

VILNIAUS UNIVERSITETAS
FIZINIŲ IR TECHNOLOGIJOS MOKSLŲ CENTRAS

BRONIUS ŠAULYS

**TRIUKŠMINĖ ŠVIESOS DIODŲ SU NITRIDINIAIS
SLUOKSNIAIS KOKYBĖS DIAGNOSTIKA**

**Daktaro disertacijos santrauka
Fiziniai mokslai, fizika (02P)**

Vilnius 2017

Disertacija rengta 2007 – 2013 Vilniaus universitete studijuojant doktorantūroje ir ginama eksternu.

Mokslinis konsultantas:

Prof. dr. Jonas Matukas (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P).

Disertacija ginama viešame disertacijos gynimo tarybos posėdyje:

Pirmininkas - prof. dr. Algirdas Sužiedėlis (Fizinių ir technologijos mokslų centras, fiziniai mokslai, fizika – 02 P).

Nariai:

Doc. dr. Maksim Ivanov (Vilniaus universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T);

Prof. dr. Šarūnas Meškiniš (Kauno Technologijos universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija - 08T);

Dr. Paulius Sakalas (Technical university of Dresden, Vokietija, fiziniai mokslai, fizika – 02P);

Dr. Juozapas Liberis (Fizinių ir technologijos mokslų centras, fiziniai mokslai, fizika – 02 P).

Disertacija bus ginama viešame disertacijos gynimo tarybos posėdyje 2017m. rugsėjo 19 d. 13 val. Nacionaliniame fizinių ir technologijų mokslų centre, B336 auditorijoje.

Adresas: Saulėtekio al. 3, LT-10257, Vilnius, Lietuva

Disertacijos santrauka išsiųsta 2017 m. rugpjūčio 18 d.

Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus universiteto ir Fizinių ir technologijos mokslų centro bibliotekose ir VU interneto svetainėje adresu: www.vu.lt/lt/naujienos/ivykiu-kalendorius.

VILNIUS UNIVERSITY
CENTER FOR PHYSICAL SCIENCES AND TECHNOLOGY

BRONIUS ŠAULYS

**QUALITY DIAGNOSTICS OF NITRIDE BASED LIGHT
EMITTING DIODES VIA LOW FREQUENCY NOISE
CHARACTERISTICS**

**Doctoral dissertation summary
Physical science, Physics (02P)**

Vilnius 2017

The thesis was prepared at Vilnius University in 2007 – 2013 during PhD studies and is defended extramurally.

Scientific consultant:

Prof. dr. Jonas Matukas (Vilnius University, physical sciences, physics – 02 P).

The dissertation is defended at a public meeting of the Dissertation Defence Board:

Chairman - Prof. Dr. Algirdas Sužiedėlis (Center for physical sciences and technology, physical science, physics – 02 P).

Members:

Doc. Dr. Maksim Ivanov (Vilnius university, technological science, substance engineering – 08T);

Prof. dr. Šarūnas Meškiniš (Kaunas university of technology, technological science, substance engineering - 08T);

Dr. Paulius Sakalas (Technical university of Dresden, physical science, physics – 02P);

Dr. Juozapas Liberis (Center for physical sciences and technology, physical science, physics – 02 P).

The dissertation is defended at a public meeting of the Dissertation Defence Board on 19th of september 2017 at 13:00 o'clock in B336 auditorium of National Center of Physical and Technological Sciences.

Address: Saulėtekio ave. 3, LT-10257, Vilnius, Lithuania

The Summary of the dissertation has been sent out on 18th of August 2017.

The dissertation is available in the Vilnius University Library, Library of Center for Physical Sciences and Technology and on Vilnius University website:

www.vu.lt/lt/naujienos/ivykiu-kalendorius.

