



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MATEMATIKOS IR GAMTOS MOKSLŲ FAKULTETAS**

Ruslanas Ramanauskas

**INDŽIO-ALAVO OKSIDO PLONŲ DANGŲ NUSODINIMAS
PLAZMA AKTYVUOTO REAKTYVAUS TERMINIO
GARINIMO METODU IR SAVYBIŲ TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Doc. dr. Aleksandras Iljinas

KAUNAS, 2017

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MATEMATIKOS IR GAMTOS MOKSLŲ FAKULTETAS

**INDŽIO-ALAVO OKSIDO PLONŲ DANGŲ NUSODINIMAS
PLAZMA AKTYVUOTO REAKTYVAUS TERMINIO
GARINIMO METODU IR SAVYBIŲ TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas
Medžiagų mokslas (kodas 621J50005)

Vadovas

Doc. dr. Aleksandras Iljinas
2017-06-

Recenzentas

Doc. dr. Alvydas Jotautis
2017-06-

Projektą atliko

Ruslanas Ramanauskas
2017-05-19

KAUNAS, 2017



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

MATEMATIKOS IR GAMTOS MOKSLŲ FAKULTETAS

(Fakultetas)

RUSLANAS RAMANAUSKAS

(Studento vardas, pavardė)

MEDŽIAGŲ MOKSLAS, 621J50005

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Baigiamojo projekto pavadinimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 17 m. Gegužės 19 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Ruslano Ramanausko**, baigiamasis projektas tema „Indžio-alavo oksido plonų dangų nusodinimas plazma aktyvuoto reaktyvaus terminio garinimo metodu ir savybių tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Ramanauskas, Ruslanas. Indžio-alavo oksido plonų dangų nusodinimas plazma aktyvuoto reaktyvaus terminio garinimo metodu ir savybių tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Aleksandras Iljinas; Kauno technologijos universitetas, Matematikos ir gamtos mokslų fakultetas.

Mokslo kryptis ir sritis: Technologijų mokslai, Medžiagų inžinerija (08 T)

Reikšminiai žodžiai: plonos dangos, ITO, PVD, plazma aktyvuotas reaktyvus terminis garinimas.

Kaunas, 2017. 42 p.

SANTRAUKA

Šiuolaikinių optoelektronikos prietaisų: jutiklių, saulės elementų, skystųjų kristalų vaizduoklių ir išmaniųjų stiklų gamybai būtinos optiškai skaidrios ir elektros srovei laidžios medžiagos. Optiškai skaidrios ir elektrai laidžios medžiagos - tai medžiagos, kurių optinis pralaidumas regimosios šviesos spektre yra virš 80 %, draustinės juostos plotis nemažesnis kaip 3 eV, o savitoji varža nedidesnė kaip $10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ eilės.

Šiame darbe aprašyti, indžio-alavo oksido plonų dangų nusodinimo plazma aktyvuoto reaktyvaus terminio garinimo metodu užaugintų dangų, tyrimo rezultatai.

Užaugintų dangų tyrimams naudoti: rentgeno spindulių difrakcijos, skenuojančios elektroninės mikroskopijos, energinės dispersijos rentgeno spektroskopijos, ultravioletinio ir regimosios šviesos spektroskopijos metodai.

Iš gautų rezultatų nustatyta, kad plazma aktyvuoto reaktyvaus terminio garinimo metodu, užaugintų ant stiklo padėklų, indžio-alavo oksido plonų dangų optinis pralaidumas mažėja, o elektrinis laidumas didėja, didėjant alavo kiekiui dangoje.

Ramanauskas, Ruslanas. Master's thesis in "Formation of Indium Tin Oxide Thin Films by Reactive Plasma Assisted Thermal Evaporation" / supervisor assoc. prof. dr. Aleksandras Iljinas. The Faculty of Mathematics and natural sciences, Kaunas University of Technology.

Research area and field: Technological Sciences, Materials Science

Key words: thin films, ITO, PVD, Reactive plasma assisted thermal evaporation

Kaunas, 2017. 42 p.

SUMMARY

Transparent and conductive layers are widely used for many microelectronic applications, such as transparent in the visible and near infra-red regions electrical contact electrodes in displays, heatable glass and thin film solar cells. Transparent and conductive materials are semiconductors with band gap higher than 3 eV, high transparency (> 80%) in the visible light wavelength range and specific resistivity lower than $10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$.

Indium-tin-oxide (ITO) thin films were fabricated on glass substrates by reactive plasma assisted thermal evaporation method. The influence of the mass ratio on the electrical and optical properties of ITO thin films were investigated. The X-ray diffraction spectroscopy, energy-dispersive X-ray spectroscopy, scanning electron microscopy, ultraviolet and visible light spectrometer and the four-probe methods were used to investigate ITO thin films. The transmittance of the films increased and resistivity decreased with the increase of the In/Sn mass ratio from 4.3 up to 10.

TURINYS

TEKSTE VARTOTŲ SANTRUMPŲ SĄRAŠAS	7
PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS.....	8
LENTELIŲ SĄRAŠAS.....	9
IŽANGA.....	10
1. LITERATŪROS APŽVALGA.....	11
1.1. OPTIŠKAI SKAIDRIOS IR ELEKTROS SROVEI LAIDŽIOS MEDŽIAGOS	11
1.2. INDŽIO – ALAVO OKSIDŲ OPTINĖS SAVYBĖS	12
1.3. INDŽIO – ALAVO OKSIDŲ ELEKTRINĖS SAVYBĖS	14
1.4. INDŽIO – ALAVO OKSIDŲ PLONŲ DANGŲ AUGINIMO FIZIKINIAI METODAI	15
2. MEDŽIAGOS IR TYRIMO METODAI.....	21
2.1. INDŽIO – ALAVO OKSIDŲ PLONŲ DANGŲ AUGINIMO ĮRANGA	21
2.2. VARŽOS MATAVIMAS KETURIŲ ZONDŲ METODU	22
2.3. ELEKTRINIŲ SAVYBIŲ TYRIMAS	23
2.4. OPTINIO PRALAIMUMO IR ATSPINDŽIO SPEKTRO MATAVIMAI ULTRAVIOLETINIO IR REGIMOSIOS ŠVIESOS SPEKTRŲ SRITYSE.....	24
2.5. RENTGENO SPINDULIŲ DIFRAKCIJOS TYRIMO METODAS	25
2.6. SKENUOJANČIOS ELEKTRONINĖS MIKROKOPIJOS TYRIMO METODAS	26
2.7. ENERGINĖS DISPERSIJOS RENTGENO SPEKTROKOPIJA	27
3. REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS	28
3.1. UŽAUGINTŲ DANGŲ OPTINĖS IR ELEKTRINĖS SAVYBĖS	29
3.2. UŽAUGINTŲ DANGŲ RENTGENOSTRUKTŪRINĖ ANALIZĖ.....	35
3.3. UŽAUGINTŲ DANGŲ ELEMENTINĖ SUDĖTIS	36
3.4. UŽAUGINTŲ DANGŲ MORFOLOGINIAI TYRIMAI	37
IŠVADOS.....	40
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	41

TEKSTE VARTOTŲ SANTRUMPŲ SĄRAŠAS

EDS – Energinės dispersijos rentgeno spektroskopija

ITO – Indžio oksidas (In_2O_3) su alavo oksido (SnO_2) priemaišomis

NIR – artimoji infraraudonojo spektro sritis

PVD – dangos nusodinimas iš dujinės fazės fizikiniu būdu

SEM – skenuojanti elektroninė mikroskopija

UV – ultravioletinio spektro sritis

Vis – regimosios šviesos spektro sritis

TCO – elektros srovei bei šviesai laidūs oksidai

XRD – Rentgeno spindulių difrakcija

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ dangos, suformuotos iš nanodalelių atspindžio ir pralaidumo priklausomybės nuo bangos ilgio.....	13
1.2 pav. ITO dangų optinio pralaidumo (550 nm bangos ilgiui) priklausomumas nuo deguonies srauto dangos augimo metu.....	13
1.3 pav. ITO plonų dangų pralaidumo priklausomybė nuo bangos ilgio, esant įvairiems dangų storiams.....	14
1.4 pav. ITO dangų paviršiaus vaizdai: a) suformuotos ir atkaitintos 200 °C; b) augintos ant 200 °C temperatūros padėklo.....	18
1.5 pav. ITO dangų paviršiai: (a ir c) suformuoti argono plazmoje, (b ir d) argono-deguonies plazmoje.....	18
2.1 pav. Plazma aktyvuoto garinimo įrenginys.....	22
2.2 pav. Plazma aktyvuoto reaktyvaus garinimo sistemos schema.....	23
2.3 pav. Paviršinės varžos matavimo keturių zondų metodu principinė schema, kai zondai išdėstyti vienoje linijoje vienodais atstumais vienas nuo kito.....	24
2.4 pav. UV-VIS spinduliuotės spektro pralaidumo matuoklis.....	25
2.5 pav. UV-VIS spinduliuotės spektro atspindžio matuoklis.....	25
2.6 pav. Scheminis krintančių (1 ir 2) ir atsispindėjusių (1' ir 2') spindulių atvaizdavimas	27
3.1 pav. Bandinys Nr. 5.....	30
3.2 pav. Indžio alavo oksidų pralaidumo priklausomybės nuo bangos ilgio.....	30
3.3 pav. Dangų pralaidumo priklausomybė nuo indžio ir alavo masių santykio lovelyje (550 nm bangos ilgiui).....	31
3.4 pav. Indžio alavo bandinių sugerties koeficiento priklausomybės nuo bangos ilgio.....	31
3.5 pav. Bandinio Nr.5 voltamperinė charakteristika.....	32
3.6 pav. Bandiniu Nr.5 tekančios srovės priklausomybė nuo laiko.....	32
3.7 pav. Bandinio Nr.5 kaitimo charakteristikos (nuo kambario temperatūros) esant skirtingoms kaitinimo įtampoms.....	33
3.8 pav. Bandinio Nr.5 atitirpdinimo charakteristikos esant skirtingoms kaitinimo įtampoms.....	34
3.9 pav. Bandinio Nr.5 pralaidumo (T5) ir atspindžio (R5) priklausomybės nuo bangos ilgio.....	35
3.10 pav. Bandinio Nr.5 Tauco diagrama.....	35
3.11 pav. Bandinio Nr.5 rentgenograma.....	36
3.12 pav. Bandinio Nr.5 EDS spektras.....	37
3.13 pav. Bandinio Nr.5 paviršiaus SEM vaizdas (5000 didinimas).....	37

3.14 pav. Bandinio Nr.5 paviršiaus SEM vaizdas (20000 didinimas).....	38
3.15 pav. Bandinio Nr.5 paviršiaus SEM vaizdas (50000 didinimas).....	38
3.16 pav. Bandinio Nr.5 ITO skersinio pjūvio SEM vaizdas (20000 didinimas).....	39

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Skaidrios ir elektrai laidžios medžiagos bei naudojamos priemaišos.....	12
2.1 lentelė. Dangų auginimo sąlygos.....	23
2.2 lentelė. Pagrindiniai EDS Bruker XFlash QUAD 5040 naudoti parametrai.....	28
3.1 Lentelė. Dangų auginimo duomenys.....	29
3.2 lentelė. Elektrinės ir optinės indžio alavo oksidų charakteristikos.....	34
3.3 lentelė. Dangos elementinė sudėtis.....	37

IŽANGA

Šiuolaikinių optoelektronikos prietaisų: jutiklių, saulės elementų, skystųjų kristalų vaizduoklių ir išmaniųjų stiklų gamybai būtinos optiškai skaidrios ir elektros srovei laidžios medžiagos. Optoelektronikos prietaisuose šios medžiagos naudojamos, kaip skaidrūs elektrodai, kuriais galima valdyti prietaiso parametrus. Keičiant įtampą galima keisti skystojo kristalo orientaciją. Elektrodu tekant elektros srovei, galima kaitinti medžiagą arba pritraukti krūvininkus iš vieno sluoksnio į kitą, tuo pačiu keičiant šviesos pralaidumą (sumanieji stiklai). O taip pat elektrodais gali tekėti krūvininkai generuojami saulės elemente [1-3].

Optiškai skaidrios ir elektrai laidžios medžiagos - tai medžiagos, kurių optinis pralaidumas regimosios šviesos spektre yra virš 80%, draustinės juostos plotis nemažesnis kaip 3 eV, o savitoji varža nedidesnė kaip $10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ eilės.

Šiuo metu plačiai naudojamos indžio oksido (In_2O_3) su alavo priemaisomis (ITO) ir alavo oksido (SnO_2) su fluoro priemaisomis plonos dangos, kurios dažniausiai formuojamos fizikinio nusodinimo iš garų fazės vakuume metodais. Atlikti tyrimai rodo, kad ITO plonų dangų savybės priklauso nuo auginimo metodo ir sąlygų. Juos varijuojant galima gauti įvairiausių struktūrų, morfologijos ir elektrinių ir optinių savybių bei jų derinio charakteristikas [3].

Vienas iš retai naudojamų metodų tokio tipo dangų auginimui yra reaktyvusis plazma aktyvuoto terminio garinimo metodas vakuume. Šiuo metodu gaunamos dangos savo savybėmis skiriasi nuo kitais būdais auginamų dangų, todėl gali turėti visai kitus privalumus ir naujas taikymo galimybes.

Šio darbo tikslas – užauginti indžio-alavo oksido plonas dangas plazma aktyvuoto reaktyvaus terminio garinimo metodu ir iširti jų optines bei elektrines savybes. Iširti optimaliomis optinėmis ir elektrinėmis savybėmis pasižyminčios dangos taikymo apledėjusių langų atitirpinimui ir šildymui charakteristikas.

Šiam tikslui pasiekti buvo išskelti šie darbo uždaviniai:

- Atlikti optiškai skaidrių ir elektrai laidžių dangų (TCO) fizikinių savybių, sintezės metodų, ir jų taikymo praktikoje literatūros apžvalgą;
- Užauginti kelių skirtingų indžio ir alavo masių santykių indžio-alavo oksido dangas ant stiklo padėklų;
- Atlikti užaugintų dangų struktūrinę ir morfologinę analizę;
- Nustatyti suformuotų dangų optinius ir elektrinius parametrus;
- Nustatyti ITO danga padengto apledėjusio stiklo atitirpdymo ir šildymo charakteristikas.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

1.1. OPTIŠKAI SKAIDRIOS IR ELEKTROS SROVEI LAIDŽIOS MEDŽIAGOS

Laidumas elektros srovei ir šviesai priklauso nuo medžiagos prigimties, atomų išsidėstymo kristalinėje gardelėje, morfologijos ir nuo savųjų arba dirbtinai suformuotų defektų tankio. Šiuo metu plačiai naudojamos ir tiriamos optiškai skaidrios ir elektros srovei laidžios medžiagos (TCO) yra:

- a) priemaišomis legiruoti ZnO, In₂O₃, SnO₂ and CdO oksidai
- b) Zn₂SnO₄, ZnSnO₃, Zn₂In₂O₅, Zn₃In₂O₆, In₂SnO₄, CdSnO₃ trikomponenčiai oksidai
- c) daugiakomponenčiai oksidai susidedantys iš ZnO, In₂O₃ and SnO₂ oksidų.

