija alvas oksīdam konkurētspējīgu materiālu.

2.nodaļa FAZILOĢIKAS MODELIS ITO PĀRKLĀJUMA ELEKTRISKĀS PRETESTĪBAS PROGNOZĒŠANAI

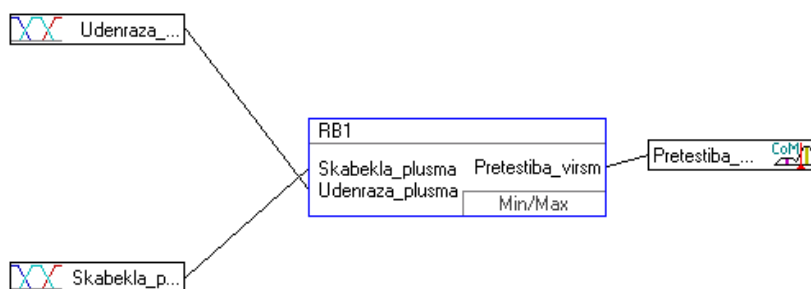
2.1. Faziloģikas izmantošana eksperimentu plānošanā

Faziloģika ir matemātiskās loģikas novirziens, kā darbības pamatā ir neskaidri jēdzieni, ko reizēm dēvē par neskaidrības loģiku [31]. LZA šim terminam ir devusi sekojošu skaidrojumu: „Loģika, kas speciāli izveidota zināšanu un cilvēka domāšanas procesu attēlošanai. Faziloģika tiek plaši izmantota eksperta un mākslīgā intelekta sistēmās. Atšķirībā no binārās loģikas vērtību „aplams” un „paties” vietā faziloģika operē ar loģiskiem mainīgajiem, kas pieņem veselu virkni dažādu vērtību, piemēram, „pareizi”, „nepareizi”, „ne gluži pareizi”, „vairāk vai mazāk pareizi”, „pavisam pareizi”, „kļūdaini”, „ne pārāk kļūdaini”, „visai kļūdaini”, „augstākā mērā kļūdaini”, kas to padara tuvāku cilvēka domāšanas veidam.” [19]

Izmantojot faziloģiku, procesa parametri (ieejošie mainīgie) un mērījuma rezultāti (izejošie mainīgie) tiek aprakstīti izmantojot lingvistisko formulējumu. Likumsakarību definēšanai, kas apraksta mainīgo savstarpēju attiecību, izmanto terminu „ja-tad”, kas ļauj faziloģikas modeļa sastādītājam panākt likumsakarību vizuālu attēlošanu. Kā rezultātā var izveidot 2D un 3D vizualizāciju modeli, kas apraksta procesa parametru savstarpējo ietekmi un dod iespēju ekonomēt laiku un resursus pētījumu veikšanai, jo modelis parāda, kādas ir parametru attiecību tendences, un ļauj izvēlēties, kādā parametru diapazonā ir nepieciešams veikt padziļinātu analīzi, tai skaitā, eksperimentus.

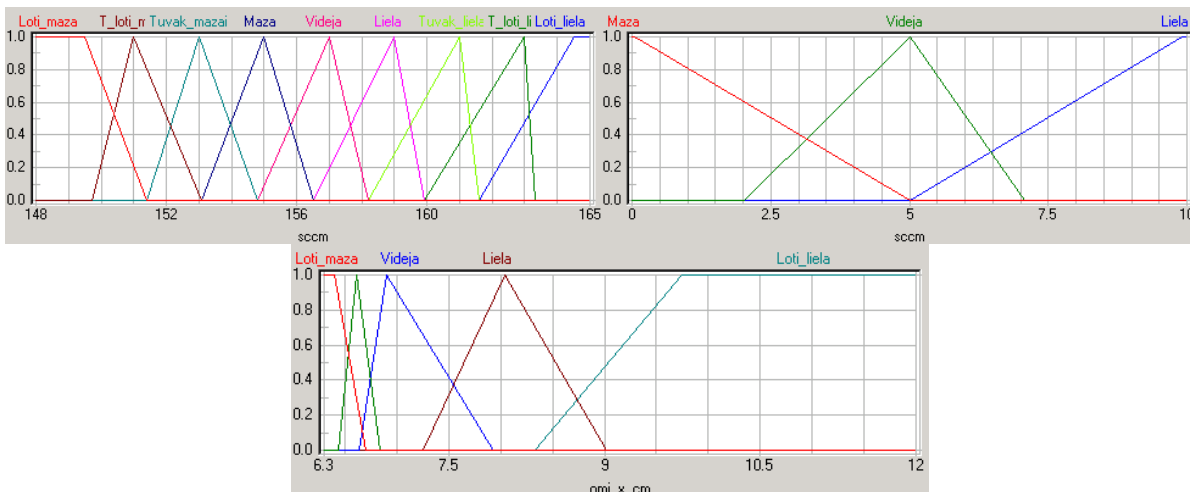
2.2. Eksperimentāla ITO pārklājuma (izmantojot HIPIMS barošanas avotu) virsmas pretestības prognozēšanas modeļa izstrāde

Darbā faziloģikas modelis tiek izmantots ITO pārklājuma pētījumiem, kas uzņests izmantojot HIPIMS barošanas avotu. Daļa datu tiek ņemti no veiktajiem eksperimentiem, bet daļa tiek aprēķināta un prognozēta balstoties uz pieredzi un literatūras avotu analīzi. Modeļa izstrādei (2.1.att.) tiek izmantoti divi mainīgie parametri: skābekļa plūsmas daudzums un ūdeņraža plūsmas daudzums.



2.1.att. Procesu parametru sakarību blokshēma

Skābekļa plūsmas apskatītais diapazons tiek sadalīts 9 apgabalos, izmantojot lingvistiskus terminus (2.2.att.). Ūdeņraža plūsma tiek iedalīta 3 apgabalos, kur mazs (0sccm), vidējs (5sccm) tiek ņemts no eksperimentiem, bet liels (10sccm) tiek prognozēts, balstoties uz pieredzi un izmantojot attiecības, kas iegūtas citos punktos. Īpatnējās pretestības prognozētais diapazons tiek sadalīts 5 apgabalos.



2.2.att. Deviņas skābekļa plūsmas piederības funkcijas (augšējais kreisais), trīs ūdeņraža plūsmas piederības funkcijas (augšējais labais), piecas īpatnējās pretestības piederības funkcijas (apakšējais)

Izmantotais sadalījums ir pietiekošs, lai iegūtu raksturīgākās parametru iezīmes un spētu aprakstīt galvenās parametru savstarpējās likumsakarības, kas dotas 2.1.tabulā.

2.1.tabula

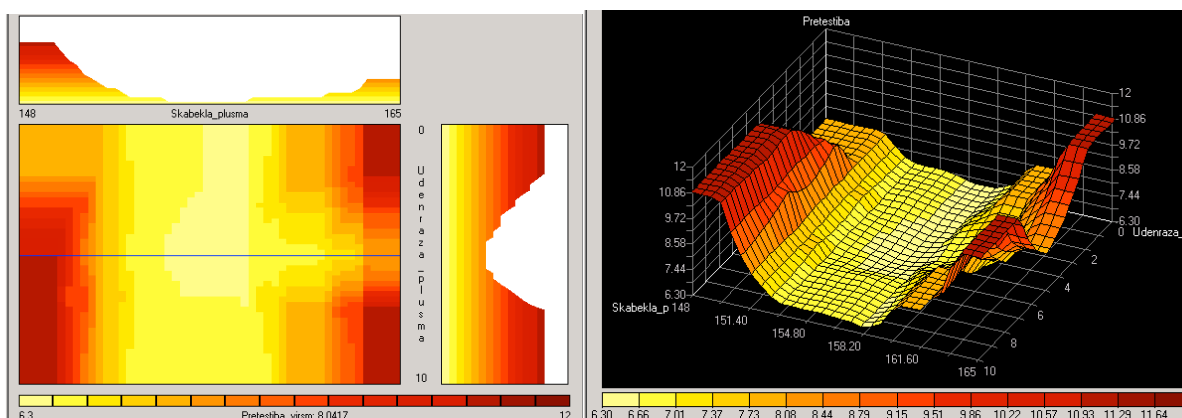
Parametru savstarpējās likumsakarības

JA		TAD
Skābekļa plūsma	Ūdeņraža plūsma	Īpatnējā pretestība
Ļoti maza	Maza	Liela
Ļoti maza	Vidēja	Ļoti liela
Ļoti maza	Liela	Ļoti liela
Tuvu ļoti mazai	Maza	Liela
Tuvu ļoti mazai	Vidēja	Liela
Tuvu ļoti mazai	Liela	Liela
Tuvāk mazai	Maza	Vidēja
Tuvāk mazai	Vidēja	Vidēja
Tuvāk mazai	Liela	Vidēja
Maza	Maza	Vidēja
Maza	Vidēja	Maza
Maza	Liela	Vidēja
Vidēja	Maza	Maza
Vidēja	Vidēja	Ļoti maza
Vidēja	Liela	Vidēja
Liela	Maza	Maza
Liela	Vidēja	Maza
Liela	Liela	Maza
Tuvāk lielai	Maza	Liela

