

LATVIJAS UNIVERSITĀTE
FIZIKAS UN MATEMĀTIKAS FAKULTĀTE

Jeļena Butikova

**Piemaisījumu sadalījuma lāzerablācijas
spektroskopija kodolsintēzes reaktoru
karstās sienas materiālu diagnostikai**

Promocijas darba kopsavilkums

Rīga, 2009

Promocijas darba veids: disertācija

Zinātniskais vadītājs: *Dr. habil. phys.* prof. **Ivars Tāle**

Darba recenzenti:

Dr. habil. phys. prof. **Elmārs Blūms**

Dr. habil. chem. **Gunta Ķizāne**

Dr. habil. phys. prof. **Artūrs Medvids**

Darba aizstāvēšana notiks Latvijas Universitātes Fizikas un astronomijas zinātnes nozares promocijas padomes atklātā sēdē 2009. gada 27. novembrī pulksten 15.00 LU Cietvielu fizikas institūta konferenču zālē

Ar darbu un tā kopsavilkumu var iepazīties Latvijas Universitātes Bibliotēkā (Rīgā, Kalpaka bulv. 4) un Latvijas Akadēmiskajā bibliotēkā (Rīgā, Rūpniecības ielā 10).

LU Fizikas un astronomijas zinātnes nozares specializētās promocijas padomes priekšsēdētājs: *Dr. habil. phys.* Andris Krūmiņš

© Jeļena Butikova, 2009

© Latvijas Universitāte, 2009

ISBN 978-9984-45-146-6

Saturs

Anotācija.....	4
Promocijas darba mērķis.....	5
Promocijas darba uzdevumi.....	5
1. Ievads.....	6
1.1. Tēmas aktualitāte.....	6
1.2. Promocijas darba mērķi un motivācija.....	6
Autores ieguldījums.....	7
2. Eksperimentālā metodika.....	8
2.1. Paraugu materiāls.....	8
2.2. Eksperimentālā iekārta.....	8
2.3. Vakuuma kamera.....	10
3. Galvenie rezultāti.....	11
3.1. Ablācijas atmosfēras spiedienā.....	11
3.2. Ablācija vakuumā.....	14
Aizstāvamās tēzes.....	26
Rezultātu kopsavilkums.....	26
Praktiskā nozīme.....	28
Nobeigums (perspektīva).....	28
Izmantotās literatūras saraksts.....	29
Promocijas darba publikāciju saraksts.....	31
Konferenču tēžu saraksts.....	31
Pateicība.....	32

Anotācija

Promocijas darba galvenā motivācija ir parādīt lāzerinducētās ablācijas spektroskopijas metodes efektivitāti plazmu skarošo materiālu piemaisījumu analīzē, jo šī metode ļauj noteikt jebkuru ķīmisko elementu materiālā un var tikt izmantota tālvadāmā analīzē.

Promocijas darba pamatuzdevumi ir uzstādīt un palaist iekārtu lāzerablācijas spektroskopijas mērījumiem, kā arī izstrādāt metodiku piemaisījumu dziļuma sadalījuma noteikšanai.

Promocijas darbā pētīti un aprakstīti ASDEX Upgrade tokamaka divertora plāksņu paraugi, izmantojot lāzerablācijas spektroskopijas metodi. Ablācijas krāteri, kas izveidojās pētīšanas procesā, tika pētīti ar profilometrijas palīdzību.

Eksperimentālā iekārta lāzerablācijas spektroskopijas mērījumiem tika izstrādāta un daļēji izgatavota Latvijas Universitātes Cietvielu fizikas institūtā. Tika atrasti optimālie ASDEX Upgrade divertora plāksņu lāzerablācijas spektroskopijas eksperimentu nosacījumi. Tika reģistrēti plazmu skarošo materiālu plazmas emisijas spektri, kas parāda ievērojamu piemaisījumu skaitu. Piemaisījumu elementi tika identificēti, kā arī ierosināti iespējamie piemaisījumu avoti. Izmantojot plazmas emisijas spektrus, ASDEX Upgrade divertora plāksņu virsmā tika novērtēti pamatpiemaisījumu (bors, ūdeņradis) akumulācijas dziļumi.

Iegūtie rezultāti ļauj secināt, ka lāzerinducētās ablācijas spektroskopijas metode var tikt izmantota plazmu skarošo materiālu ekspresanalīzei. Ar nelielajām modifikācijām šo metodi var lietot kā *in situ* tehniku plazmu skarošo komponentu stāvokļa apsekošanai kodoltermiskās sintēzes reaktora kamerā.

Promocijas darba mērķis

Promocijas darba pamatuzdevumi ir uzstādīt un palaist iekārtu lāzerablācijas spektroskopijas mērījumiem, kā arī izstrādāt metodiku piemaisījumu dziļuma sadalījuma noteikšanai.

Promocijas darbs mērķis – izpētīt ASDEX Upgrade tokamaka divertora plākšņu paraugus ar lāzerablācijas spektroskopijas metodi un parādīt piemaisījumu saturu plazmu skarošajā materiālā, kā arī novērtēt pamatpiemaisījumu (bors, ūdeņradis) akumulācijas dziļumus ASDEX Upgrade divertora plākšņu virsmā.

Promocijas darba uzdevumi

Promocijas darbam ir šādi galvenie uzdevumi:

- uzstādīt un testēt plazmu skarošo materiālu lāzerinducētās ablācijas spektroskopijas iekārtas;
- izstrādāt piemaisījumu dziļuma profila noteikšanas metodoloģiju;
- parādīt lāzerinducētās ablācijas spektroskopijas metodes efektivitāti plazmu skarošo materiālu piemaisījumu analīzē ar perspektīvu izmantot šo tehniku kā *in situ* plazmu skarošo komponentu apsekošanas metodi kodoltermiskās sintēzes reaktora kamerā.

1. Ievads

Kodoltermiskās sintēzes reaktora ar plazmas magnētisko iesprostošanu projektēšanas un konstruēšanas galvenā problēma ir karstās plazmas mijiedarbība ar kameras iekšējām komponentēm – reaktora sienām. Kameras plazmu skarošās komponentes tiek izmantotas kā rezervuārs enerģijai un daļiņām, kas nāk no plazmas. Tai pašā laikā daļiņu mijiedarbība ar materiāla virsmu var izraisīt sienu materiāla atomu un atomu, kas implantēti no degvielas, atbrīvošanu no sienas materiāla un nonākšanu plazmā.

Par pētījuma objektu tika izmantotas ASDEX Upgrade tokamaka divertora plāksnes (R 6710 ogleklis). Tika izpētīts piemaisījumu sastāvs un akumulācijas dziļums šajā materiālā pēc plazmas izlādes reaktora kamerā.

1.1. Tēmas aktualitāte

Optimālais plazmu skarošais materiāls kodoltermiskajiem reaktoriem joprojām nav atrasts. Plazmu skarošo komponentu izvēli nosaka plazmas mijiedarbība ar šiem materiāliem. Nozīmīgākie aspekti šeit ir plazmu skarošo komponentu kalpošanas ilgums un deitērija/tritija uzkrājums reaktora sienu materiālos. Procesi, ko izraisa plazmas un sienas materiāla mijiedarbība, tiek pētīti ar dažādām virsmas pētīšanas metodēm: jonu staru kūļu analīzi [1, 2], jonu zondēm [3], rentgenstaru fotoelektronu spektroskopiju [4] un daudzām citām.

Salīdzinājumā ar minētām metodēm, lāzerablācijas spektroskopijai ir noteiktas priekšrocības. Tā ir praktiski nedestruktīva analīze, jo tiek izmantots ļoti mazs materiāla daudzums. Lāzerinducētās ablācijas spektroskopijas metode dod iespēju identificēt jebkuru ķīmisko elementu jebkurā materiālā neatkarīgi no tā agregātvokļa.

1.2. Promocijas darba mērķi un motivācija

Promocijas darba galvenā motivācija ir parādīt lāzerinducētās ablācijas spektroskopijas metodes efektivitāti plazmu skarošo materiālu piemaisījumu analīzē, jo šī metode ļauj noteikt jebkuru ķīmisko elementu jebkurā materiālā un var tikt izmantota tālvadāmā analīzē. Tas ir ļoti būtiski tāpēc, ka ūdeņraža izotopu detektēšana un detritācija ir izšķiroši uzdevumi plazmu skarošo komponentu virsmas analīzē un komponentu neregulārās formas veido grūti sasniedzamas telpas.

Promocijas darba mērķis ir izpētīt ASDEX Upgrade tokamaka plazmu skarošo materiālu ar lāzerablācijas spektroskopijas metodi un parādīt šo materiālu

piemaisījumu sastāvu, kā arī dziļumu, kādā tiek akumulēti svarīgākie piemaisījumu elementi – ūdeņradis un bors.

Promocijas darbam ir šādi galvenie uzdevumi:

- plazmu skarošo materiālu lāzerinducētās ablācijas spektroskopijas iekārtas uzstādīšana un testēšana;
- piemaisījumu dziļuma profila noteikšanas metodoloģijas izstrāde;
- parādīt lāzerinducētās ablācijas spektroskopijas metodes efektivitāti plazmu skarošo materiālu piemaisījumu analīzē ar perspektīvu izmantot šo tehniku kā *in situ* plazmu skarošo komponentu apsekošanas metodi kodoltermiskās sintēzes reaktora kamerā.

Autores ieguldījums

Darbs tika izstrādāts kopā ar vairākiem zinātniskajiem līdzstrādniekiem. Autores ieguldījums ir eksperimentālās iekārtas izveidošana un uzturēšana, mērījumu veikšana, kā arī rezultātu analīze un apkopošana.

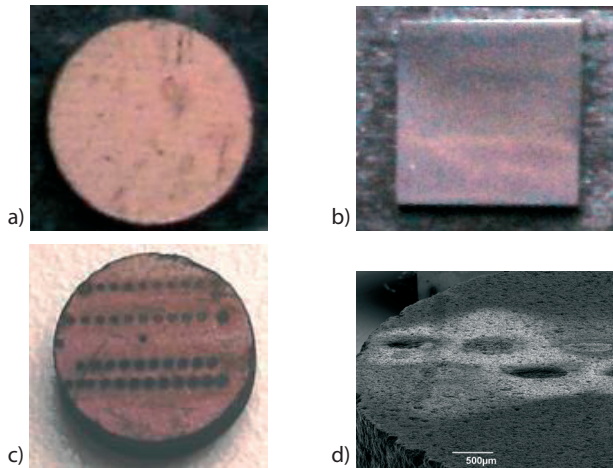
Eksperimentos izmantoto vakuuma kameru konstruēja un rasējumu veica inženieris Jānis Straumēns. Anatolijs Šarakovskis palīdzēja salikt eksperimentālās iekārtas un plānot eksperimentus. Boriss Poļakovs piedalījās rezultātu apspriešanā un palīdzēja praktiski. Autores ieguldījums rakstā “Some aspects of pulsed laser deposition of Si nanocrystalline films”, B. Polyakov et. al. bija tehniskā palīdzība eksperimenta gaitā un rezultātu apspriešana.