Šiuo metu dažniausiai naudojamos In₂O₃ su alavo priemaišomis (ITO) ir SnO₂ su fluoro priemaišomis plonos dangos. Didėjant TCO medžiagų panaudojimui gaminant skaidrius elektrodus optoelektroniniuose prietaisuose, labai padidėjo indžio paklausa ir kaina. Susidariusi situacija verčia ieškoti alternatyvių medžiagų ITO pakeitimui. Naujų TCO medžiagų savitoji varža turėtų būti apie 10⁻⁵ Ω·cm eilės, tipinis absorbcijos koeficientas nedidesnis kaip 10⁴ cm⁻¹, regimosios šviesos ir UV spindulių spektruose, optinis draustinės juostos plotis apie 3 eV [1-3].

Geromis ITO alternatyvomis, gaminant plonus skaidrius elektrodus galėtų būti ZnO:Al ir ZnO:Ga (AZO ir GZO) puslaidininkiai. Lyginant AZO ir GZO dangų savybes bei gamybos technologijas, pirmenybė teikiama AZO plonos dangos. Jos turi žemą savitąją varžą (10⁻⁴ Ω·cm eilės), o taip pat jų gamybai naudojamos aplinkai nekenksmingos bei nebrangios medžiagos. Tačiau šiuo metu susiduriama su šių medžiagų elektrinių savybių stabilumo problemomis. TCO medžiagų savybės turi išlikti stabilios šarminėje arba rūgštinėje terpėse, o jų dangos turi būti atsparios oksidacijai ar redukcijai aukštesnėse temperatūrose [3]

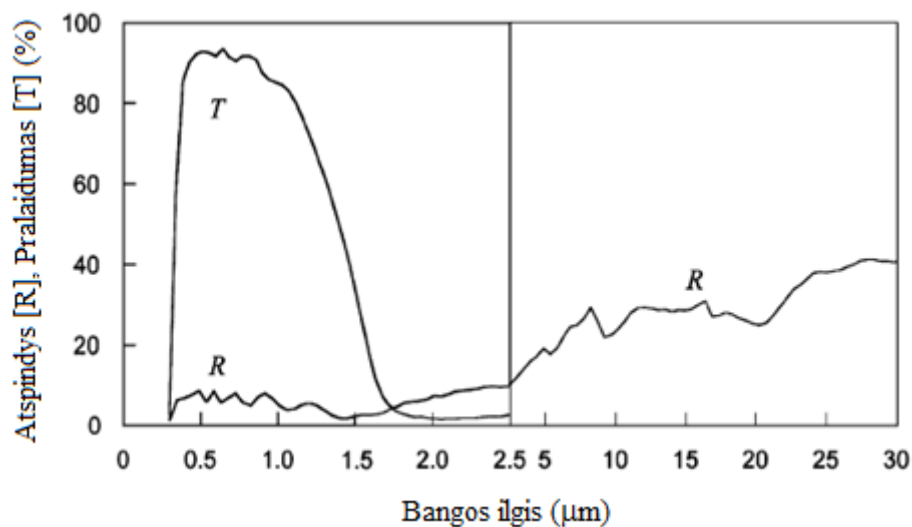
Pagrindė TCO medžiagos yra n-tipo puslaidininkiai, bet šiuo metu išaugo tyrimų skaičius gaminant ir tiriant p – tipo TCO medžiagų (ZnO:Mg, ZnO:N, IZO, NiO, NiO:Li, CuAlO₂, Cu₂SrO₂, and CuGaO₂) plonas dangas[4-7].

1.1 lentelė. Skaidrios ir elektrai laidžios medžiagos bei naudojamos priemaišos

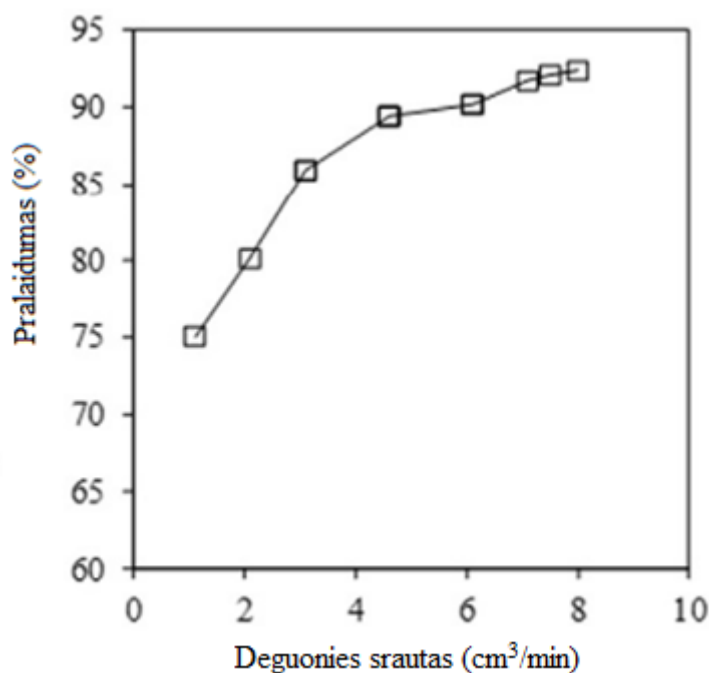
TCO	Priemaišos
SnO ₂	Sb, F, As, Nb, Ta
ZnO	Al, Ga, B, In, Y, Sc, F, V, Si, Ge, Ti, Zr, Hf, Mg, As, H
In ₂ O ₃	Sn, Mo, Ta, W, Zr, F, Ge, Nb, Hf, Mg
CdO	In, Sn
Ta ₂ O	
GaInO ₃	Sn, Ge
CdSb ₂ O ₃	Y

1.2. INDŽIO – ALAVO OKSIDŲ OPTINĖS SAVYBĖS

Siekiant TCO dangas pritaikyti praktikoje, jų absorbcijos koeficientas turi būti labai mažas UV-VIS-NIR spektrų srityse. Arti UV spektro pralaidumą riboja draustinės juostos plotis (E_g), nes fotonai turintys didesnę energiją yra absorbuojami. Antra pralaidumo riba yra NIR zonoje. Idealiu atveju plačiame UV-VIS-NIR spektrų diapazone neturėtų absorbuoti fotonų. Tačiau realiose dangose, esant plačiam elektromagnetinių bangų spektro diapazonui, pralaidumas nesiekia 100 %. ITO dangų atspindžio ir pralaidumo priklausomybės nuo bangos ilgio pateiktos 1.1 pav. [4]

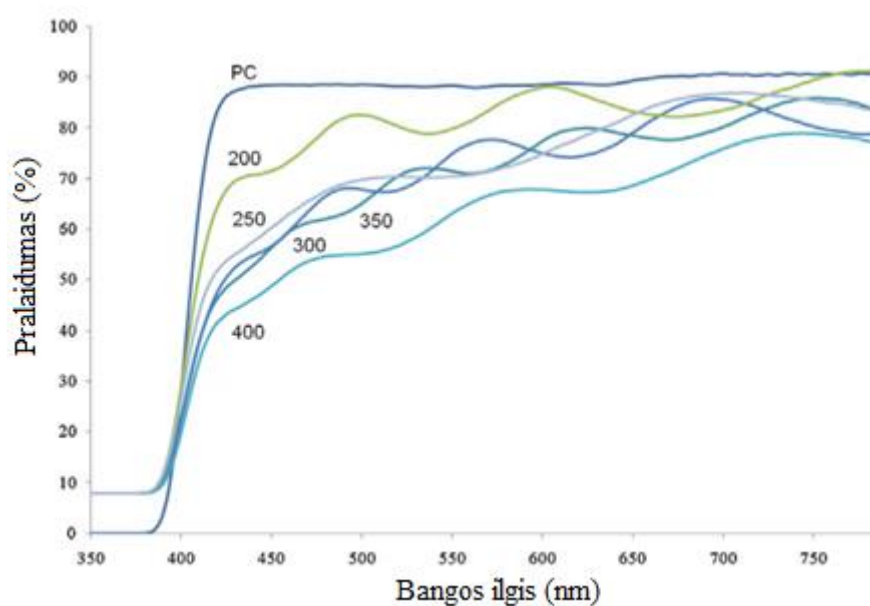


1.1 pav. $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ dangos, suformuotos iš nanodalelių atspindžio ir pralaidumo priklausomybės nuo bangos ilgio [4]



1.2 pav. ITO dangų optinio pralaidumo (550 nm bangos ilgiui) priklausomumas nuo deguonies srauto dangos augimo metu [4]

C. David ir kt. [4] ITO dangas formavo keisdami deguonies koncentraciją auginimo metu. Jų atlikti tyrimai parodė, kad ITO dangų optinis pralaidumas padidėja nuo 75 % iki 93 %, o savitoji varža sumažėja nuo $30 \cdot 10^{-4}$ iki $5 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$, argono plazmoje didinant deguonies srautą nuo 1 iki $8 \text{ cm}^3/\text{min}$ (1.2 pav.). A.Eshaghi ir kt. tyrinėjo ITO dangų, suformuotų magnetroniniu dulkėjimo metodu, optinio pralaidumo, paviršiaus morfologijos, savitosios varžos ir draustinės juostos kitimą priklausomai nuo ITO sluoksnių storio. Autoriai nustatė, kad, didinant ITO dangų storį nuo 200 nm iki 400 nm, optinis pralaidumas regimosios šviesos intervale sumažėja apie 20 % (1.3 pav.). Optinis pralaidumas sumažėja, nes, didėjant dangos storiui, formuojasi stambesni grūdėliai, kurie lemia didesnę šviesos sklaidą [5].



1.3 pav. ITO plonų dangų pralaidumo priklausomybė nuo bangos ilgio, esant įvairiems dangų storiams [5]

Optinės TCO dangų pralaidumo (T), atspindžio (R) ir absorbcijos (A) savybės nusakomos lūžio rodikliu (n), ekstinkcijos koeficientu (k), draustinės juostos pločiu (E_g) ir geometriniais parametrais. Geometrija nusakoma plonos dangos storiu, storio vienodumu, dangos paviršiaus šiurkštumu. Dangų pralaidumo, atspindžio ir absorbcijos koeficientai priklauso nuo cheminės sudėties ir medžiagos struktūros. Krūvininkų koncentracija yra atvirkščiai proporcinga NIR absorbcijos ribai. Tačiau krūvininkų koncentracija tiesiogiai proporcinga UV absorbcijos ribai, nes draustinės juostos plotis didėja, didėjant koncentracijai (Moss-Burstein efektas). Dėl to TCO pralaidumo ribinės vertės ir elektrinis laidumas priklauso vienas nuo kito [5]. Yra nustatyta, kad absorbcijos riba pasislenka link trumpesnių bangų srities, padidėjus elektronų, užpildančių laidumo juostą, koncentracijai įvedant priemaišas.

1.3. INDŽIO – ALAVO OKSIDŲ ELEKTRINĖS SAVYBĖS

TCO yra plačios draustinės juostos puslaidininkiniai oksidai, kurių savitasis laidis (σ) kinta nuo 10^2 iki $1,2 \cdot 10^6$ S. Laidumą sąlygoja susidaręs deguonies vakansijų skaičius arba vakansijų skaičius atsiradęs dėl priemaišų. Pašalinus priemaišas, šie oksidai tampa labai gerais dielektrikais, kurių savitoji varža $\rho > 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$. Daugelis TCO yra n-tipo puslaidininkiniai. Tokių medžiagų elektrinis laidumas priklauso nuo elektronų tankio laidumo juostoje ir jų judrumo:

$$\sigma = \mu n e; \quad (1)$$

čia μ yra elektronų judrumas, n – elektronų tankis, e – elektrono krūvis. Elektronų judrumas:

$$\mu = \frac{e\tau}{m^*}; \quad (2)$$

čia τ yra impulso relaksacijos trukmė, m^* yra efektyvi elektrono masė.

Elektronų judrumas yra ribotas, nes elektronų tankis ir impulso relaksacijos trukmė yra atvirkščiai proporcingi. Kadangi plati draustinė juosta ($E_g > 3$ eV) skiria valentinę juostą nuo laidumo, tai laidumo padidinti termiškai kambario temperatūroje negalima ($kT \sim 0,03$ eV, kur k yra Boltzmano konstanta). Dėl tos pačios priežasties stochiometriniai TCO yra geri dielektrikai.

Taigi savitasis laidis iš esmės ribojamas dėl dviejų priežasčių:

1) n ir μ negalime atskirai keisti (didinti) TCO, turinčiuose dideles krūvininkų koncentracijas. Esant didelei elektronų koncentracijai, krūvių pernešimas pirmiausiai ribojamas jonizuotų priemaišų sklaidos, t.y. Kulono jėgų.

2) Kuo didesnė priemaišų koncentracija, tuo labiau ribojamas krūvininkų judrumas. Pasiekus tam tikrą ribinę vertę, elektrinis laidumas nebedidėja, o optinis skaidrumas mažėja, bangos ilgiui artėjant link artimųjų infraraudonųjų spindulių spektro srities.

Bellingham ir kt. [8] nustatė, kad TCO (ITO, SnO_2 , ZnO) krūvininkų judrumas, o tuo pačiu savitoji varža yra riboti dėl jonizuotų priemaišų sklaidos, krūvininkų koncentracijai pasiekus 10^{20} cm^{-3} vertes. Ellmer taip pat nustatė, kad ZnO plonų dangų, nepriklausomai nuo padengimo metodo, savitoji varža siekia $2 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$, o krūvininkų judrumas – $50 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. ITO dangose maksimali krūvininkų koncentracija siekė $1,5 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-3}$, o varža ir krūvininkų judrumas buvo toks pat kaip ir ZnO .