JA		TAD
Tuvāk lielai	Vidēja	Vidēja
Tuvāk lielai	Liela	Liela
Tuvāk ļoti lielai	Maza	Liela
Tuvāk ļoti lielai	Vidēja	Vidēja
Tuvāk ļoti lielai	Liela	Liela
Ļoti liela	Maza	Ļoti liela
Ļoti liela	Vidēja	Liela
Ļoti liela	Liela	Ļoti liela

2.3. Datu defazifikācija un prognozēšanas modelis

Veicot datu defazifikāciju, tiek iegūts prognozēšanas modelis, kura 2D un 3D grafiks dots 2.3.attēlā. Modelis apstiprina literatūrā sniegtos apgalvojumus un apraksta ūdeņraža un skābekļa plūsmas ietekmes tendences uz ITO pārklājuma īpatnējo pretestību, uznešanas procesā izmantojot HIPIMS barošanas avotu. Pēc modeļa var spriest, ka pārklājuma uznešanas procesa sākumā ir nepieciešams atrast zemāko īpatnējās pretestības punktu, uznesot pārklājumu ar dažādām skābekļa plūsmām, pēc iegūtajām pretestības vērtībām (pretestības pieaugšanas vai samazināšanās tendences) var secināt, kurā modeļa apgabalā konkrētie mērījumi tiek veikti, tādā veidā turpinot pētījumus tikai sev interesējošajā zonā.



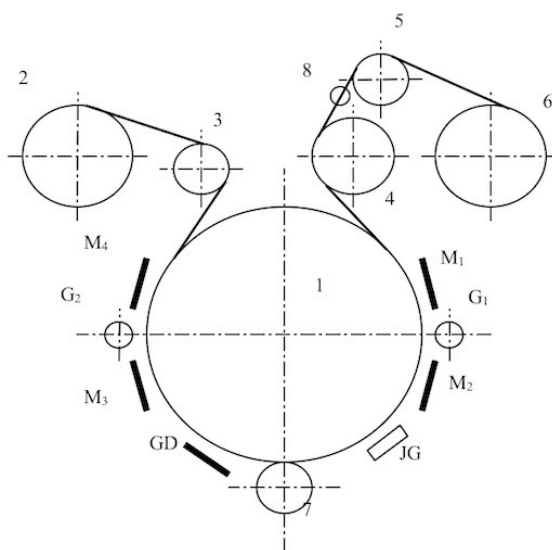
2.3. att. Divdimensionāls un trīsdimensionāls grafiks virsmas pretestības atkarībai no skābekļa plūsmas un ūdeņraža plūsmas

Šāds modelis dod iespēju prognozēt iespējamo īpatnējās pretestības minimuma apgabalu (2.3.attēla gaišākais apgabals) un ļauj samazināt pārklājuma uznešanas eksperimentu skaitu. Jo veicot tikai pāris kontrolmērījumus, ir iespēja novērtēt kurā modeļa zonā ir veikta pārklājuma uznešana (īpatnējās pretestības lielumi, mainot kādu no procesa parametriem, palielinās vai samazinās) un turpmāk veikt skābekļa, ūdeņraža plūsmas korekcijas pētījumam vēlamajā virzienā.

3.nodaļa NANOPĀRKLĀJUMU UZNEŠANA, MĒRĪŠANA, ANALĪZE

3.1. ITO pārklājuma uznešana

ITO pārklājuma uznešanai tiek izmantota ražošanas apstākļiem atbilstoša laboratorijas iekārta UV80 (AS SIDRABE). In:Sn (Sn-10%) mērķa izmēri ir 120 mm x 800 mm, pamatnes – plēves platums 600 mm, pamatnes garums līdz 500 m. Iekārtas shēma dota 3.1.attēlā.



3.1.att. Iekārtas UV80 pārtīšanas shēma:

1 – centrālais veltnis; 2 - 6 – pārtīšanas rullīšu sistēma; 7 – piespiedējrollītis; 8 – gaismas caurlaidības mēriekārta; M1, M2, M3, M4 – magnetroni; G1, G2 – gāzu sadalītāji; GD – mirdzizlādes ierīce; JG – jonu lielgabals

Pirmais pētījuma posms bija nodrošināt pārklājuma viendabīgumu pamatnes platumā. Pārklājuma īpašību viendabīguma nodrošināšana pamatnes platumā ir atkarīga no daudziem faktoriem. Viens no galvenajiem un savā veidā vienkāršākajiem veidiem, kā nodrošināt efektīvu pārklājuma biezuma vienmērību pamatnes platumā, ir skābekļa padeves koreģēšana mērķa garumā pie nosacījuma, ka tiek izpildītas pārējās prasības. Skābekļa padeves korekciju mērķa garumā var iegūt izmantojot daudzsekciju gāzes sadalītāju. Šāds aprīkojums dod iespēju kontrolēti ar atsevišķu MFC palīdzību lokāli, konkrētā vietā pievadīt papildus skābekļa plūsmu.

Šādām korekcijām ir būtiska loma uz pārklājuma īpašībām dēļ pārklājuma augstās jutības uz skābekļa parciālā spiediena izmaiņām pārklājuma uznešanas laikā. Skābekļa plūsmas lokālas izmaiņas noved pie skābekļa parciālā spiediena pārsadalīšanas visā magnetrona garumā un pārklājuma īpašību izmaiņām konkrētās pārklājuma uznešanas zonās. 3.2. attēlā parādītas skābekļa lokālas padeves izmaiņas ietekme uz pārklājuma viendabīgumu (vizuāli novērojama krāsu atšķirība), uzstādot papildus skābekļa padevi labajā pusē. Augšējā parauga (Nr.3) gadījumā papildus skābeklis tiek padots nepietiekošā daudzumā (10 sccm), vidējā parauga gadījumā ir vērojams uzlabojums pārklājuma viendabīgumam (15 sccm), savukārt apakšējā parauga gadījumā (Nr.5) ir redzams, ka papildus padotais skābeklis ir par daudz (20 sccm), jo tajā zonā gaismas caurlaidība ir samazināta vairāk kā zonā, kur skābeklis netiek papildus padots. Turpmākā darbā tiek izmantota 15 sccm liela papildus skābekļa plūsma.



3.2.att. Skābekļa plūsmas lokālu izmaiņu ietekme uz pārklājuma viendabīgumu

Otrais pētījuma posms bija aprīkot iekārtu ar HIPIMS barošanas avotu un nodrošināt vienlaicīgu abu iekārtu vadību un kontroli. Pētījumā tika izmantota AS SIDRABE izstrādāta vadības sistēma, kuras būtība ir tā, ka magnetrons strādā stabilizētā režīmā: visi trīs elektriskie izlādes parametri – strāva, spriegums un izlādes jauda – vienlaicīgi tiek uzturēti nemainīgi un tik ilgi, cik nepieciešams. Procesu nosaka tikai viens mainīgais - skābekļa parciālais spiediens. Izlādes elektriskie parametri ir atkarīgi no skābekļa parciālā spiediena, un to stabilizācijai ir nepieciešams vadīt skābekļa parciālo spiedienu, kas ir arī procesa vadības priekšnosacījums. Skābekļa parciālā spiediena vadības avots kamerā ir vadīta skābekļa plūsma. Barošanas avots strādā sprieguma stabilizācijas režīmā. Argona plūsma kamerā tiek stabilizēta ar MFC palīdzību un procesā nemainās, neatkarīgi no citiem procesiem kamerā. Vadības sistēma uztur metāla un skābekļa balansu pa tiešo.