IVADAS

Darbo aktualumas

Šviesos diodas (ŠD) yra tiesiogine kryptimi veikiantis puslaidininkinis įtaisas, kurio spinduliuotė yra nulemta savaiminės rekombinacijos. Priklausomai nuo medžiagos draudžiamosios energijos tarpo spinduliuojamos šviesos spektras gali būti infraraudonojoje, matomoje arba ultravioletinėje spektro dalyje. Sukūrus didelio ryškumo mėlynos šviesos diodus netruko atsirasti ir baltą šviesą skleidžiantys ŠD. Pastarieji sukurti panaudojant papildomą YAG fosforo sluoksnį ant mėlynos šviesos diodų. Atsiradus didelio ryškumo baltos šviesos diodams ŠD panaudojimo sritys ženkliai prasiplėtė. Šviesos diodai pradėti naudoti ne tik ten, kur reikalinga vienos spalvos šviesa (įvairūs indikatoriai, šviesoforai ir pan.), bet ir apšvietimui (patalpų bei teritorijos apšvietimas, automobilinės šviesos, skystųjų kristalų monitorių apšvietimas ir pan.). Taip pat šviesos diodai yra labai plačiai naudojami ir srityse nesusijusiose su apšvietimu (siųstuvai šviesolaidinėse bei atviros erdvės perdavimo sistemose, jutiklinėse sistemose ir pan.). Šiuolaikiniai šviesos diodai, lyginat juos su tradiciniais šviesos šaltiniais, pasižymi dideliu našumu, ilgaamžiškumu, mažais gabaritais, galimybe spinduliuoti monochromatinę šviesą.

Nors šviesos diodai ir pasižymi dideliu ilgaamžiškumu, jų veikimo trukmė gali ženkliai sumažėti esant nepalankioms sąlygoms. Taip pat gamintojų nurodoma šviesos diodų veikimo trukmė yra statistinis dydis ir neužtikrina, kad jo spinduliuojamos šviesos intensyvumas nesumažės anksčiau negu nurodyta veikimo trukmė. Daugelyje ŠD taikymo sričių labai svarbus yra jų patikimumas, o telekomunikacinėse sistemose - dar ir pačių šviesos diodų savasis triukšmų lygis. Dėl įvykusių pokyčių vidinėje ŠD struktūroje, gali būti stebimas nedidelis pokytis jo charakteristikose (pavyzdžiui voltamperinėje charakteristikoje), kai tuo tarpu triukšmų charakteristikos pakinta ženkliai. Dėl to šviesos diodų žemadažnių triukšmų analizė ne tik suteikia informaciją apie paties diodo savuosius triukšmus, bet ir leidžia analizuoti tam tikrus fizikinius procesus vykstančius ŠD darinyje. Todėl triukšminė šviesos diodų diagnostika yra labai jautrus, tiriamo bandinio nesuardantis tyrimo būdas, suteikiantis informacijos apie jo kokybę ir patikimumą.

Disertacijos tikslas ir uždaviniai

Disertacijos tikslas – atliekant žemadažnių triukšmo matavimus ištirti šiuolaikinių didelio ryškumo InGaN šviesos diodų kokybę ir degradacijos priežastis. Siekiant užsibrėžto tikslo, disertacijoje keliami uždaviniai:

1. ištirti šviesos diodų su nitridiniais sluoksniais triukšmų charakteristikas ir palyginti su fosfidiniais;
2. ištirti ir įvertinti lęšiuko bei fosforo sluoksnio įtaką šviesos diodų kokybei;
3. ištirti ir palyginti InGaN šviesos diodo ir lazerinio diodo triukšmų charakteristikas;
4. ištirti šviesos diodo nuotėkio srovės sąryšį su jo triukšmų charakteristikomis;
5. ištirti šviesos diodo degradacijos priežastis taikant paspartintą sendinimą;
6. ištirti baltos šviesos diodo fosforo sluoksnio degradaciją;
7. palyginti degradacijos mechanizmus skirtingų medžiagų šviesos diodams: InGaN ir AlInGaP;
8. atlikti šviesos diodo triukšmų charakteristikų modeliavimą bei koreliacinę analizę.

Mokslinis naujumas

1. Ištirta šviesos diodo su nitridiniais sluoksniais lęšiuko įtaka triukšmų charakteristikoms.
2. Ištirta fosforo sluoksnio įtaka baltos šviesos diodo triukšmų charakteristikoms.
3. Atliktas detalus šviesos diodo triukšmų charakteristikų modeliavimas bei koreliacinė analizė.

Tyrimo rezultatų aprobacija ir publikacijos

Darbo metu gauti ir disertacijoje aprašomi rezultatai publikuoti šešiuose straipsniuose moksliniuose žurnaluose, turinčiuose cituojamumo rodiklį Thomson Reuters Web of Knowledge duomenų bazėje, bei pristatyti šešiose tarptautinėse konferencijose.