Ši savybė būdinga visiems puslaidininkiams. Jonizuotų priemaišinių atomų, homogeniškai pasiskirsčiusių puslaidininkyje, sklaida yra tik vienas iš galimų judrumą ribojančių veiksnių. Taip pat dėl šio efekto, esant didelei krūvininkų koncentracijai, gali įvykti priemaišinių jonų persigrupavimas, kas dar labiau padidina krūvininkų sklaidą [8, 9]

1.4. INDŽIO – ALAVO OKSIDŲ PLONŲ DANGŲ AUGINIMO FIZIKINIAI METODAI

Iš dujinės fazės dangos gali būti nusodinamos fizikiniais (PVD), cheminiais ar kombinuotais būdais. Nusodinimas iš garų fazės vyksta, kai kietosios būsenos medžiaga garuoja (paverčiama atomais arba molekulėmis) iš garintuvo. Atomai arba jų klasteriai yra pernešami link padėklo vakuume arba plazmoje.

PVD būdu galima formuoti įvairių medžiagų (vieno elemento medžiagų, lydinių ir junginių) dangas, vykdant garinimo procesą inertinių ir/arba reaktyviųjų dujų aplinkoje.

Naudojant PVD būdus, plonų dangų formavimo metu pasireiškia keli jų augimo mechanizmai. Plona danga auga atomams iš garų fazės kondensuojantis ant padėklo. Procesą sąlygoja kondensacijos sąlygos ant padėklo paviršiaus ir atlekiančių atomų srauto parametrai. Kondensacijos sąlygas įtakoja padėklo parametrai: temperatūra, cheminė sudėtis, struktūra, kristalografinė orientacija, paviršinių defektų koncentracija, paviršiaus švarumas. Atlekiančių atomų srauto parametrai priklauso nuo medžiagos tipo ir būdo, kuriuo medžiaga buvo paversta į garų fazę. Pastarąjį parametras lemia atlekiančios medžiagos srauto tankis, jo atomų pasiskirstymas erdvėje, jei tai daugiakomponentinis srautas, pasiskirstymas pagal energijas ir dalelių erdvinės trajektorijos. Sudarant sudėtingų oksidų plonus sluoksnius, nusodinimas vyksta dujų mišinio aplinkoje į kurį įeina deguonis. Oksido junginiai formuojasi ant padėklo paviršiaus, vykstant reaktyviajam procesui. Reaktyvios dujos taip pat keičia ir atlekiančio srauto charakteristikas. Nevertinant parametru gausos, yra galimi trys sluoksnių augimo mechanizmai: Volmerio-Veberio, Franko van der Merves ir Stranski-Krastanovo. Pirmuoju atveju augimas vyksta salelėmis. Franko van der Merves mechanizmas nusako sluoksnių augimą, kai sluoksniai auga vienas ant kito. Stranski-Krastanovo sujungia pirmus du augimo būdus. Kuris mechanizmas pasireiškš, priklauso nuo nusodinamų atomų tarpusavio bei tų atomų ir padėklo ryšių energijų. Sluoksnių mikrostruktūros priklausomybę nuo padėklo ir sluoksnių lydymosi temperatūrų santykio vakuuminiam garinimui sudarė B.A. Movčan ir A.V. Demčišin.

ITO dangų formavimui dažnai naudojami du PVD metodai: joninio dulkejimo [1, 4, 10-15] ir terminio garinimo [2, 16]. Pats populiariausias ITO plonų sluoksnių auginimo metodas yra joninis dulkejimas. Dulkejimo procesas nuo garinimo proceso skiriasi tuo, kad jis nepriklauso nuo medžiagos temperatūros ir yra sąlygojamas bombarduojančios dalelės impulso, o ne energijos perdavimo. Lengviausiai galima pagreitinti jonizuotas daleles, todėl praktiškai dulkejimo procesas vyksta bombarduojant medžiagas teigiamais jonais. Dulkejimo metu, bombarduojama medžiaga pervedama į dujinę būseną ir plonas sluoksnis kondensuojasi ant padėklo. Dabartiniu metu visus naudojamus jonų srauto gavimo metodus galima suskirstyti į dvi grupes:

1. Jonai, bombarduojantys taikinį, ištraukiami iš plazmos, suteikus taikiniui neigiamą potencialą plazmos atžvilgiu. Dujų plazmai gauti dažniausiai yra naudojamas savaiminis rusenantis išlydis dujose. Tokiose sistemose joninis dulkėjimas atliekamas $10\text{-}10^{-2}$ Pa slėgio dujose, nes gilesniame vakuume išlydis nevyksta.

2. Jonų srauto gavimui naudojami skirtingų tipų ir konstrukcijų jonų šaltiniai, kuriuose yra suformuojamas reikalingos energijos ir tankio jonų srautas. Toks procesas vadinamas dulkėjimu joniniu pluošteliu. Be minėtų techninių ypatumų, joninis dulkėjimas nuo terminio garinimo žymiai skiriasi ir gautų dalelių parametrais, kurie priklauso nuo proceso mechanizmo.

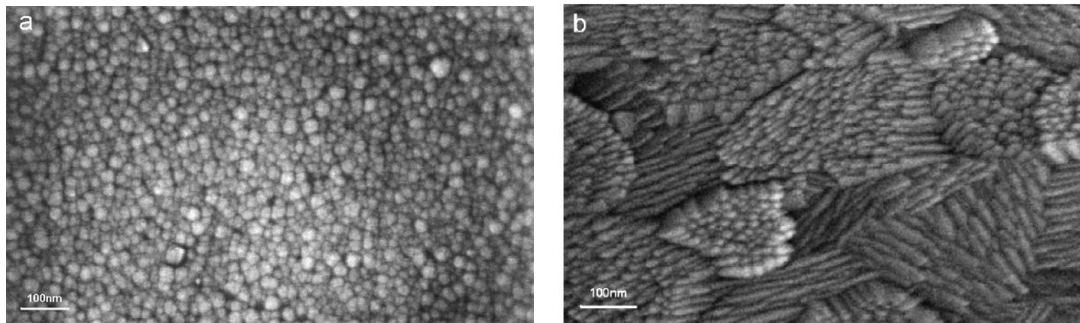
Bombarduojant medžiagas pagreitintais jonais vyksta daug procesų, kurie priklauso nuo daugelio parametrų: jonų masės, energijos, krūvio, bombarduojančios medžiagos savybių (atomų masės, atomų ryšio energijos, struktūros), paviršiaus reljefo, poveikio sąlygų (jonų kritimo kampo, taikinio temperatūros ir kt.)

Vyraujantys procesai labiausiai priklauso nuo jonų kinetinės energijos. Kai jonų energija viršija tam tikrą slenkstinę energiją, stebimas medžiagos dulkėjimas. Slenkstinė energija priklauso nuo medžiagos savybių ir jono masės, ir dažniausiai yra lygi 15-30 eV. Joninio dulkėjimo greitis visoms medžiagoms priklauso nuo joninio dulkėjimo koeficiento ir jonų srauto. Joninio dulkėjimo koeficientas priklauso nuo medžiagos ir jonų savybių: jonų atominės masės ir energijos, kritimo į taikinį kampo, taikinio atomų atominės masės, taikinio temperatūros. Konkrečiu atveju šis koeficientas nustatomas eksperimentiškai arba apskaičiuojamas remiantis dulkėjimo mechanizmu.

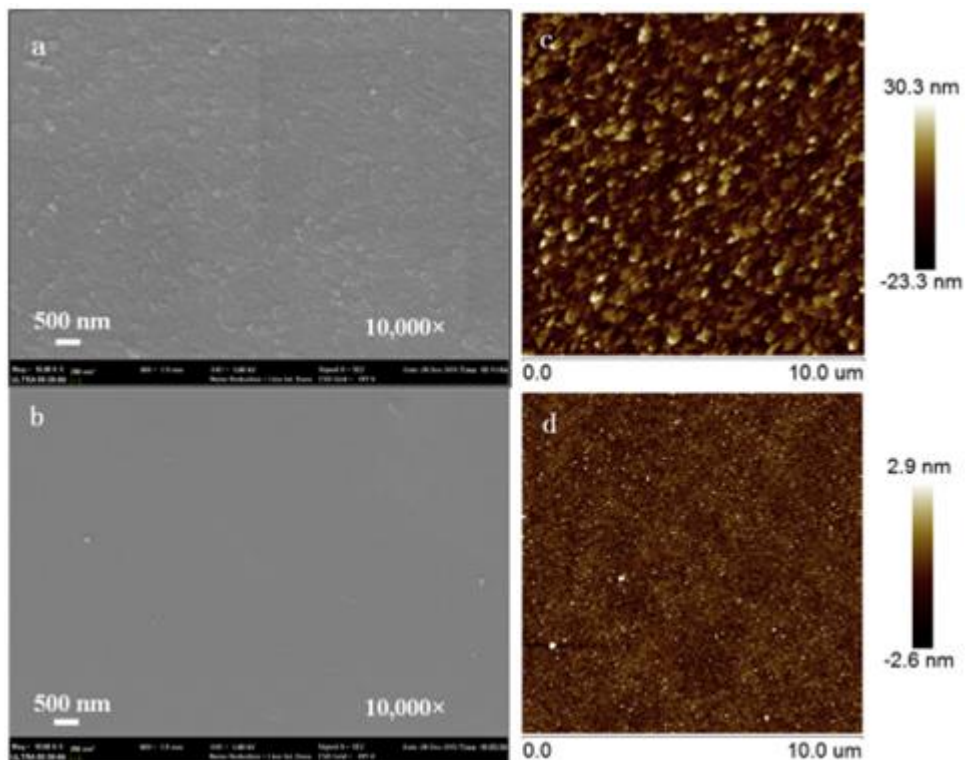
Literatūroje daugiausiai aprašomi ITO plonų dangų auginimas magnetroninio joninio dulkėjimo metodais. Dažniausiai naudojamas nuolatinės srovės reaktyvinis magnetroninis nusodinimas, kai nusodinimas atliekamas argono ir deguonies aplinkoje. Dulkėjimas gali vykti iš dviejų skirtingų magnetronų, į kuriuos yra įstatomi indžio ir alavo metaliniai taikiniai arba kai į vieną magnetroną įstatomas indžio-alavo lydinio taikiny [17]. Kitas būdas - radijo dažnio magnetroninis nusodinimas [12]. Jis gali būti atliekamas argono ir kartais argono su nedideliu deguonies kiekiu aplinkoje. Taikiny dažniausiai yra norimos sudėties indžio-alavo oksidas. Dangų paviršiaus morfologiją galima keisti, naudojant skirtingas auginimo metodikas. Formuojant dangą kambario temperatūroje ir vėliau ją atkaitinus $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūroje, vieną valandą, gaunamas tolygus paviršius (1.4 pav. a). Formuojant dangą ant karšto ($200\text{ }^{\circ}\text{C}$) padėklo, susidaro įvairiomis kryptimis orientuotos nanokolonos (1.4 pav. b) [3].

Y. Wang ir kt. [18] ITO dangas formavo argono ir argono-deguonies plazmose. Jie nustatė, kad papildomai įvedant deguonį (5, 10 ar $20\text{ cm}^3/\text{min}$) į argono plazmą ITO dangų storis nuo $1,46\text{ }\mu\text{m}$ sumažėja iki $0,42\text{ }\mu\text{m}$, o savitoji varža padidėja nuo $6,83\text{ }10^{-4}$ iki $1,53\text{ }10^{-3}\text{ }\Omega\text{cm}$. Deguonies įvedimas lemia ir ITO dangų paviršiaus šiurkštumo sumažėjimą (1.5 pav.)

Šis metodas gana paprastas, tačiau turi kelis trūkumus: praktiškai negalima keisti indžio alavo santykio ir sąlyginai nedidelis dangos augimo greitis. Tačiau šiuo būdu galima gauti gerą dangos savybių tolygumą. Šiais metodais gaunamos tankios, neporėtos dangos, kurių savitoji varža yra nuo $5,5 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ iki $7,5 \cdot 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$, o optinis pralaidumas (80÷90) %, draustinės juostos plotis 3,5-4,0 eV [3].



1.4 pav. ITO dangų paviršiaus vaizdai: a) suformuotos ir atkaitintos 200 °C; b) augintos ant 200 °C temperatūros padėklo [3]



1.5 pav. ITO dangų paviršiai: (a ir c) suformuoti argono plazmoje, (b ir d) argono-deguonies plazmoje [18]

ITO plonų sluoksnių auginimas, naudojant terminio garinimo PVD metodą, gali būti vykdomas terminiu rezistyviniu būdu, naudojant metalinius indį ir alavą. Taip pat gali būti vykdomas garinimas elektronų pluoštu. Antruoju būdu dažniausiai jau garinami indžio-alavo oksido supresuoti milteliai. Dangų auginimas dažniausiai atliekamas ant skaidrių stiklo padėklų, kurių temperatūra auginimo metu gali kisti nuo kambario iki 400 °C. Po auginimo, sluoksniai gali

būti papildomai atkaitinami keletą valandų oro aplinkoje, kurios temperatūra neaukštesnė kaip 400 °C. Atkaitinimo metu gerėja dangų kristališkumas, jei joms augimo metu neužteko energijos pilnai kristalizacijai. Dėl to gerėja optinės ir elektrinės savybės. Šiais metodais užaugintų sluoksnių savitoji varža yra $(3\div 9) \cdot 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$, o optinis pralaidumas (70÷90) %, draustinės juostos plotis 3,8-3,9 eV [3].

Auginant ITO plonus sluoksnius gali būti taikomas plazma aktyvuotas reaktyvusis garinimas. Reaktyvaus garinimo metu, junginiai susiformuoja, garuojant medžiagai ir vykstant plazmocheminei reakcijai su aplinkoje esančiomis dujomis (O_2 , N_2).

Garinimas vakuume taip pat sumažina užterštumą sistemoje. Liekamųjų dujų slėgis sistemoje yra nuo 10^{-3} iki 10^{-6} Pa. Šis slėgis priklauso nuo vakuuminių siurblių galios, kameros didžio ir švarumo. Garinamos medžiagos garų sudėtis proporcinga išlydytos medžiagos garų slėgiui. Terminis garinimas vykdomas, rezistyviai kaitinant lovelį, kuris dažniausiai būna pagamintas iš molibdeno. Padėklai montuojami tokiu atstumu, kad garinimo šaltinis nekaitintų padėklo šiluminio spinduliavimo būdu. Atomai laisvai garuoja nuo paviršiaus, jeigu išlėkę iš paviršiaus nepatiria susidūrimų. Šiuo atveju garavimo greitis apskaičiuojamas pagal Hertz ir Knudsen išraišką:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{C(p^* - p)}{\sqrt{2\pi mkT}}; \quad (3)$$

čia dN – išgaravusių atomų skaičius iš kvadratinio centimetro; C – konstanta, priklausanti nuo skysčio ir garų rotacinių laisvės laipsnių; p^* – medžiagos garų slėgis esant temperatūrai T ; p – liekamųjų dujų slėgis; k – Bolcmano konstanta; T – absoliučioji temperatūra; m – garinamos medžiagos masė.