Darbs ir apspriests Latvijas Universitātes Cietvielu fizikas institūta (LU CFI) 2008. gada 17. septembra zinātniskajā seminārā. Galvenie rezultāti ir publicēti piecos rakstos un izklāstīti 14 konferencēs.

2. Eksperimentālā metodika

2.1. Paraugu materiāls

Pētījumos tika izmantoti divu veidu materiāli. References mērījumiem tika lietots tīrs R 6710 grafiti. Tas ir ASDEX Upgrade tokamaka divertora plākšņu materiāls. Piemaisījumu noteikšanas mērījumiem tika lietoti paraugi, kas izzāģēti no ASDEX Upgrade tokamaka divertora plāksnēm, kuras tika pakļautas plazmas izlādes iedarbībai reaktora kamerā. Ablētus un neablētus paraugus var redzēt 2.1. attēlā.

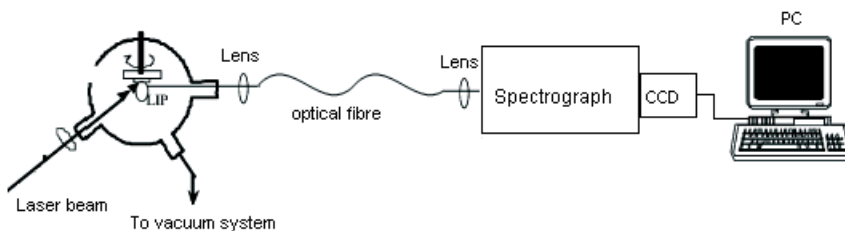


2.1. attēls. Pētījumos izmantotie paraugi: a) neablēts ASDEX Upgrade divertora plākšņu paraugs; b) neablēts R 6710 grafitā paraugs; c) ablēts ASDEX Upgrade paraugs; d) ablētā ASDEX Upgrade parauga SEM attēls

Ūdeņraža un bora koncentrācija ASDEX Upgrade divertora plākšņu paraugā tika noteikta ar Rezerforda atpakaļizkliedes spektroskopijas (RBS) metodi Maksā Planka Plazmas fizikas institūtā Garhingā, Vācijā.

2.2. Eksperimentālā iekārta

Eksperimentālās iekārtas shēma ir parādīta 2.2. attēlā. Tā sastāv no Nd:YAG lāzera un optiskās sistēmas lāzera stara fokusēšanai, vakuuma sistēmas (kameras un pumpja) un spektroskopijas sistēmas.



2.2. attēls. Eksperimentālās iekārtas shēma

Materiāla iztvaicēšanai un atomizācijai ablācijas eksperimentos tika lietots impulsa lāzers. Kaskādes ablācijas sliekšnis mainās kā lāzera stara λ^{-2} [5, 6]. Tas nozīmē, ka minimāla lāzera stara intensitāte, kas ir nepieciešama, lai sasniegtu ablācijas sliekšni, ir ātrāk sasniedzama infrasarkanajā, nevis ultravioletajā diapazonā. Tomēr, lietojot ultravioleto lāzeru, var sasniegt lielāku materiāla ablācijas ātrumu [7]. Piemaisījumi atrodas plazmu skarošo materiālu virskārtā, tāpēc eksperimenta nosacījumi pieprasa ablēt iespējami minimālu materiāla daudzumu vienā impulsā. Tika izvēlēts infrasarkanais lāzers ar viļņa garumu 1064 nm.

Par lāzerinducētās ablācijas plazmas avotu tika izmantots Nd:YAG lāzers (SL-312, EKSPLA) ar emisijas viļņa garumu 1064 nm, impulsa atkārtotības frekvenci 10 Hz, impulsa garumu 135 ps un regulējamu stara enerģiju līdz 250 mJ [8]. Lai novērstu dzirksteles parādīšanos gaisā, lāzera stars tika nedaudz defokussēts [9]. Izliektā kvarca lēca fokusē lāzera staru 3 mm aiz parauga virsmas (iekšā paraugā). Ablētais paraugs tika nostiprināts XYZ translācijas platformā (mērījumiem atmosfēras spiedienā) vai vakuuma kamerā. Lāzera stara enerģija tika kontrolēta ar lāzera stara jaudas/enerģijas mērītāju *Ophir* (modelis PE25BB-DIF).

Plazmas plūmes gaisma tika savākta ar kvarca lēcu optisko viļņvadu saišķa ieejā. No saišķa izejas emitētā gaisma tika fokusēta *Andor Shamrock sr-303i* spektrogrāfa ieejas spraugā ar kvarca lēcu, kurai fokusa attālums ir 50 mm. Spektrogrāfs tika aprīkots ar *Andor CCD* kameru.

Spektrogrāfs tika kalibrēts ar dzīvsudraba lampu, izmantojot dzīvsudraba dzelteno dubletu (5789.7 un 5769.6 Å dzīvsudraba spektrālās līnijas).

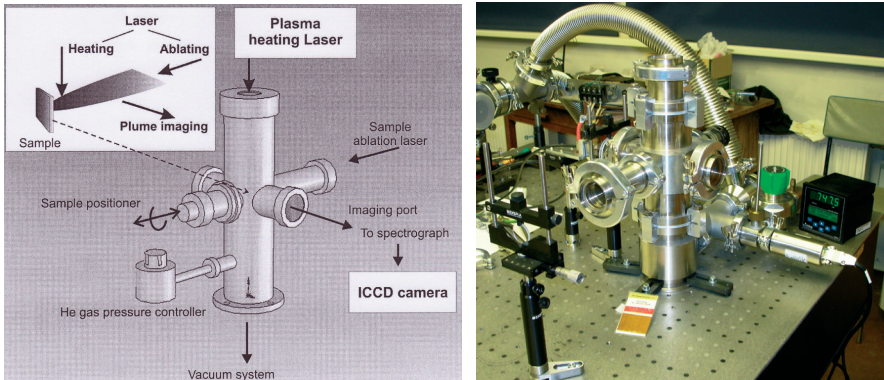
Lai identificētu elementus eksperimentāli iegūtajos spektros, tika izmantotas tabulētās viļņa garuma vērtības. Integrējot oglekļa līniju intensitātes, mērījumu nenoteiktība nepārsniedza 10%. Novērtējot citu elementu spektrālīniju mērījumu nenoteiktību, tā jānosaka attiecībā pret oglekļa līniju intensitātēm.

Ablācijas krāteru dziļums tika novērtēts ar *Dektak 150* (*Veeco Instruments, Inc.*) virsmas profilometru. Izmantotajā darba režīmā profilometrs nodrošina

100 nm izšķiršanu. Nenoteiktību ablācijas krāteru dziļumu mērīšanā nosaka galvenokārt ablētā materiāla porainā struktūra.

2.3. Vakuuma kamera

Vakuuma kamera lāzerinducētās ablācijas eksperimentiem tika konstruēta un izgatavota Cietvielu fizikas institūta darbnīcās. Vakuuma kamera ir parādīta 2.3. attēlā. Pozicionēšanas ierīce kamerā ļauj pārvietot paraugu horizontāli. Paraugs var rotēt, lai nodrošinātu iespēju realizēt vairākas eksperimentu sērijas ar tiem pašiem nosacījumiem. Kameras portos ir ievietoti kvarca lodziņi. Ablācijas stara ieejas ports ir ievērojami garāks par pārējiem. Tas nepieciešams, lai pasargātu logus no piesārņojuma ar ablētajām daļiņām, kas nāk no plazmas plūmes (ablācija ir veikta perpendikulāri parauga virsmai). Tomēr dažas materiāla daļiņas ablācijas procesā neizbēgami nosēžas uz ieejas porta stikla, tāpēc stikls tika tīrīts, kad tas bija nepieciešams. Lāzera stars tika fokusēts uz ablācijas kamerā esošo paraugu ar lēcu, kurai fokusa attālums ir 300 mm.



2.3. attēls. Eksperimentos lietotā vakuuma kamera

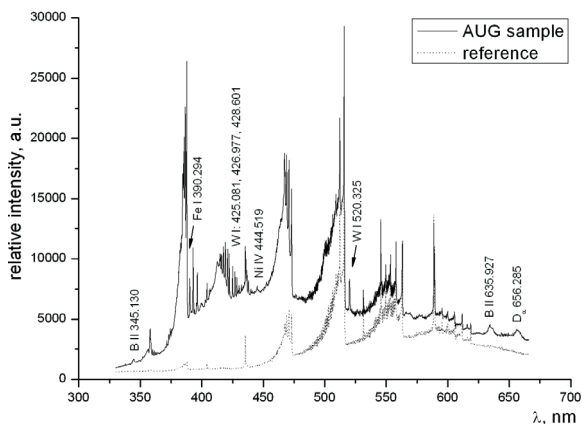
Vakuuma kameras dizains ļauj sistēmu modificēt, lai varētu realizēt dubultā impulsa eksperimentu. Otra lāzera stars plazmas sildīšanai var tikt ievadīts no augšējā porta.

Vakuuma kamera tika pievienota pie turbomolekulārā pumpja (*CDK 280 Ilmvac*), kas nodrošina vakuumu līdz 10^{-5} Torr. Pumpēšanas sistēma var tikt izolēta no vakuuma kameras ar vārsta palīdzību. Vakuuma sistēma ir aprīkota ar spiediena kontrolieri *910 DualTrans sensor transducer (MKS Instruments)*, kurā ir absolūtais pjezosensors un *MicroPirani*.

3. Galvenie rezultāti

3.1. Ablācijas atmosfēras spiedienā

Lai izpētītu piemaisījumu sastāvu ASDEX Upgrade divertora plāksņu paraugos, tika reģistrēti lāzerinducētās ablācijas spektri. References mērījumiem tika izmantoti R 7610 grafiņa paraugi, kas netika pakļauti plazmas izlādes iedarbībai un nesatur piemaisījumus, kurš varētu būt raksturīgi paraugiem, kas ņemti no reaktora kameras. Lai iegūtu paraugu elementu raksturīgās spektrālīnijas, abi paraugi tika ablēti ar 10 lāzera impulsiem ar enerģiju 10 mJ [10]. Emisijas spektri parādīti 3.1. attēlā.



