

Vilniaus universitetas
Fizikos fakultetas
Lazerinių tyrimų centras

Paulius Gaidimaukas
SELEKTYVUS GaN DANGOS ATKĖLIMAS NUO SAFYRO PADĖKLO ULTRATRUMPAISIAIS
ŠVIESOS IMPULSAIS

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Lazerinės technologijos
studijų programa

Studentas

Paulius Gaidimaukas

Leista ginti

2018-05-28

Darbo vadovas

doc. Domas Paipulas

Centro direktorius

prof. Roaldas Gadonas

Vilnius 2018

Turinys

Įvadas	2
Literatūros apžvalga	3
Galio nitridas	3
Galio nitrido šviestukai.....	4
Lazerinis atkėlimas	5
Pažeidimo slenksčio radimas pagal kraterių diametrus	7
Statistinis pažeidimo slenksčio radimas	8
Eksperto schema	10
Schemos elementai ir jų paskirtis	10
Eksperto eiga ir rezultatai	13
GaN abliacijos slenksčio radimas.....	14
GaN pažeidimo slenksčio sandūroje su safyru nustatymas	18
GaN dangos atkėlimas nuo safyro padėklo	21
Rezultatai ir išvados	24
Literatūros sąrašas	25

Įvadas

Galio nitridas (GaN) – kristalinė medžiaga, pasižyminti dideliu elektronų judriu, atsparumu aukštomis temperatūroms ir didelėms įtampoms. Šios priežastys leidžia gaminti mažesnius ir efektyvesnius elektronikos prietaisus [1].

Labai svarbi GaN panaudojimo sritis yra mėlyną šviesą spinduliuojančių šviestukų gamyba. Mėlyni šviestukai sudaro galimybę, kartu naudojant žalius ir raudonus šviestukus arba geltonai fosforencijuojančią medžiagą, susidaryti baltai šviesai. Tokia šviesa yra tinkama naudoti apšvietimo sistemose ir, dėl savo efektyvumo, ilgaamžiškumo ir mažos sunaudojamos galios, yra laikoma patraukliu pasirinkimau pakeisti dabartines fluorescencines ir gyvsidabrinės apšvietimo sistemas [2]. Pagrindinė problema yra GaN kaina, kurios didžiausią dalį sudaro gamybos kaštai. Priešingai nei silicio ar safyro atveju, dėl savo mažos suirimo temperatūros į metalinį galį ir azoto dujas, yra sunku užauginti didesnių matmenų GaN kristalus. Labiausiai paplitęs būdas panaudoti GaN elektronikoje ir optoelektronikoje yra plonų dangų užgarinimas molekulių pluoštu. Pagrindinės dvi medžiagos, kurios naudojamos kaip padėklai GaN sluoksniui, yra safyras ir silicio karbidas dėl gardelės ir šiluminio plėtimosi koeficientų suderinamumo [3].

Vienas iš pasiūlytų būdų, kaip pagerinti šviestukų kokybę, yra GaN sluoksnių perkėlimas nuo SiC/safyro padėklo ant geresnį šiluminį ir elektrinį laidumą turinčio silicio padėklo panaudojant lazerinį atkėlimą (*angl. LLO – laser lift-off*) [4-6]. Negana to, tokį galio nitrido sluoksnį būtų galima perkelti ant lanksčių plastikų, poliimido ar polietileno tereftalato dangų ir taip gauti lanksčius šviestukus [7]

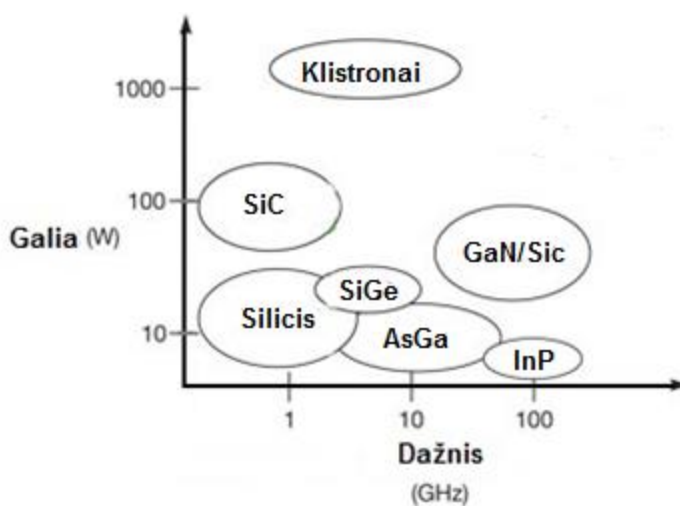
Šio darbo tikslas yra ištirti galio nitrido dangos atkėlimą nuo safyro padėklo. Pagrindiniai darbo tikslai:

- surasti galio nitrido pažeidimo slenkstį sandūroje su safyru
- pademonstruoti GaN dangos atkėlimą nuo safyro padėklo

Literatūros apžvalga

Galio nitridas

Silicis – medžiaga, kuri dėl savo paplitimo (ji sudaro apie 28% Žemės plutos masės) ir puslaidininkinių savybių yra elektronikos prietaisų lyderė. Iš šios medžiagos pagaminti tranzistoriai, saulės elementai, fotodiodai, integriniai grandynai ir t.t. [8] jau ilgą laiką yra vieni populiariausių lyginant su prietaisais, pagamintais iš kitų medžiagų. Tačiau didėjantis aukštas įtampas atlaikančių, galinčių dirbti aukštesniuose dažniuose ir mažesnių matmenų prietaisų poreikis verčia ieškoti medžiagų, galinčių pakeisti silicį. Pagrindinės dvi medžiagos, iš kurių pagaminti elektronikos prietaisai geba patenkinti šiuos didėjančius reikalavimus, yra galio nitridas (GaN) ir silicio karbidas (SiC). Šių puslaidininkinių didelis draustinės energijos juostos tarpas (GaN 3,3 eV ir SiC 3,23 eV) nulemia galimybę atlaikyti apie 10 kartų didesnę įtampą, nei iš silicio pagaminti prietaisai. Tai reiškia, kad, dirbant tokia pat įtampų diapazone, kaip ir silicis, galima naudoti iki 10 kartų plonesnius prietaisus. Tai sąlygoja didesnes persijungimo spartas ir mažesnius šiluminius nuostolius. Galio nitridas turi didesnę elektronų judrį, kuris atveria galimybes aukštų dažnių taikymuose [9]. Tuo tarpu silicio karbido gardelė pasižymi didesniu šiluminiu laidumu, tad ji naudojama didesnių temperatūrų ir įtampų taikymuose. Įvairių medžiagų prietaisų panaudojimas skirtingoms galioms ir dažniams pavaizduotas 1 pav.



1 pav. Medžiagų panaudojimas skirtingų dažnių ir galių poreikiams [9]

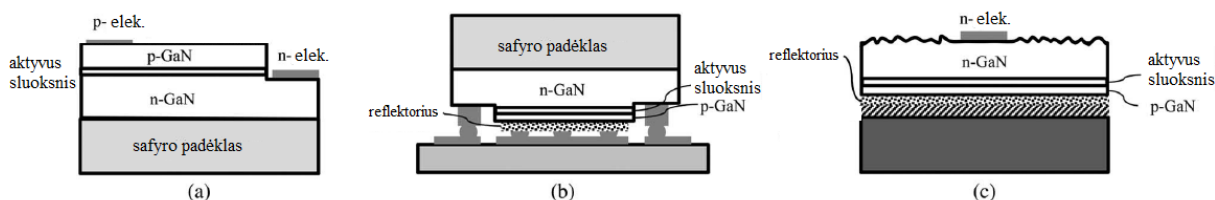
Galio nitrido šviestukai

Apšvietimas tapo neatsiejama mūsų gyvenimo dalis – JAV statistikos duomenimis, 2017 m. komercinio ir gyvenamojo sektorių apšvietimui buvo sunaudota apie 273 mlrd. kWh elektros energijos, kuri sudarė apie 7% visos sunaudotos elektros energijos JAV [10]. Taigi nenuostabu, jog pradėta ieškoti efektyvesnių šviesos šaltinių. Viena iš populiariausių alternatyvų kaitrinėms lempoms yra baltos spalvos šviestukai. Šviestukai pasižymi didesniu patvarumu, yra efektyvesni, mažesni už kaitrines lempas. Nors baltų šviestukų kaina yra apie 5 kartus didesnė nei kaitrinių lempučių, tačiau jie pasižymi žymiai didesniu ilgaamžiškumu (LED ilgaamžiškumas ~25000 val., kaitrinių lempučių ~1000 val.) [11]. Pagrindinis komponentas, norint gauti baltos šviesos šviestuką, yra mėlynos spalvos šviestukas. Paprastas ir palyginti pigus būdas gauti baltos spalvos apšvietimą yra mėlynos spalvos šviestuku sužadinti geltonai fosforescencijuojančią medžiagą (populiariausia medžiaga – itrio aliuminio granatas su ceriso priemaišomis [12]). Kitas būdas gauti baltos šviesos apšvietimą yra naudoti trijų spalvų – raudonos, žalios ir mėlynos (sutrumpinimas RGB) šviestukus, o atskirai keičiant jų šviesumą galima gauti dinaminį spalvų keitimą, panaudojamą telefonų ekranuose, monitoriuose ir t.t. Taigi, pagrindinis komponentas, norint turėti baltos spalvos apšvietimą, yra mėlynos spalvos šviestukas. Pirmasis mėlynos spalvos GaN LED pagamintas 1993m., o šio išradimo svarbą parodo ir tai, jog 2014 m. šis išradimas įvertintas Nobelio premija [13].