Didžiausias garavimo greitis yra, kai $p = 0$ Pa, o $C = 1$. Jeigu garavimo greičiai maži, erdvinis atomų srauto pasiskirstymas gali būti aprašomas kosinuso dėsnium. Jei, esant medžiagai dujinėje fazėje, nevyksta susidūrimų, tai medžiaga nusodinama nuo šaltinio ant padėklo tiesiomis linijomis. Medžiagos, nusodinamos iš taškinio šaltinio ant paviršiaus, nusodinimo greitis priklauso nuo atstumo ir padėklo pasukimo kampo:

$$\frac{dm}{dA} = \frac{E}{\pi r^2} \cos \phi \cos \theta; \quad (4)$$

čia dm/dA – masė ploto vienetė; E – visa išgarinta masė; r – atstumas nuo šaltinio iki padėklo; θ – garavimo kampas normalės atžvilgiu; ϕ – kampas nuo šaltinio – padėklo linijos [19].

Bet kuriame paviršiaus taške kampinis nusodinamųjų dalelių pasiskirstymas yra mažas, nes jie garuoja iš taškinio šaltinio. Kampinis srauto pasiskirstymas iš laisvo paviršiaus nebūtinai

pasiskirstęs pagal kosinuso dėsnį. Jis priklauso nuo šaltinio geometrijos, susidūrimų, dėl didelio garavimo greičio, garinamos medžiagos lygio garintuve [19].

Plazma aktyvuoto garinimo metodas taikomas bismuto oksido dangoms nusodinti. A. Iljinas ir kiti suformavo plonas bismuto oksido dangas, naudodami reaktyviojo ir jonais aktyvinto reaktyviojo garinimo būdą [20].

Galimos ir kitos jonais aktyvuoto garinimo sistemų konstrukcijos: nuolatinės srovės šaltinis, generuojantis plazmą, ir garintuvas su elektronų spinduliu, garintuvas su indukcinio kaitinimo sistema. Naudojant rezistyvinius garintuvus, garinamų medžiagų įvairovė apribojama iki medžiagų, kurių lydymosi temperatūros yra mažesnės kaip 1300 °C. Naudojant garinimo elektronų spinduliu metodą, galima gauti didelius nusodinimo greičius netgi tų medžiagų, kurių lydymosi temperatūra didesnė negu 3000 °C. Siūlelio tipo elektronų patrankos prastai dirba esant dideliems slėgiams, reikalingiems žerintiems išlydžiams gauti. Siekiant pailginti siūlelio naudojimo laiką, o taip pat padidinti elektronų laisvojo kelio ilgį, kurio reikia siekiant jonizuoti dujas, būtinas papildomas diferencijuotas siurbimas [21]. Bunshal, Raghuram, Deshpandey [21, 22] aprašė metodą, kurį naudojant, metalas, garinamas elektronų spinduliu, reaguoja su reaktyviųjų dujų plazma ir nusodinamas ant padėklo kaip junginys. Metodas buvo pavadintas plazma aktyvuotu reaktyviuoju garinimu. Šiuo metodu plazma sukuriama tarp įžemintos kameros ir zondo, prie kurio prijungtas aukštosios įtampos teigiamasis polius. Plazma palaikoma elektronų, emituojamų iš elektronų spindulio. Srovės stipris zonde yra 40–170 mA, o įtampa – 20–80 V. Reaktyviosios dujos naudojamos tokios, kaip ir reaktyviojo dulkėjimo sistemose. Darbinių dujų slėgis, vykstant nusodinimo procesui, yra $10 \cdot 10^{-2}$ Pa. Dar gali būti plazma aktyvuoto garinimo sistema, kurioje plazma yra sužadinama indukciškai radijo dažniu. Tokią sistemą išrado Murayama [22]. Naudojant radijo dažnį, galima gauti stabilesnį išlydį, didesnį jonizacijos laipsnį nei nuolatinės srovės išlydžiuose. Taip pat yra ir modifikuotų jonais aktyvuoto garinimo sistemų, kai plazma sužadinama tiesiogiai prijungus radijo dažnio šaltinį į padėklo laikiklį, pastatant magnetus už padėklų. Siekiant padidinti dujų jonizaciją gali būti naudojami siūleliai, emituojantys elektronus, kurie sumontuojami šalia garintuvo.

Svarbiausias plazma aktyvuoto garinimo metodo privalumas yra tas, jog plazma gali būti kontroliuojama nepriklausomai nuo metalų garavimo greičio. Reguluojant elektronų energiją plazmoje ir siekiant maksimalaus dujų sužadinimo, galima generuoti chemiškai aktyvius darinius: sužadintus atomus ir molekules. Šis privalumas išnaudojamas, nusodinant junginių dangas. Proceso metu dažnai pastebimas nusodinimo greičio sumažėjimas, esant reaktyviajam dulkėjimui, nes, sąveikaujant su aktyvia aplinka, ant taikinio susiformuoja stabilūs junginiai. Tačiau plazmos jonais aktyvuoto garinimo proceso metu metalai lydosi garintuve ir nusodinimo greičio

sumažėjimas pasireiškia retai. Taikant jonais aktyvuoto garinimo metodą, pasiekiami nusodinimo greičiai yra didesni nei 10 $\mu\text{m}/\text{min}$.

Vykstant plazma aktyvuoto nusodinimo procesui, padėklas, o tuo pačiu ir danga nuolatos bombarduojamas argono arba deguonies jonais. Dėl joninio bombardavimo padidėja padėklo temperatūra. Tarp padėklo ir dangos atsiranda abipusis difuzinis sluoksnis. Esant didesnėms jonų energijoms, vyksta vidinis dangos ir padėklo medžiagų maišymasis. Dėl šios priežasties plazmos jonais aktyvuoto garinimo metodu nusodintų dangų adhezija yra gerokai didesnė, negu nusodinant dangas klasikiniu garinimo metodu. Plazma aktyvuoto garinimo metodu nusodintos dangos pasižymi stipria adhezija, mažu porėtumu, atsparumu korozijai ir mechaniniam poveikiui.

ITO dangų formavimas magnetroniniu dulkėjimo metodu yra gana plačiai nagrinėjamas, vertinant proceso parametrų įtaką suformuotų dangų morfologijai, fazinei sudėčiai, optinėms bei elektrinėms savybėms. Tačiau duomenų apie ITO dangų formavimą naudojant plazma aktyvuoto reaktyvaus terminio garinimo metodą yra nedaug. Taip pat mažai duomenų apie optimalų indžio ir alavo masių santykį plonose dangose. Be to nepakankamai išsamiai yra ištirta indžio ir alavo masių santykio įtaka dangų optiniam pralaidumui, elektrinėms savybėms, draustinėms juostos pločiui bei kt. Siekiant šio tipo plonas dangas sėkmingai pritaikyti praktikoje būtini sistemingi tyrimai.

2. MEDŽIAGOS IR TYRIMO METODAI

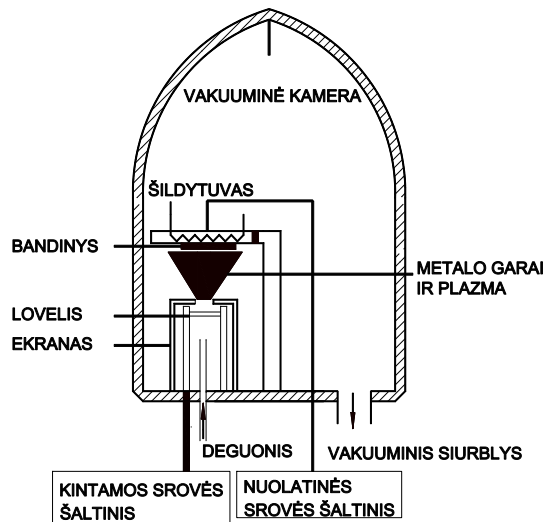
2.1. INDŽIO – ALAVO OKSIDŲ PLONŲ DANGŲ AUGINIMO ĮRANGA

Ploni indžio-alavo oksido sluoksniai buvo auginami ant stiklo 2.1 pav. pavaizduota rezistyvino terminio garinimo vakuume sistema UVN. Didžiausias vakuumas, kurį galima pasiekti šia vakuumine sistema yra $5 \cdot 10^{-3}$ Pa.



2.1 pav. Plazma aktyvuoto garinimo įrenginys

Ši sistema yra modifikuota, taip, kad joje būtų galima auginti sluoksnius plazma aktyvuotu reaktyviojo garinimo metodu. Tam prie kameros yra prijungtas deguonies padavimo srauto reguliatorius, kuris leidžia keisti deguonies padavimo srautą nuo $0 - 500 \text{ cm}^3/\text{min}$. Plazma sukuriama tarp ekrano ir bandinio laikiklio, naudojant aukštos įtampos nuolatinės srovės šaltinį. Garinimas atliekamas iš molibdeno lovelio, į jį įdedant norimą išgarinti indžio ir alavo medžiagos kiekį. Keičiant įdedamas indžio ir alavo mases, gaunamos skirtingos sudėties dangos. Plazma aktyvuoto reaktyvaus garinimo kameros schema yra pavaizduota 2.2 pav.



2.2 pav. Plazma aktyvuoto reaktyvaus garinimo sistemos schema

Plonų ITO dangų formavimo plazma aktyvuoto garinimo įrenginio parametrais nurodyti 2.1 lent.

2.1 lentelė. Dangų auginimo sąlygos

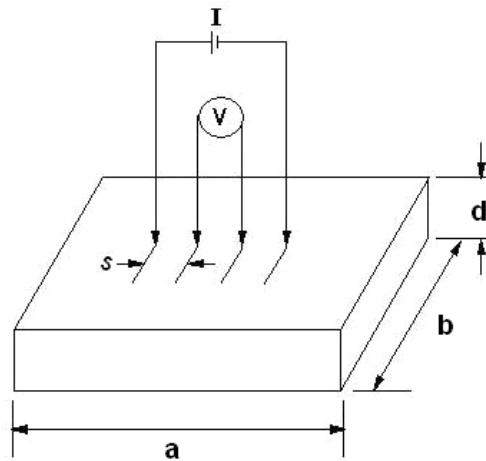
Auginimo parametras	Vertės
Pradinis slėgis, Pa	$5 \cdot 10^{-3}$
Deguonies dujų slėgis auginimo metu, Pa	4
Atstumas tarp lovelio ir bandinio, cm	10
Įtampa tarp ekrano ir bandinio, V	400
Išlydžio srovė, A	0,625
Garintuvu tekanti srovė, A	75

Įdedamos išgarinti medžiagos masė buvo nustatoma analitinėmis svarstyklėmis A&D GR 202. Svarstyklių absoliutinė paklaida – 0,01 mg.

Užaugusių dangų storiai išmatuoti profilometru.

2.2. VARŽOS MATAVIMAS KETURIŲ ZONDŲ METODU

Medžiagų elektrinis laidumas priklauso nuo elementinės sudėties, struktūros, fazinės būsenos ir gali kisti plačiose ribose. Todėl elektrinių charakteristikų matavimas yra labai efektyvus netiesioginis plonų sluoksnių savybių tyrimo metodas. Sluoksnių paviršinės varžos buvo matuojamos keturių zondų metodu. Sluoksniai buvo sudaromi stačiakampio (2.3 pav.) formos [23].



2.3 pav. Paviršinės varžos matavimo keturių zondų metodu principinė schema, kai zondai išdėstyti vienoje linijoje ir vienodais atstumais vienas nuo kito

Per kraštinius zondus leidžiama srovė, o tarp vidurinių zondų matuojamas potencialų skirtumas. Sluoksnio, kurio storis žymiai mažesnis už jo plotį ir ilgį, paviršiaus kvadrato varža apskaičiuojama naudojant formulę:

$$R_s = \frac{\pi}{\ln 2} \cdot \frac{U}{I}; \quad (5)$$

čia R_s - paviršiaus kvadrato varža, U - įtampos kritimas bandinyje, I – srovė stipris.

Savitoji varža apskaičiuojama pagal formulę:

$$\rho = R_s \cdot d; \quad (6)$$

čia d – sluoksnio storis.

2.3. ELEKTRINIŲ SAVYBIŲ TYRIMAS

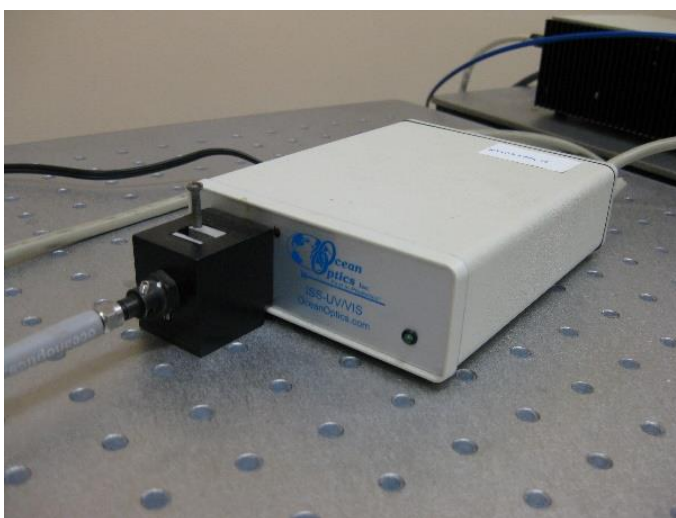
Elektrinės ir elektro-terminės indžio-alavo oksido savybės nustatytos prie bandinio kontaktų prijungus nuolatinę įtampą ir išmatavus sluoksniu tekančios elektros srovės stiprį. Taip buvo nustatytos voltamperinės sluoksnio ir kontaktų priklausomybės. Sluoksnio paviršiaus temperatūra buvo matuojama termopora.