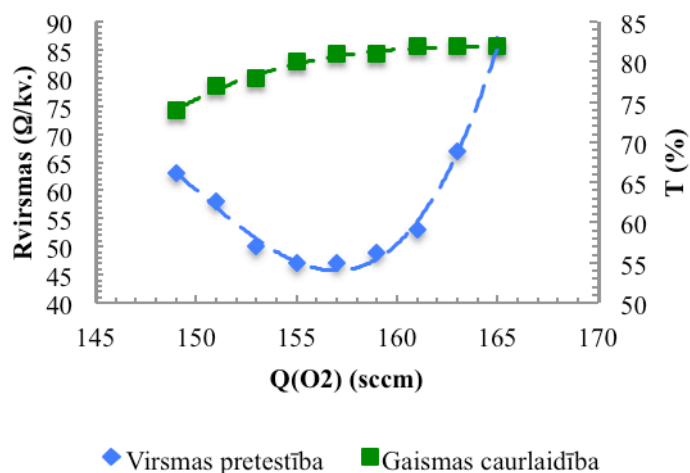
Eksperimentālajā darbā tiek izmantots TruPlasma Highpuls 4008 DC barošanas avots (2kV, 20 kW) no firmas Huttinger (HIPIMS), kura galvenie tehniskie raksturlielumi, kas ir raksturīgi arī citu ražotāju HIPIMS barošanas avotiem ir sekojoši:

- Impulsa frekvence: 1-500 Hz, pētījumā tiek izmantota 500 Hz frekvence;
- Impulsa ilgums: 1-200 μs, pētījumā tiek izmantots 100 μs impulsa ilgums;
- Izejas jauda: līdz 8MW=8000 kW – pīķī, līdz 20 kW – vidējā, tiek mērīta un parādīta uz displeja, pētījumā vidēji 3 kW;
- Izejas spriegums: līdz 2000 V – pīķī, pētījumā 600 V;
- Izejas strāva: līdz 4000 A – pīķī, līdz 20 A – vidēji, pētījumā vidēji 5 A.

Pētījuma laikā tiek konstatēts, ka konkrētais barošanas avots nedod iespēju palielināt uznešanas jaudu virs 3 kW, jo savādāk tiek zaudēta procesa stabilitāte, pastiprinās dzirksteļošana, un tiek iegūts nekvalitatīvs pārklājums. Bet arī izmantojot 3 kW jaudu, tiek iegūti vērā ņemami rezultāti, kas dod iespēju raksturot HIPIMS barošanas avota izmantošanu pārklājuma uznešanai uz plēves.

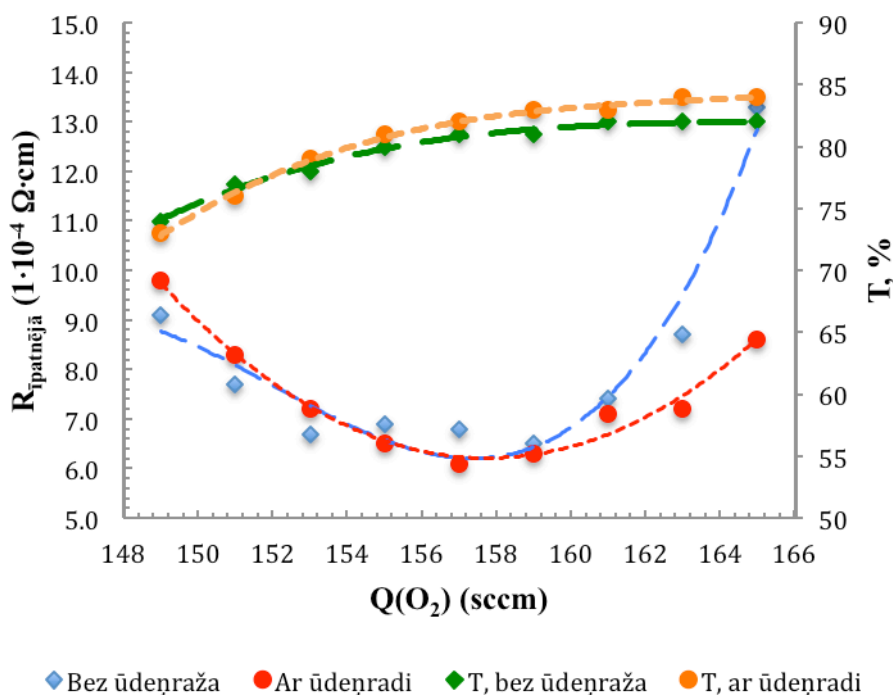
ITO pārklājuma mērījumu rezultāti

Mērījumu rezultātā tika iegūta virsmas pretestības raksturlielne atkarībā no skābekļa plūsmas daudzuma. 3.3.attēls rāda, ka arī izmantojot HIPIMS barošanas avotu, virsmas pretestības izmaiņu tendences saglabājas. Ir novērojams, ka sākotnēji palielinot skābekļa plūsmu, pretestība samazinās, savukārt gaismas caurlaidība palielinās. Šo zonu sauc arī par metāla zonu. Tālāk pretestības vērtība sasniedz savu zemāko vērtību un atkal palielinās, bet gaismas caurlaidība turpina pieaugt, šo zonu sauc par pārejas zonu un tā tiek izmantota industrijā, uznesot caurspīdīgus vadošus oksīda pārklājumus. Savukārt pēc tam pretestības vērtība strauji palielinās, bet gaismas caurlaidība nedaudz pieaugot vairs vērtību nemaina, šī tiek saukta par oksīda zonu. Pārejas zonā iegūtā zemākā virsmas pretestības vērtība ir 47 Ω/kvadrātu. Tā kā īpatnējā pretestība ir atkarīga gan no pārklājuma virsmas pretestības un no pārklājuma biezuma, kas dažādos procesos mainās no 130-150 nm, tad turpmāk tiks apskatīta īpatnējā pretestība, kas ievēro abu vērtību attiecību. Līdz ar to var teikt, ka sākotnēji labākā īpatnējās pretestības vērtība, uznesot pārklājumu ar HIPIMS barošanas avotu, tika konstatēta $6.5 \cdot 10^{-4}$ Ω·cm un atbilstošā gaismas caurlaidības vērtība, ieskaitot pamatni - 81 %, kas ir vērā ņemams rezultāts un atbilst industrijas izvirzītajām prasībām (īpatnējā pretestība 5 – $8 \cdot 10^{-4}$ Ω·cm, gaismas caurlaidība >80 % [3]).



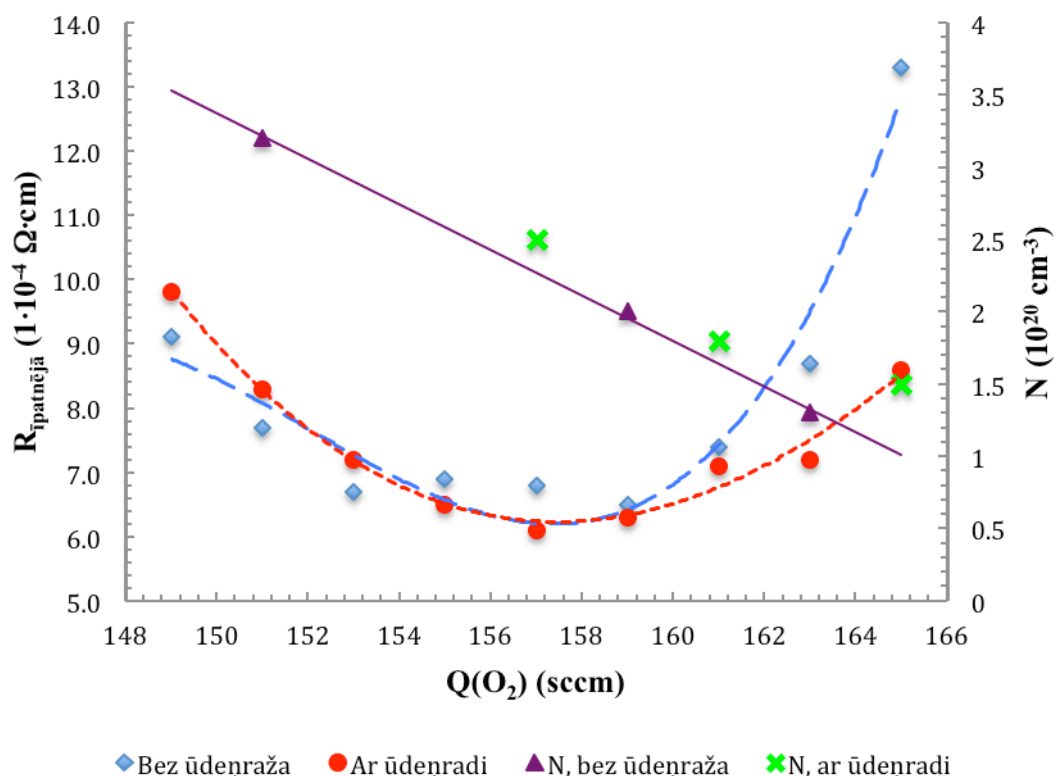
3.3.att. Virsmas pretestības un gaismas caurlaidības atkarība no skābekļa plūsmas