Ginamieji teiginiai

1. Šviesos diodų degradacijos priežastis yra nespinduliuojamosios generacijos ir rekombinacijos centrų skaičiaus padidėjimas jų struktūroje.
2. Šviesos diodo kokybei ir patikimumui didžiausią įtaką turi aktyvioji sritis (ne papildomas lęšiukas ar fosforo sluoksnis).

3. Pirmiausia šviesos diodo senėjimas stebimas jo elektrinio triukšmo bei koreliacijos koeficiento tarp elektrinių ir optinių fliktuacijų bei voltamperinėje (mažos srovės srityje) charakteristikose, o ne spinduliuotės charakteristikose.
4. Tirta šviesos diodo elektrinio bei optinio triukšmų spektruose žemame dažnyje vyrauja dalinai ($d_1= 0,64$) koreliuotas $1/f$ bei visiškai koreliuotas ($d_2=1$) $1/f^{1.5}$ triukšmų sandai, aukštesniame dažnyje juos užgožia šratinis triukšmas, o elektriniame triukšme dar ir labai silpnai koreliuotas ($d_3= 0,03$) generacinis – rekombinacinis sandas.

Disertacijos turinys

Disertaciją sudaro penki skyriai ir cituojamos literatūros sąrašas. Cituojamos literatūros sąrašas yra 75 nuorodos. Disertacijos apimtis yra 112 puslapių, kuriuose yra 61 paveikslas ir 1 lentelė.

Pirmasis skyrius – įvadas, jame pateikiami darbo tikslai ir uždaviniai, mokslinis naujumas, ginamieji teiginiai, publikacijų ir pranešimų konferencijose sąrašas.

Antrajame skyriuje yra apžvelgta literatūra disertacijos tema – šviesos diodų gamyboje naudojamos medžiagos, baltos šviesos diodų sandaros ypatybės, šviesos diodų patikimumo problemos, šviesos diodų triukšmai.

Trečiajame skyriuje pateikiama tyrimų metodika bei bandinių aprašymas.

Ketvirtajame skyriuje apžvelgiami tyrimų metu gauti rezultatai.

Penktajame skyriuje pateikiamos išvados.

Pirmojo disertacijos skyriaus turinys atspindimas šios santraukos pradžioje. Todėl toliau yra pateikiamos svarbiausios disertacijos dalys pradedant antruoju skyriumi.

2. ŠVIESOS DIODŲ APŽVALGA

Šio skyriaus pirmoje dalyje trumpai apžvelgiamos šviesos diodo aktyviojoje srityje naudojamos medžiagos. Šiuo metu InGaN medžiaga naudojama trumpabangių šviesos diodų (pvz., spinduliuojančių mėlynos ir žalios spalvos šviesą) gamyboje, o AlInGaP - ilgesnių bangų šviesos dioduose (pvz., spinduliuojančiuose raudonos, geltonos ir oranžinės spalvos šviesą) [1].

Antroje šio skyriaus dalyje apžvelgiami baltos šviesos gavimo būdai šviesos dioduose. Vienas iš būdų yra šviesos diode sudarant keletą aktyviųjų sričių, spinduliuojančių skirtingo bangos ilgio šviesą ir taip gaunant baltą šviesą [2]. Kitas,

labiau paplitęs būdas, yra panaudojant šviesos bangos ilgį keičiančias medžiagas. Pavyzdžiui, mėlynos šviesos diodą padengiant fosforo sluoksniu. Šis fosforo sluoksnis dalį mėlynos šviesos praleidžia, o dalį sugeria ir išspinduliuoja plataus spektro geltoną šviesą. Toks suminis spinduliuotės spektras žmogaus akiai suvokiamas kaip balta šviesa [3]. Baltos šviesos diode naudojamas fosforo sluoksnis gali būti papildomas šių ŠD degradacijos šaltinis.