Mėlyni galio nitrido šviestukai yra skirstomi į pirmos ir antros kartos šviestukus [14]. Pirmosios kartos šviestukuose GaN sluoksniai yra užauginami ir nusodinami ant kitokios medžiagos padėklo, o antrosios kartos šviestuko GaN sluoksnių pagrindas yra galio nitrido kristalas. Paprastai antrosios kartos šviestukai yra efektyvesni, tačiau kyla problemų norint užauginti pakankamo dydžio GaN kristalą. Kadangi disociacijos slėgis kristalo lydymosi temperatūroje (~2200 °C) yra labai didelis (~6 GPa), galio nitridas tokiam slėgyje ne auga, o disocijuoja [15], todėl standartiniai (Čochralskio, Bridžmano) kristalo auginimo metodai netinka. Yra atrasti kiti būdai užauginti tokius kristalus (pvz. epitaksija iš hidrido garų fazės, sutrumpinimas *HVPE*), visgi šiuo metu komerciniam naudojimui tokie kristalai yra per brangūs. Šiuo metu 2 colių diametro galio nitrido plokštelę galima nusipirkti už ~2000\$ [16]. Labiau paplitę yra pirmosios kartos šviestukai, kadangi tokių šviestukų pagrindai yra iš prieinamesnių medžiagų, kurių gardelės konstanta ir šiluminis plėtimosi koeficientas yra panašūs į galio nitrido kristalo. Tokios medžiagos – tai safyras (gardelės konstantų skirtumas 14%, šiluminio plėtimosi koeficiento skirtumas 25%, 2 colių plokštelės kaina ~50\$[17]) ir mažiau naudojamas silicio karbidas (atitinkamai 4%, 25% ir ~400\$[10]). Dėl šių parametų neatitikimo sandūroje tarp GaN ir padėklo susidaro didesnis skaičius defektų, kurie lemia prastesnius šviestuko parametrus, pvz. šviesos ištrauka (pirmosios kartos LED siekia

75%, o antrosios kartos LED 85%), spinduliuojamos šviesos intensyvumas (antrosios kartos LED yra apie 10 kartų didesnis nei pirmos kartos ir siekia 1000 W/cm^2).

Nepaisant prastesnių rezultatų, komerciškai labiau paplitę yra pirmosios kartos šviestukai. Nėgana to, per pastaruosius porą dešimtmečių buvo išbandyta ne viena LED konstrukcija siekiant pagerinti jų parametrus. 2 pav. pavaizduoti įvairių konstrukcijų šviestukai.



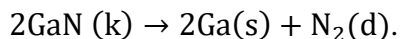
2 pav. Mėlynųjų GaN šviestukų konstrukcijos kitimas bėgant laikui: a) klasikinis, b) apverstas (flip-chip), c) vertikalusis plonų sluoksnių (VTF), d) struktūrizuoto safyro padėklas, e) GaN padėklas (antros kartos LED) [11].

2 pav. a) pavaizduota pirmojo mėlyno LED konstrukcija, vadinama klasikine (CC, *angl. conventional chip*). Tokį LED sudarė p-GaN/n-InGaN/n-GaN sluoksniai ant safyro padėklo. Tokios konstrukcijos problema yra ta, jog krūvininkai pasiskirsto netolygiai, didesnė krūvininkų tankis yra prie p-elektrodo, kuris sugeria didelę išeinančios spinduliuotės dalį [18]. Ši konstrukcija buvo pagerinta apvertus LED (FC, *angl. flip-chip*), kad spinduliuotė išeitų pro safyro padėklą, o sugeriantis kontaktas buvo pakeistas storu ir atspindinčiu kontaktu (2 pav. b)). Nors susitvarkyta su sugeriančio kontakto problema, atsiranda kita problema – safyro lūžio rodiklis yra mažesnis nei GaN, todėl susidaro galimybė atsirasti visiškam vidaus atspindžiui. Tuomet kilo idėja safyro padėklą atkelti, tuo pačiu sušiuurkštinant n-GaN sluoksnį ir taip sumažinant visiškojo vidaus atspindžio tikimybę, šviestuką perkeliant ant geresnį šiluminį laidumą turinčios medžiagos (2 pav. c). Tokia konstrukcija (vertikalioji plonųjų sluoksnių, *angl. trumpinys VTF*) pasiekė 75% šviesos ištrauką [19].

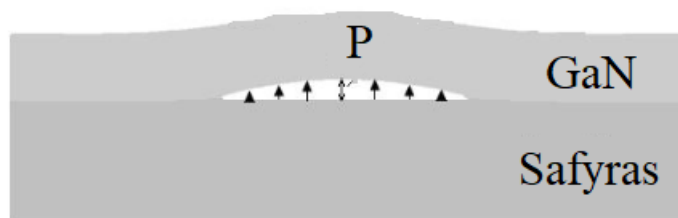
Lazerinis atkėlimas

Kaip minėta anksčiau, vienas iš būdų pagerinti mėlynos šviesos LED efektyvumą yra to LED atkėlimas nuo padėklo, ant kurio jis buvo užaugintas (paprastai safyro), ir perdėjimas ant kitos medžiagos, turinčios geresnį šiluminį laidumą (paprastai silicis ir varis) padėklo. Vienas iš atkėlimo būdų yra pasinaudoti lazerine spinduliuote. Šio proceso metu yra parenkamas toks lazerinės spinduliuotės

bangos ilgis, kuriam safyras yra pralaidus, tačiau kurį galio nitridas sugeria. Tokiu atveju lazerinė spinduliuotė nepaveikia padėklo, tačiau yra sugerama sandūroje tarp galio nitrido ir safyro. Esant pakankamai lazerinės spinduliuotės energijai, sąveikos zonoje GaN sušyla iki temperatūros, pakankamos savaiminiam suskilimui [20]:



Galio nitridas suskyla į metalinius galio lašelius ir azoto dujas ir sandūroje susidaro tarpelis, atkeliantis ir atskiriantis galio nitridą su safyro padėklu (3 pav.). Galio kambario temperatūroje sukietėja, todėl norint atskirti safyro padėklą reikia pakaitinti galį iki jo lydymosi temperatūros, t.y. 29 °C.



3 pav. Lazerinio atkėlimo metu susidarantis oro tarpelis, P raide pažymėtas slėgis.

Pagrindinis privalumas, naudojant lazerinę spinduliuotę atkeliant galio nitridą, yra greitis. Galio nitridą užtenka paveikti vienu impulsu, kad vyktų atkėlimas, tad galima pasiekti didelius skenavimo greičius, kurie yra labai svarbūs pramonėje. Kitas privalumas yra tai, kad spinduliuotės sugertis yra selektyvi, todėl lazerinė spinduliuotė nepažeidžia jokių kitų dalių. Tuo tarpu kaip lazerinio atkėlimo trūkumus būtų galima paminėti tai, jog reikia griežtai kontroliuoti parametrus, kadangi parinkus ne tokius parametrus išauga galimybė sugadinti galio nitrido dangą.

Kalbant apie lazerinį atkėlimą, reikia nustatyti, kokie lazerinės spinduliuotės parametrai yra svarbūs kokybiškam atkėlimui. *Ji-Hao Cheng su kolegomis* nustatė, kad didelę įtaką atkelto šviestuko kokybei turi naudojamas spinduliuotės bangos ilgis [21]. Naudojant didesnio bangos ilgio spinduliuotę, jos sugerties koeficientas mažėja, dėl ko spinduliuotė gali įsiskverbti gyčiau į galio nitrido sluoksnį ir pažeisti didesnę dalį šviestuko sudarant dislokacijas. Kitas svarbus parametras yra lazerinės spinduliuotės impulso trukmė – mažėjant impulso trukmei energijos slenksčio, reikalingo suskaidyti GaN, vertė taip pat mažėja [22]. Negana to, mažesnės trukmės impulsai įkaitina mažesni paviršiaus plotą, o šiluma išsisklaido per trumpesni laiką nei naudojant ilgesnės trukmės impulsus. Didesnė temperatūra medžiagoje sukelia dvi pasekmes – padidina defektų skaičių ir azoto dujų, atsirandančių disocijuojant

galio nitridui, slėgį. Esant pakankamam azoto dujų slėgiui gali susidaryti smūginės bangos, galinčios pažeisti kristalinę gardelę ir sukelti dar daugiau dislokacijų. Tame pačiame darbe pastebėta, jog naudojant mažesnės trukmės impulsus reikia labiau kontroliuoti spinduliuotės energijos tankį. Atkėlimui galioja sąryšis:

$$T \propto I/\sqrt{t},$$

kur T – temperatūra, I – šviesos intensyvumas, t – impulso trukmė. Iš šio sąryšio matyti, jog naudojant trumpesnius impulsus reikia mažesnio spinduliuotės intensyvumo norint pasiekti tą pačią temperatūrą, negu naudojant ilgesnius impulsus. Iš to išeina, kad galio nitridas, naudojant trumpesnius impulsus, yra jautresnis energijos svyravimams, tad reikia užtikrinti lazerinės spinduliuotės energijos stabilumą.

Pažeidimo slenksčio radimas pagal kraterių diametrus

Norint, kad medžiagoje įvyktų pokyčiai, reikia, kad ta medžiaga absorbuotų tam tikrą fotonų kiekį tūrio vienetu, kuris viršytų ribinę vertę – slenkstį. Įskaičius visą galimą lazerinės spinduliuotės sugertį, spinduliuotės energijos įtėkis paviršiuje turi pasiekti tam tikrą ribą, vadinamą slenkstiniu energijos įtėkiu F_{sl} . Šis slenkstinis įtėkis priklauso nuo lazerinės spinduliuotės parametrų (bangos ilgis λ , lemiantis sugerties koeficientą, impulsų trukmė τ , lemiantis sugerties mechanizmus, impulsų pasikartojimo dažnis (akumuliaciniai ir terminiai efektai)) ir nuo medžiagos savybių. Abliacijos slenkstis taip pat priklauso ir nuo impulsų skaičiaus, pataikančių į tą pačią vietą. Nors pavienis impulsas gali ir neviršyti abliacijos slenksčio vertės, tačiau tokie impulsai gali sukelti struktūrinius ir cheminius pokyčius, kurie sumažina medžiagos abliacijos slenkstį [23]. Akumuliacijos modelis aprašo abliacijos slenksčio kitimą nuo impulsų skaičiaus ir išreiškiamas tokia formule:

$$F_{sl}(N) = F_{sl}(1)N^{\xi-1},$$

kur $0 < \xi \leq 1$ yra akumuliacijos koeficientas, aprašantys defektų inkubaciją. Kai $\xi = 1$, inkubacijos nėra ir abliacijos slenkstis nepriklauso nuo impulsų skaičiaus.