3.1. attēls. R 7610 grafiņa references un ASDEX Upgrade paraugu lāzerinducētās plazmas emisijas spektri. Attēlā nav atzīmētas oglekļa līnijas [11]

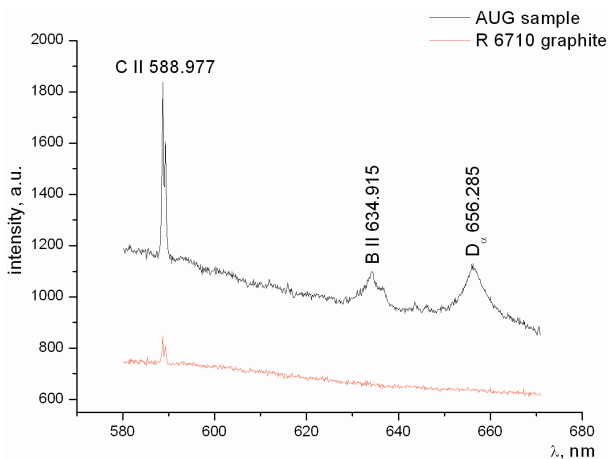
ASDEX Upgrade divertora plāksņu parauga spektrā ir ievērojams piemaisījumu skaits. Volframa līniju (W I 425.061 nm, 426.977 nm un 428601 nm) klātbūtni varētu izskaidrot ar to, ka volframs ir ASDEX Upgrade tokamaka pirmās sienas seguma pamatmateriāls [12]. Bora līniju B II (345.130 nm, 634.927 nm) parādīšanās iemesls varētu būt plazmu skarošo materiālu boronizācijas process – virsmas stāvokļa uzlabošanas procedūra [13]. Virsmas stāvokļa modificēšana veikta, lai optimizētu plazmas skarošo komponentu ietekmi uz plazmas izlādi. Nemodificētās sienas atbrīvo gāzu daļiņas, kas varētu traucēt plazmas izlādes stabilitāti. Lai minimizētu gāzu atbrīvošanu, tika veikta virsmas modificēšana un samazināta daļiņu uzkrāšanās sienas materiālos [14].

Fe I 390.294 nm un Ni IV 444.519 nm avoti varētu būt nerūsējošā tērauda komponentes, kas netika izolētas no plazmas. Pārsvārā tie ir kameras sienas ārējās daļas un elektrisko kabeļu izolācijas materiāli [15]. Izlādes laikā kabeļi kustas, un tas var novest pie plaisu parādīšanās. Savukārt materiāla atbrīvošana no

plaisām var izraisīt putekļu parādīšanos [16, 17], kas migrē pa reaktora kameru un nogulsņējas dažādās vietās.

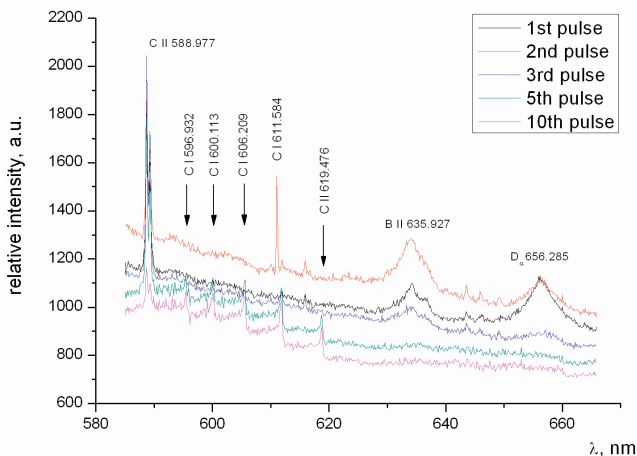
Kaut gan abi spektri tika reģistrēti ar tiem pašiem eksperimenta nosacījumiem, tomēr spektrālo līniju relatīvās intensitātes, kas atbilst plazmā neeksponētam paraugam, ir zemākas nekā ASDEX Upgrade paraugam. Iemesls tam var būt dažāds ablēto paraugu virsmu stāvoklis (2.1. a, b att.). References R 7610 grafitā paraugs tika gludi populēts salīdzinājumā ar ASDEX Upgrade paraugu, kas ir daudz raupjāks un ir ar erozijas pēdām pēc plazmas izlādes. Šiem paraugiem atšķiras arī materiāla ablācijas daudzums. Vidējais materiāla ablācijas daudzums ASDEX Upgrade paraugam bija ap 0.5 μm uz vienu lāzera impulsu. Tīram R 7610 grafitam šī vērtība ir tuva 70 nm. Tas ir saskaņā ar faktu, ka parauga atstarošanās spēja ietekmē lāzera impulsa jaudu, ko absorbē materiāls [18]. Virsmas defekti ir ļoti svarīgi, jo tie veicina lāzera intensitātes sliekšņa pazemināšanos, kas nepieciešams, lai iztvaicētu virsmu [5].

Plazmu skarošo materiālu izpētē svarīga nozīme ir ūdeņradim un (vai) tā izotopiem; ASDEX Upgrade tokamaka gadījumā – deitērijam. Lāzerablācijas spektroskopijas eksperimentos pētāmos paraugos tika konstatēta D_{α} 656.285 nm līnija. Lai pārliecinātos, ka novērotā līnija patiešām ir deitērija līnija, ASDEX Upgrade parauga un tīrā R 7610 grafitā parauga spektri tika reģistrēti šaurā spektrālajā apgabalā – no 620 līdz 680 nm. Attiecīgie spektri ir parādīti 3.2. attēlā. Tīrā R7610 grafitā parauga spektros netika atrastas ne B II (634.927 nm), ne D_{α} (656.285 nm) līnijas. Tas ļauj secināt, ka šie piemaisījumi ir specifiski paraugiem, kas tika pakļauti plazmas izlādes iedarbībai.



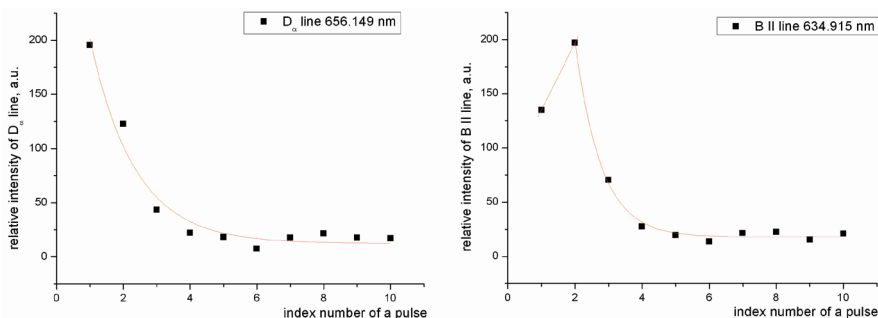
3.2. attēls. ASDEX Upgrade parauga un R 7610 grafitā parauga spektru salīdzinājums. Ablācijas tika veikta ar vienu 10 mJ enerģijas impulsu. R7610 grafitā paraugam, kas nav bijis reaktora kamerā, D_{α} 656.285 nm līnija netika konstatēta

Lai izsekotu deitērija līnijas 656.285 nm parādīšanos spektrā, signāli tika reģistrēti spektrālajā intervālā no 580 līdz 680 nm. 3.3. attēlā redzami spektri, kas atbilst plazmas emisijai pēc 1., 2., 3., 5., un 10. impulsa, lietojot to tajā pašā ablācijas vietā.



3.3. attēls. D_α 656.285 nm [11] līnijas parādīšanās ASDEX Upgrade parauga lāzera ablācijas spektrā. Skaitļi grafikā atbilst impulsa kārtas numuram

Piemaisījumu dziļuma profili ir parādīti 3.4. attēlā.



3.4. attēls. D_α and B II līniju dziļuma profili ASDEX Upgrade parauga lāzera ablācijas spektrā. Ablētā materiāla noņemšanas daudzums ir ap 0.5 μm vienā lāzera impulsā

3.3. un 3.4. attēlā ir attēloti spektri, kas iegūti pēc ASDEX Upgrade parauga Nr. VI lāzera ablācijas. Deitērija koncentrācija, kas noteikta ar RBS metodi, šajā paraugā bija 5.36×10^{17} atomi/cm³, bora koncentrācija – 9.78×10^{18} atomi/cm³. Ja ablētā materiāla noņemšanas daudzums ir ap 0.5 μm vienā lāzera impulsā, deitērijs varētu atrasties līdz 0.5–1 μm dziļumā materiāla virskārtā. Bora koncentrācija,

spriežot pēc lāzera ablācijas spektra, sasniedz maksimumu aptuveni 1 μm materiāla dziļumā, pēc tam seko koncentrācijas samazināšanās.

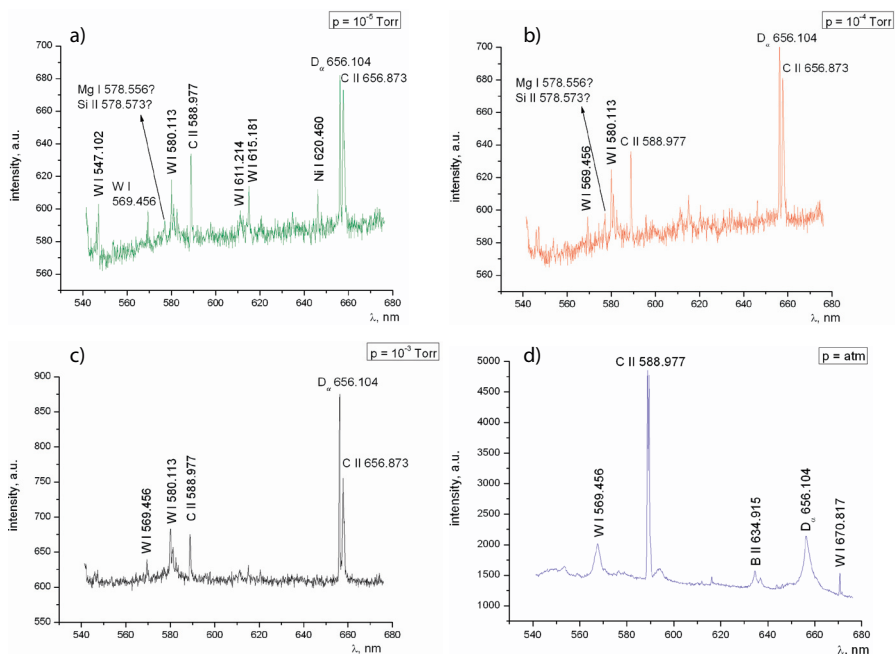
Līdz ar lāzera impulsu skaitu palielināšanos (ar to iedarbojās uz virsmas vienu un to pašu punktu) piemaisījumu signāls samazinās līdz fona līmenim, bet substrāta (oglekļa) signāls līdz ar pieaugošo lāzera impulsu skaitu paliek nemainīgs. Atmosfēras spiedienā plazma ir ierobežota nelielā tilpumā tuvu parauga virsmai. Kad spēki, kas uztur plūmes augstā spiediena apgabalu, izkliedējas, plūmes izplatīšanās palēninās un priekšējā plūmes robeža relaksējas. Tas noved pie tā, ka plūmes materiāla porcija nogulsņējas atpakaļ parauga virsmā. Vieglākie elementi kondensējas no atdziestošās plazmas ātrāk nekā smagākie elementi. Šī kondensētā viela ir avots materiālam, kas ir piesātināts ar smagākajiem elementiem un tiks iztvaicēts ablācijas vēlākajās stadijās [19].