Trečioje šio skyriaus dalyje apžvelgiamas šviesos diodų patikimumas. Patikimumas yra apibrėžiamas kaip tikimybė, kad, esant normalioms veikimo ir aplinkos sąlygoms, bandinys veiks tam tikrą nustatytą laiką. ŠD gamintojai nurodo jų veikimo trukmę, apibrėždami ją kaip tipinę vidutinę šviesos diodų veikimo trukmę, per kurią sugenda 50 % bandinių. Tipinė aukštos kokybės šviesos diodų veikimo trukmė būna nuo 20 000 iki 70 000 valandų.

Ketvirtoje šio skyriaus dalyje yra apžvelgiami šviesos diodų triukšmai. Šviesos dioduose stebimi šiluminis, šratinis, generacinis-rekombinacinis bei $1/f^{\alpha}$ triukšmai.

Penktoje šio skyriaus dalyje aptariamas šviesos diodų patikimumo ir kokybės tyrimas atliekant žemadažnių triukšmų matavimus. Šviesos diodų žemadažnių triukšmų tyrimas yra daug jautresnis nei voltamperinės ar šviesos spinduliuotės matavimas. Taip pat šis metodas yra neardantis, tai yra negadinantis paties bandinio [4-6].

3. MATAVIMŲ IR SKAIČIAVIMŲ METODIKA

Šiame skyriuje apžvelgti triukšmų, voltamperinių bei optinių charakteristikų matavimo metodai.

Vienalaikiai elektrinis ir optinis žemadažniai triukšmai buvo matuojami panaudojant National Instrument PCI 6115 analogas – kodas keitiklį. Triukšmai matuoti dažnio diapazone nuo 10 Hz iki 20 kHz. Taip pat buvo apskaičiuojama koreliacija tarp elektrinio bei optinio triukšmų visame dažnio diapazone bei mažesniuose intervaluose (oktavose) tam panaudojant skaitmeninius filtrus.

Šviesos diodo spinduliuotės tyrimai buvo atliekami ne tik matuojant fotodiodo, apšviesto tiriamuoju ŠD, įtampos priklausomybę nuo srovės stiprio, bet buvo atlikti ir optinių spektrų matavimai. Optiniai spektrai matuoti Advantest Q8341 optiniu spektro analizatoriumi.

Palyginimui su šviesos diodais buvo atlikti ir lazerinių diodų triukšmų tyrimai. Tam, kad vienu metu stebėti optinių spektrų ir triukšmų pokyčius vykstant modų šuoliams, lazerio spinduliuotė buvo nukreipta į šviesolaidį su dviem skaidulomis. Viena iš jų buvo prijungta prie optinio spektro analizatoriaus Advantest Q8384 įėjimo, kita skaidula buvo naudojama optinių triukšmų matavimui.

Šviesos diodų voltamperinės charakteristikos buvo matuojamos ne tik jų veikimo srityje, bet ir tekant labai mažai srovei. Matuojant šviesos diodo voltamperinę charakteristiką mažos srovės srityje galima įvertinti nuotėkio srovės dydį. Voltamperinės charakteristikos buvo matuojamos specialiu puslaidininkinių prietaisų analizatoriumi Agilent Technologies B1500A. Šis prietaisas turi integruotus precizinius srovės bei įtampos maitinimo šaltinius bei labai tikslius įtampos ir srovės matuoklius. Įtampos maitinimo bei matavimo maksimalus tikslumas, atitinkamai, yra 150 μV ir 120 μV . Srovės maitinimo ir matavimo maksimalus tikslumas – atitinkamai, 0,3 pA ir 0,2 pA. Siekiant sumažinti matavimo kabelių varžos bei nuotėkio srovės per kabelius įtaką, buvo naudojami atskiri triaksialiniai kabeliai maitinimo ir matavimo grandinėms.

Tirti bandiniai

1 lentelė. Tirti šviesos diodai.