Pētījuma laikā tika analizēta ūdeņraža ietekme uz pārklājuma īpašībām (elektrisko pretestību un optisko gaismas caurlaidību). Literatūras avotos ir minēts, ka izmantojot zināmu daudzumu ūdeņradi iespējams samazināt pārklājuma pretestību. Šis apgalvojums arī ir novērojams pētījumā (3.4.att.), kur zemākā īpatnējās pretestības vērtība ir $6.1 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$. Savukārt tika novērotas vēl vairākas tendence, kas atkārtojās veicot turpmākus eksperimentus. Izmantojot ūdeņradi ITO pārklājuma uznešanā, kur tiek izmantots HIPIMS barošanas avots, ir novērojama pārejas zonas palielināšanās. Tas nozīmē, ka, lai iegūtu pēc iespējas zemāku pārklājuma pretestību, ir iespējams strādāt lielākā skābekļa plūsmas diapazonā, kas ir būtisks faktors pārklājuma uznešanā industriālos apjomos. Analizējot rezultātus tika novērota ūdeņraža ietekme uz gaismas caurlaidību, kas rāda, kā pārejas zonā un oksīda zonā ūdeņraža izmantošanas rezultātā ir iespējams paaugstināt pārklājuma gaismas caurlaidību.



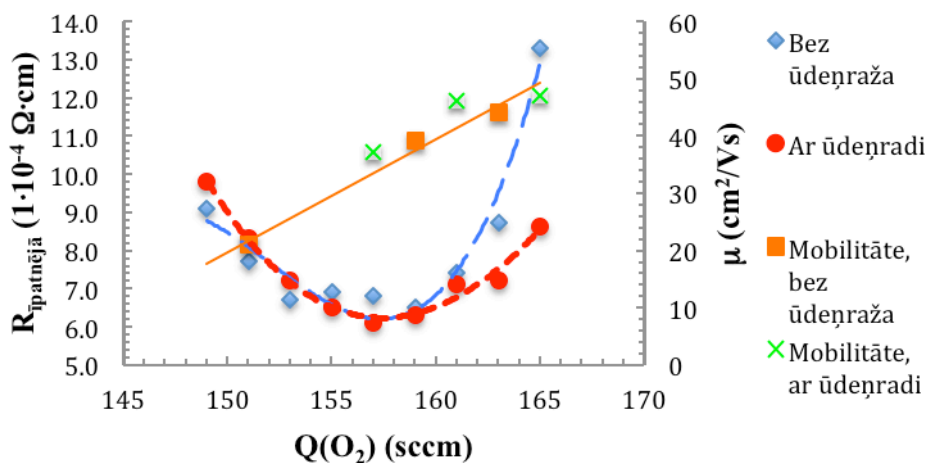
3.4.att. Īpatnējās pretestības un gaismas caurlaidības atkarība no skābekļa plūsmas paraugiem bez ūdeņraža vai ar ūdeņradi (procesā pievadīti 5sccm)

Lai analizētu pārklājuma elektriskās īpašības, tika veikti Hola efekta mērījumi. Analizējot iegūtos rezultātus tika konstatēts, ka iegūtās lādiņnesēju koncentrācijas vērtības ir atbilstošas industrijas prasībām ($2-3 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^{-3}$). Lādiņnesēju koncentrācija samazinās pieaugot skābekļa plūsmai (3.5.att.), jo lādiņnesējus veido skābekļa vakances, struktūras defekti, bet palielinoties skābekļa plūsmai, norit labāks oksidācijas process, mazāk struktūras defektu, kā rezultātā mazāk vakances, tātad zemāka lādiņnesēju koncentrācija. Pievadot ūdeņradi tiek palielināta lādiņnesēju koncentrācija, kur var skaidrot arī ar [15] minēto apgalvojumu, ka ūdeņradis ir kā papildus donors lādiņnesēju koncentrācijai.



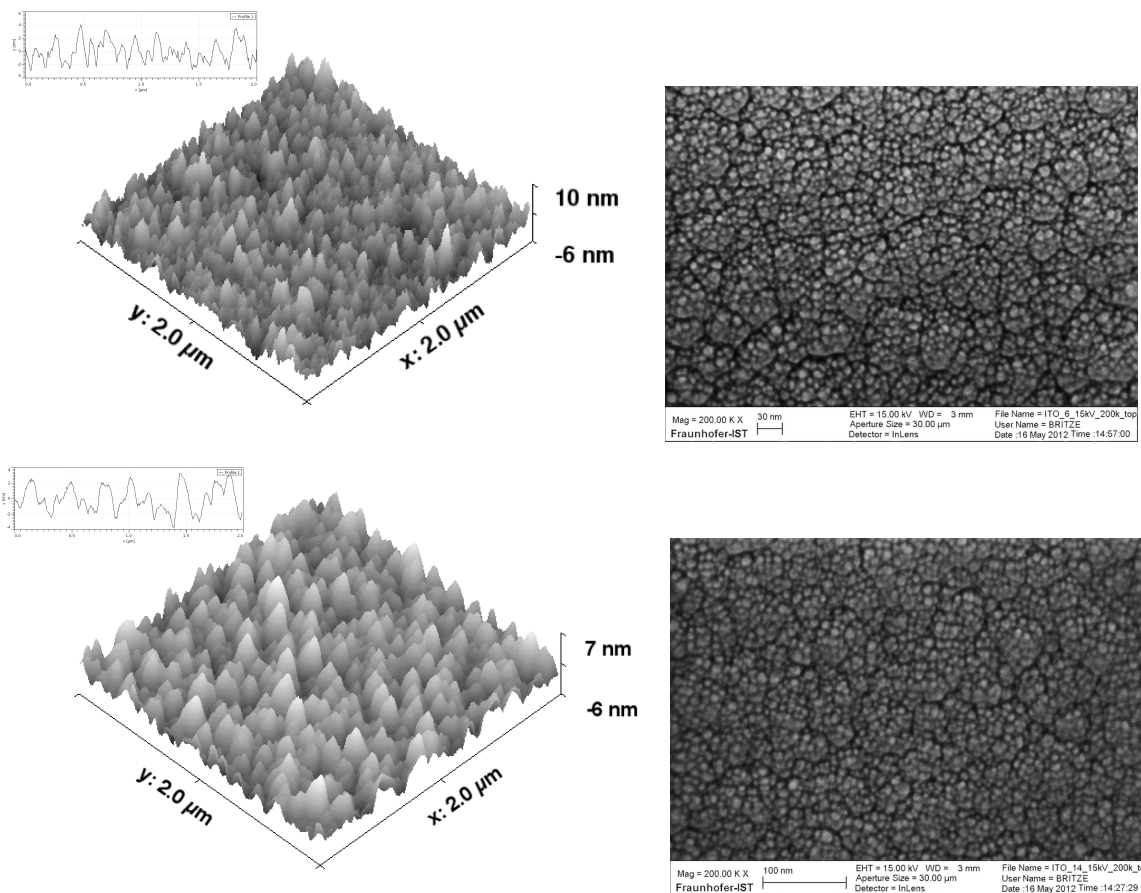
3.5.att. Lādiņnesēju koncentrācijas izmaiņas atkarībā no skābekļa plūsmas paraugiem bez ūdeņraža vai ar ūdeņradi (procesā pievadīti 5sccm)

Hola efekta mērījumu laikā ir iespējams novērtēt arī „caurumu” kustīgumu, turpmāk saukta – Hola mobilitāte. Iegūtie rezultāti ir tuvu industrijas prasībām ($40-45 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ [3]). Ir novērojama Hola mobilitātes palielināšanās pieaugot skābekļa plūsmai (3.6.att.), kas saistīta ar to, ka palielinot skābekļa plūsmu, pārklājuma struktūrā ir tīrāks oksīds, mazāk defektu, tātad labāks kustīgums. Paraugu, kuru izgatavošanā tika izmantots ūdeņradis, ir novērojams, ka mobilitātes vērtības ir tuvu tām vērtībām, kas paraugam bez ūdeņraža klātbūtnes.