3.2. Ablācija vakuumā

Plazmas plūme, kas veidojas no ablācijas vietas, tika novērota perpendikulāri izplatīšanās virzienam. Plūmes parametri ir atkarīgi no lāzera starojuma blīvuma. Plazmas optiskā emisija mainās atkarībā no novērošanas attāluma no parauga virsmas.

3.2.1. Ablācija dažādās spiediena vērtībās

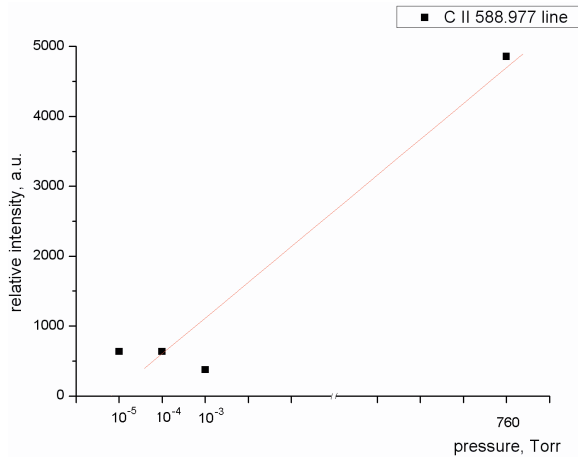
Lai atrastu optimālo režīmu plazmu skarošo materiālu piemaisījumu dziļuma profilu, tika veikti eksperimenti vakuuma kamerā dažādās spiediena vērtībās, kā arī atmosfēras spiedienā. Paraugi tika ablēti ar 10 lāzera impulsiem, kuru enerģija ir 25 mJ. Iegūtie spektri ir attēloti 3.5. attēlā. Katrā lāzerinducētās ablācijas sērijā ir norādīta spiediena vērtība. Katrai spiediena vērtībai tika uzņemti 10 spektri, un mērījumiem atmosfēras spiedienā tika reģistrētas 3 spektru sērijas [20].



3.5. attēls. ASDEX Upgrade paraugu spektri dažādos spiedienos [11]:

a) $p = 10^{-5}$ Torr, b) $p = 10^{-4}$ Torr, c) $p = 10^{-3}$ Torr, d) atmosfēras spiediens. Katrā spektra reģistrācijas reizē optisko viļņvadu saišķi tika fokusēti plazmas plūmes spožākais punkts

Spektrs, kas uzņemts 10^{-5} Torr spiedienā, ir visbagātākais ar līnijām. Līdz ar spiediena palielināšanos reģistrēto spektrālīniju skaits samazinās. Spektrs, kas ir uzņemts atmosfēras spiedienā, satur vismazāko spektrālīniju skaitu, bet relatīvās intensitātes ir daudz augstākas salīdzinājumā ar spektriem, kas reģistrēti zemākā spiedienā. Tas ilustrēts 3.6. attēlā.



3.6. attēls. C II 588.977 spektrālās līnijas intensitāte atkarībā no spiediena vakuuma kamerā. Izvēlēta C II līnija parāda, ka maksimālā intensitāte tika sasniegta atmosfēras spiedienā

Šo novērojumu var izskaidrot ar lāzerinducētās plazmas izplatīšanās modeļiem, kas demonstrē augsta spiediena apgabala veidošanos plazmas plūmes priekšējās robežas rajonā [21]. Atmosfēras spiedienā lāzerinducētā plazma tiek ierobežota nelielā tilpumā tuvu ablētā materiāla virsmai. Priekšējā ablācijas plūmes mala mijiedarbojas ar fona gāzu daļiņām, tāpēc plūmes spožums reģistrēšanas vietā palielinās.

Spektros, kas tika uzņemti atmosfēras spiedienā, līnijas ir vairāk paplašinātas nekā spektros, kas reģistrēti zemākā spiedienā. Ja liels atomu daudzums ir koncentrēts nelielā tilpumā, lai radītu augstu atomu blīvumu, to savstarpējā mijiedarbība sekmē ievērojamu emisijas spektrālīniju paplašināšanos papildus efektam, kas izraisa spektrālīnijas dabisko paplašināšanos [22]. Tas notiek, kad atomi, joni vai brīvie elektroni saduras ar ierosinātu atomu un tas atgriežas no ierosinātā stāvokļa, pirms elektrons paspēj spontāni sabrukt.

3.3. un 3.4. attēlā ir parādīti spektri, kas iegūti pēc ASDEX Upgrade parauga Nr. IX lāzera ablācijas. Deitērija koncentrācija, noteikta ar RBS metodi, šajā paraugā bija 6.54×10^{17} atomi/cm³, bora koncentrācija – 1.37×10^{19} atomi/cm³. Tāpat kā iepriekšējos eksperimentos ASDEX Upgrade divertora plākšņu paraugu spektros ir ievērojams piemaisījumu skaits. Bez volframa un deitērija, ja spiediena vērtība ir 10^{-5} Torr, tika reģistrēts Ni I (620.460 nm). Šis elements varētu parādīties no nerūsējošā tērauda komponentēm, kas netika izolētas no plazmas [15]. Kas attiecas uz piemaisījumiem, kuri tika reģistrēti, ja spiediena vērtība ir 10^{-4} Torr, abi elementi varētu parādīties spektrā. Si II (578.573 nm) līnija varētu rasties no kabeļu izolācijas materiāla. Starp ASDEX Upgrade piemaisījumiem var atrast

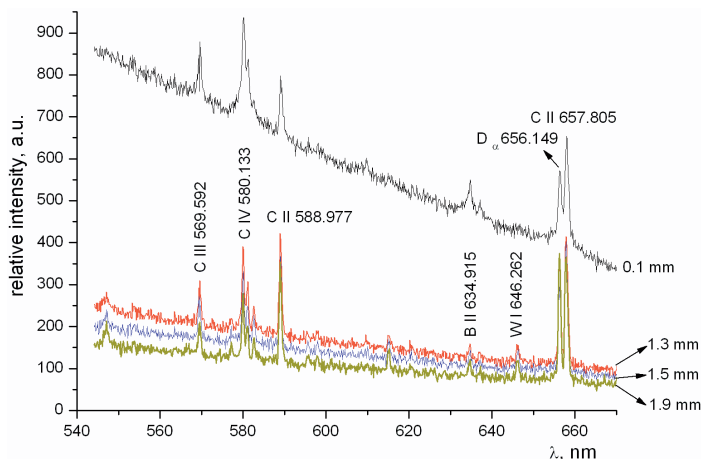
arī Mg I (578.556 nm) [15]. B II (634.915 nm) līnijas klātbūtne tika izskaidrota iepriekšējā apakšnodaļā.

Materiāla ablācijas daudzums uz vienu lāzera impulsu minētajos eksperimentālajos nosacījumos bija aptuveni līdzīgs un sasniedza 0.5 μm vienā lāzera impulsā. Spiediena ietekme šinī gadījumā nav būtiska. Spektrā ir parādīta gaismas summa, jo eksperimenta mērķis bija noteikt optimālos ablācijas procedūras nosacījumus. Tas izskaidro, kādēļ D_{α} līniju (656.104 nm) joprojām var novērot spektrā.

3.2.2. Emisijas spektru reģistrācija dažādos attālumos no parauga

Plazmas gaismas selektīva reģistrēšana varētu uzlabot detektēšanas spējas, lai spēcīgais nepārtrauktais starojums, kas parādās plazmas veidošanās agrīnajās stadijās, varētu tikt reducēts pat mērījumos bez laika izšķiršanas [23].

Lāzerinducētās plazmas spektrs tika reģistrēts, fokusējot optisko viļņvadu saišķi lāzera ablācijas plazmas spožāko punktu, pēc tam pārvietojot saišķi ar soli 0.1 mm un reģistrējot spektru pēc katra soļa (3.7. att.). Lāzera ablācijas plazma katram reģistrēšanas solim tika iegūta, ablējot materiālu ar 10 impulsiem, kuru enerģija ir 20 mJ.

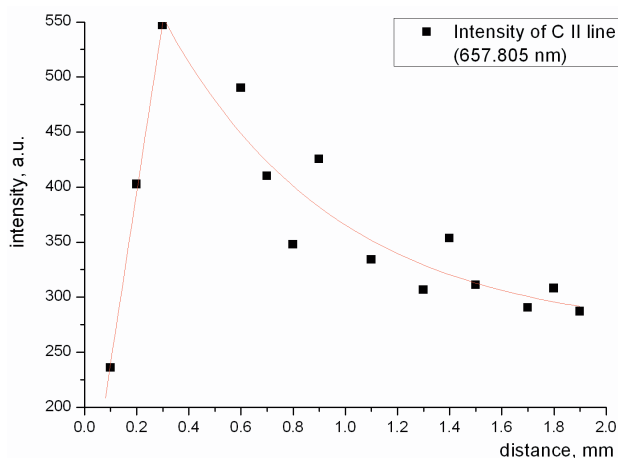


3.7. attēls. Lāzerinducētās plazmas spektri, kas iegūti dažādos attālumos no parauga virsmas. Katram spektram tika akumulēti 10 lāzera impulsi ar enerģiju 20 mJ

3.7. attēlā redzama nepārtrauktā starojuma intensitātes samazināšanās, palielinoties attālumam no ablētā parauga virsmas. 1 mm attālumā no ablācijas plūmes spožākā punkta spektriem ir līdzīga signāla-trokšņa attiecība un līdzīgs spektrālais sastāvs. Kad optisko viļņvadu saišķis kustas projām no plūmes spožākā punkta (un noablētā parauga virsmas), nepārtrauktais starojums ievērojami

samazinās salīdzinājumā ar to, kas tika iegūts, plūmes spožāko punktu fokusējot tieši uz optiskās šķiedras. Signāla-trokšņa attiecība ir lielāka, kad ablācijas spektrs tiek reģistrēts plūmes perifērijā. Šajā gadījumā spektrs ir ļoti līdzīgs tipiskajam laikā izšķirtajam spektram ar zemu nepārtrauktā starojuma intensitāti [24].