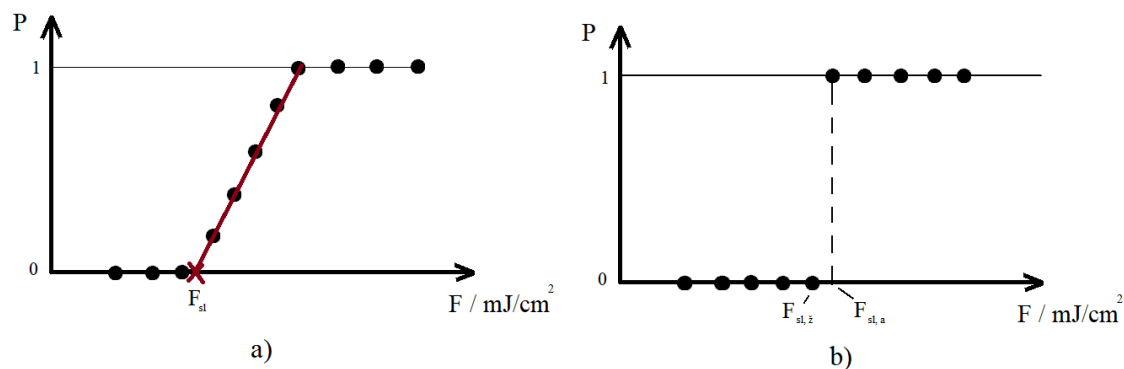
Eksperimentiškai abliacijos slenksčio vertę galima nustatyti iš jo sąryšio su lazerio spinduliuote išabliuoto kraterio diametru D [24]:

$$D^2 = 2\omega_0^2 \ln\left(\frac{F_0}{F_{sl}}\right),$$

čia ω_0 - pluošto radiusas $1/e^2$ lygyje. Kadangi įvairios energijos impulsai išabliuoja skirtingo diametro kraterius, tai slenkstinę energijos įtekio vertę galima surasti išmatavus tų kraterių diametrus optiniu mikroskopu ar adatiniu profilometru ir atidėjus priklausomybę $D^2(\ln(F_0))$, kur F_0 yra energijos įtekis pluošto sąsmaukoje. Atidėta priklausomybė yra ekstrapoliuojama tiese iki $D^2 = 0$ ir yra gaunama abliacijos slenkstinė energijos įtekio vertė.

Statistinis pažeidimo slenkščio radimas

Šis metodas dažniausiai yra naudojamas lazerinės pažeidimo matavimuose (sutrumpinimas LIDT – angl. *Laser Induced Damage Threshold*) su ilgesnės trukmės lazeriniais impulsais (dažniausiai nanosekundžių eilės). Dirbant su ultratrumpaisiais impulsais, dėl vykstančių netiesinių reiškinių, tokių kaip daugiafotonė sugertis ir tunelinė jonizacija, pažeidimo procesas yra labiau deterministinis, nei naudojant ilgesnės trukmės lazerinius impulsus [25]. Pažeidimo slenkščio radimas remiasi statistiniu eksperimentu – su vienodu lazerinės spinduliuotės energijos įtekio tam tikras skaičius bandinio vietų (dažniausiai 10) ir yra stebima, ar su tokiu energijos įtekio medžiaga buvo pažeista, išabliuota [26]. Tokio metodo privalumas yra tai, kad nereikia nieko matuoti (pvz. išabliuoto kraterio diametro, išabliuotos medžiagos tūrio), o užtenka tik surinkti informaciją, ar yra pažeidimas. Taip yra pašalinamos paklaidos, atsirandančios dėl matuojančios įrangos jautrumo ir tikslumo, matuojančio operatoriaus klaidos.

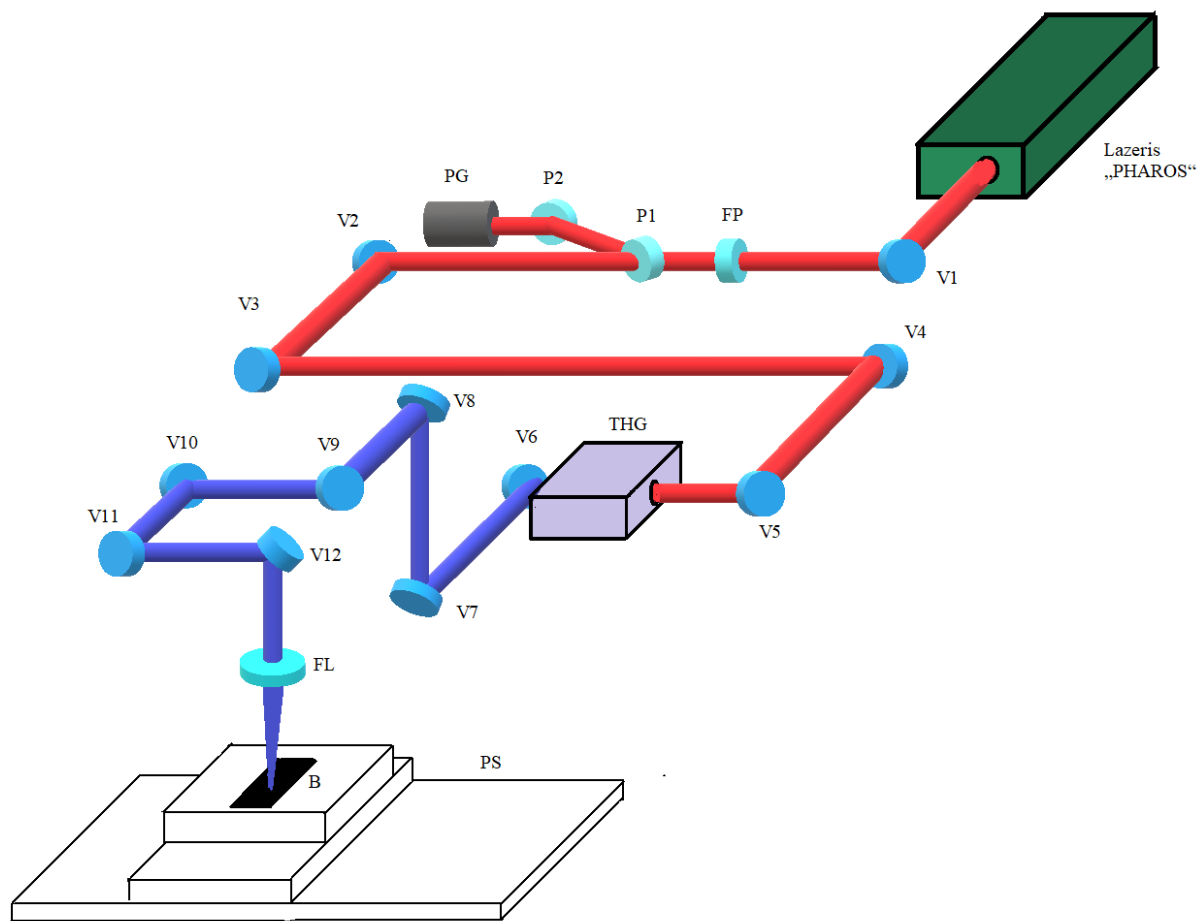


4 pav. Medžiagų panaudojimas skirtingų dažnių ir galių poreikiams

Pažeidimo slenkstis nustatomas, atidedant priklausomybę $P(F)$, kur P – lazerinės pažeidimo tikimybė, lygi vietų, kuriose matosi pažeidimas, ir iš viso su ta pačia energijos įtekio verte eksponuotų vietų skaičiaus santykis, F – lazerinės spinduliuotės energijos įtekis. Atidėjus šią priklausomybę,

ekstropolijuojant tiesę iki $P = 0$ randama pažaidos energijos įtekio slenkstinė vertė F_{sl} (4 pav a). Vyraujant deterministiniui pasiskirstymui (4 pav b), perėjimo plotis tarp $F_{sl,z}$ (maksimali energijos įtekio vertė, su kuria pažeidimo tikimybė 0 %) ir $F_{sl,a}$ (minimali energijos įtekio vertė, su kuria pažeidimo tikimybė 100 %) yra labai maža. Tokiu atveju yra labai staigus perėjimas nuo $P = 0\%$ iki $P = 100\%$ ir slenkstinė energijos įtekio vertė randama paimant šių dviejų energijos įtekio verčių vidurkį.

Eksperimento schema



5 pav. Eksperimente naudota sistema, kurią sudaro: Lazeris „PHAROS“ – lazerinės spinduliuotės šaltinis; FP - $\lambda/2$ fazinė plokštelė; V1-V12 – veidrodžiai, atspindintys lazerio spinduliuotę; P1-P2 – poliarizatorių pora; PG – pluošto gaudyklė; THG – trečios harmonikos generatorius; FL – fabrikavimui naudotas lęšis; PS - „Aerotech“ motorizuoti X ir Y krypčių pozicionavimo stalai; B - bandinys.

Schemos elementai ir jų paskirtis

- MGF Šviesos Konversijos „PHAROS“ lazeris – lazerinės spinduliuotės šaltinis. Lazeris naudojamas kartu su trečios harmonikos generatoriumi („Hiro“, MGF Šviesos Konversija). Naudojamos lazerinės spinduliuotės centrinis bangos ilgis $\lambda = 343$ nm, impulso trukmė 300 fs .

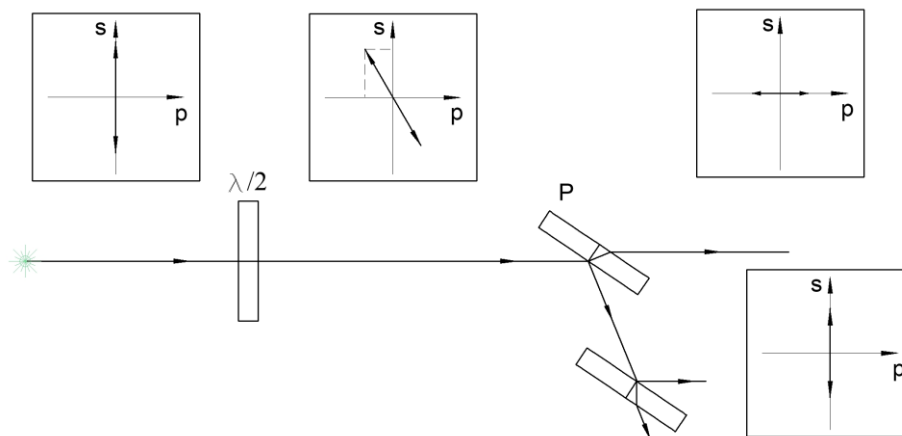


6 pav. Eksperimente naudotas „Pharos“ lazeris ir trečios harmonikos generatorius „Hiro“.

- Motorizuotas $\lambda/2$ fazinės plokštelės sukiklis ir dviejų Briusterio kampo tipo plonasluoksnių poliarizatorių rinkinys $\lambda = 1030$ nm bangos ilgio lazerinei spinduliuotei.