3.6.att. Hola mobilitātes atkarība no skābekļa plūsmas paraugiem bez ūdeņraža vai ar ūdeņradi (procesā padoti 5sccm)

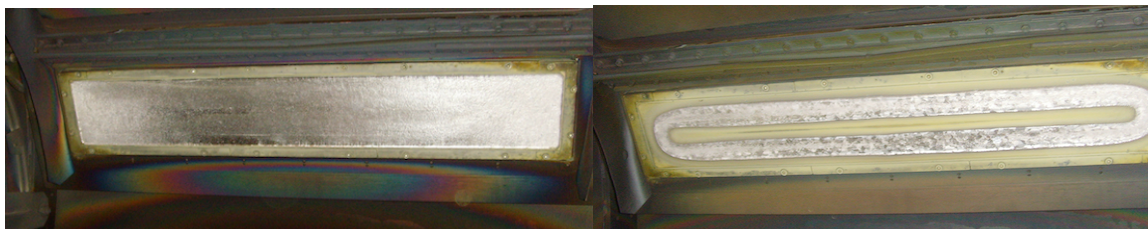
Pētot pārklājuma virsmas struktūru tika novērots, ka virsmas struktūra mainās, ja procesa laikā tiek pievadīts ūdeņradis (3.7.att.). Virsmas vidējā aritmētiskā novirze no vidusplaknes $S_a = 1.45$ nm, zemākās pretestības paraugam, kura uznešanā ūdeņradis netika izmantots, savukārt $S_a = 1.3$ nm, zemākās pretestības paraugam, kuru uzputinot tika papildus pievadīts ūdeņradis. Arī vidējais grauda lielums, analizējot AFM attēlus, ir atšķirīgs abiem procesiem, piemēram, grauda diametrs ir 40-60 nm, ja netiek pievadīts ūdeņradis pārklājuma uznešanas procesā, bet ja tiek pievadīts, tad grauda diametrs ir 70-100 nm.



3.7.att. AFM un SEM attēli ITO pārklājumam bez (augšējie) ūdeņraža un ar (apakšējie) ūdeņradi (procesā padoti 5sccm)

Virsmas struktūra, tai skaitā, grauda diametrs ir būtisks faktors caurspīdīgiem vadošiem oksīda pārklājumiem, jo palielinoties grauda diametram samazinās, piemēram, elektriskās vadītspējas zudumi no grauda robežām un pārklājumam ar lielāku graudu diametru virsmas pretestības vērtība līdz ar to ir zemāka.

Pētījuma laikā tika novērots atšķirīgs mērķa izstrādāšanās raksturs, salīdzinot pārklājuma uznešanas procesus, kur tiek izmantoti atšķirīgi barošanas avoti.

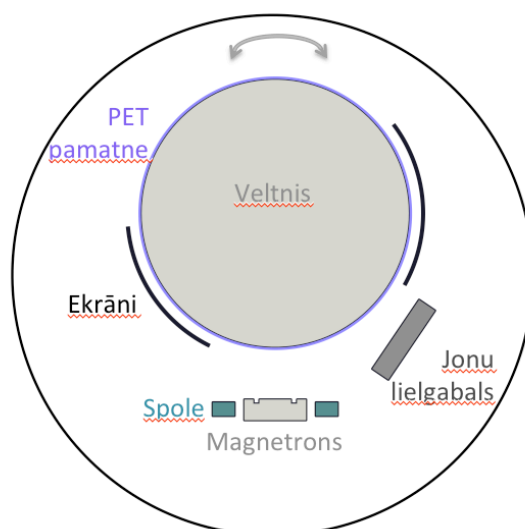


3.8.att. Indija alvas sakausējuma mērķis pirms (pa kreisi) un pēc (pa labi) procesa

Strādājot ar tradicionālajiem barošanas avotiem reaktīvajā procesā erozijas zonā tika novērota neizsmidzināmu oksīdu augšana šauru, garu kristālu veidā, kas bloķē izsmidzināšanu, bet neerozijas zonā - nosēžas pulveris. Strādājot ar HIPIMS erozijas zonā nenotiek nekāda aizaugšana (3.8.att.), tā paliek tīra visa mērķa izmantošanas perioda laikā, kas ir pozitīvs efekts izmantojot HIPIMS, savkārt neerozijas zonā ir novērojams pulveris uz virskārtas. Pulvera izsēšanās neerozijas zonā, iespējams ir saistīta ar izsmidzinātā metāla jonizēto atomu magnetron savākšanu un oksīda izveidošanos pulvera veidā uz mērķa neerozijas zonas.

3.2. AZO pārklājuma uznešana

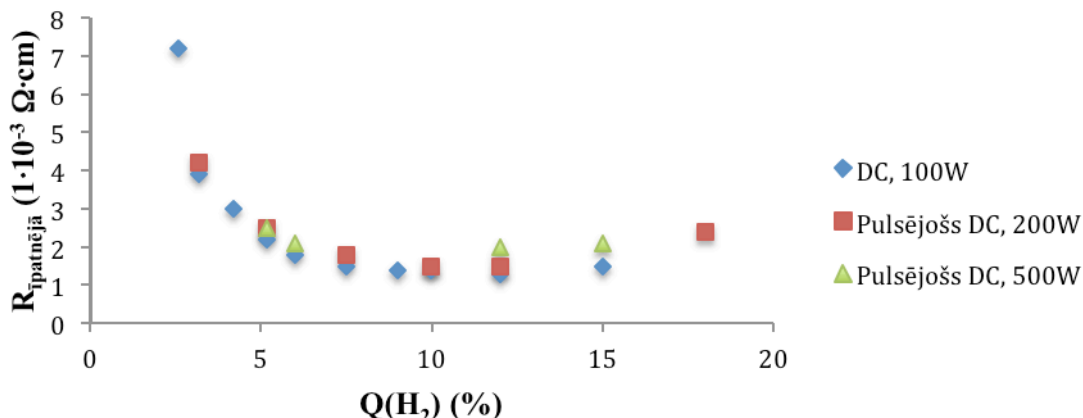
AZO pārklājuma uznešanai tiek izmantota laboratorijas iekārta PMG (AS SIDRABE). ZnO/Al₂O₃ (Al-2%) mērķa izmēri ir 225 mm x 100 mm, pamatnes – plēves platums 150 mm, garums 780mm. AZO pārklājuma uznešanas iekārtas shēma dota 3.9.attēlā.



3.9.att. Iekārtas PMG pārtīšanas shēma

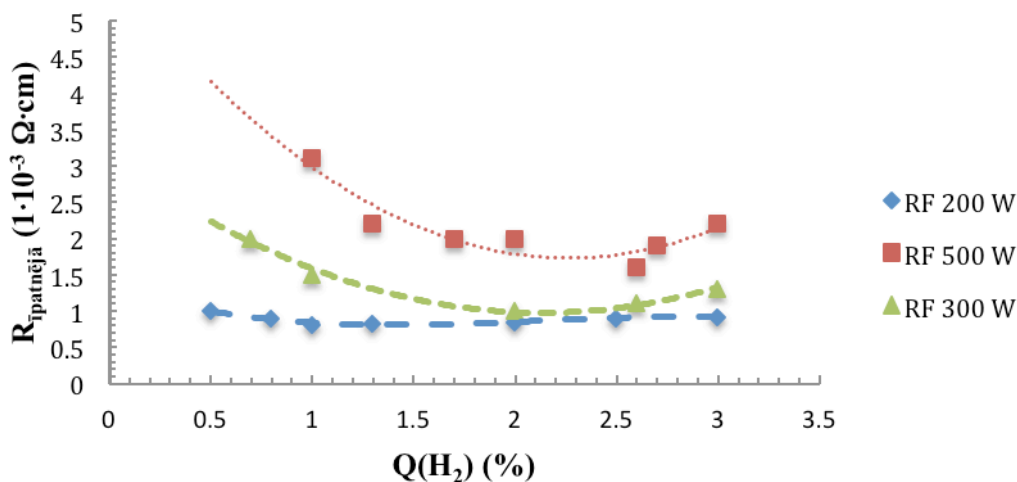
Pētot AZO pārklājumu liela uzmanība tika veltīta ūdeņraža ietekmei uz procesu, kas jau sākotnēji tika uzskatīta par veidu, kā samazināt pārklājuma pretestību. 3.10.attēlā redzams, ka izmantojot DC vai pulsējošu DC barošanas avotu, ir novērojama iepriekš jau aprakstītā ūdeņraža ietekme uz pārklājuma īpatnējo pretestību. Sākotnēji pretestība strauji samazinās

sasniedzot zemāko vērtību, tad, piemēram, izteiktāk redzams 200W pulsējoša DC gadījumā, pretestība pieaug.