3.8. attēlā parādīta C II spektrālās līnijas (657.805 nm) relatīvās intensitātes atkarība no attāluma no parauga virsmas līdz ablācijas spektra reģistrēšanas vietai. Relatīvā intensitāte pieaug un sasniedz maksimumu 0.3 mm no ablētā parauga virsmas, un pēc tam intensitāte eksponenciāli samazinās. To var izskaidrot ar faktu, ka plazmas temperatūra un elektronu blīvums samazinās, pieaugot attālumam no ablētā parauga [25].

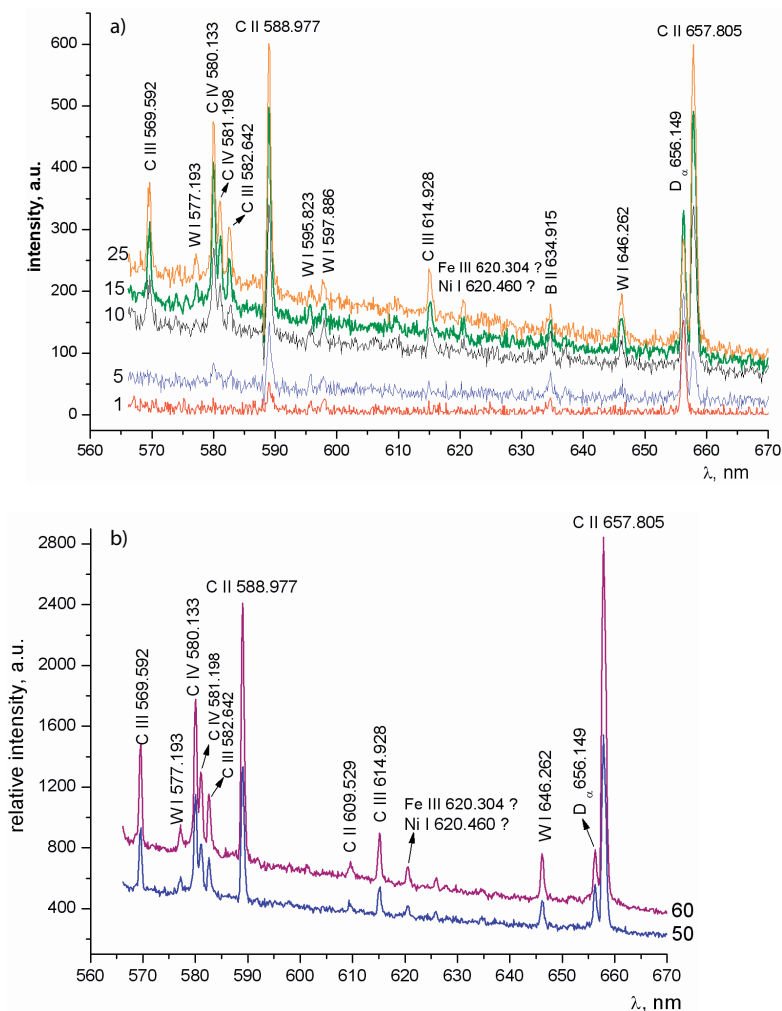


3.8. attēls. C II spektrālās līnijas (657.805 nm) relatīvās intensitātes atkarība no parauga virsmas. Spektu reģistrēšanas nosacījumi ir tādi paši kā spektriem 3.7. attēlā

Kaut gan plazmas temperatūra varētu būt visaugstākā 0.3 mm attālumā no parauga virsmas (sk. 3.8. att.), tomēr ablācijas spektru reģistrēšanas optimālākais attālums no parauga virsmas ir 1.9 ± 0.1 mm, jo signāla-trokšņa attiecība šajā gadījumā ir maksimāla.

Viens no potenciālajiem lietojumiem ir tritija desorbēcija no plazmu skarošiem materiāliem, iedarbojoties uz virsmu ar noteikta skaita lāzera impulsiem. Lai novērotu spetkrāšņlīniju uzvedību, uz ASDEX Upgrade parauga virsmu iedarbojās ar impulsu skaitu no 1 līdz 60 (3.9. a, b att.). Spektri tika uzņemti 1.9 ± 0.1 mm attālumā no parauga virsmas. Iegūtajos spektros redzam oglekļa līniju relatīvo intensitāšu palielināšanos, augot impulsu skaitam. Savukārt piemaisījumu – bora un deitērija – signāli samazinās, pieaugot impulsu skaitam. B II 634.915 nm līnija

ir joprojām redzama spektrā pēc 25 impulsiem, un tās intensitāte kļūst līdzīga fonam pēc 50 lāzera impulsiem.



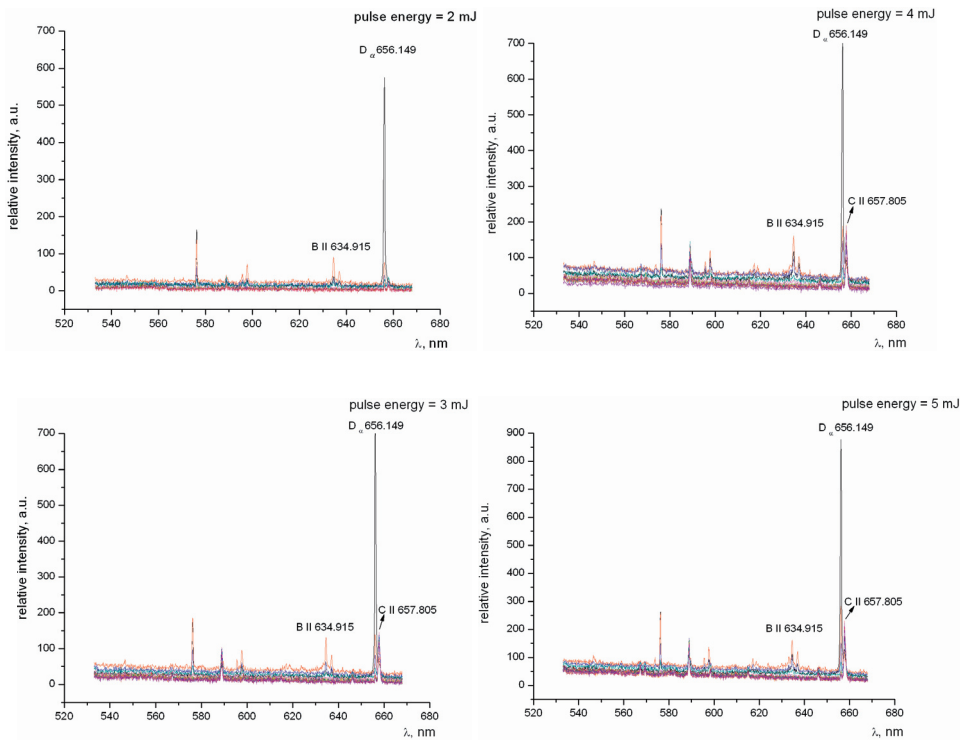
3.9. *a, b attēls.* ASDEX Upgrade parauga spektrs pēc iedarbības uz to ar noteiktu impulsu skaitu. Impulsu skaits ir atzīmēts pie katra spektra

Vienlaikus ar lāzera ablācijas mērījumiem var tikt veikta arī jonu enerģijas analīze [26]. Mērot jonu signālu pirms un pēc lāzera ablācijas, var noteikt minimālo lāzera impulsu skaitu, ar kuriem var pilnībā noņemt deitēriju vai tritiju no plazmu skaroša materiāla. Var atrast optimālo lāzera darbības režīmu,

lai reģistrētu spektrālo informāciju par citiem piemaisījumiem vienlaikus ar detritiācijas procesu.

3.2.3. Ablācija dažādās impulsa enerģijās. Dziļuma profili

Lai reģistrētu ASDEX Upgrade divertora plāksņu paraugu piemaisījumu – boru un deitēriju – spektrālo informāciju un dziļuma profilus, paraugi tika apstrādāti ar noteiktu skaitu lāzeru impulsu vienā un tai pašā vietā. Spektri tika reģistrēti pēc katra lāzera impulsa. Līdz ar to katra spektru sērija satur tik daudz spektru, ar cik impulsiem tika apstrādāts paraugs. Visi mērījumi tika veikti 10^{-5} Torr spiedienā. Iegūtie spektri parādīti 3.10. attēlā.



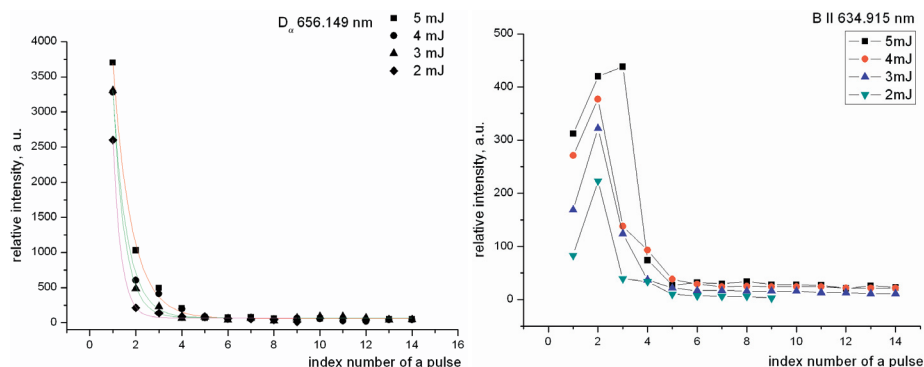
3.10. attēls. ASDEX Upgrade divertora materiāla spektri. Paraugi tika apstrādāti ar 9 (2 mJ impulsa enerģijas gadījumā) līdz 14 (pārējām enerģijām) lāzera impulsiem. Impulsa enerģija ir atzīmēta katrā grafikā. Mērījumi tika veikti spiedienā 10^{-5} Torr

Procesi, kas noved pie optiskās caursites, sākās ar liela lādiņnesēju skaita veidošanos lāzera stara fokusā pie ablētā parauga virsmas. Ja lādiņnesēju oscilācijas enerģija pārsniedz aizliegtās zonas platumu, saites var tikt pārrautas un notiek

lavīnveida jonizācija. Lādiņnesēju oscilācijas enerģija ir $E_{osc} = \left\langle \frac{e^2 E^2}{2m_e \omega^2}_{laser} \right\rangle$ vai

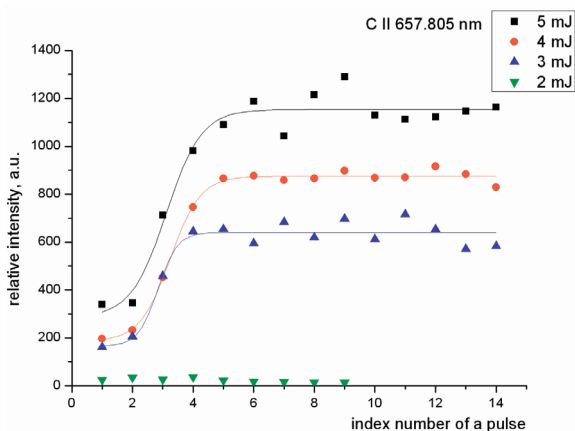
(lāzeru viļņa garuma un intensitātes izteiksmē) $E_{osc} = 9,3 \times 10^{-14} I \lambda^2$, kur E_{osc} ir eV, lāzera intensitāte I ir W/cm^2 un lāzera viļņa garums λ ir μm [27]. Lai jonizētu ūdeņraža atomu, lāzera impulsa intensitātei jābūt ar kārtu $10^{14} \text{W}/\text{cm}^2$ pētījumā izmantotajam lāzera impulsa garumam. Eksperimenta izmantotās intensitātes ir ar kārtu $10^{13} \text{W}/\text{cm}^2$, kas izrādījusies pietiekama, lai ūdeņraža spektrālā līnija parādītos spektrā. Plazmas izplešanās laikā notiek tās termiskā relaksācija un ūdeņraža atomu elektronu sistēma ierosinās sadursmēs ar plazmas daļiņām.