Rinkinys yra skirtas lazerinės spinduliuotės intensyvumo valdymui. Pasinaudojant tuo, kad iš lazerio ateinančios spinduliuotės poliarizacija yra tiesinė, galia reguliuojama tokiu būdu (7 pav.):

- 1) Pasukus $\lambda/2$ fazinę plokštelę, spinduliuotės poliarizacija pasisuka išeinančios iš lazerio spinduliuotės poliarizacijos atžvilgiu.
- 2) Dėl šio pasisukimo s- ir p- poliarizacijos dedamosios pakinta, išlaikydamos tą pačią amplitudės vertę.
- 3) Spinduliuotė pasiekia Briusterio kampu pastatytą poliarizatorių P, kuris atspindi s-poliarizacijos dedamąją, o praleidžia p-poliarizacijos dedamąją.
- 4) Dėl šio dedamųjų išskyrimo lazerio spinduliuotės intensyvumas sumažėja.
- 5) Lazerio spindulys pasiekia antrą poliarizatorių, dėl patogesnio spindulio atvedimo į pluošto gaudyklę



7 pav. Eksperimente naudojamo lazerinės spinduliuotės intensyvumo reguliavimo schema.

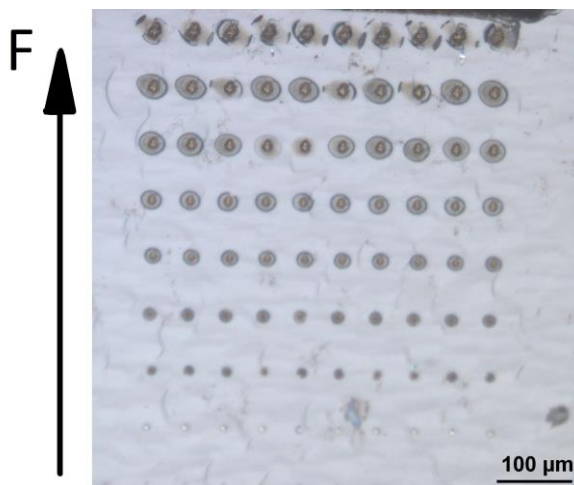
- Veidrodžiai V1-V5, padengti dielektrine danga, atspindintys $\lambda = 1030$ nm lazerinę spinduliuotę ir veidrodžiai V6-V12, atspindintys $\lambda = 343$ nm bango ilgio spinduliuotę. Šių veidrodžių paskirtis yra nuvesti lazerinę spinduliuotę į bandinį.
- Fokusuojantis lęšis FL - $f = +100$ mm židinio nuotolio lęšis.
- „Aerotech“ XY motorizuotas linijinis stalas, skirtas judinti bandinį eksperimentų metu. Ant šių linijinių stalų yra vakuuminis prisiurbėjas, kuris neleidžia bandiniui judėti ir išlaiko jį fiksuotoje pozicijoje. Apdirbimo procesas yra automatizuotas „Altechnos“ sukurta „SCA“ programa.
- Bandinys B - 4 μ m storio galio nitrido sluoksnis ant 400 μ m storio safyro padėklo.

Eksperimento eiga ir rezultatai

Darbe naudojami ultratrumpieji impulsai norint patyrinėti jų įtaką lazeriniam atkėlimui. Dauguma lazerinio atkėlimo darbų yra atliekami eksimeriniais nanosekundžių impulsų trukmės lazeriais, tačiau yra pagrindo manyti, jog ultratrumpųjų impulsų mažesnė šiluminio poveikio zona galėtų pagerinti atkeltos dangos kokybę.

Pirmoji šio darbo užduotis buvo surasti energijos įtekio vertę, su kuria pradeda vykti GaN dangos abliacija. Šio slenksčio radimas yra svarbus norint įvertinti energijos intervalą, kuriame gali vykti dangos nuėmimas – naudojant per mažą lazerinės spinduliuotės energiją, abliacija paprasčiausiai nevyks, tuo tarpu naudojant per didelę energiją, GaN danga gali prikepti prie safyro padėklo. Slenksčio vertė buvo nustatoma dvejais metodais – abliacijos slenksčio nustatymu matuojant išabliuotų vietų diametrus ir LIDT matavimas s-į-1 būdu.

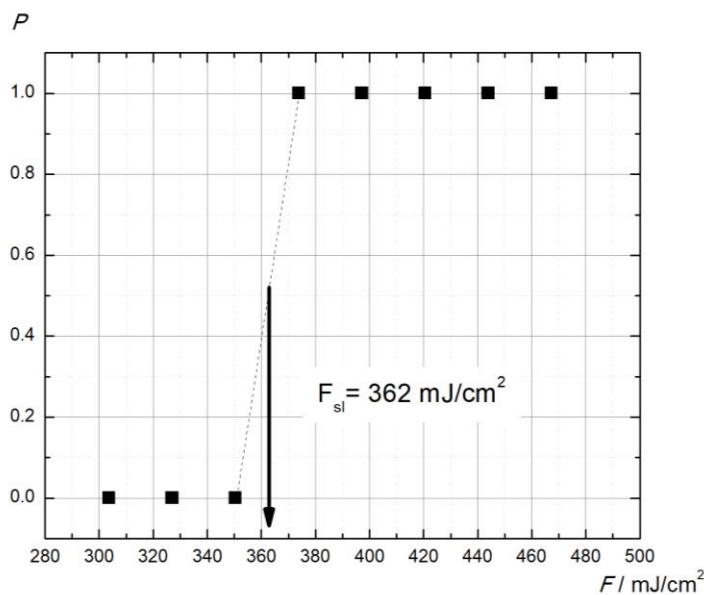
Eksperimento metu GaN dangos gabalėlis buvo sudalintas į matricą, kurios eilutėse buvo daromi 10 pažeidimų vienodomis sąlygomis, o stulpeliuose buvo keičiama lazerinės spinduliuotės energija (8 pav.). Ši matrica sudaro pagrindą s-į-1 matavimui. Iš kiekvienos eilutės buvo paimta po vieną tašką, išmatuotas pažeidimo diametras ir, pagal išmatuotas vertes, paskaičiuotas abliacijos slenkstis. Toks eksperimentas buvo kartojamas keičiant tą pačią vietą veikiančių impulsų skaičių ($n = 1, 10, 100, 1000$). Palyginimui eksperimentas kartotas GaN sluoksnį veikiant sandūroje GaN-oras ir GaN-safyro padėklas.



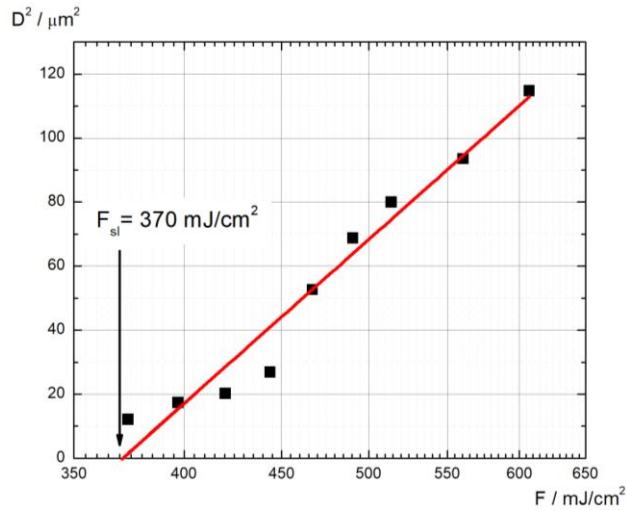
8 pav. Eksperimento matrica: eilutėje padaryti 10 pažeidimų vienodomis sąlygomis, stulpeliuose keičiama energijos įtekio vertė

GaN abliacijos slenksčio nustatymas

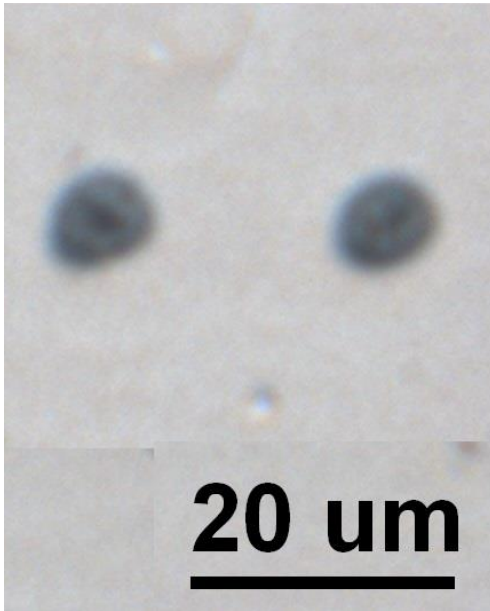
Norint patikrinti, ar sistema teisingai paruošta, pirmiausiai buvo atliekami galio nitrido dangos abliacijos slenksčio matavimai ir jie buvo palyginami su publikuotais rezultatais [27]. Sudalinus dangos dalį į matricą, mažinant lazerio spinduliuotės galią buvo daroma po 10 šūvių kiekvienai galiai (8 pav.). Bandant įvertinti abliacijos slenkstį s-į-1 metodu, pastebėta diskretinė abliacijos slenksčio priklausomybė. Naudojant ultratrumpuosius impulsus, kurių energija yra mažesnė už abliacijos slenkstį, ir didinant energiją iki slenkstinės vertės, visose 10 vietų pastebimas pažeidimas (9 pav). Kitaip sakant, tikimybė, jog lazerinė spinduliuotė sukels pažeidimą medžiagoje naudojant ultratrumpuosius impulsus, yra lygi 0 (nėra pažeidimo nei vienoje iš 10 zonų) arba 1 (visose 10 zonų matomi pažeidimai). Dėl šios tendencijos, abliacijos slenksčio vertė buvo nustatoma paimant vidurkį tarp energijos įtėkio verčių, kuriose pastebimas pažeidimo tikimybės kitimas nuo 0% iki 100% (aritmetinis vidurkis didžiausio energijos įtėkio, kuriuo paveikus medžiagą nėra stebimas medžiagos pažeidimas, ir mažiausio energijos įtėkio, kuriuo paveikus medžiagą yra matomas pažeidimas).