3.10.att. Īpatnējās pretestības atkarība no ūdeņraža izmantojot DC un Pulsējošu DC barošanas avotu

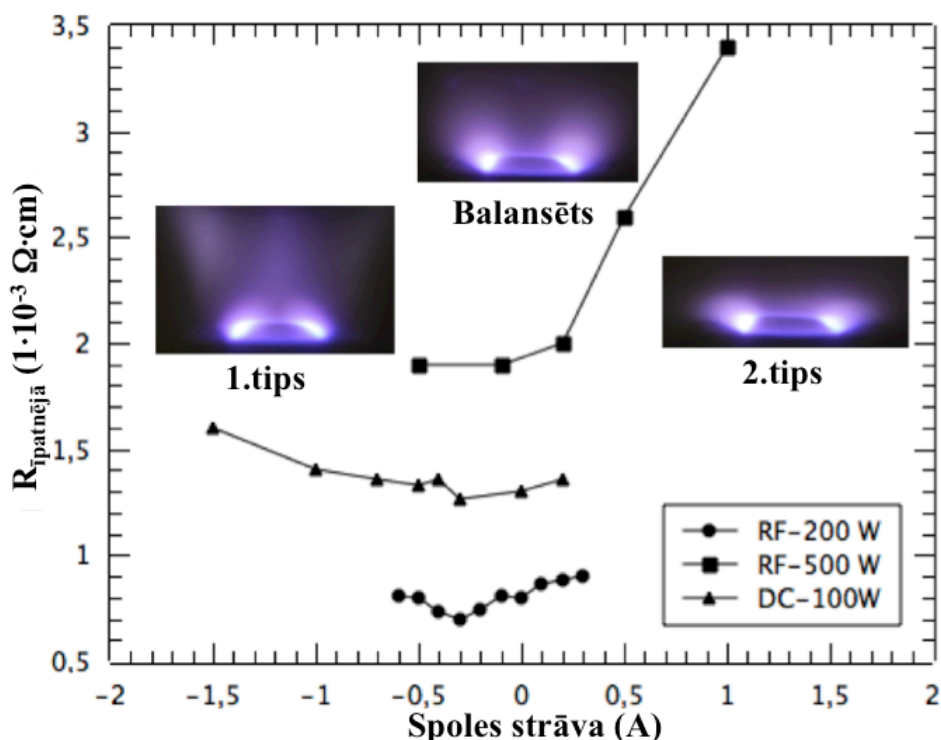
Kaut arī eksperimentu laikā, izmantojot RF barošanas avotu, tika novērota tā pati tendence (3.11.att.), izmantotā ūdeņraža daudzums bija līdz pat 10 reizēm mazāks. Attēlā ir arī redzams, ka pretestības minimumam, samazinot uzputināšanas jaudu, ir tendence pārvietoties uz mazāku ūdeņraža plūsmas daudzuma pusi, ko varētu skaidrot ar to, ka izmantojot zemāku izputināšanas jaudu, tiek iegūta uzlabota kristāliskā struktūra un salīdzinot to ar DC un pulsējoša DC eksperimentiem, šī struktūra ir pilnīgāka, jo tiek izmantots mazāks ūdeņraža daudzums.



3.11.att. Īpatnējās pretestības atkarība no ūdeņraža izmantojot RF barošanas avotu ar dažādām jaudām

Lai vēl vairāk uzlabotu pārklājuma īpašības, tika analizēta magnetrona magnētiskā lauka ietekme uz pārklājuma īpašībām. Magnetronam apkārt tika uzlikta papildus spole. Atkarībā no magnetrona tipa, strāva tika padota atšķirīgos virzienos, 1.tipa gadījumā uz vienu pusi, 2.tipa gadījumā uz pretējo pusi, tādā veidā nodrošinot nesimetrisku magnētu sistēmu. Kā redzams 3.12. attēlā, 1.tipa gadījumā magnētiskais lauks ir vairāk izliekts uz kameras sienu pusi, savukārt 2.tipa gadījumā magnētiskā lauka līnijas ir vērstas uz centru. Nodrošinot 1.tipa nesimetriju mēs iegūstam sliktākus rezultātus, savukārt 2.tipa nesimetrijas gadījumā pēc kāda

perioda pārklājuma pretestība samazinās (zemākā iegūtā īpatnējā pretestība $7 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$) un pēc tam palielās. Šo palielināšanos varētu skaidrot ar to, ka plazma kļūst pārāk koncentrēta, tādā procesā tiek atgriezts lielākas jaudas diapazonā, kas palielina pretestību.



3.12.att. Īpatnējās pretestības atkarība no magnētu sistēmas tipa

No veiktajiem pārklājumu pētījumiem var secināt, ka:

- 1) ITO pārklājumu uzvešanai HIPIMS barošanas avots ir kā alternatīvs barošanas avots tradicionālajiem barošanas avotiem, un ir iespējams uzņemt industrijas prasībām atbilstošus pārklājumus. Vienīgais šķērslis tā izmantošanai šobrīd industriālos procesos ir uzvešanas jaudas ierobežojumi, kas saistīti ar konkrētā HIPIMS barošanas avota tehnoloģisko risinājumu;
- 2) HIPIMS barošanas avota izmantošana uzlabo ITO pārklājuma mehāniskās īpašības, kas ir būtiskas konkrētu pielietojumu – rezistīvo skārienjūtīgo ekrānu ražošanai un izmantošanai;
- 3) Izmantojot RF barošanas avotu AZO pārklājuma uzvešanā ir iespējams sasniegt ITO pārklājuma īpašībām konkurētspējīgu pārklājumu;
- 4) Kā RF barošanas trūkumu var minēt lēno uzvešanas ātrumu, bet, ja minētais trūkums nav primārs pārklājuma uzvešanā, tad šo tehnoloģiju var uzskatīt par konkurētspējīgu un izmantojamu ražošanā;
- 5) Gan ITO, gan AZO pārklājuma īpašības ietekmē udeņraža pievadīšana pārklājuma uzvešanas procesa laikā, kas dod iespēju vēl vairāk samazināt īpatnējo pretestību;
- 6) Magnetrona magnētu sistēmas izbalansēšanai ir ietekme uz pārklājuma īpašībām, kā rāda pētījumi ar AZO pārklājumu, ir iespējams vēl vairāk samazināt pārklājuma īpatnējo pretestību, ja tiek izmantota 1.tipa magnetronu sistēma.

4.nodaļa TCO NANOPĀRKLĀJUMU UZNEŠANAS EKONOMISKIE ASPEKTI

Analizējot caurspīdīgu vadošu oksīdu pārklājumu uznešanas izmaksas, būtiskākās no izmaksu grupām ir izdevumi, kas saistīti ar pašu izputināmo materiālu – mērķa materiālu un mērķa tipu.

Ja cinku var iegūt kā pamatmateriālu cinka raktuvēs, tad indijs ir tikai kā blakus produkts, kas tiek iegūts no cinka raktuvēm, līdz ar to tā resursi ir daudzreiz mazākos apjomos. Indija cena 20 gadu laikā ir pieaugusi vairāk kā 5 reizes [10], bažas par iespējamiem cenu pieaugumiem nākotnē ir saistīti arī ar izsīkstošajiem indija resursiem zemes dziļēs. Ir dažādas spekulācija par iespējamu indija resursu izbeigšanos, ir avoti, kur minēts, ka indijs varētu pietrūkt jau mazāk kā pēc 6 [1], savukārt ir citi avoti, kur tiek minēts, ka indija resursi varētu pietikt vēl līdz pat 90 gadiem [22]. Viens no veidiem kā šodien tiek palielināti indija ieguves apjomus ir otrreizēja indija pārstrāde. Šāda atkārtoti iegūta indija ražošanas apjomi pēdējos gados pat pārsniedz pirmreizēji iegūtā indija ražošanas apjomus [25].