Eil. Nr.	Spalva	λ (nm)	Medžiaga	Pastabos
1.	Žalia	530	InGaN	
2.	Mėlyna	470	InGaN	
3.	Balta	---	InGaN	
4.	Raudona	625	AlInGaP	
5.	Oranžinė	590	AlInGaP	
6.	Mėlyna	470	InGaN	Šviesa spinduliuojama į šonus
7.	Infraraudona	1330	InGaAsP/InP	Lazerinis diodas

1 lentelėje nurodyti tirti šviesos diodai. Buvo tiriami komerciškai prieinami LUXEON START HEX šviesos diodai: InGaN ŠD, skleidžiantys žalios, mėlynos ir baltos spalvos šviesą bei AlInGaP ŠD, spinduliuojantys raudonos ir oranžinės spalvos šviesą. Daugumos tirtų šviesos diodų spinduliuotės kryptingumo diagrama buvo Lamberto tipo, kai didžioji spinduliuotės dalis nukreipiama statmenai šviesos diodo paviršiui. Taip pat buvo tiriami šviesos diodai spinduliuojantys šviesą į šonus –

didžiausia spinduliuotės dalis nukreipiama 75 – 85 laipsnių kampu nuo jo optinės ašies. Tokie šviesos diodai dažniausiai naudojami, kai reikia tolygiai apšviesti labai arti esantį objektą (pvz., LCD ekranų apšvietimas iš galo). Į šoną spinduliuojantis šviesos diodas puikiai tiko atlikti ne tik vienalaikius elektrinio ir optinio triukšmų matavimus, bet ir vienalaikius optinių triukšmų matavimus dviejuose fotodioduose apšviestuose to paties ŠD. Įvertinus koreliaciją tarp šių dviejų optinių triukšmų, galima nustatyti, ar tirtieji optiniai triukšmai atsiranda toje pačioje šviesos diodo srityje.

Siekiant įvertinti fosforo sluoksnio įtaką ŠD triukšmams baltos šviesos diodų tyrimams buvo naudojama fotodiodų matrica sudaryta iš fotodetektorių, jautrių skirtingiems bangos ilgiams. Su mėlynai ir raudonai šviesai jautriais fotodetektoriais, buvo atskirai išmatuoti optiniai triukšmai sukurti ŠD aktyviojoje srityje bei fosforo sluoksnyje.

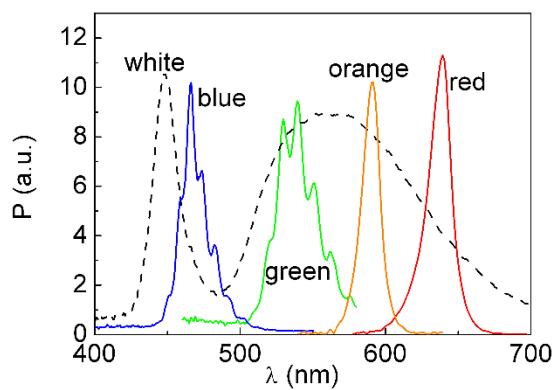
Šviesos diodo triukšmų palyginimui su puslaidininkinio lazerio triukšmais, buvo išstirti daugiamodžiai InGaAsP/InP Fabry-Pérot lazeriniai diodai. Jų spinduliuotė sudaryta iš 3 – 5 pagrindinių modų, kurių bangos ilgis yra 1,33 μm .