Piemaisījumu dziļuma profili ir parādīti 3.11. attēlā.



3.11. attēls. D_α and B II līniju dziļuma profili ASDEX Upgrade parauga lāzera ablācijas spektrā atkarībā no lāzera impulsa enerģijas. Impulsi tika padoti viens aiz otra uz to pašu vietu, un spektri reģistrēti pēc katra impulsa. Impulsa kārtas numurs ir norādīts uz X ass

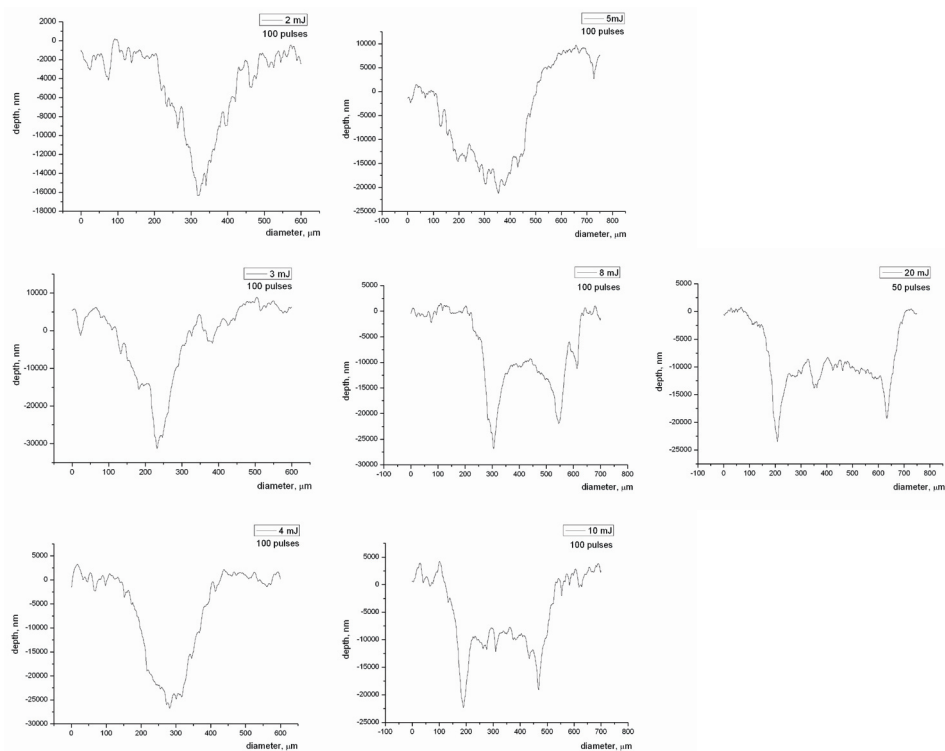
3.12. attēlā parādīta C II līnijas ($\lambda = 657.805 \text{ nm}$) intensitātes uzvedība atkarībā no lāzera impulsa enerģijas.



3.12. attēls. C II līnijas ($\lambda = 657.805$ nm) evolūcija atkarībā no lietoto impulsu skaita dažādās lāzera impulsu enerģijās. Impulsi tika padoti viens aiz otra uz to pašu vietu, un spektri reģistrēti pēc katra impulsa. Impulsa kārtas numurs ir norādīts uz X ass

Tā kā grafitis ir ASDEX Upgrade divertora plākšņu pamatmateriāls, C II 657.805 nm līnijas intensitāte aug līdz ar lāzera impulsu skaitu un pēc 5. impulsa kļūst aptuveni konstanta. Intensitātes spektros, kas atbilst ablācijai ar impulsa enerģiju 2 mJ, ir praktiski vienādas ar fona līmeni, jo grafitā ablācijas sliekšnis netika ievērojami pārsniegts.

Lai izpētītu ablācijas krāteru formas lāzera impulsu enerģijām, kuras tika izmantotas lāzera ablācijā, ASDEX Upgrade plāksne tika apstrādāta ar 100 attiecīgo enerģiju impulsiem un ablācijas krāteru dziļumi tika izmērīti ar profilometru. Ablācijas krāteru profili ir attēloti 3.13. attēlā.



3.13. attēls. Ablēto krāteru profili. Impulsu enerģijas un impulsu skaits ir norādīts katrā grafikā

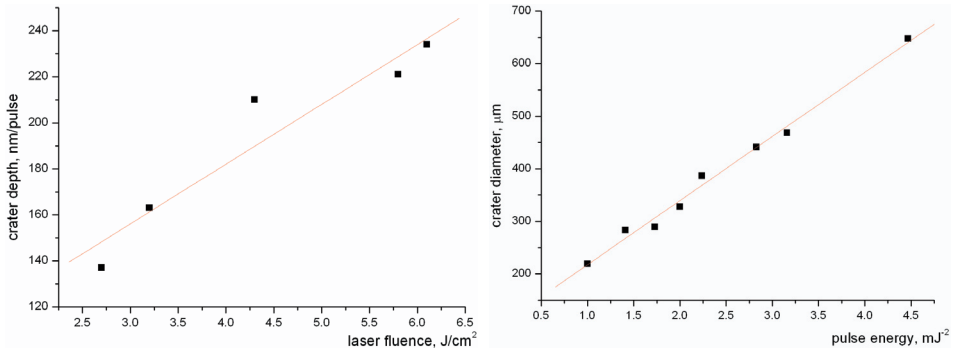
Lāzera impulsa augstākās intensitātēs ablācijas krāterim parādās specifiska forma (sk. 3.13. att.: 8, 10 un 20 mJ impulsiem). Varētu domāt, ka šādu krāteru formu nosaka lāzera stara difrakcija, kas parādās ablācijas procesā [28].

Lāzera ablācijas procesā mainās ablētā parauga virsmas topogrāfija. Ablācijas krāteru malas, kā arī ar lāzeru neapstrādātā parauga virsma ir gludāka salīdzinājumā ar krātera iekšējo daļu. Tādējādi lāzera ablācija veido apgabalus ar atšķirīgiem absorbcijas koeficientiem. Tas ir lielāks raupjākiem virsmas apgabaliem, un tas veido sava veida masku. Šī maska darbojas kā difrakcijas veidols, radot profilu, kas atbilst intensitātes sadalījumam, ko apraksta difrakcija no bezgalīgas pusplaknes.

3.10.–3.12. attēlā ir parādīti spektri, kas iegūti pēc ASDEX Upgrade parauga Nr. X lāzera ablācijas. Deitērija koncentrācija, kas noteikta ar RBS metodi, šajā paraugā bija 5.84×10^{17} atomi/cm³, bora koncentrācija – 1.11×10^{19} atomi/cm³. Aplūkojot materiāla ablēšanas daudzumu, ablējot materiālu ar lāzera impulsiem,

kuru enerģija ir 2–5 mJ, šie rezultāti saskan ar rezultātiem, kas iegūti atmosfēras spiedienā. Deitērijs varētu atrasties 0.5–1 μm dziļumā materiāla virskārtā. Bora koncentrācija, spriežot pēc lāzera ablācijas spektra, sasniedz maksimumu aptuveni 1 μm materiāla dziļumā, kam seko koncentrācijas samazināšanās.

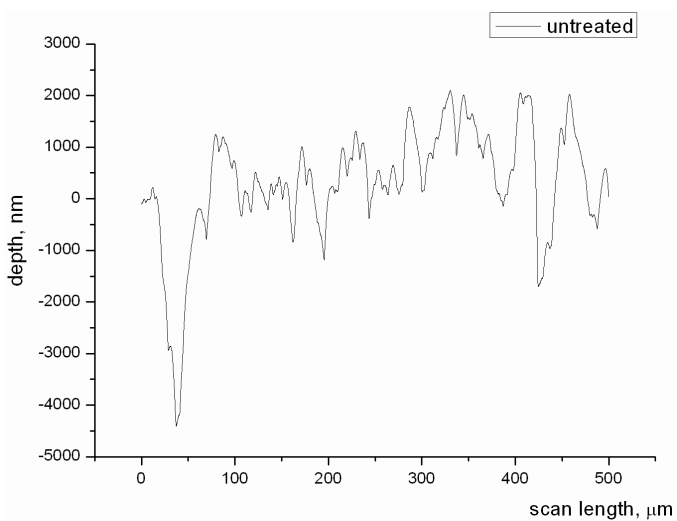
Salīdzinājumā ar krāteru diametru, kas ievērojami mainās līdz ar lāzera impulsa enerģijas pieaugumu, krāteru dziļums nemainās sevišķi strauji.



3.14. a, b attēls. Ablētā materiāla daudzums mainās līdz ar lāzera stara impulsa enerģiju. Krāteru dziļums (a) ir attēlots kā funkcija no lāzera starojuma blīvuma un krāteru diametrs (b) – kā funkcija no lāzera impulsa enerģijas kvadrātsaknes

Ablācijas krātera diametrs palielinās ar impulsa enerģijas kvadrātsakni. Tā cēlonis visdrīzāk ir masas transports. Lāzera starojuma blīvumam palielinoties, ievērojama materiāla daļa izkūst. Stara fokusēšana noved pie straujas temperatūras gradienta palielināšanās sānu virzienā, un hidrodinamiskās plūsmas ietekmē beigu virsmas morfoloģija var precīzi neatspoguļot lokālo starojuma blīvumu [29].

Piemaisījumu dziļuma profila noteikšanu apgrūtina arī pati ASDEX Upgrade divertora plākšņu paraugu virsma. 3.15. attēlā ir redzama ASDEX Upgrade parauga virsma, kas nav apstrādāta ar lāzeru un ir iegūta ar profilometru.