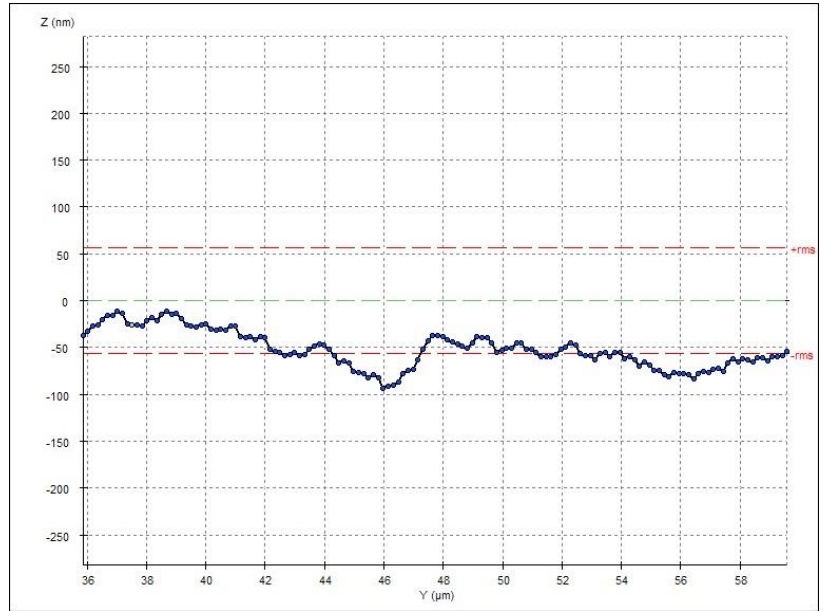
9 pav. GaN abliacijos slenksčio nustatymas s-į-1 metodu; tikimybės padaryti pažeidimą priklausomybė nuo energijos įtėkio. Abliacijos slenkstis randamas paimant vidurkį dviejų verčių, kuriose yra tikimybės pokytis iš 0 į 1. Pavyzdyje – n=1 impuls abliacijos slenkstis.



a)



b)

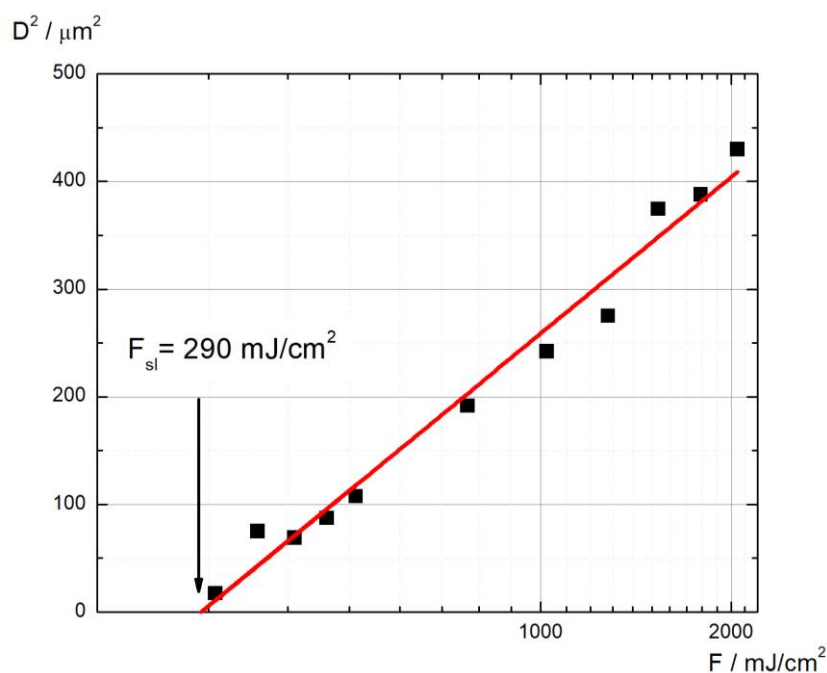


c)

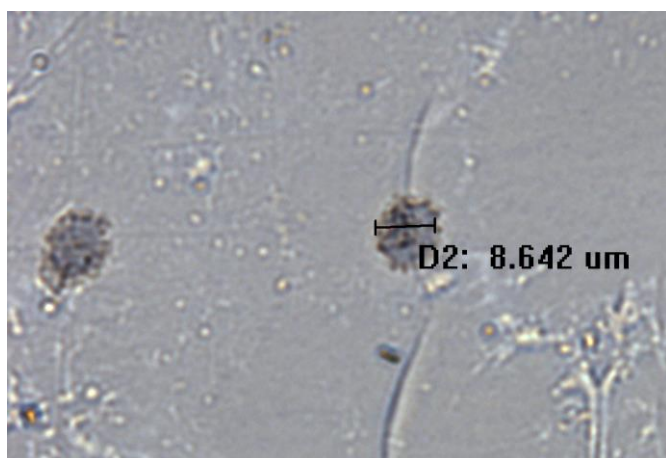
10 pav. GaN abliacijos slenksčio nustatymas vienu impulsu. Abliacijos slenksčio radimas paskaičiavus pažeidimų diametrus (a); pažeidimų, padarytų su energijos įtėkiu $F = 450 \text{ mJ/cm}^2$, nuotrauka mikroskopu (b); to pačio pažeidimo profilis (c)

Impulsų skaičius $n = 1$ – pažeidimo slenkstis $F_{sl} = 370 \text{ mJ/cm}^2$. Lyginant su M. Ščiukos ir kolegų atliktu eksperimentu [27] rezultatas sutampa (400 mJ/cm^2). 10 pav. a) pavaizduoti eksperimento rezultatai, kurie buvo ekstrapolijuojami tiesė iki $D^2 = 0$. Pažiūrėjus į rezultatus gali susidaryti įspūdis, kad galima būtų aproksimuoti dvejomis skirtingo polinkio kampo tiesėmis – viena prie žemesnių energijos įtėkio verčių, kita prie didesnių šio dydžio verčių, tačiau padaryta prielaida, kad eksperimentuojant su vienu impulsu, gautos paklaidos turėtų būti didesnės. Priešingai nei daugelio

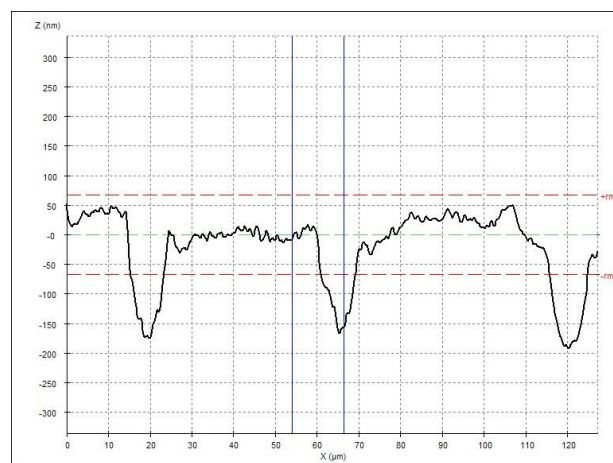
impulsų atveju, kuomet daugelio impulsų įtaka gali būti suvidurkinta, vieno impulso režime rezultatai yra smarkiai įtakojami įvairių reiškinų, pavyzdžiui lazerio stabilumo ir panašiai. Dirbant šiuo režimu pastebėta, kad pažeidimo vietose matosi metalinis galis (10 pav b). Šiame režime yra nuabliuojama nedidelė galio nitrido sluoksnio dalis - naudojant energijos įtėkį, artimą slenkstinei vertei, lazerinė spinduliuotė pašalina ~50 nm storio sluoksnį (10 pav. c). Metalizuotas galis parodo, kad GaN sėkmingai suiro toje vietoje, kur buvo paveiktas lazerine spinduliuote.



a)



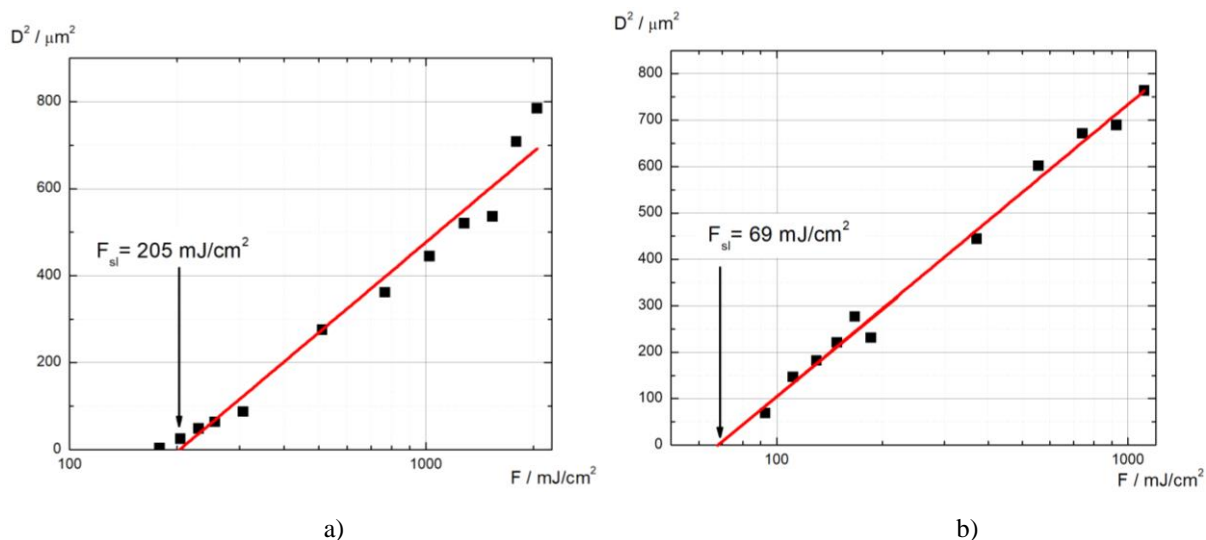
b)



c)

11 pav. GaN abliacijos slenkščio nustatymas, kai impulsų skaičius $n=10$. Abliacijos slenkščio radimas paskaičiavus pažeidimų diametrus (a); pažeidimų, padarytų su energijos įtėkiu $F = 350 \text{ mJ/cm}^2$, nuotrauka mikroskopu (b), pažeidimų profilis (c)

Impulsų skaičius $n = 10$ - abliacijos slenkstis $F_{sl} = 290 \text{ mJ/cm}^2$ (11 pav. a). Didinant impulsų, pataikančių į tą pačią vietą, skaičiui yra stebimas abliacijos slenkščio mažėjimas, keičiasi pažeidimų profilis (11 pav c). Slenkstinio energijos įtėkio mažėjimą galima paaiškinti tuo, kad kiekvienas ateinantis lazerinės spinduliuotės impulsas sukelia struktūrinius ir cheminius pokyčius medžiagoje, paveiktoje zonoje atsiranda daugiau defektų, kurie lemia geresnę spinduliuotės sugertį [2]. Šiame režime pažeidimų gylio ir jo diametro santykis yra didesnis nei veikiant vienu impulsu. Parinkus energijos įtėkį, artimą abliacijos slenkščiui ($F = 350 \text{ mJ/cm}^2$), gauname $\sim 150 \text{ nm}$ gylio pažeidimus. Tai būtų galima paaiškinti tuo, kad kiekvienas impulsas, kurio energijos pakanka medžiagos abliacijai, pašalina dalį medžiagos.