4. GAUTI REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS

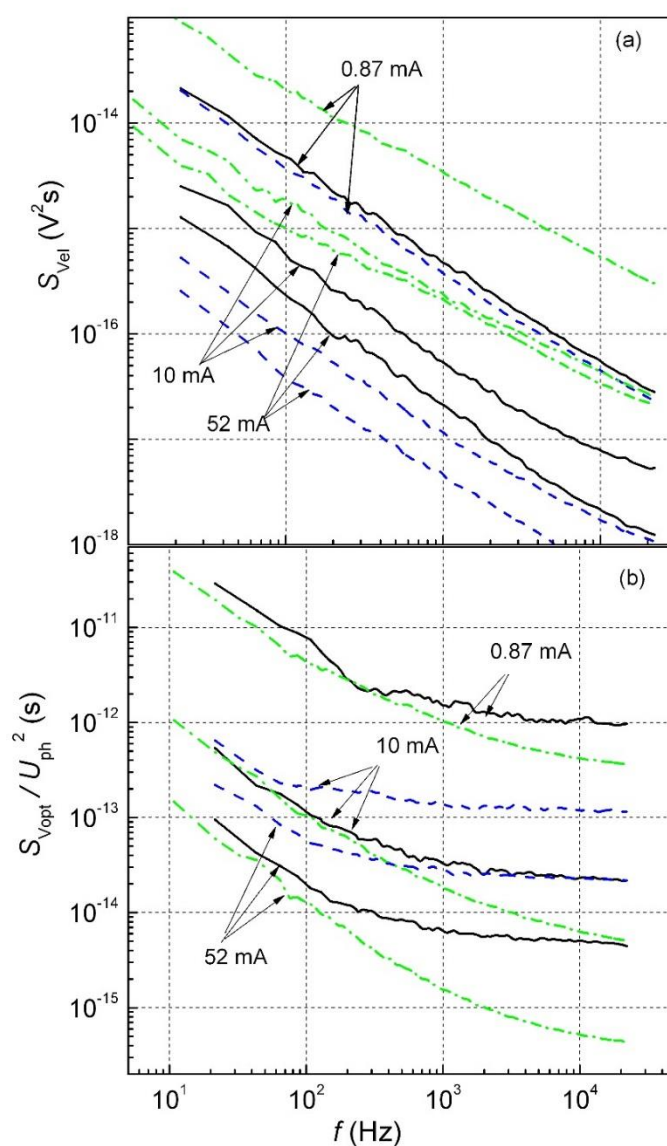
Šviesos diodų triukšmų charakteristikos

Pirmoje šio paragrafo dalyje apžvelgiamos šviesos diodų su fosfidiniais bei nitridiniais sluoksniais triukšmų charakteristikos [S1]. Buvo matuojamos šios šviesos diodų charakteristikos: voltamperinė charakteristika, šviesos galios priklausomybė nuo bandiniu tekančios srovės, optinis spektras, elektrinio ir optinio triukšmų spektriniai tankiai bei abipusės koreliacijos koeficientas tarp šių triukšmų.

Būdingi optiniai tirtų šviesos diodų spektrai pateikti 4.2 pav. Baltos šviesos diodo kreivė yra juodos spalvos, o kitų bandinių – atitinka jų spinduliuotės spalvą. Visi tirti šviesos diodai elektriniame triukšme pasižymi $1/f^\alpha$ pobūdžio spektrais (4.1 (a) ir 4.3 (a) pav.). Paprastai šios fliktuacijos šviesos dioduose atsiranda dėl generacijos-rekombinacijos procesų, kurių relaksacijos trukmės yra pasiskirsčiusios labai plačiame trukmių intervale. Generaciniai-rekombinaciniai vyksmai vyksta dėl įvairių defektų (gardelės nesutapimų, dislokacijų, paviršiaus netobulumo) puslaidininkiniame darinyje, kurie sukuria didelius medžiagos energijos juostos iškreipius ir sudaro krūvininkų

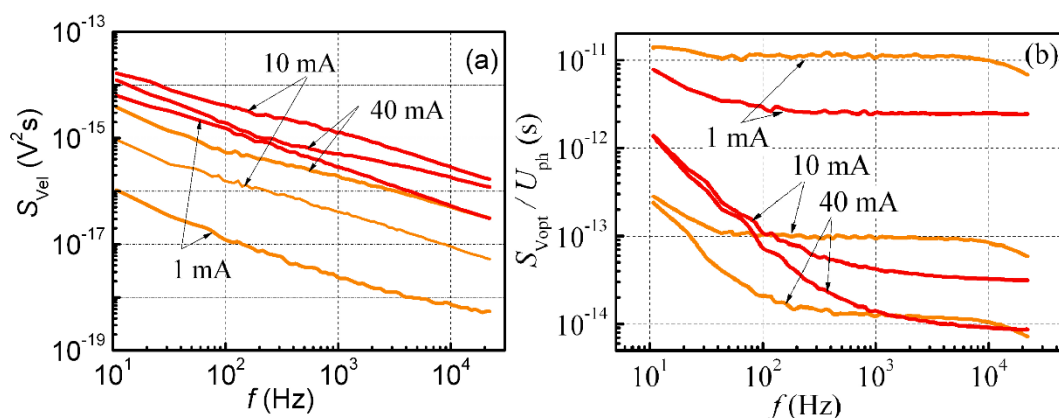


4.2 pav. Būdingi optiniai tirtų šviesos diodų spektrai.