No raktuvēm iegūtais cinka daudzums 2011.gadā mērāms 12,4 miljoni tonnās [20]. Šis apjoms ir līdz šim lielākais pasaulē apgūtais cinka daudzums gadā [6]. Papildus šim apjomam tiek iegūts arī atkārtoti pārstrādātais cinks.

Pēc Pasaules Bankas datiem šī brīža cena ir 1850 USD par tonnu cinka [12], kas ir vairāk kā divas reizes lielāka, ne kā pirms 25 gadiem. Tā pat kā indijam, arī cinkam cenas pēdējo 20 gadu un jo sevišķi pēdējo 10 gadu laikā ir ļoti svārstījušās, kas saistīts gan ar pieprasījuma, gan ar piedāvājuma izmaiņām, kā arī ar ekonomisko situāciju pasaulē.

Salīdzinot abu metālu izmaksas ir acīmredzamas atšķirības. Piemēram, 2009.gadā 1 kg indija maksāja, 500 USD, bet 1 kg cinka 2 USD. Un tā kā izputināmā mērķa cena tiek noteikta pēc metāla svara, tad indija aizstāšana ar cinku ir vērā ņemams aspekts. Protams, pārklājumos tiek izmantoti citu metālu sakausējumi, bet gan ITO, gan AZO pārklājumu izputināšanai tiek izmantoti mērķi, kuru pamatelements, parasti 90 procenti un vairāk, ir attiecīgi indijs vai cinks.

Metāla vai keramiskais mērķis

ITO un AZO pārklājumu var uznest gan no metāla mērķa, gan arī no keramikas mērķa. Līdz šim populārākais ITO pārklājumu uznešanai ir keramikas mērķis [14], dēļ procesa specifikas. Šādā process ir vienkāršāks un stabilāks: nepieciešamais oksīda sastāvs tiek nodrošināts ar mērķa ķīmisko sastāvu, un lai nodrošinātu optimālas pārklājuma īpašības proces laikā papildus tiek padots 10-100 reizes mazāks reaktīvās gāzes (skābekļa) daudzums nekā procesos ar metāla mērķi, kam ir būtiska ietekme uz procesa stabilitāti. Līdz ar to keramiskais mērķis spēj nodrošināt arī labu procesa atkārtojamību [14]. Savukārt šādu mērķu izgatavošana ir daudz sarežģītāka un dārgāka [18], ir garāks procesa iedegšanās/uzsākšanas periods pirms stabila procesa, ir ierobežojumi ķīmiskajā sastāvā un kristāla struktūrā, kas samazina procesa optimizācijas iespējas [21].

Izstrādājot pilnvērtīgu procesa vadības un kontroles sistēmu metāla mērķa izmantošana spēj nodrošināt gan stabilu procesu, gan labu atkārtojamību. Kā viens no īpaši akcentējamiem indija-alvas metāla mērķa plusiem ir iespēja tos pārkausēt – izlīdzinot erozijas celiņu un nepieciešamības gadījumā arī pašu mērķi papildināt. Tā kā indija kušanas temperatūra ir 156⁰C [23], to ir iespējams pārkausēt pārklājuma ražotājam pie sevis, kas nav izdarāms ar keramisko mērķi, kura ražošanas process ir pilnīgi atšķirīgs un nav apstrādājams pie tik zemas temperatūras. Līdz ar to metāla mērķis ir ne tikai lētāks dēļ tā izgatavošanas specifikas, bet ir arī ekonomiski izdevīgāks – mērķa darba mūža ziņā, tas ir garāks, dēļ pārkausēšanas iespējas.

Nepieciešamie ieguldījumi ražošanas iekārtas iegādei ir atšķirīgi katra mērķa gadījumā. Sākotnēji lielāki ieguldījumi ir pārklājuma uznešanai no metāla mērķa [16], bet mērķa izmaksas ir pretējas, metāla mērķa izmaksas var būt līdz pat 3 reizēm mazākas nekā keramiska mērķa gadījumā [28]. Kā rezultātā ekonomiski izdevīgāks ir pārklājuma uznešana no metāla mērķa, kas veido 30% [16] līdz pat 50 % [28] izstrādājuma izmaksu samazinājumu salīdzinājumā ar procesu, kur laikā tiek izmantots keramiskais mērķis.

Plakans vai cilindrisks mērķis

Šodien ar vien lielāku popularitāti iegūst cilindriskie mērķi, kam atšķirībā no plakana mērķa ir vairākas priekšrocības:

- Ir labāks mērķa izlietojums. Atšķirībā no plakanā mērķa, kuram parasti materiāla izlietojums (utilizācija) ir 25% [2], cilindriskā mērķa materiāla izlietojums var būt līdz pat 80 %.
- Retāki procesa pārtraukumi dēļ mērķa maiņas. Kad tiek sasniegts zināms mērķa nolietojums, tad ir jāapstādina pārklājuma ražošanas process un jānomaina mērķis. Cilindriska mērķa gadījumā tas ir jādara retāk, līdz ar to arī tiek ietaupīts laiks un līdzekļi mērķa nomaiņai, procesa apstādināšanai, kameras atgāzēšanai un bāzes vakuuma sasniegšanai.
- Neveidojās erozijas zona. Tā kā pārklājuma uznešanas procesa laikā mērķis rotē, tad neveidojās erozijas celiņš, kura dziļumam ir ietekme uz pārklājuma īpašībām [24].

Lai arī cilindriski mērķiem ir būtiskas priekšrocības pār plakanajiem mērķiem, tomēr tā cena ir līdz pat 3 reizēm lielāka nekā plakanajiem mērķiem, tāpēc pirms mērķa tipa izvēlēšanās ir nepieciešams izvērtēt vai ekonomiskais ieguvums no mērķa nolietojuma atsver mērķa cenas starpību. Kā arī lielai daļai esošo iekārtu, kur tiek izmantoti plakani mērķi, ir ļoti dārga vai reizēm pat neiespējama procesa pārorientācija uz cilindriskajiem mērķiem. Šādā gadījumā attīstība notiek magnetronu sistēmām, kas spēj nodrošināt ar vien lielāku mērķa materiāla izmantošanas apjomu.

Apkopojot augstāk minēto var secināt, ka metāla mērķa izmantošana dod iespēju izgatavot lētākus caurspīdīgus vadošus oksīda pārklājumus, tādus kā ITO un AZO, nekā pārklāšanas procesā izmantojot keramiskos mērķus. Kā arī nodrošinot AZO pārklājumus ar ITO līdzvērtīgām pārklājuma īpašībām ir iespēja izgatavot izstrādājumus ar vērā ņemamu izmaksu samazinājumu.

SECINĀJUMI UN PRIEKŠLIKUMI

Dotajā pētījumā tika iegūti sekojoši rezultāti:

- 1) Izstrādāts ITO pārklājuma īpatnējās pretestības prognozēšanas faziloģikas modelis, kas dod iespēju plānot pārklājuma uznešanu izmantojot HIPIMS barošanas avotu;
- 2) Izstrādātais modelis dod iespēju veikt tikai pāris kontrolmērījumus, nosakot konkrēto mērījumu atrašanos vietu modelī, un ļauj, ekonomējot laiku un resursus, izvēlēties tālākos procesa parametrus sev interesējošajā modeļa diapazonā;
- 3) Tika atrasti nepieciešamie procesa parametri un to lielumi konkrētajai iekārtai, lai uznestu ITO pārklājumu uz plēves, izmantojot HIPIMS barošanas avotu. Pārklājuma uznešanai izmantotais process nodrošināja, ka uzputinātais pārklājums ir ar industrijas vajadzībām atbilstošām īpašībām, tas ir, labākie paraugi bija ar īpatnējo pretestību $6.1 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ un gaismas caurlaidību (ieskaitot pamatni) 82%;
- 4) Tika atrastas likumsakarības, kā ūdeņradis ietekmē pārklājuma īpašības pārklājuma uznešanas procesā, izmantojot dažādus barošanas avotus. Ūdeņradim, pie zināma plūsmas daudzuma ir spēja samazināt pārklājuma pretestību. Pievadot ūdeņradi ITO pārklājuma uznešanas laikā, tika samazināta pārklājuma īpatnējās pretestības minimālā vērtība par 7%;
- 5) Ir pilnveidota AZO pārklājuma uznešanas process, kas nodrošina konkurētspējīga AZO pārklājuma iegūšanu, izmantojot gan ūdeņradi, gan izmainot magnetrona magnētu sistēmu. Izmantojot pilnveidoto pārklājuma uznešanas procesu, labākajiem paraugiem tika iegūta īpatnējā pretestība $7 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$;
- 6) Ir apzināti HIPIMS barošanas avotu ierobežojumi, kurus atrisinot, barošanas avota izgatavotājs dotu iespēju veikt turpmākus pētījumus šī barošanas avota izmantošanai industrijā.