Šiems tyrimams naudota įranga: maitinimo šaltinis (AIM-TTI INSTRUMENTS, PL303QMD), kuriuo galima keisti įtampą nuo 0 iki 30 V, ampermetras (Agilent 34410A), multimetras (Mastech MS 8229) su termoporiniu zondų. Matavimai žemesnėse temperatūrose buvo atliekami šaldant bandinį Peltje elementu ir bandinio temperatūra buvo pažeminta iki $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

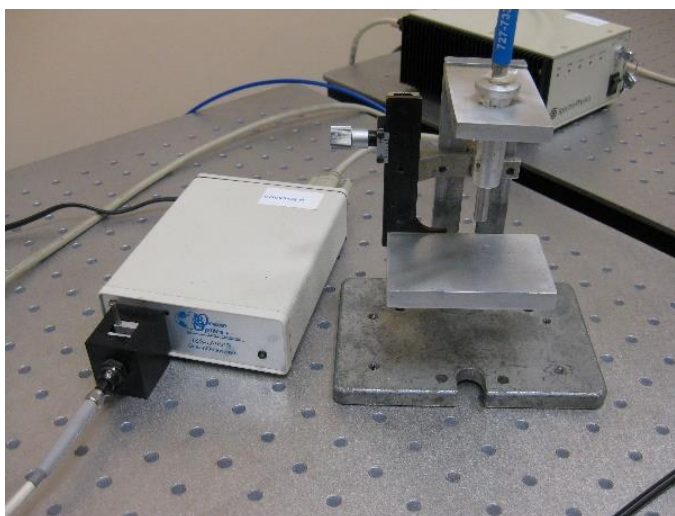
Srovė, tekanti per indžio-alavo oksido sluoksnį, didina jo ir stiklo padėklo temperatūrą. Darbe buvo nustatyti bandinio temperatūros kitimo dėsningumai, prie bandinio prijungiant nuo 12 V iki 27 V įtampą.

2.4. OPTINIO PRALAIIDUMO IR ATSPINDŽIO SPEKTRO MATAVIMAI ULTRAVIOLETINIO IR REGIMOSIOS ŠVIESOS SPEKTRŲ SRITYSE

Šiame darbe naudojamas šviesolaidinis spektrometras „Ocean Optics“ USB4000. Prietaisas leidžia keisti krentančios šviesos bangos ilgį nuo 250 nm iki 850 nm. Šiuo prietaisu galima išmatuoti šviesos pralaidumo ir atspindžio priklausomybes nuo šviesos bangos ilgio. 2.4 pav. pavaizduota pralaidumo spektro matavimo įranga, o 2.5 pav. pavaizduota atspindžio matavimo įranga.



2.4 pav. UV-VIS spinduliuotės spektro pralaidumo matuoklis



2.5 pav. UV-VIS spinduliuotės spektro atspindžio matuoklis

Naudojant pralaidumo ir atspindžio duomenis, absorbcijos koeficientą galima apskaičiuoti pagal formulę:

$$\alpha = \frac{1}{d} \cdot \ln\left(\frac{1}{T}\right); \quad (7)$$

čia: d - dangos storis;; T – pralaidumas.

Jei yra išmatuotas atspindžio priklausomybė nuo bangos ilgio R atsižvelgiant į sąryšį:

$$T = \frac{(1-R)^2 e^{-\alpha d}}{1-R^2 e^{-2\alpha d}}; \quad (8)$$

absorbcijos koeficientas skaičiuojamas pagal sekančią išraišką:

$$\alpha = \frac{1}{d} \cdot \ln \left\{ \frac{(1-R)^2}{2T} + \frac{1}{\sqrt{\left[\frac{(1-R)^2}{2T}\right]^2 + R^2}} \right\}; \quad (9)$$

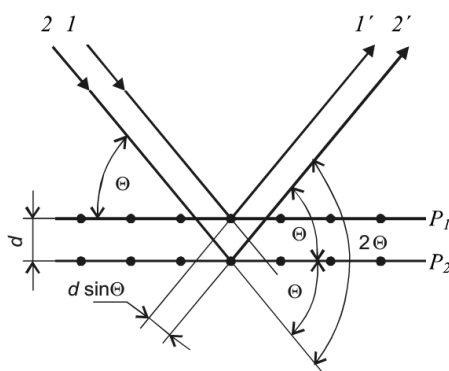
Tauco metodu ekstrapoliuojant $(\alpha h\nu)N = f(h\nu)$ priklausomybę galima tiksliai nustatyti plonos plėvelės draustinės juostos plotį, kuris yra svarbi puslaidininkinių medžiagų savybė [24]

2.5. RENTGENO SPINDULIŲ DIFRAKCIJOS TYRIMO METODAS

Indžio-alavo oksido dangų kristalografinės struktūros buvo ištirtos „Bruker“ firmos „D8 Advance“ difraktometru, naudojant Bregio-Brentano θ - 2θ geometrinę konfigūraciją. Įrenginyje naudojamas $\text{CuK}\alpha$ spinduliavimas, kurio bangos ilgis yra 0,15418 nm. Difrakcijoje rentgeno spinduliai registruojami $10^\circ - 60^\circ$ kampų intervale.

Rentgeno spindulių difrakcija (XRD) yra nedestruktyvus analizės metodas, naudojamas metalų, puslaidininkų, dielektrikų ir jų lydinių kristalinei struktūrai apibūdinti. Juo galima tirti kietuosius kūnus, miltelius, plonas dangas bei plėveles .

Kad rentgeno spinduliai difraguotų, turi būti tenkinama Bregio sąlyga. Tai pavaizduota 2.6 pav., kai rentgeno spindulys krinta į lygiagrečias plokštumas P_1 ir P_2 , kurias skiria atstumas d .



2.6 pav. Scheminis krintančių (1 ir 2) ir atsispindėjusių (1' ir 2') spindulių atvaizdavimas [25]

Monochromatiniai spinduliai 1 ir 2 su plokštumomis sudaro kampą θ . Kampas tarp kritusio ir konstruktyviojo atspindžio spindulių yra 2θ . Atsispindėjęs spindulys didžiausią intensyvumą pasieks, kai 1' ir 2' bangų fazės sutaps. Konstruktyvi interferencija įvyks tuomet, kai bangų eigos skirtumas tarp 1 ir 1' bei tarp 2 ir 2' bus bangos ilgio kartotinis. Tai yra vadinamas Brego dėsnis, kuris užrašomas taip:

$$2d \sin \theta = n\lambda; \quad (10)$$

čia d – atstumas tarp plokštumų P_1 ir P_2 ; θ – į plokštumą krintančių spindulių kampas; λ – bangos ilgis; n – sveikas skaičius, nurodantis difrakcijos laipsnį [25].

Kokybinė rentgeno spindulių difrakcija yra paremta tuo, kad kiekviena medžiagos fazė turi tik jai specifinę kristalinę gardelę. Šią gardelę sudaro atominių plokštumų šeimos, kurių tarplokštuminiai atstumai yra būdingi tik tos fazės kristalų gardelei. Todėl difraktogramoje pateikiami šią fazę atitinkantys difrakciniai maksimumai, vadinami smailėmis. Daugiafazės medžiagos difraktogramoje yra išdėstytos smailės, kurios priklauso visoms fazėms, o bendrą difrakcinį vaizdą sudaro difrakcinių maksimumų visuma. Fazę, kurios kiekis medžiagoje mažas, atvaizduoja tik patys intensyviausi maksimumai. Įprastinis difrakcijos spektras susideda iš kreivės, kurioje pavaizduota atsispindėjusių spindulių intensyvumo priklausomybė nuo detektoriaus kampo 2θ ar θ (atsižvelgiant į goniometro konfigūraciją).

Lyginant gautas rentgenogramas su atitinkamų fazių standartinėmis rentgenogramomis, buvo identifikuotos sudarytų plonų plėvelių fazės ir kristalinė sandara. Jeigu XRD spektre buvo stebimi vienas arba keli statūs difrakciniai maksimumai, tai gauta danga buvo laikoma polikristaline.

2.6. SKENUOJANČIOS ELEKTRONINĖS MIKROKOPIJOS TYRIMO METODAS

Indžio-alavo oksido dangų morfologija buvo ištirta „Raith“ firmos „e-LINE“ skenuojančiu elektroniniu mikroskopu. Įrenginyje naudojamas terminio lauko emisijos elektronų šaltinis. Tiriant

sluoksnius, SEM greitinanti įtampa buvo 10 kV, didinimas nuo 20 iki 50 tūkstančių kartų, o atstumas nuo tiriamojo bandinio iki detektoriaus buvo 8 – 11 mm.

Skenuojančio elektroninio mikroskopo paskirtis yra gauti labai daug kartų (iki 100 tūkstančių) padidintą tyrinėjamo paviršiaus vaizdą. Šiuo mikroskopu galima analizuoti metalų, dielektrikų, puslaidininkių paviršius bei jų pjūvius. Prietaiso veikimo principas yra pagrįstas 5 – 10 nm sufokusuoto elektronų pluoštelio sąveika su paviršiumi vakuume. SEM detektorius fiksuoja atsispindėjusius nuo bandinio elektronus ir iš bandinio išmuštus antrinius elektronus.

Skenuojančiame elektroniniame mikroskope, tiriamos medžiagos paviršiaus vaizdai gauti, naudojamos elektronų šaltinio generuojamas elektronų pluoštelis. Iš katodo išspinduliuoti elektronai yra įgreitinami elektriniame lauke, sufokusuojami į siaurą pluoštelį, kuriuo yra skenuojamas bandinys ir taip gaunamas paviršiaus vaizdas. Elektroninio mikroskopo sukuriama vaizdo kokybė priklauso nuo elektronų šaltinio dydžio, formos, jų įgreitinimo įtampos bei srovės dydžio, kuri pernešą elektronų pluoštelis.

2.7. ENERGINĖS DISPERSIJOS RENTGENO SPEKTROSKOPIJA

Energinės dispersijos rentgeno spektroskopijos (EDS) metodas buvo naudojamas bandinių elementinei analizei atlikti. EDS įranga yra sujungta su SEM. EDS veikimo principas remiasi rentgeno spindulių, kurie yra išspinduliuojami iš bandinio, kai į jį nukreipiamas elektronų srautas, analize. Elektronai sužadina bandinio atomus, kurie, vėliau grįždami į stabilią būseną, išspinduliuoja rentgeno spindulius. Kiekvieno elemento atomai gali spinduliuoti tik tam tikros energijos rentgeno spindulius, todėl išspinduliuoti iš bandinio spinduliai spektre suformuoja būdingas smailes. Atskiri elementai gali turėti daugiau kaip vieną charakteringą smailę, taip pat skirtingų elementų smailės gali persidengti.

EDS spektras gali būti gaunamas iš tam tikrų bandinio taškų/dalelių, kadangi elektronų srautas gali būti tiksliai kontroliuojamas. Taip įmanoma analizuoti tik kelis kubinius mikrometrus medžiagos. Galima gauti linijos profilius ir elementų pasiskirstymo žemėlapius, pagal kuriuos galima nustatyti elementus bandinio plote. Pagrindiniai darbe naudoto EDS spektrometro Bruker XFlash QUAD 5040 parametrai pateikti 2.2 lent.

2.2 lentelė. Pagrindiniai EDS Bruker XFlash QUAD 5040 naudoti parametrai

Skiriamoji geba	3,6 nm
Greitinanti įtampa	17 kV
Didinimas	~5 000 kartų
Pirminio elektrono srovė	10^{-6} A
Slėgis kameroje	10^{-4} Pa

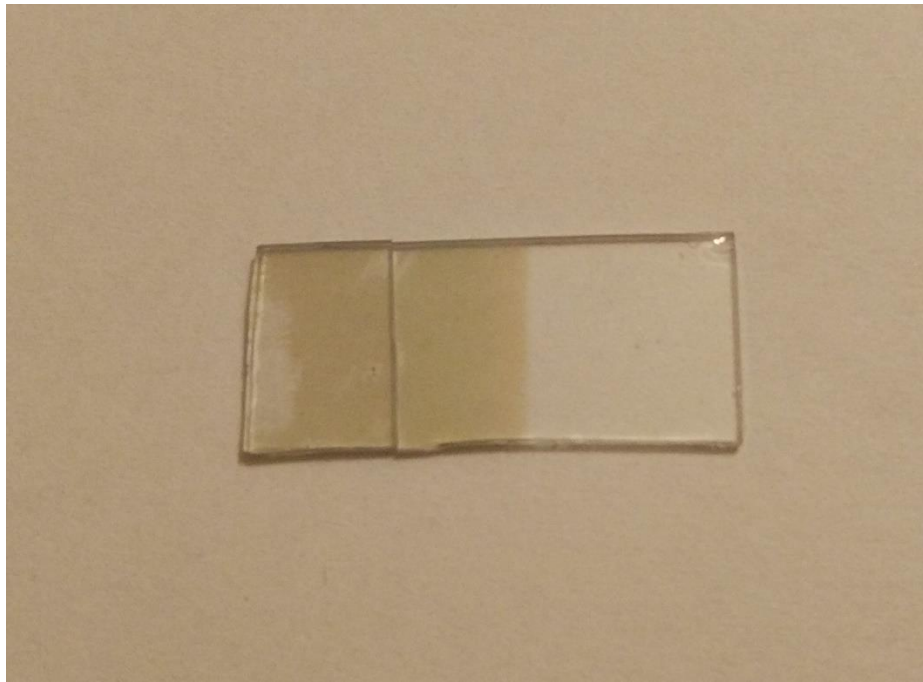
3. REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS

Tyrimų metu buvo užaugintos šešios skirtingos indžio ir alavo oksido sudėties (santykio) plonos dangos ant stiklo padėklų, plazma aktyvuoto terminio garinimo metodu. Auginimo metu visų stiklo padėklų temperatūra buvo 350 °C. Aukštesnė padėklo temperatūra pagerina sluoksnio ir padėklo adheziją, padidina atomų energiją bei jų judrumą padėklo paviršiuje. Temperatūra taip pat veikia dangos mikrostruktūrą ir orientaciją. Ši temperatūra parinkta todėl, kad alavo priemaišos jau dangos augimo metu būtų „aktyvuotos“, t. y. alavo atomams pakaktų energijos pakeisti indžio atomus kristalinės gardelės mazguose ir taip padidinti laisvųjų elektronų skaičių laidumo juostoje [3]. Šiuo atveju nebūtina šildyti jau užaugintų dangų atkaitinimo krosnyse, kad būtų aktyvuotos priemaišos bei pagerinta dangos kristalinė struktūra, elektrinės bei optinės savybės. Į molibdeno lovelį, iš kurio buvo atliekamas indžio ir alavo garinimas, įdėtų medžiagų masės ir jų santykiai pateikti 3.1 lent. Masės buvo parinktos taip, kad jų suma būtų pastovi ir lygi 0,2 g. Indžio ir alavo masių santykis garintuve kito nuo 4,3 iki 10. Užaugusių dangų storis buvo matuojamas profiliometru ir atlikti matavimai parodė, kad gautų dangų storis kito nuo 755 nm iki 803 nm.