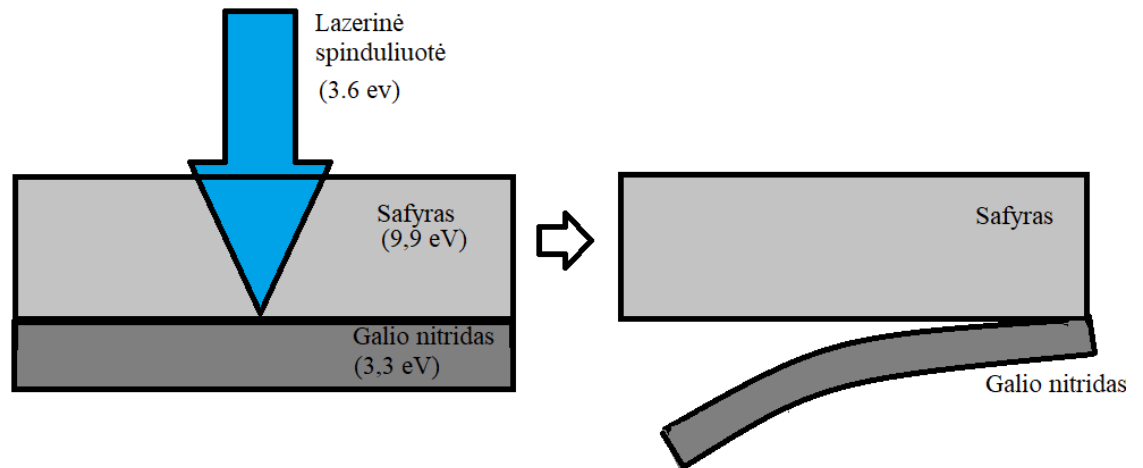


12 pav. GaN abliacijos slenkščio nustatymas; abliacijos slenkščio radimas paskaičiavus pažeidimų diametrus, kai impulsų skaičius $n=100$ (a) ir $n=1000$ (b).

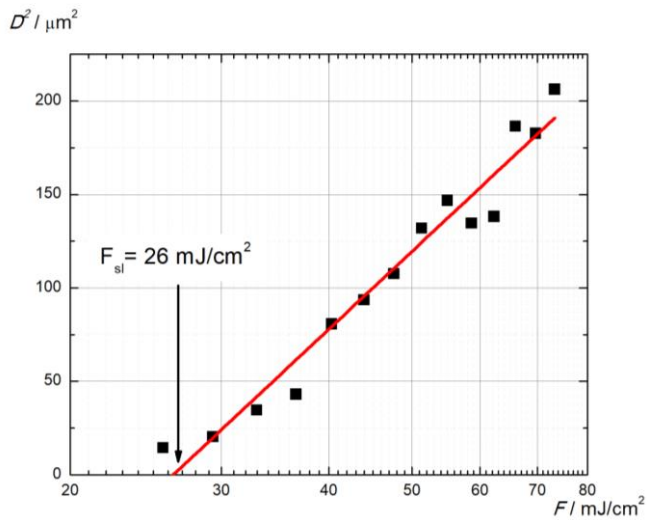
Impulsų skaičius $n = 100$ - pažeidimo slenkstis $F_{sl} = 205 \text{ mJ/cm}^2$, $n = 1000$ - pažeidimo slenkstis $F_{sl} = 69 \text{ mJ/cm}^2$. Palyginus su M. Ščiukos ir kolegų gautais rezultatais naudojant 1000 impulsų režimą, abliacijos slenkščio vertė yra ganėtinai panaši ($\sim 60 \text{ mJ/cm}^2$) [22]. Didinant tą pačią vietą veikiamų impulsų skaičiui, tendencijos išlieka tokios pačios – abliacijos slenkščio dėl akumuliacinių reiškinių ir toliau mažėja. Kadangi kiekvienas impulsas pašalina kažkokį kiekį medžiagos, tai esant tai pačiai energijai ir padidinus impulsų skaičių gaunamos didesnio gylio duobutės – 100 impulsų į vieną vietą režime jau pašalinamas visas $4 \mu\text{m}$ storio GaN sluoksnis.

GaN pažeidimo slenksčio sandūroje su safyru nustatymas

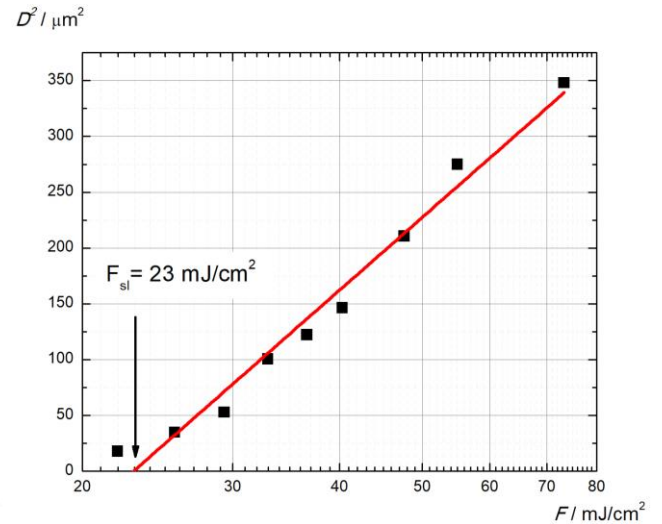
Toliau eksperimentai buvo atliekami bandinį apsukus taip, kad lazerinė spinduliuotė pasiektų GaN dangą pro safyro padėklą, kadangi tik tokiu būdu bus sėkmingai atskiriama danga nuo safyro padėklo (13 pav). Lazerinės spinduliuotės energijos įtėkis yra per mažas, kad safyras sąveikautų su lazerine spinduliuote. Praėjusi pro safyrą, lazerinė spinduliuotė pasiekia safyro ir galio nitrido sandūrą, kurioje galio nitridas sugeria ir taip sąveikauja su spinduliuote. Mažam galio nitrido sluoksniui atsiskyrus nuo dangos pasidaro galimas dangos atkėlimas – danga yra atskiriama nuo safyro ir perdedama ant kito padėklo. Šio etapo metu buvo ieškomos energijos slenksčių ribos, kuriose įvyksta dangos pažeidimas ir potencialiai yra galimas visos dangos atkėlimo procesas. Pažeidimo slenkstis ieškotas su keturiais skirtingais impulsų, pataikančių į tą pačią vietą, skaičiais ($n = 1, 10, 100, 1000$).



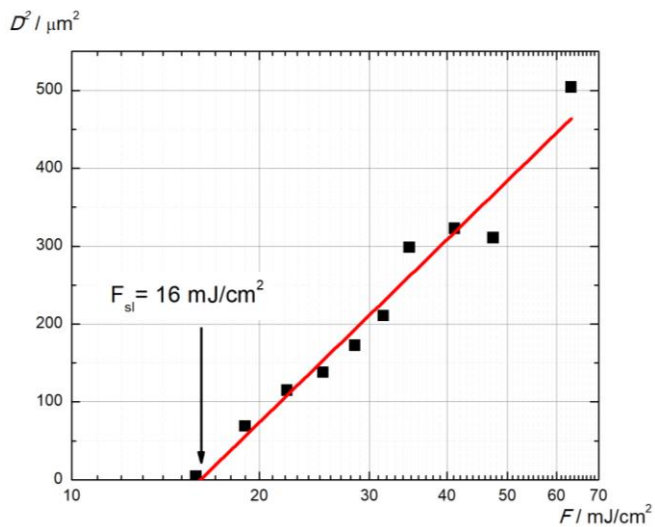
13 pav. GaN pažeidimo slenksčio sandūroje su safyru schema



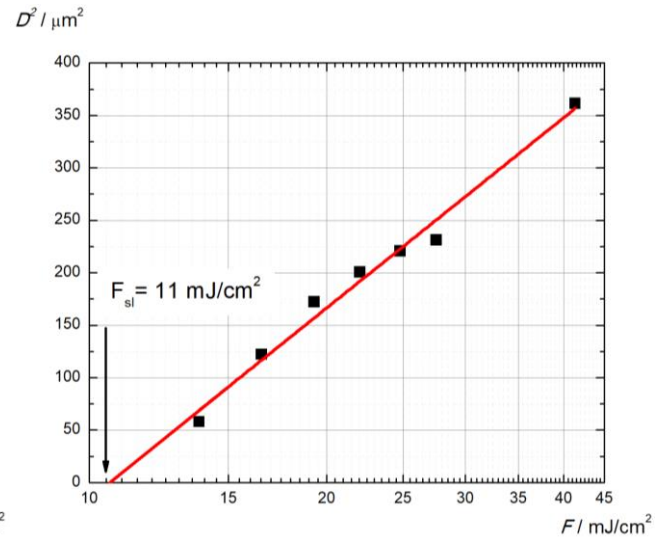
a)



b)



c)



d)