LITERATŪRA

1. Bishop C.A. Paucity of Materials – A Potential Constraint to the Growth of Many Markets Including Displays and Photovoltaics // 52nd Annual Technical Conference Proceedings. - 2009. - 735.-739.lpp.
2. Blondeel A., De Bosscher W. Higher Performing Cylindrical Target Materials and rotating Sputter Magnetrons Meeting upcoming Challenges for PV Applications // 52nd Annual Technical Conference Proceedings. - 2009. - 370.-374.lpp.
3. Bright C. Alternative transparent Conductive Oxides (tCO) to ItO// 51st Annual Technical Conference Proceedings. - 2008. - 840.-850.lpp.
4. Chemical Information Profile for Indium Tin Oxide/Supporting Nomination for Toxicological Evaluation by the National Toxicology Program. - National Toxicology Program, 2009. - 31.lpp.
5. Dong-Joo Kwak, Ji-Hoon Kim, Byung-Wook Park, Youl-Moon Sung, Min-Woo Park, Young-Bae Choo. Growth of ZnO:Al transparent conducting layer on polymer substrate for flexible film typed dye-sensitized solar cell// Current Applied Physics. - 2010. - Nr.10/2. - 282.-285.lpp.
6. Dr.Thomas Chaize Energy & Mining Newsletter:Zinc, prices and production / Internets. - <http://www.dani2989.com/articles/zinc0309gb.htm> / Skatīts 20.06.2012.
7. Edwards P. P., Porch A., Jones M. O., Morgan D. V., Perks R. M. Basic materials physics of transparent conducting oxides// Dalton Transaction. – 2004. – Nr.19. – 2995.-3002.lpp.
8. Fahland M., Vogt T., Schoenberger A. Zinc Oxide Based Transparent Electrodes for Flexible Thin Film Devices// 53rd Annual Technical Conference Proceedings. - 2010. - 531.-534.lpp.
9. Fernández S., Naranjo F.B. Optimization of aluminum-doped zinc oxide films deposited at low temperature by radio-frequency sputtering on flexible substrates for solar cell applications// Solar Energy Materials and Solar Cells. - 2010. - Nr.94/2. - 157.-163.lpp.
10. Goonan T.G. Materials Flow of Indium in the United States in 2008 and 2009. - Virginia: Reston, 2012. - 20 lpp.
11. Huttinger Elektronik: TruPlasma Highpulse Series 4000 / Internets. - <http://www.huettinger.com/en/products/plasma-excitation/truplasma-highpulse-series-4000.html> / Skatīts 20.06.2012.
12. Indexmundi: Zinc Monthly Price - US Dollars per Metric Ton / Internets. - <http://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=zinc&months=300> / Skatīts 20.06.2012.
13. Jung-Min Kim, Thiyagarajan P., Shi-Woo Rhee. Deposition of Al-doped ZnO films on polyethylene naphthalate substrate with radio frequency magnetron sputtering// Thin Solid Films. - 2010. - Nr.518/20. - 5860.-5865.lpp.
14. Kleinhempel R., Thielsch R., Wahl A. Optical, Electrical, and Structural Properties of ZAO and ZGO Coatings Deposited by Magnetron Sputtering onto Plastic Substrate// 52nd Annual Technical Conference Proceedings. - 2009. - 685.-690.lpp.

15. Klykov V., Strazdina I., Kozlov V. Influence of hydrogen content and sputtering characteristics on the properties of ZnO:Al transparent conductive layers deposited on polymer substrate// Surface and Coating Technology. - 2011. – Nr.21. – 180.-183.lpp.
16. Linss V., Strümpfel J., Fleischer T., Menner R., Friedlmeier T.M., Wischmann W., Niesen T., Visbeck S., Palm J. ZnO:Al for CIGS Solar Modules Deposited by Reactive Sputtering from Rotatable Magnetron // 54th Annual Technical Conference Proceedings. - 2011. - 508.-513.lpp.
17. Lippens P., Leitner K., Margadant N., Kaitz M., Broenstrup A., Sutter S. Aluminum Doped Zinc Oxide Coatings Sputtered on Large Area with Rotary AZO Targets: New Insights to Improve Productivity and Coating Quality// 53rd Annual Technical Conference Proceedings. - 2010. - 290.-295.lpp.
18. Lippens P., Murez C. Rotary Ceramic ITO Sputtering Targets for large Area TCo Coating Deposition: Cost Effective and Quality boosting// 52nd Annual Technical Conference Proceedings. - 2009. - 390.-395.lpp.
19. LZA Terminoloģijas komisija: Akadēmiskā terminu datubāze AkadTerm / Internets. – <http://termini.lza.lv/term.php?term=fazilo%C4%A3ika&list=&lang=LV> / Skatīts 20.06.2012.
20. Mineral Commodity Summaries// U.S. Geological Survey. 2012. - January. - 188.-189.lpp.
21. Monaghan D., Bellido-Gonzalez V., Audronis M., Daniel B. High Rate Reactive Aluminium-Doped Zinc Oxide (AZO) Deposition by Dual Rotatable Magnetron Sputtering// 54th Annual Technical Conference Proceedings. - 2011. - 215.-220.lpp.
22. Murphy M.D., Mikolajczak C. Sustainability of Indium and Gallium Supplies in the face of emerging Markets// 54th Annual Technical Conference Proceedings. - 2011. - 468.-469.lpp.
23. READE Advanced Materials: Indium / Internets. - <http://www.reade.com/lv/products/16-elements-inorganic-powder-sheet-wire/259-indium-in-metal-a-powder?q=heat> / Skatīts 20.06.2012.
24. Sittinger V., Dewald W., Werner W., Szyszka B. Influence of Process Parameter and Magnetic Field Strength on DC Magnetron Sputtered ZnO:Al films from ceramic targets // 54th Annual Technical Conference Proceedings. - 2011. - 502.-507.lpp.
25. SMG Indium Resources Ltd: The Indium Market / Internets. - <http://www.smg-indium.com/Market.html> / Skatīts 20.06.2012.
26. Strazdiņa I. Cinka oksīda nanopārklājumu raksturlielumu noteikšana un analīze: Maģistra darbs. -Rīga, 2009. - 54.lpp.
27. Sung-Mok Jung, Young-Hwan Kim, Seong-II Kim, Sang-Im Yoo. Characteristics of transparent conducting Al-doped ZnO films prepared by dc magnetron sputtering//Current Applied Physics. 2011. Nr.11/1. - 191.-196.lpp.
28. Szyszka B., Sittinger V., Dewald W., Pflug A., Ulrich S., Kaiser A., Werner W. Reactive Magnetron Sputtering of ZnO:Al – A Status report // 52nd Annual Technical Conference Proceedings. - 2009. - 383.-389.lpp.
29. Tadatsugu Minami. Present status of transparent conducting oxide thin-film development for Indium-Tin-Oxide (ITO) substitutes// Thin Solid Films. - 2008. - Nr.516/17. - 5822.-5828.lpp.

30. Tseng C.H., Huang C.H., Chang H.C., Chen D.Y., Chou C.P., Hsu C.Y. Structural and optoelectronic properties of Al-doped zinc oxide films deposited on flexible substrates by radio frequency magnetron sputtering// Thin Solid Films. - 2011. - Nr.519/22. - 7959.-7965.lpp.
31. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. – Москва: Мир, 1976. -166.стр.