3.1 Lentelė. Dangų auginimo duomenys

Nr.	m(indžio), g	m(alavo), g	m(indžio)/ m(alavo) santykis	d, nm
1	0,17	0,04	4,3	800
2	0,175	0,03	5,8	755
3	0,18	0,03	6,0	803
4	0,185	0,025	7,4	796
5	0,185	0,02	9,3	802
6	0,2	0,02	10,0	780

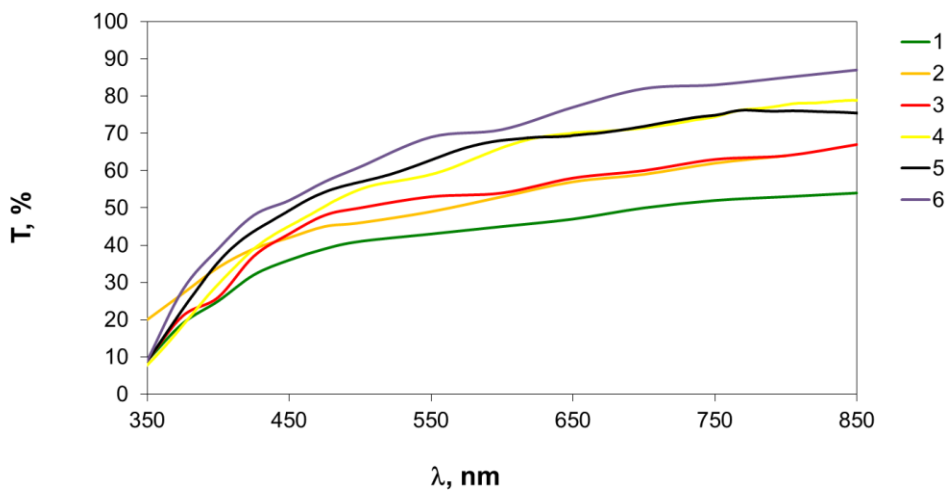
Bandinio Nr. 5 nuotrauka pateikta 3.1 pav. Nuotraukoje matome, kad užaugusi danga yra optiškai skaidri kaip ir visos kitos užaugintos dangos.



3.1 pav. Bandinys Nr. 5

3.1. UŽAUGINTŲ DANGŲ OPTINĖS IR ELEKTRINĖS SAVYBĖS

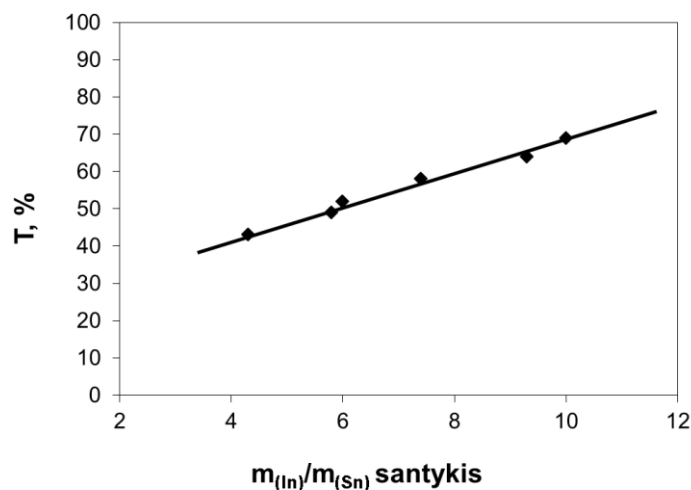
Užaugintų dangų optinės charakteristikos išmatuotos UV-VIS spektrometru. Dangų pralaidumo priklausomybės nuo krentančios bangos ilgio pateiktos 3.2 pav. Nustatyta, kad dangų optinis pralaidumas mažėja didinant alavo kiekį medžiagoje.



3.2 pav. Indžio alavo oksidų pralaidumo priklausomybės nuo bangos ilgio

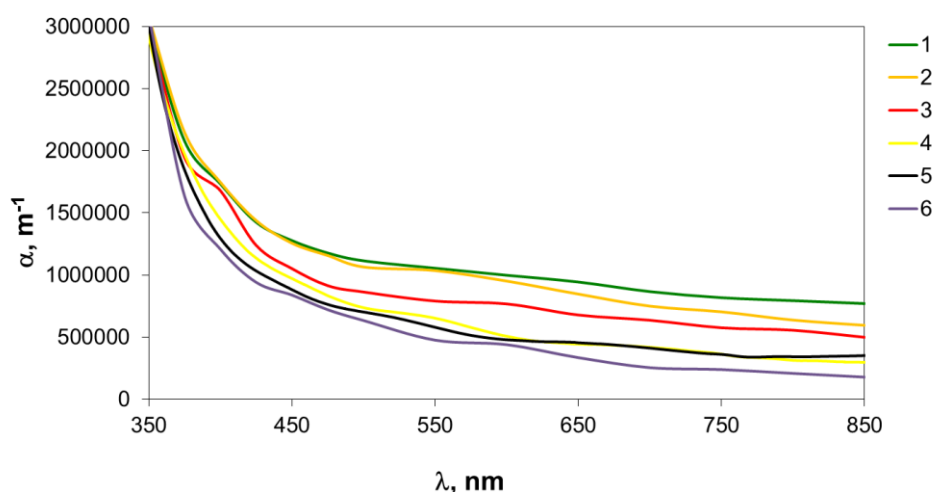
Optinio pralaidumo priklausomybė nuo indžio ir alavo masių santykio lovelyje esant 550 nm krentančios bangos ilgiui pateikta 3.3 pav. Esant šiam bangos ilgiui, pralaidumas tiesiškai priklauso nuo indžio ir alavo masių santykio. Kaip matyti, didėjant indžio ir alavo masių santykiui

nuo 4,3 iki 10, optinis pralaidumas padidėja nuo 45 % iki 70 %. A.Eshaghi ir kt. nustatė, kad ITO dangų pralaidumas esant 550 nm bangos ilgiui priklauso nuo dangos storio. Didėjantis dangos storis nuo 200 nm iki 400 nm lemia pralaidumo sumažėjimą nuo 80 % iki 60 % [5].



3.3 pav. Dangų pralaidumo priklausomybė nuo indžio ir alavo masių santykio lovelyje (550 nm bangos ilgiui)

Siekiant palyginti dangų optines savybes, kai yra skirtingi sluoksnių storiai, būtina apskaičiuoti tiesinį sugerties koeficientą. Dangų sugerties koeficientų priklausomybės nuo bangų ilgio pateiktos 3.4 pav.. Jame matome, kad dangos su mažesniu alavo kiekiu (bandiniai Nr. 4, 5, 6) pasižymi mažesniu sugerties koeficientu.



3.4 pav. Indžio alavo bandinių sugerties koeficiento priklausomybės nuo bangos ilgio

Elektriniai dangų parametrai (paviršinė varža (R , Ω/cm^2) ir savitoji varža (ρ , $\Omega \cdot cm$)) nustatyti keturių zondų metodu. Matavimų rezultatai parodo, kad mažėjant alavo kiekiui indžio - alavo

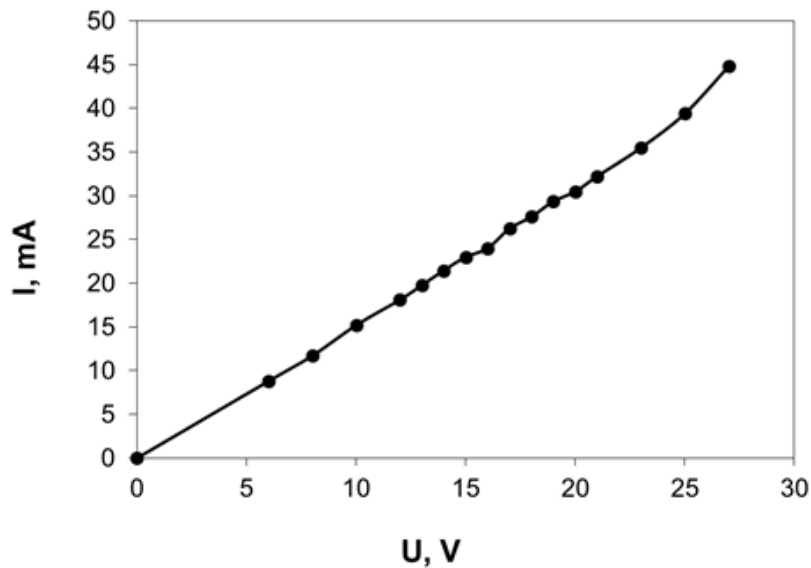
dangose, jų varža padidėja nuo $92 \Omega/\text{cm}^2$ iki $560 \Omega/\text{cm}^2$, o sugerties koeficientas sumažėja nuo $11 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ iki $5 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$. Apibendrinti visų užaugintų dangų elektrinių ir optinių tyrimų rezultatai, pateikti 3.2 lent., leidžia teigti, kad geriausiu optinių ir elektrinių savybių deriniu (maža varža ir mažu sugerties koeficientu) pasižymi danga Nr.5. Šis bandinys buvo pasirinktas nuodugniems kitų savybių tyrimams.

3.2 lentelė. Elektrinės ir optinės indžio alavo oksidų charakteristikos

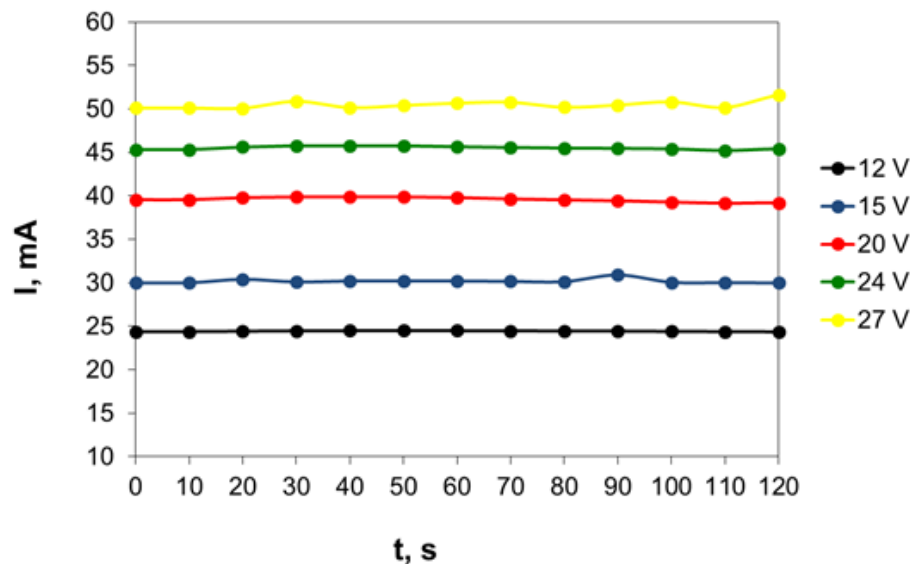
Nr.	<i>d, nm</i>	<i>R, Ω/ cm²</i>	<i>ρ, Ω·cm</i>	<i>a, cm⁻¹ (550 nm)</i>	<i>m(indžio)/ m(alavo) santykis</i>
1	800	92	$7,36 \cdot 10^{-3}$	$11 \cdot 10^{-3}$	4,3
2	755	117	$8,83 \cdot 10^{-3}$	$10 \cdot 10^{-3}$	5,8
3	803	151	$12,1 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3}$	6,0
4	796	173	$13,8 \cdot 10^{-3}$	$6,5 \cdot 10^{-3}$	7,4
5	802	211	$16,9 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$	9,3
6	780	560	$43,7 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	10,0

Analizuojant dangos Nr. 5, kurios alavo ir indžio masių santykis 9,3, elektrines charakteristikas, visų pirma buvo išmatuota dangos voltamperinė charakteristika. Nuolatinės įtampos šaltinis buvo prijungtas prie bandinio priešingų kraštinių, naudojant sukabinimo gnybtus. 3.5 pav. pavaizduota bandinio voltamperinė priklausomybė.

Ji parodo, tiesinę srovės priklausomybę nuo įtampos, tai reiškia, kad sluoksnio varža yra pastovi (670Ω) ir dangos ir gnybtų kontaktas yra ominis. Kontaktai būna dviejų rūšių – ominiai ir užtvariniai (Šotkio). Ominis kontaktas sudaro sąlygas nekliudomam krūvininkų judėjimui iš kontakto medžiagos (metalo) į puslaidininkį arba atvirkščiai. Todėl galima laikyti, kad ominio kontakto srityje nėra erdvinių elektrinių krūvių ir neatsiranda kontaktinis potencialų skirtumas. Tai yra pageidautina visuose įtaisuose turinčiuose kontaktą-metalas puslaidininkis (stabilios elektrinės charakteristikos). Norint įvertinti elektrinių parametrų (srovės ir varžos) stabilumą, buvo matuotas srovės kitimas laike. Esant skirtingoms įtampoms buvo matuotos srovės stiprių vertės laike iki 120 s (3.6 pav.). Matome, kad srovės stipris nekito, o tai rodo, kad dangos varža išlieka stabili.