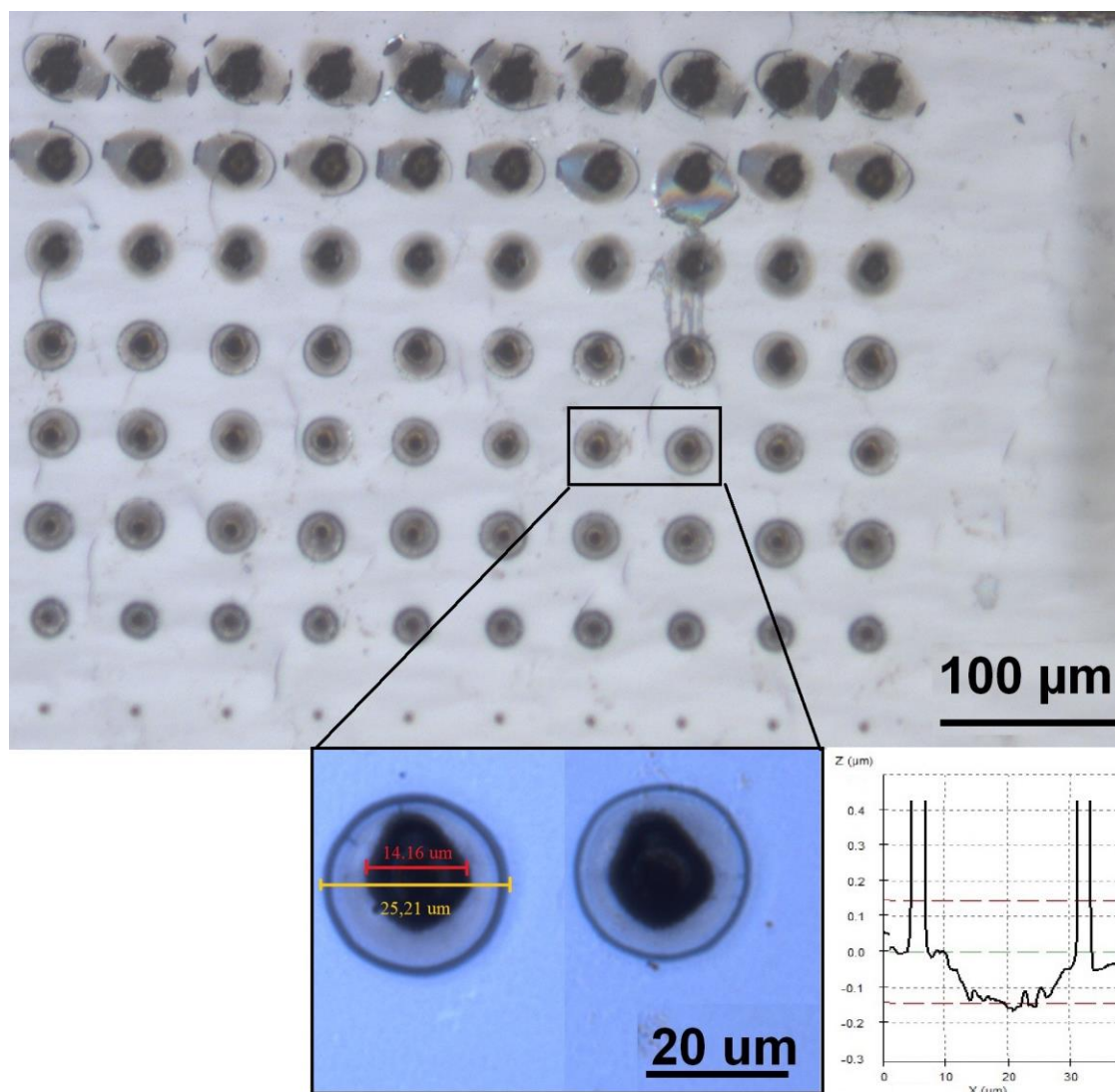
14 pav. GaN pažeidimo pro safyro padėklą slenksčio nustatymas, a) $n = 1$, b) $n = 10$, c) $n = 100$, d) $n = 1000$

Nustatytos GaN pažeidimo slenksčio vertės pavaizduotos 14 pav. Gauta, kad, lyginant su anksčiau gautais abliacijos slenksčio rezultatais, slenksčio vertės yra žymiai mažesnės paveikiant GaN dangą per safyro padėklą (1 lentelė). Nors safyras nedidelę dalį spinduliuotės sugeria, dėl ko pažeidimo slenkstis galėtų padidėti, tačiau didelę įtaką daro būtent sandūra tarp safyro ir galio nitrido. Kai GaN yra paveikiamas lazerinės spinduliuotės, jis tą spinduliuotę sugeria, greitai sušyla ir dėl temperatūrų gradiento susidaro įtempiai, dėl kurių galio nitrido sluoksnis gali atsiskirti nuo safyro padėklo.

1 lentelė: Gautos pažeidimo slenksčio vertės su skirtingais impulsų, pataikančių į tą pačią vietą, skaičiais.

Impulsų skaičius	Pažeidimo slenkstis iš oro pusės (pagal kraterio diam.)	Pažeidimo slenkstis iš oro pusės (pagal s-į-1)	Pažeidimo slenkstis iš safyro pusės (pagal kraterio diam.)	Pažeidimo slenkstis iš safyro pusės (pagal s-į-1)
1	370 mJ/cm ²	362 mJ/cm ²	26 mJ/cm ²	24 mJ/cm ²
10	290 mJ/cm ²	282 mJ/cm ²	23 mJ/cm ²	20 mJ/cm ²
100	205 mJ/cm ²	138 mJ/cm ²	16 mJ/cm ²	14 mJ/cm ²
1000	69 mJ/cm ²	82 mJ/cm ²	11 mJ/cm ²	12 mJ/cm ²

Šio bandymo metu buvo pastebėtas kitas būdingas bruožas – esant pakankamai lazerinės spinduliuotės energijai ir dangą veikiant daugiau nei vienu impulsu aplink pažeidimą susidaro aureolės (15 pav). Tai didesnio diametro, aplink lazerio pažeidimą, susidaranti zona, kuri susidaro dėl susidarancio didelio slėgio. Vykstant spinduliuotės sugerčiai, galio nitridas skyla į metalizuotą galį ir azoto dujas, kurios neturi kur pasišalinti ir kaupiasi sandūroje tarp galio nitrido sluoksnio ir safyro padėklo. Impulsai, inicijuojantys galio nitrido dangos skilimą, lemia vis didėjantį kiekį azoto dujų kiekį tame pačiame ribotame tūryje – didėja slėgis. Šios aureolės rodo, kad yra paveikiamas didelis plotas aplink pažeidimą, kad galėtų paspartinti atkėlimo procesą, tačiau reikia atlikti tolimesnius tyrimus ir išsiaiškinti, ar šios aureolės reiškia, kad danga atšoka nuo padėklo, ar priešingai – dar tvirčiau prikimba.



15 pav. Aplink pažeidimus susidarančios aureolės. GaN pažeistas pro safyro padėklą, naudotas režimas – $n = 1000$ impulsų.

GaN dangos atkėlimas nuo safyro padėklo

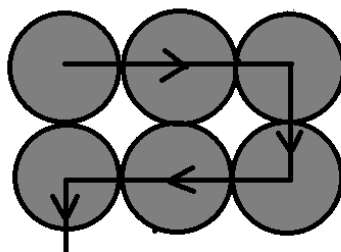
Paskutinis eksperimento etapas buvo pademonstruoti GaN dangos atkėlimą nuo safyro padėklo. Šiame etape skirtingomis lazerinės spinduliuotės energijomis buvo paveikiamos $500 \times 500 \mu\text{m}^2$ ploto zonos viduryje bandinio ir stebimas GaN dangos atkėlimas. Paveikus lazerine spinduliuote, bandinys buvo kaitinamas iki galio lydymosi temperatūros ($T_L = 30 \text{ }^\circ\text{C}$) dėl lengvesnio galio nitrido sluoksnio atskyrimo nuo safyro padėklo. Pagrindiniai parametrai, kurie lemia sėkmingą GaN sluoksnio atskyrimą nuo safyro, yra dangos vienalytiškumas (svarbu, kad danga nebūtų sutrukinėjusi ir kad atsiskirtų visa danga, kuri buvo paveikta lazerine spinduliuote) ir šiurkštumas. 16 pav. pavaizduota $15 \mu\text{m}$ storio galio

nitrido danga, sėkmingai atkelta nuo safyro padėklo, ankstesnių eksperimentų metu. Tai yra sėkmingo dangos atkėlimo pavyzdys.



16 pav. Pavyzdys gero GaN sluoksnio atskyrimo nuo safyro padėklo. Pavyzdys darytas su storesne GaN danga.

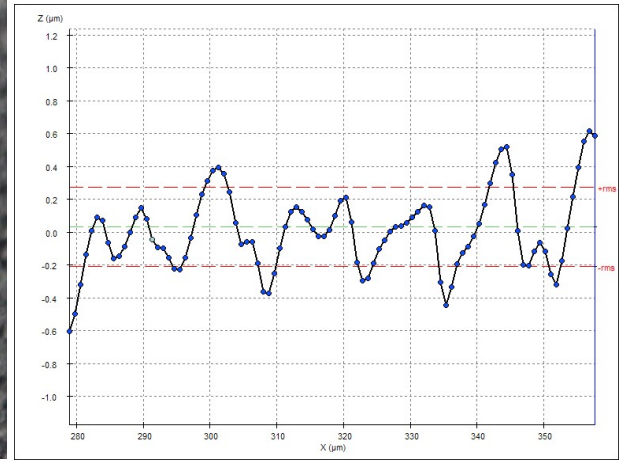
Bandymai buvo atliekami keičiant lazerinės spinduliuotės impulsų energiją, esant vienodam periodui tarp impulsų - 15 μm. Lazero spindulys buvo zigzagu skenuojamas per visą norimos atkelti dangos plotą (17 pav). Geriausias rezultatas gautas, naudojant didžiausią energiją – 3,5 μJ. Tuomet nusiima didžiausia GaN ploto, paveikto ultratrumpaisiais impulsais, dalis. Visgi tai yra nepakankamai geras rezultatas, nes be to, kad nėra nuimama visa lazerinės spinduliuotės paveikta danga, tačiau ta danga ir sutrūkinėja (18 pav. a). Šios dangos šiurkštumas yra ~800 nm, kuris sudarytas iš periodiškai pasikartojančių pikų (18 pav. b).



17 pav. Lazero spindulio skenavimo schema, atliekant galio nitrido dangos atkėlimą



a)



b)

18 pav. Atskirta nuo safyro padėklo GaN danga (a) ir jos profilis (b).

Rezultatai ir išvados

- Eksperimente buvo nustatytas galio nitrido abliacijos slenkstis. Gautos abliacijos slenksčio vertės (370 mJ/cm^2 vienam impulsui ir 69 mJ/cm^2 tūkstančiui impulsų) sutampa su vertėmis, randamomis literatūroje (atitinkamai 400 mJ/cm^2 ir 60 mJ/cm^2).
- Lazerinei spinduliutei einant per safyro padėklą gauti pažeidimo slenksčiai yra 5-15 kartų mažesni, nei tuo atveju, kai spinduliuotė pataiko tiesiai į galio nitridą (370 mJ/cm^2 vienam impulsui sumažėja iki 24 mJ/cm^2 , o 69 mJ/cm^2 tūkstančiui impulsų sumažėja iki 12 mJ/cm^2).
- Šią tendenciją galima paaiškinti susidarančiu dideliu slėgiu netoli paveiktos vietos, dėl susikaupiančių ir niekur negalinčių ištrūkti dujų. Kita galima priežastis – dėl atsirandančio šiluminio gradiento tarp lazeriu įkaitinto galio nitrido sluoksnio ir vėsesnio safyro padėklo atsirandantys įtempiai, padedantys plėvelei atsiskirti nuo padėklo.
- Pademonstruotas galio nitrido sluoksnio lazerinis nuėmimas nuo safyro padėklo. Plėvelės kraštai nenusiėmė, pati plėvelė suskilo.
- Profilometru pastebėta, kad ant dangos yra $\sim 800 \text{ nm}$ aukščio pikai. Jų atsiradimo priežastimi gali būti dideli atstumai tarp paveiktų zonų. Galimas sprendimo būdas – impulsų sutankinimas.