3.15. attēls. ASDEX Upgrade neablētā parauga virsma

Paraugs netika ablēts ar lāzeru. Attēlā ir redzamas relatīvi dziļas poras, kas varētu traucēt precīzai ablācijas krāteru analīzei. Erozijai, kurai plazmu skarošie materiāli pakļaujas reaktora kamerā, ir būtiska nozīme šo virsmu modificēšanā, bet R 6710 grafitā specifikācijā ir teikts, ka materiāls pats par sevi ir porains. Atsevišķas poras var sasniegt 0.6 μm.

Aizstāvamās tēzes

1. Novēroti divi ablācijas mehānismi. Līdz lāzera impulsa jaudas noteiktā sliekšņa sasniegšanai (4.3 J/cm^2 ar impulsa garumu 0.1 ns) ablācijas procesu nosaka materiāla kušana. Pēc sliekšņa pārsniegšanas ablācijas procesus nosaka atomu jonizācija lāzera impulsa elektriskajā laukā.

2. Atšķirīgie ablācijas procesu norises mehānismi izpaužas kā specifiska ablācijas krāteru forma. Pārsniedzot noteikto lāzera starojuma jaudas sliekšni (4.3 J/cm^2), ablācijas krātera raksturīgo formu nosaka lāzera starojuma difrakcija no krātera sienas, ko apraksta difrakcija no pusplaknes. Zemsliekšņa lāzera starojuma jaudā ablācijas krāterim ir zvanveida forma.

3. Eksistē optimālais attālums no materiāla virsmas, kurā noteiktas piemaisījuma spektrālās līnijas intensitāte ir maksimāla attiecībā pret nepārtrauktā starojuma fonu. To nosaka plazmas termiskā relaksācija plūmes izplešanās laikā un piemaisījumu (ūdeņraža) atomu elektronu sistēmas ierosināšana sadursmēs ar plazmas daļiņām.

Rezultātu kopsavilkums

Promocijas darba galvenie rezultāti:

- Cietvielu fizikas institūta Optiskās spektroskopijas laboratorijā tika izveidota eksperimentālā iekārta plazmu skarošo materiālu lāzerinducētās ablācijas eksperimentiem;
- tika izveidota metodoloģija piemaisījumu dziļuma profila noteikšanai ar lāzerablācijas spektroskopijas metodi;
- tika novērtēts piemaisījumu akumulācijas dziļums plazmu skarošos materiālos.

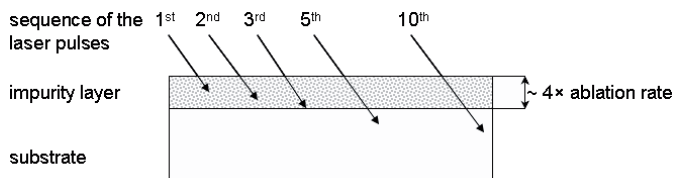
Optimālais spiediens lāzerinducētās ablācijas spektroskopijas mērījumiem ir 10^{-5} Torr. Līdz ar spiediena palielināšanos reģistrēto spektrālīniju skaits samazinās. Spektrs, kas ir uzņemts atmosfēras spiedienā, satur vismazāko spektrālīniju skaitu, bet relatīvās intensitātes ir daudz augstākas salīdzinājumā ar spektriem, kas reģistrēti zemākā spiedienā. Spektri, kas iegūti 10^{-5} Torr spiedienā, ir labi izšķirti un demonstrē maksimālu spektrālo līniju skaitu, salīdzinot ar citām spiediena vērtībām, kas tika izmantotas pētījumos. Ūdeņraža un bora spektrālās līnijas netika pakļautas paplašinājumam tik spēcīgi, kā tas notika eksperimentos atmosfēras spiedienā.

Novērota nepārtrauktā starojuma intensitātes samazināšanās, palielinoties attālumam no ablētā parauga virsmas. 1 mm attālumā no ablācijas plūmes spožākā

punkta spektriem ir līdzīga signāla-trokšņa attiecība un līdzīgs spektrālais sastāvs. Kad optisko viļņvadu saišķis kustas projām no plūmes spožākā punkta (un noablētā parauga virsmas), nepārtrauktais starojums tiek ievērojami samazināts salīdzinājumā ar to, kas tika iegūts, plūmes spožāko punktu fokusējot tieši uz optiskās šķiedras. Signāla-trokšņa attiecība ir lielāka, kad ablācijas spektrs tiek reģistrēts plūmes perifērijā. Optimālais attālums lāzera ablācijas spektra reģistrēšanai ir 1.9 ± 0.1 mm no plūmes spožākā punkta.

Tika veikti ASDEX Upgrade divertora plākšņu paraugu piemaisījumu dziļuma profila noteikšanas eksperimenti pie dažādām lāzera impulsa enerģijām. Tika novēroti divi ablācijas mehānismi. Pārsniedzot noteikto lāzera starojuma jaudas sliekšni (4.3 J/cm^2), ablācijas krātera raksturīgo formu nosaka lāzera starojuma difrakcija no krātera sienas, ko apraksta difrakcija no pusplaknes. Zemsliekšņa lāzera starojuma jaudā ablācijas krāterim ir zvanveida forma.

ASDEX Upgrade divertora plākšņu materiāla ablācijas mehānisms un piemaisījumu signālu uzvedība var tikt izskaidroti šādi. Kad lāzera impulss mijiedarbojas ar parauga materiālu, piemaisījumu elementi parādās spektrā. Ja piemaisījumu slāni ablē nost no ASDEX Upgrade divertora materiāla virsmas, piemaisījumu signāla intensitāte samazinās. Šī slāņa biezums varētu būt $(3 \div 4) \times$ materiāla ablēšanas ātrums, kas ir ap $0.5 \mu\text{m}$ ar vienu lāzera impulsu (3.16. att.).



3.16. attēls. ASDEX Upgrade paraugā – piemaisījumu ablācijas process

Gandrīz viss ūdeņradis, kas atrasts ASDEX Upgrade paraugos, tiek izlaists ar lāzera stara iedarbību $0.5\text{--}1 \mu\text{m}$ dziļumā. Bora koncentrācija sasniedz maksimālo vērtību $1 \mu\text{m}$ dziļumā, samazinoties līdz ar ablācijas krātera dziļuma palielināšanos.

Praktiskā nozīme

Iegūtie rezultāti var tikt izmantoti praksē:

1. Plazmu skarošo materiālu piemaisījumu lāzerinducētās ablācijas spektroskopijas analīzes metode ļauj noteikt jebkuru ķīmisko elementu, tāpēc tā var tikt izmantota ūdeņraža izotopu noteikšanai plazmu skarošās komponentēs.

2. Lāzerinducētā ablācijas spektroskopija var tikt izmantota par *in situ* analīzes metodi. Tas ir ļoti būtiski tāpēc, ka ūdeņraža izotopu detektēšana un detritiācija ir izšķiroši uzdevumi plazmu skarošo komponentu virsmas analīzē un komponentu neregulārās formas veido grūti sasniedzamus apgabalus.

3. Rezultāti rāda, ka lāzerablācijas spektroskopijas metode var tikt izmantota arī plazmu skarošo komponentu detritiācijas veikšanai un vienlaicīgai kontrolei.

Nobeigums (perspektīva)

1. Darba rezultāti aktualizē jautājumu par ātras un relatīvi lētas plazmu skarošo materiālu apsekošanas metodes izstrādi. To varētu lietot kodoltermiskā reaktora kamerā.

2. Vienlaikus ar lāzera ablācijas mērījumiem var veikt arī jonu enerģijas analīzi. Mērot jonu signālu pirms un pēc lāzera ablācijas, var noteikt minimālo lāzera impulsu skaitu, ar kuriem var pilnībā noņemt deitēriju vai tritiju no plazmu skaroša materiāla. Var atrast optimālo lāzera darbības režīmu, lai reģistrētu spektrālo informāciju par citiem piemaisījumiem vienlaikus ar detritiācijas procesu.

3. Plazmu skarošo materiālu piemaisījumu koncentrācijas noteikšanai nepieciešami koncentrācijas kalibrēšanas etaloni, kas nav komerciāli pieejami, jo tie ir ļoti specifiski. Tāpēc varētu veikt savstarpējo kalibrēšanu ar kādu no pašreizējām metodēm (piemēram, SIMS), lai būtu iespējama gan kvalitatīva, gan kvantitatīva plazmu skarošo materiālu lāzera ablācijas spektroskopija.

4. Tika parādīts, ka deitērija signāls samazinās līdz fona līmenim pēc 4. lāzera impulsa iedarbības. To varētu uzlabot bez ierosmes lāzera intensitātes paaugstināšanas ar dubultā lāzera impulsa ablācijas palīdzību. Ar dubultā impulsa ablāciju var paaugstināt detektēšanas sliekšni par kārtu salīdzinājumā ar ablāciju, izmantojot tikai ierosmes lāzeru.

Izmantotās literatūras saraksts

- [1] M. Yorozu, T. Yanagida, T. Nakajyo, Y. Okada, A. Endo. Laser microprobe and resonant laser ablation for depth profile measurements of hydrogen isotope atoms contained in graphite. *Appl. Opt.* 40, 2001, 2043–2046.
- [2] K. Krieger, A. Geier, X. Gong, H. Maier, R. Neu, V. Rohde, ASDEX Upgrade Team. Erosion and migration of tungsten employed at the main chamber first wall of ASDEX Upgrade. *J. Nucl. Mater.* 313–316, 2003, 327–332.
- [3] B. Thestrup, B. Toftmann, J. Schou, B. Doggett, J. G. Lunney. Ion dynamics in laser ablation plumes from selected metals at 355 nm. *Appl. Surf. Sci.* 197–198, 2002, 175–180.
- [4] M. Miyamoto, K. Tokunaga, T. Fujiwara, N. Yoshida, TRIAM group, Y. Morimoto, T. Sugiyama, K. Okuno. Material properties of co-deposition formed on plasma facing materials in all-metal machine TRIAM-1M. *J. Nucl. Mater.* 313–316, 2003, 82–86.
- [5] G. M. Weyl. Laser-Induced Plasmas and Applications, Chapter 1. Eds. L. J. Radziemski and D. A. Cremers. New York: Marcel Dekker, 1989.
- [6] Ch. Boulmer-Leborgne, J. Hermann, B. Dubreuil. Plasma formation resulting from the interaction of a laser beam with a solid metal target in an ambient gas. *Plasma Sources Sci. Technol.* 2, 1993, 219–223.
- [7] R. Fabbro, E. Fabre, F. Amiranoff, C. Garban-Labaune, J. Virmont, M. Weinfeld, C. E. Max. Laser wavelength dependence on mass ablation rate and heat flux inhibition in laser produced plasmas. *Phys. Rev. E* 26, 1982, 2289–2292.
- [8] B. Polyakov, A. Petruhins, J. Butikova, A. Kuzmin, I. Tale. Some aspects of pulsed laser deposition of Si nanocrystalline films. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* 48, 2009, p. 20502.
- [9] V. S. Burakov, S. N. Raikov. Quantitative analysis of alloys and glasses by a calibration-free method using laser-induced breakdown spectroscopy. *Spectrochim. Acta B* 62, 2007, 217–223.
- [10] J. Butikova, A. Sarakovskis, I. Tale. Laser-induced breakdown spectroscopy for determining impurity content and depth profile in plasma facing materials. Submitted for publication in *Optics and Lasers in Engineering*.
- [11] Yu. Ralchenko, F-C. Jou, D. E. Kelleher, A. E. Kramida, A. Musgrove, J. Reader, W. L. Wiese, K. Olsen. NIST Atomic Spectra Database (Version 3.1.3) [Online]. Available: <http://physics.nist.gov/asd3>, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
- [12] Max-Planck Institut für Plasmaphysik, Annual Report 2007.
- [13] R. Neu, R. Pugno, M. Balden, J. Gafert, A. Geier, A. Kallenbach, V. Rohde, ASDEX Upgrade Team. Laser ablation at the inboard side of ASDEX Upgrade. *ECA* 24B, 2000, 1176–1179.
- [14] V. Rohde, R. Dux, A. Kallenbach, K. Krieger, R. Neu, ASDEX Upgrade Team. Wall conditioning in ASDEX Upgrade. *J. Nucl. Mater.* 363–365, 2007, 1369.