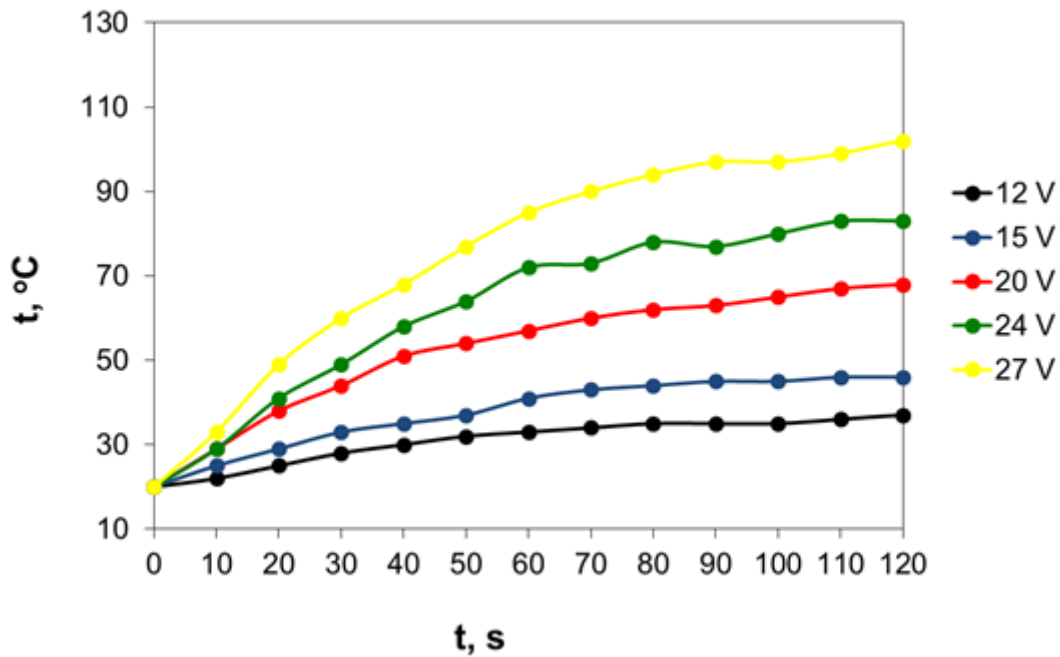


3.5 pav. Bandinio Nr.5 voltamperinė charakteristika



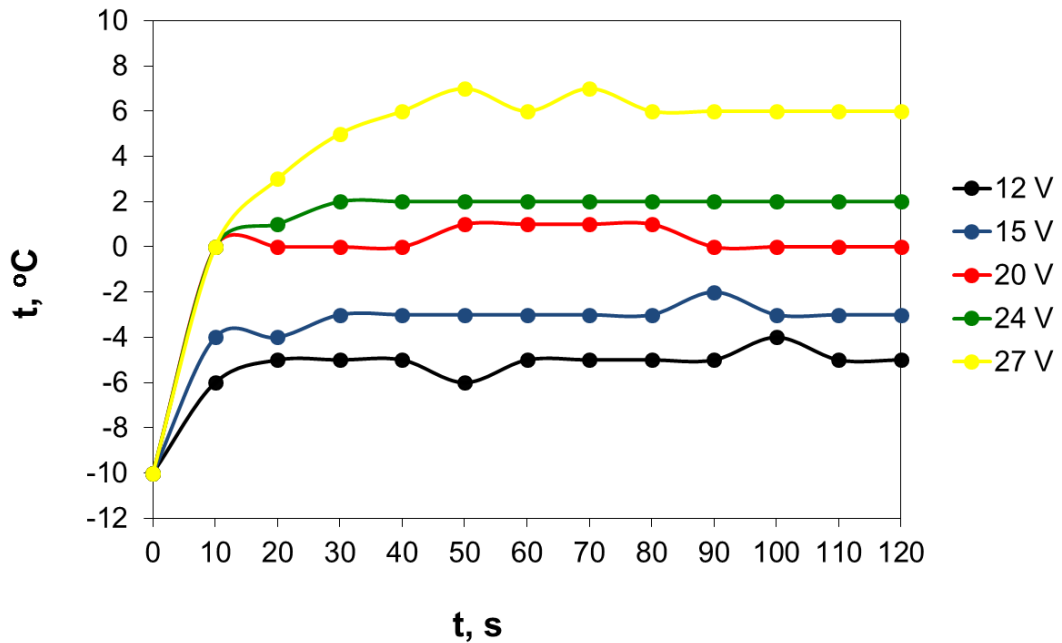
3.6 pav. Bandiniu Nr.5 tekančios srovės stiprio priklausomybė nuo laiko

Bandinio kaitimo charakteristikos pateiktos 3.7 pav. Jame prie bandinio buvo prijungtos skirtingos įtampos nuo (12 V iki 27 V) ir matuojama bandinio temperatūra. Bandinys kaista dėl juo tekančios srovės. Kambario temperatūra buvo 20 °C. Prijungus 12 V įtampa po dviejų minučių bandinys įkaista iki 31 °C ir išsotina, o prijungus 27 V įkaista iki pakankamai aukštos 103 °C temperatūros ir kilimo tendencija rodo, kad toliau didės nežymiai.



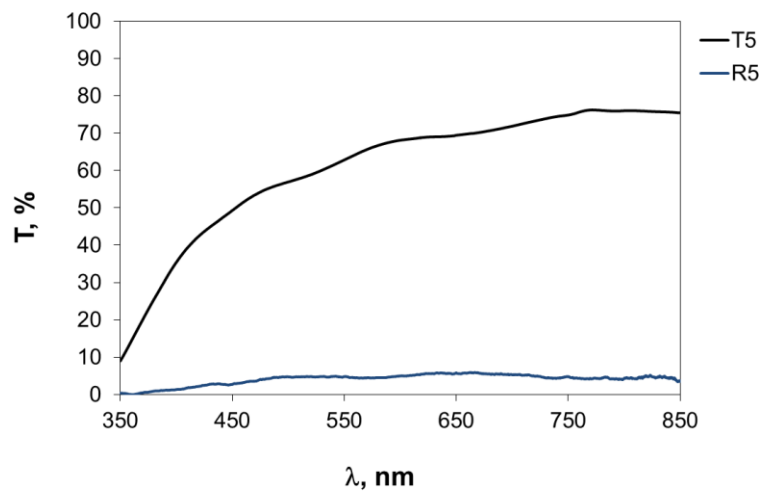
3.7 pav. Bandinio Nr.5 kaitimo charakteristikos (nuo kambario temperatūros) esant skirtingoms kaitinimo įtampoms

Vienas iš galimų šios dangos taikymų yra jos panaudojimas transporto priemonių (automobilių, lėktuvų ir kt.) apledėjusių stiklų atitirpinimui, esant neigiamai aplinkos temperatūrai. Greitas, nemechaninis langų šerkšno ir ledo pašalinimas nuo stiklų būtų inovatyvus ir paklausus rinkoje. Norint ištirti bandinio aptirpdinimo savybes, bandinys buvo šaldomas naudojant Peltje elementą iki $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Prijungus 12 V ir 15 V įtampą bandinio atitirpinti nepavyko, o (dėl įsotrinimo) pasiektos temperatūros per 2 min atitinkamai buvo $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ir $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$. 20 V įtampos naudojimas leido pakelti temperatūrą iki $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, bet stiklo paviršius išliko apšarmojęs. Esant 24 V ir 27 V įtampai šerkšnas atitirpo, o stiklo paviršiaus temperatūra po 2 min jau buvo pasiekus atitinkamai $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ir $103\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tyrimas parodė, kad indžio-alavo oksidu padengtas motorinės transporto priemonės stiklas gali būti visiškai atitirpdintas per trumpą laiką, esant nedidelėms 24 V ir 27 V įtampoms (3.8 pav.).



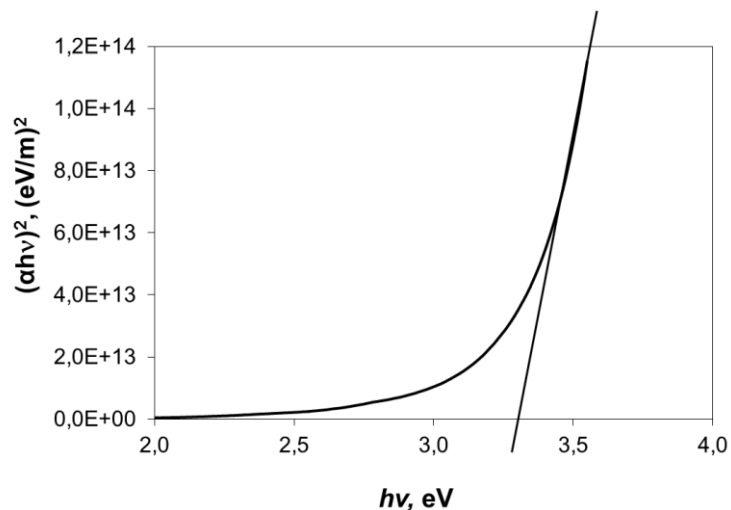
3.8 pav. Bandinio Nr.5 atirpdinimo charakteristikos esant skirtingoms kaitinimo įtampoms

Vienas iš svarbesnių sluoksnio optinių parametų yra draustinės juostos plotis. Tikslesnei jos vertei nustatyti būtina atlikti optinio atspindžio matavimą. 3.9 pav. yra pateiktos bandinio Nr.5 optinio pralaidumo (T5) ir atspindžio (R5) priklausomybės nuo bangos ilgio.



3.9 pav. Bandinio Nr.5 pralaidumo (T5) ir atspindžio (R5) priklausomybės nuo bangos ilgio

Naudojant šiuos duomenis ir pritaikius Taucio metodą draustinių juostų pločiui puslaidininkiuose nustatyti, buvo apskaičiuota, o po to ir nubraižyta Taucio diagrama (3.10 pav.).

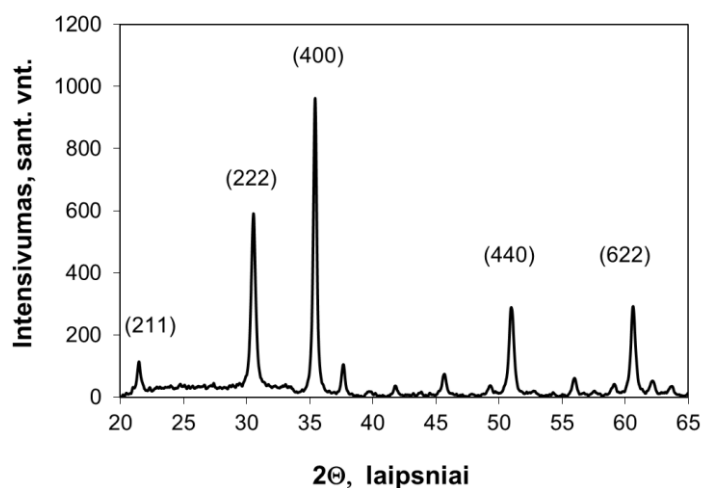


3.10 pav. Bandinio Nr.5 Taucio diagrama

Draustinės juostos plotis buvo nustatytas ekstrapoliuojant tiesinę $(\alpha hv)^2 = f(hv)$ kreivės dalį iki susikirtimo su X ašimi. Bandinio draustinės juostos plotis – 3,35 eV. Tokia vertė sutampa su kitų tyrėjų darbuose pateikiamomis vertėmis, kurios priklausomai nuo dangos formavimo metodo kinta nuo 3,3 eV iki 4,1 eV [1, 2, 4, 18, 26-31].

3.2. UŽAUGINTŲ DANGŲ RENTGENOSTRUKTŪRINĖ ANALIZĖ

Bandinio Nr.5 rentgenodifrakcinio matavimo rezultatai pateikti 3.11 pav..

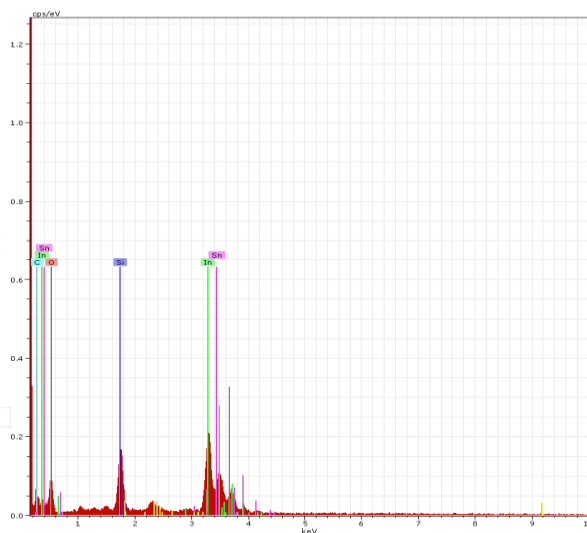


3.11 pav. Bandinio Nr.5 rentgenograma

Jame matome, kad sluoksnis yra polikristalinis, turintis visas pagrindines kubinės sistemos Ia3 erdvinės grupės indžio-alavo oksido fazei būdingų orientacijų smailes: (211), (222), (400), (440), (622). Smailių padėtys gerai atitinka rentgenogramų standartų duomenų bazės PDF-2 bylos (JCPDS: 71-2194) smailių padėtis. Vidutinis kristalitių dydis, apskaičiuotas naudojant Šererio formulę yra lygus 37 nm.

3.3. UŽAUGINTŲ DANGŲ ELEMENTINĖ SUDĖTIS

Dangos elementinė sudėtis nustatyta elektronų energijos dispersijos rentgeno spektroskopijos metodu. Dangos elementų atomai spinduliuoja tik jiems būdingus tam tikros energijos rentgeno spindulius, todėl išspinduliuoti iš bandinio spinduliai spektre suformuoja charakteringas smailes. Šios smailės pateiktos 3.12 pav. o elementinės sudėties analizė pateikta 3.3 lent.. Spektrogramoje matosi anglies ir silicio smailės, kurių kilmę nesunku paaiškinti. Silicis yra stiklinio padėklo sudėtyje, o krentantis elektronų spindulys įsiskverbia į didesnę gylį negu sluoksnio storis. Anglis atsirado, dėl vakuumui vakuuminėje kameroje sukurti naudojamo difuzinio siurblio. Veikiant šiam siurbliui, kameroje susidaro anglies garai. Be to deguonies dalis dangoje, yra mažesnė negu rodo tyrimas, nes papildoma dalis deguonies yra stiklo padėklo sudėtyje. Nustatyta, kad dangoje yra 48,7 % indžio ir 12,7% alavo, t.y. indžio ir alavo masių santykis yra 3,8. Tai yra apie du kartus mažiau negu šis santykis buvo lovelyje 9,3. Šis skirtumas dažnai pasireiškia terminiu būdu garinant metalų lydinius iš to paties lovelio. Kadangi padėklo temperatūra buvo gana aukšta 350 °C lyginant su indžio ir alavo lydymosi temperatūromis (indžio 157 °C alavo 232 °C). Kadangi sluoksnis ant padėklo auga, o indis ir alavas nenugaruoja, reiškia, kad indžio ir alavo oksidai formuojasi plazmoje ir ant padėklo nusėda jau šių metalų oksidai, kurių lydymose temperatūros žymiai aukštesnės (indžio oksido – 1910 °C, alavo oksido – 1630 °C). Tačiau greičiausiai dalis nusėdančių atomų yra metalai, kurie bando oksiduotis ant padėklo, bet dėl didelės padėklo temperatūros nespėja oksiduotis ir vyksta desorbcija. Kitas fizikinis reiškinys vykstantis ant padėklo yra dangos bombardavimas plazmoje esančiais neigiamais deguonies jonais ir elektronais, nes padėklas turi teigiamą priešįtampį (+400 V). Jeigu elektronai tik aktyvuoja augančios dangos paviršių, tai tokios energijos deguonies jonai efektyviai nudulkina atomus nuo paviršiaus. Indžio oksido dulkėjimas vyksta efektyviau, dėl pirmenybinio indžio oksido dulkėjimo alavo oksidu atžvilgiu.