Literatūros sąrašas

- [1] M. E. Levinshtein, S. L. Rumyanstev, M. S. Shur, *Properties of Advanced Semiconductor Materials—GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe*, (John Wiley & Sons, New York, 2001)
- [2] G. Tamulaitis, *Elektronikos ir fotonikos rinka*, (Vilnius, Biznio mašinų kompanija, 2008)
- [3] L. Liu, J. H. Edgar, Substrates for gallium nitride epitaxy, *Mater. Sci. Eng. R Rep.* **37** (3), 61-127 (2002).
- [4] W.S. Wong, T. Sands, N. W. Cheung, Damage-free separation of GaN thin films from sapphire substrates, *Appl. Phys. Lett.* **72** (5), 599-601 (1998)
- [5] C. Chu, F. Lai, J. Chu., C. Yu, C. Lin, H. Kuo, S. C. Wang, Study of GaN Light-emitting Diodes Fabricated by Laser Lift-off Tehnique, *J. Appl. Phys.* **95** (8), 3916-3922 (2004)
- [6] T. Ueda, M. Ishida, M. Yuri, Separation of Thin GaN from Sapphire by Laser Lift-Off Technique, *Jpn. J. Appl. Phys.* **50** (4), 1-9 (2011)
- [7] J. Kim, J. Kim., S. Cho, K. Whang, Selective Lift-off of GaN Light-Emitting Diode from a Sapphire Substrate Using 266-nm Diode-pumped Solid-state Laser Irradiation, *Appl. Phys. A.* **122** (4), 1-6 (2016)
- [8] Silicio panaudojimas elektronikos pramonėje // <http://www.thomasnet.com/articles/plastics-rubber/Silicon-Electronics-Casting-Applications> (tikrinta 2018–01–23)
- [9] Įvairių medžiagų elektronikos prietaisų panaudojimas skirtingoms galioms ir dažniams // <http://www.edn.com/design/power-management/4409627/3/Si-vs--GaN-vs--SiC--Which-process-and-supplier-are-best-for-my-power-design-> (tikrinta 2018–01–23)
- [10] <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=99&t=3> (tikrinta 2018-05-25)
- [11] P. M. Pattison, M. Hansen, J. Y. Tsao, LED Lighting efficacy: Status and Directions, *C. R. Phys.* **19** (3) 134-145 (2018)
- [12] S. Nakamura, S. Pearton, G. Fasol, *The Blue Laser Diode, the Complete Story* (Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2000)
- [13] https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2014/press.html (tikrinta 2018-05-25)
- [14] S. Nakamura, M. R. Krames, History of Gallium-Nitride-Based Light-Emitting Diodes for Illumination, *Proc. IEEE* **101**(10) 2211-2220 (2013)

- [15] X. Ke, W. J.Feng, R. G. Qiang, Progress in Bulk GaN Growth, Chin. Phys. B **24** (6) 0.66105 – 0.66105-16 (2015)
- [16] <https://www.msesupplies.com/collections/free-standing-gan-crystal/products/copy-of-2-n-type-led-grade-free-standing-gallium-nitride-gan-single-crystal-c-plane-0001-low-dislocation-density> (tikrinta 2018-05-25)
- [17] <https://www.universitywafer.com/> (tikrinta 2018-05-25)
- [18] B. Cao, S. Li, R. Hu, S. Zhou, Y. Sun, Z. Gan, S. Liu, Effects of current crowding on light extraction efficiency of conventional GaN-based light-emitting diodes, Opt. Express **21**(21) 25381 - 25381-8 (2013)
- [19] T. Fujii, Y. Gao, R. Sharma, E. L. Hu, S. P. DenBaars, and S. Nakamura, Increase in the Extraction Efficiency of GaN-Based Light-Emitting Diodes via Surface Roughening, Appl. Phys. Lett., **84**(6), 855–857 (2004)
- [20] Z. Quan, *Thin film technology for optoelectronics and their thermal management* (University College Cork, 2017)
- [21] J. H. Cheng, Y. S. Wu, W.C. Peng, H. Ouyang, Effects of Laser Sources on Damage Mechanisms and Reverse-Bias Leakages of Laser Lift-Off GaN-Based LEDs, J. Electrochem. Soc. **156**(8) H640-H643 (2009)
- [22] C. Ming, Z. J. Yong, L. X. Qin, , Y. L. Ying, Z. B. Ping, Effect of Laser Pulse Width on the Laser Lift-off Process of GaN Films, Chin. Phys. Lett.. **30**(1) 014203 – 014203-4 (2013)
- [23] B. Zheng, G. Jiang, W. Wang, K. Wang, X. Mei, Ablation Experiment and Threshold calculation of Titanium Alloy Irradiated by Ultra-fast Pulse Laser, AIP Adv. **4**(3), 031310-031310.9 (2014)
- [24] G. Račiukaitis, *Lazerinio apdirbimo laboratoriniai darbai* (TEV, Vilnius, 2008)
- [25] N. Sanner, O. Uteza, B. Chimier, M. Sentis, P. Lassonde, F. Legare, J. C. Kieffer, Toward Determinism in Surface Damaging of Dielectrics Using Few-cycle Laser Pulses, Appl. Phys. Lett. **96** (7), 071111-071111.3 (2010)
- [26] N. Sanner, O. Uteza, B. Bussiere, G. Coustillier, A. Leray, T. Itina, M. Sentis, Measurement of Femtosecond Laser-induced Damage and Ablation Thresholds in Dielectrics, Appl. Phys. A. **94**(4), 889-897 (2009)
- [27] M. Ščiuka, T. Grinys, M. Dmukauskas, V. Plerpaitė, A. Melninkaitis, Femtosecond Laser Etching of GaN and InGaN Thin Films Grown by Metal Organic Chemical Vapor Deposition, Jpn. J. Appl. Phys. **52** (8), 1-5 (2013)

SELEKTYVUS GaN DANGOS ATKĖLIMAS NUO SAFYRO PADĖKLO
ULTRATRUMPAISIAIS ŠVIESOS IMPULSAIS

Mėlynos spalvos galio nitrido šviestukai, kartu naudojant raudonos ir žalios šviesos šviestukus arba geltonai fosforescencijuojančią medžiagą (pvz., ceriu legiruotą itrio aliuminio granatą Ce:YAG), sudaro galimybę sudaryti baltą šviesą. Tokia šviesa, naudojant taupius, ilgaamžiškus šviestukus, galėtų pakeisti ne tokias efektyvias gyvsidabrines ir fluorescencines apšvietimo sistemas. Vienas iš technologinių procesų, atliekamų norint pagerinti mėlynos spalvos galio nitrido šviestukų efektyvumą yra jų atkėlimas nuo safyro/silicio karbido padėklų ant padėklų iš šilumai laidesnės medžiagos, pvz. vario. Šiuo metu yra atlikta mažai lazerinio atkėlimo bandymų, naudojant ultratrumpuosius lazerio impulsus, tačiau mažesnė tokių impulsų šiluminio poveikio zona galėtų reikšti geresnę atkeltos dangos kokybę.

Šiame darbe buvo naudojama $\lambda = 343$ nm bangos ilgio spinduliuotė, impulso trukmė 300 fs (MGF „Šviesos Konversija“ „PHAROS“ lazeris su trečios harmonikos generatoriumi). Surastas 4 μm storio galio nitrido dangos pažeidimo slenkstis, kuomet lazerinė spinduliuotė veikia sandūroje tarp GaN dangos ir safyro padėklo, ir patyrinėta, kaip keičiasi pažeidimo slenkstis, keičiant impulsų, pataikančių į tą pačią vietą dangoje, skaičių. Impulsų skaičiui esant 1, pažeidimo slenkstis 24 mJ/cm^2 , tuo tarpu šiam skaičiui esant 1000, pažeidimo slenkstis dėl akumuliacinių reiškinių sumažėja iki 12 mJ/cm^2 . Šios vertės yra apytiksliai eile mažesnės nei galio nitrido abliacijos slenksčio vertės. Tai galima paaiškinti įtempių dėl temperatūros gradiento susidarymu tarp įkaitinto galio nitrido ir vėsaus safyro padėklo. Kita galima priežastis – sandūroje susidarantis didelis azoto dujų slėgis, kurios neturi kur išstrūkti.

Taip pat buvo pabandyta atkelti 500 x 500 μm^2 ploto dangos gabalėlį, tačiau atkelta danga sutrūkinėjo. Šioje dangoje buvo matomi ~800 nm aukščio pikai.

Raktiniai žodžiai: galio nitridas; lazerinis atkėlimas; ultratrumpieji impulsai;

SELECTIVE LIFT-OFF OF GaN FILM FROM SAPPHIRE SUBSTRATE USING
ULTRASHORT LASER PULSES

Gallium nitride based LEDs emitting blue light, combined with red and green light LEDs or yellow phosphors (i.e. cerium doped yttrium aluminum garnets Ce:YAG) makes a white light. This type of lighting is more effective, it lasts longer so it could change fluorescent lights and incandescent bulbs. Lift-off is a technological process when GaN film is transferred from sapphire/silicon carbide substrate to the substrate of better thermal conductivity, like copper. Currently there is only a few researches, where lift-off is done with ultrashort laser pulses. Smaller heat affected zone of ultrashort laser pulses could mean lesser number of defects and better quality overall in the transferred film.

In this thesis, $\lambda = 343$ nm wavelength laser beam with the pulse width of 300 fs (MGF „Light Conversion“ laser „PHAROS“) was used. The damage threshold of 4 μm GaN film grown on sapphire substrate was found when laser beam propagates through the sapphire. The investigation of the effect of number of pulses hitting the same spot on the film was made, which showed that number of pulses lowers the damage threshold. The damage threshold of one pulse was $24 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ and the damage threshold of one thousand pulses affecting same spot was $12 \text{ mJ}/\text{cm}^2$. These values are approximately ten times lower than ablation threshold values of GaN. There could be two reasons for this phenomenon: thermal stresses from the temperature gradient between laser beam heated GaN film and cooler sapphire substrate; immense pressure of nitrogen gasses in the junction of GaN and sapphire, where they have nowhere to go.

There was an attempt to lift-off $500 \times 500 \mu\text{m}^2$ GaN segment. It was unsuccessful as lifted-off film was fractured. The peaks of ~ 800 nm can be seen on this lifted-off segment.

Keywords: gallium nitride; ultrashort pulses; laser lift-off;