- [15] W. Schustereder, K. Krieger, A. Herrmann, V. Rohde, ASDEX Upgrade Team. Discharge resolved impurity flux measurements in the edge plasma of ASDEX Upgrade by exposure of collector probes. *J. Nucl. Mater.* 363–365, 2007, 242–246.
- [16] J. P. Sharpe, D. A. Petti, H.-W. Bartels. A review of dust in fusion devices: Implications for safety and operational performance. *Fusion Eng. Des.* 63–64, 2002, 153–163.
- [17] J. Winter, G. Gebauer. Dust in magnetic confinement fusion devices and its impact on plasma operation. *J. Nucl. Mater.* 266–269, 1999, 228–233.
- [18] C. Boulmer-Leborgne, J. Hermann, B. Dubreuil. Plasma formation resulting from the interaction of a laser beam with a solid metal target in an ambient gas. *Plasma Sources Sci. T.* 2, 1993, 219–226.
- [19] S. M. Eggins, L. P. J. Kinsley, J. M. G. Shelley. Deposition and element fractionation processes during atmospheric pressure laser sampling for analysis by ICP-MS. *Appl. Surf. Sci.* 127–129, 1998, 278–286.
- [20] J. Butikova, A. Sarakovskis, I. Tale. Laser-induced ablation spectroscopy for deuterium detection in plasma facing components. International Baltic Sea Region Conference “Functional Materials and Nanotechnologies”, Book of Abstracts, April 1–4, 2008, Rīga, Latvia, p. 170.
- [21] J. N. Leboeuf, K. R. Chen, J. M. Donato, D. B. Geohegan, C. L. Liu, A. A. Puretzky, R. F. Wood. Dynamical Modelling of Laser Ablation Processes. *Appl. Surf. Sci.* 96–98, 1996, 14.
- [22] T. W. Silfvast. *Laser Fundamentals*. Cambridge University Press.
- [23] R. A. Multari, L. E. Foster, D. A. Cremers, M. J. Ferris. Effect of Sampling Geometry on Elemental Emissions in Laser-Induced Breakdown Spectroscopy. *Appl. Spectrosc.* 50, 1996, 1483–1499.
- [24] J. Butikova, A. Sarakovskis, I. Tale. Laser-induced plasma spectroscopy of plasma facing materials. 35th EPS Conference on Plasma Physics, Hersonissos, Greece, 9–13 June 2008, ECA, Vol. 32, P-2.011.
- [25] M. Jedynski, J. Hoffman, W. Mroz, Z. Szymanski. Plasma plume induced during ArF laser ablation of hydroxyapatite. *Appl. Surf. Sci.* 2008. DOI:10.1016/j.apusc.2008.07.070
- [26] T. Åkermark, B. Emmoth, H. Bergsäter. Laser annealing in combination with mass spectroscopy, a technique to study deuterium on tokamak carbon samples, a tool for detritiation. *J. Nucl. Mater.* 359, 2006, 220–226.
- [27] A. P. Joglekar, H. Liu, E. Meyho, G. Mourou, A. J. Hunt. Optics at critical intensity: Applications to nanomorphing. *PNAS* 16, Vol. 101, 2004, 5856–5861.
- [28] B. Polyakov, G. Marcins, M. Chubarov, A. Kuzmin, V. Klykov, I. Tale. Patterned Laser Crystallization of a-Si. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences* 3 (Vol. 46), 2009.
- [29] T. D. Bennett, D. J. Krajnovich, C. P. Grigoropoulos, P. Baumgart, A. C. Tam. Marangoni Mechanism in Pulsed Laser Texturing of Magnetic Hard Discs. *J. Heat Transf.* 119, 1997, 589–596.

Promocijas darba publikāciju saraksts

1. J. Butikova, A. Sarakovskis, B. Polyakov, I. Tale. Laser ablation for analysis of nanoscale layers. *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 93, 2007, p. 012043.
2. J. Butikova, A. Sarakovskis, I. Tale. Laser-induced breakdown spectroscopy for determining impurity content and depth profile in plasma facing materials. Submitted for publication in *Optics and Lasers in Engineering*.
3. J. Butikova, A. Sarakovskis, I. Tale. Laser-induced ablation spectroscopy for deuterium detection in plasma facing components. Submitted for publication in *Spectroscopy Letters*.
4. J. Butikova, A. Sarakovskis, I. Tale. Laser-induced plasma spectroscopy of plasma facing materials. 35th EPS Conference on Plasma Physics, Hersonissos, Greece, 9–13 June 2008, ECA, Vol. 32, P-2.011.
5. B. Polyakov, A. Petruhins, J. Butikova, A. Kuzmin, I. Tale. Some aspects of pulsed laser deposition of Si nanocrystalline films. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* 48, 2009, p. 20502.

Konferenču tēžu saraksts

1. J. Butikova, I. Tale. Laser Ablation Spectroscopy for Concentration of Impurity Elements. ISSP 21st Scientific Conference, Abstract Book, 2005, Rīga, Latvia.
2. J. Butikova, I. Tale. Laser Ablation Spectroscopy for Impurity Depth Profiling in Plasma. Book of Abstracts of the 7th International Summer School-Conference “Advanced Materials and Technologies”. Aug 2005, Palanga, Lithuania, p. 129. ISBN 9955-09-894-5
3. J. Butikova. Laser Ablation Spectroscopy for Impurity Depth Profiling and Concentration Imaging in Plasma. Internal seminar at the Department of Material Sciences, Max Planck Institute of Plasma Physics, October 2005, Garching, Germany.
4. J. Butikova. Rutherford backscattering measurements for laser induced breakdown spectroscopy standards. ISSP 22nd Scientific Conference, Abstract Book, 2006, Rīga, Latvia, p. 41.
5. J. Butikova. Laser Induced Breakdown Spectroscopy. Internal seminar at the Department of Material Sciences, Max Planck Institute of Plasma Physics, October 2006, Garching, Germany.
6. J. Butikova, A. Sharakovskiy, I. Tāle. Development of Equipment for Laser Ablation Spectroscopy. ISSP 23rd Scientific Conference, Abstract Book, 2007, p. 53, Rīga, Latvia.
7. J. Butikova, A. Sarakovskis, I. Tale. Laser Ablation Spectroscopy of Plasma-Facing Materials. Development in Optics and Communications 2007, Abstract Book, p. 15, Rīga, Latvia.
8. J. Butikova, A. Sarakovskis, B. Polyakov, I. Tale. Laser ablation for analysis of nanoscale layers. International Baltic Sea Region Conference “Functional Materials and Nanotechnologies”, April 2–4, 2007, Rīga, Latvia.
9. J. Butikova, A. Sarakovskis. Laser ablation spectroscopy for impurity depth profiling and concentration imaging in plasma. EFDA Workshop, October 2007, Rīga, Latvia.

10. J. Butikova, A. Sarakovskis, I. Tale. Laser-induced breakdown spectroscopy application for determining impurity content and depth profile in the plasma facing materials. Conference Proceedings of the 13th International Conference on Fusion Reactor Materials, December 10–14, 2007, Nice, France.
11. J. Butikova, A. Sarakovskis, I. Tale. Laser ablation spectroscopy of the first wall materials of *ASDEX Upgrade* tokamak. ISSP 24th Scientific Conference, February 2008, Rīga, Latvia.
12. J. Butikova, A. Sarakovskis, I. Tale. Laser-induced ablation spectroscopy for deuterium detection in plasma facing components. International Baltic Sea Region Conference “Functional Materials and Nanotechnologies”, April 1–4, 2008, Rīga, Latvia.
13. J. Butikova. Laser-induced breakdown spectroscopy of plasma facing materials. Invited lecture at the Faculty of Physics, Vilnius University, May 28th, 2008.
14. J. Butikova, A. Sarakovskis, I. Tale. Laser-induced ablation spectroscopy of plasma facing materials. 35th EPS Conference on Plasma Physics, June 9–13, 2008, Hersonisos, Greece.

Pateicība

Izsaku lielu pateicību promocijas darba vadītājam prof. Ivaram Tālem par vērtīgajām diskusijām un praktisku palīdzību. Liels paldies Anatolijam Šarakovskim, Borisam Poļakovam un Jānim Straumēnam, kuru ieguldījums ir minēts iepriekš. Paldies arī citiem Cietvielu fizikas institūta Optiskās spektroskopijas laboratorijas kolēģiem par diskusijām, tehnisko palīdzību un lielisko darba atmosfēru laboratorijā un ārpus tās.

Pētāmie paraugi tika iegūti Maksa Planka Plazmas fizikas institūta Materiālzinātnes nodaļā, pateicoties Dr. Karlam Krīgeram (*Dr. Karl Krieger*). Viņa palīdzība bija nenovērtējama arī darbā ar tandēma paātrinātāju.

Par ļoti svarīgu atbalstu promocijas darba praktiskai sagatavošanai autore vēlas pateikties Eiropas Sociālajam fondam un LU Fizikas un matemātikas fakultātei, kā arī Viļņas Universitātes Fizikas fakultātes Kvantu elektronikas nodaļai par piešķirto *Marie Curie Early Stage Training* stipendiju *ATLAS (Advanced Training in Laser Sciences)* projektam (MEST-CT-2004-008048).