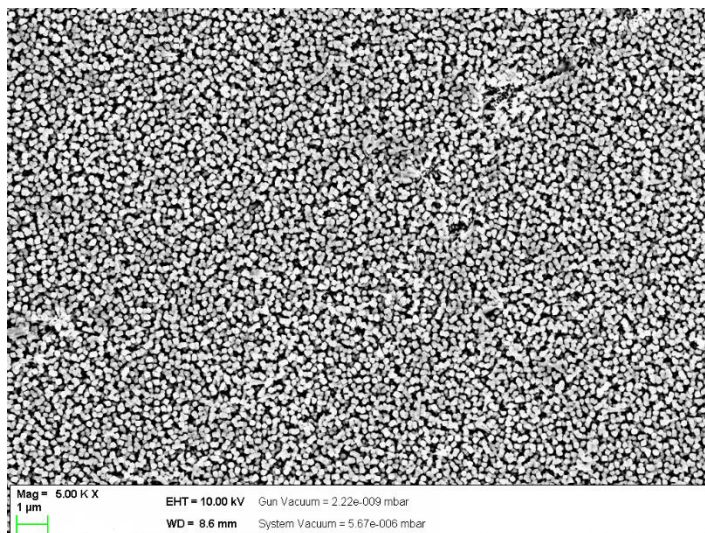
3.12 pav. Bandinio Nr.5 EDS spektras

3.3 lentelė. Dangos elementinė sudėtis

Elementas	Normalizuota masės dalis, %	Normalizuota atomų dalis, %
Deguonis	27,8	61,6
Indis	48,7	22,4
Silicis	9,1	11,5
Anglis	1,7	0,7
Alavas	12,7	3,8
	100	100

3.4. UŽAUGINTŲ DANGŲ MORFOLOGINIAI TYRIMAI

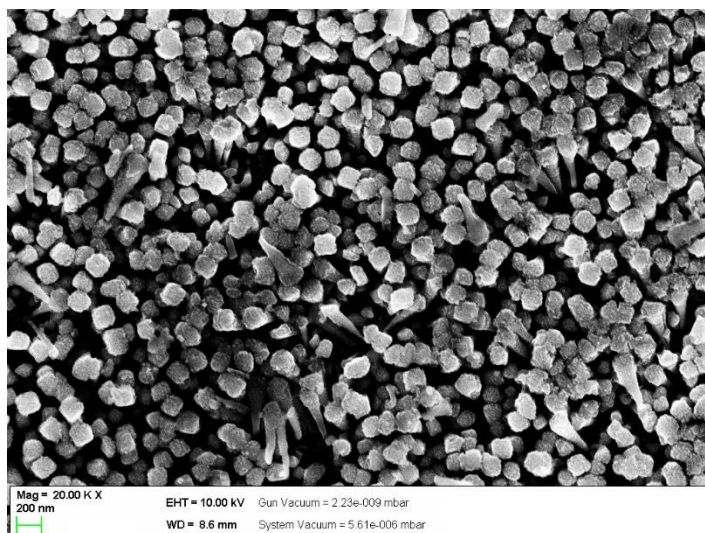
Dangos morfologiniai tyrimai buvo atlikti skenuojančios elektroninės mikroskopijos metodu.



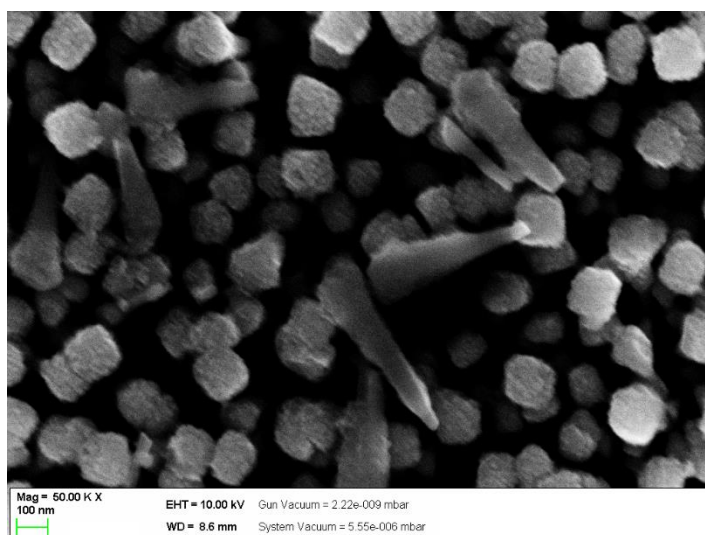
3.13 pav. Bandinio Nr.5 paviršiaus SEM vaizdas (5000 didinimas)

Kadangi indžio-alavo oksidas yra laidus elektros srovei ir elektros krūvis nesikaupė bandinio paviršiuje, pavyko gauti labai geros kokybės paviršiaus nuotraukas. Bandinio Nr. 5 paviršiaus

SEM nuotrauka esant 5000 kartų didinimui pateikta 3.13 pav. Dar didesniu didinimo tos pačios dangos paviršius pateiktas 3.14 pav. ir 3.15 pav.

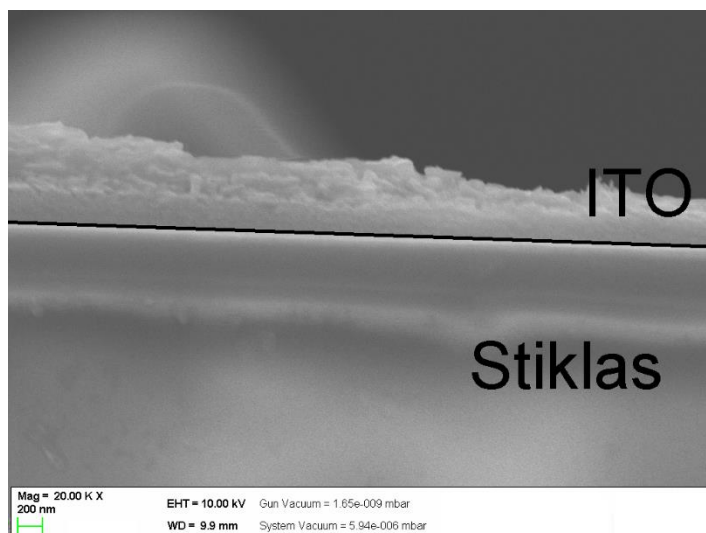


3.14 pav. Bandinio Nr.5 paviršiaus SEM vaizdas (20000 didinimas)



3.15 pav. Bandinio Nr.5 paviršiaus SEM vaizdas (50000 didinimas)

Dangos SEM nuotraukose matosi, kad sluoksnis auga gana retomis, statmenomis padėklui kolonomis, kurių skersmuo apie 150 nm.



3.16 pav. Bandinio Nr.5 ITO skersinio pjūvio SEM vaizdas (20000 didinimas)

3.16 pav. pateiktas padėklo ir dangos skerspjūvio vaizdas. Jame matome, kad danga auga Stranski-Krastanovo augimo režimu, t. y danga pradžioje auga sluoksniuotai o po to pasireiškia salelinis augimas. Nuotraukoje matome, kad dangoje galima išskirti dvi augimo zonas. Pradžioje ant padėklo iki (300 nm storio) danga auga tankiai ir sluoksniuotai, o vėliau augimas tampa salelinis (koloninis).

IŠVADOS

1. Plazma aktyvuoto reaktyvaus terminio garinimo metodu, užaugintų ant stiklo padėklų, indžio-alavo oksido plonų dangų optinis pralaidumas mažėja, o elektrinis laidumas didėja, didėjant alavo kiekiui dangoje.

2. Iš užaugintų dangų geriausiu optinių ir elektrinių savybių deriniu (maža varža ir nedideliu sugerties koeficientu) pasižymi danga, kuri suformuota panaudojus 9,3 indžio ir alavo masių santykį. Jos paviršiaus varža yra $211 \Omega/\text{cm}^2$, o šviesos sugerties koeficientas – $6 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$. Indžio-alavo oksido dangos draustinės juostos plotis – 3,35 eV.

3. Danga, kurios indžio ir alavo masių santykis lygus 3,8, yra kubinės polikristalinės struktūros. Sluoksnis auga gana retomis, statmenomis padėklui kolonomis, kurių skersmuo apie 150 nm. Danga auga Stranski-Krastanovo augimo režimu, t. y. pradžioje vyksta monosluoksnių susidarymas ir tik po to pasireiškia salelinis augimas.

4. Dangos voltamperinė priklausomybė yra tiesinė, o varža lygi 670Ω . Apledėjęs, indžio-alavo oksidu padengtas stiklas ($-10 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatūros) gali būti visiškai atitirpdintas per 30 s, esant 24 V įtampai. Tai patvirtina, kad ši, pakankamai skaidri danga, gali būti naudojama transporto priemonių apledėjusių stiklų greitam atitirpdinimui.

LITERATŪROS ŠARAŠAS

1. Chen, A., et al., *A new investigation of oxygen flow influence on ITO thin films by magnetron sputtering*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2014. 120, Part A: p. 157-162.
2. Elmas, S., Ş. Korkmaz, and S. Pat, *Optical characterization of deposited ITO thin films on glass and PET substrates*. Applied Surface Science, 2013. 276: p. 641-645.
3. Granqvist, C.G., *Transparent conductors as solar energy materials: A panoramic review*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2007. 91(17): p. 1529-1598.
4. David, C., et al., *Highly conductive and transparent ITO films deposited at low temperatures by pulsed DC magnetron sputtering from ceramic and metallic rotary targets*. Surface and Coatings Technology, 2017. 314: p. 113-117.
5. Eshaghi, A. and A. Graeli, *Optical and electrical properties of indium tin oxide (ITO) nanostructured thin films deposited on polycarbonate substrates "thickness effect"*. Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 2014. 125(3): p. 1478-1481.
6. Domaradzki, J., *Perspectives of development of TCO and TOS thin films based on (Ti-Cu)oxide composites*. Surface and Coatings Technology, 2016. 290: p. 28-33.
7. Lai, K.-C., et al., *Plasma-induced TCO texture of ZnO:Ga back contacts on silicon thin film solar cells*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2011. 95(2): p. 415-418.
8. Bellingham, J.R., W.A. Phillips, and C.J. Adkins, *Amorphous indium oxide*. Thin Solid Films, 1991. 195(1): p. 23-32.
9. Morikawa, H. and M. Fujita, *Crystallization and electrical property change on the annealing of amorphous indium-oxide and indium-tin-oxide thin films*. Thin Solid Films, 2000. 359(1): p. 61-67.
10. Jung, Y.S., D.W. Lee, and D.Y. Jeon, *Influence of dc magnetron sputtering parameters on surface morphology of indium tin oxide thin films*. Applied Surface Science, 2004. 221(1-4): p. 136-142.
11. Iljinas, A., et al., *Growth of ITO thin films by magnetron sputtering: OES study, optical and electrical properties*. Vacuum, 2009. 83, Supplement 1: p. S118-S120.
12. Vidhya, V.S., et al., *Influence of RF power on the growth mechanism, preferential orientation and optoelectronic properties of nanocrystalline ITO films*. Current Applied Physics, 2011. 11(3): p. 286-294.
13. Aijo John, K., et al., *In situ crystallization of highly conducting and transparent ITO thin films deposited by RF magnetron sputtering*. Vacuum, 2016. 132: p. 91-94.
14. Park, Y.S., et al., *Characteristics of ITO films with oxygen plasma treatment for thin film solar cell applications*. Materials Research Bulletin, 2013. 48(12): p. 5115-5120.
15. Kumar, K.J., N.R.C. Raju, and A. Subrahmanyam, *Thickness dependent physical and photocatalytic properties of ITO thin films prepared by reactive DC magnetron sputtering*. Applied Surface Science, 2011. 257(7): p. 3075-3080.
16. Senthilkumar, V., et al., *Structural and optical properties of indium tin oxide (ITO) thin films with different compositions prepared by electron beam evaporation*. Vacuum, 2010. 84(6): p. 864-869.
17. Sibin, K.P., et al., *Optical and electrical properties of ITO thin films sputtered on flexible FEP substrate as passive thermal control system for space applications*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2016. 145, Part 3: p. 314-322.
18. Wang, Y., et al., *Fabrication and characterization of ITO thin film resistance temperature detector*. Vacuum, 2017. 140: p. 121-125.
19. Bishop, C.A., *Chapter 16 - Thermal Evaporation*, in *Vacuum Deposition Onto Webs, Films and Foils (Third Edition)*. 2015, William Andrew Publishing: Boston. p. 301-331.
20. Iljinas, A. and L. Marcinauskas, *Formation of bismuth oxide nanostructures by reactive plasma assisted thermal evaporation*. Thin Solid Films, 2015. 594, Part A: p. 192-196.
21. Adachi, H., T. Hata, and K. Wasa, *5 - Basic Process of Sputtering Deposition*, in *Handbook of Sputtering Technology (Second Edition)*. 2012, William Andrew Publishing: Oxford. p. 295-359.
22. Tominaga, K., H. Adachi, and K. Wasa, *6 - Functional Thin Films*, in *Handbook of Sputtering Technology (Second Edition)*. 2012, William Andrew Publishing: Oxford. p. 361-520.
23. Sanderson, M.L., *20 - Electrical measurements A2 - Boyes, Walt*, in *Instrumentation Reference Book (Third Edition)*. 2003, Butterworth-Heinemann: Burlington. p. 425-491.
24. Leontie, L., et al., *Structural and optical characteristics of bismuth oxide thin films*. Surface Science, 2002. 507-510: p. 480-485.

25. He, B.B., *Two-Dimensional X-Ray Diffraction*. 2011: Wiley.
26. Song, S., et al., *Rapid thermal annealing of ITO films*. Applied Surface Science, 2011. 257(16): p. 7061-7064.
27. Socol, G., et al., *Pulsed laser deposition of transparent conductive oxide thin films on flexible substrates*. Applied Surface Science, 2012. 260: p. 42-46.
28. Kumar, R.R., et al., *Low temperature and self catalytic growth of ultrafine ITO nanowires by electron beam evaporation method and their optical and electrical properties*. Materials Research Bulletin, 2014. 52: p. 167-176.
29. Marikkannu, S., et al., *Effect of substrate temperature on indium tin oxide (ITO) thin films deposited by jet nebulizer spray pyrolysis and solar cell application*. Materials Science in Semiconductor Processing, 2014. 27: p. 562-568.
30. Rung, S., A. Christiansen, and R. Hellmann, *Influence of film thickness on laser ablation threshold of transparent conducting oxide thin-films*. Applied Surface Science, 2014. 305: p. 347-351.
31. Kim, T.-H., et al., *Roll-to-roll sputtered ITO/Ag/ITO multilayers for highly transparent and flexible electrochromic applications*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2017. 160: p. 203-210.