4.1 pav. InGaN šviesos diodų elektrinio (a) ir optinio (b) triukšmų spektrai tekant skirtingai srovei. Juodos linijos – balto ŠD, mėlynos – mėlyno ŠD, žalios – žalio ŠD rezultatai.

pagavimo didelius medžiagos energijos juostos iškreipius ir sudaro krūvininkų pagavimo centrus, turinčius platų relaksacijos trukmių pasiskirstymą. Elektrinio triukšmo intensyvumo mažėjimas didėjant srovei gali būti paaiškinamas defektais šviesos diodo struktūroje: esant mažai srovei, ji teka siaurais mikrokanalais susidariusiais dėl defektų ir atsitiktinis elektronų generavimas ar rekombinacija moduliuoja tekančią srovę. Didėjant šviesos diodu tekančiai srovei, ji pradeda tekėti per visa sandūros skerspjuvio plotą, ir diskretinių defektų įtaka ženkliai sumažėja. Tyrimų rezultatai rodo, kad žalios šviesos diodas pasižymi didesniu žemadažnio triukšmo lygiu nei mėlynos ar baltos šviesos diodai. Manoma, kad žalios šviesos diodas turi didesnę defektų skaičių savo struktūroje dėl didesnės indžio koncentracijos. Optinio triukšmo spektre žemame dažnyje vyrauja $1/f$ fliktuacijos, o aukštesniame dažnyje (virš 1 kHz) „baltas“ triukšmas (4.1 (b) ir 4.3 (b) pav.). „Balto“ triukšmo sandą lemia šratinis triukšmas, atsirandantis dėl

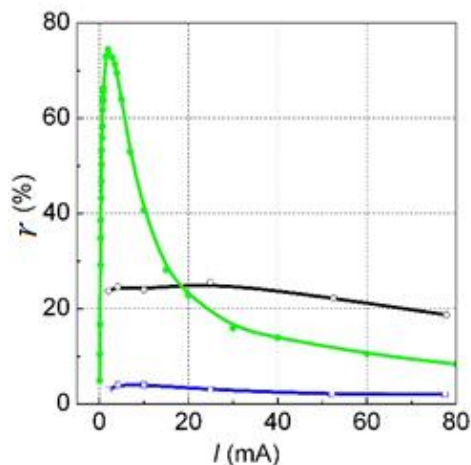


4.3 pav. AlInGaP šviesos diodų elektrinio (a) ir optinio (b) triukšmų spektrai tekant skirtingai srovei. Linijos spalva atitinka šviesos diodo spinduliuojamos šviesos spalvą.

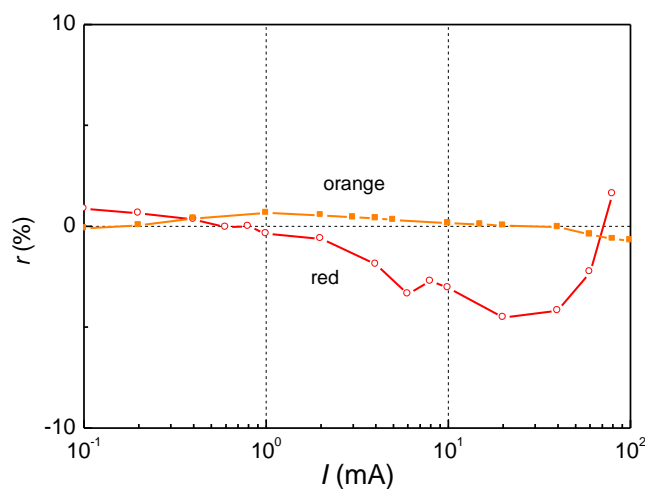
šviesos diodo spinduliuojamų fotonų diskretiškumo. AlInGaP ŠD elektrinio ir optinio triukšmų lygis yra panašus į InGaN mėlynos ir baltos šviesos diodų. Raudonos šviesos diodas lyginant su oranžinės šviesos, pasižymi aukštesniu elektrinio triukšmo lygiu, o taip pat ir optiniame triukšme stebimas didesnis $1/f$ triukšmo lygis.

Tirtųjų šviesos diodų su nitridiniais bei fosfidiniais sluoksniais koreliacijos koeficientas tarp elektrinio ir optinio triukšmų pavaizduotas, atitinkamai, 4.4 pav. ir 4.5 pav. Optinio triukšmo šaltiniai yra tik šviesos diodo aktyviojoje srityje. Taip pat tarpusavyje koreliuoja tik fliktuacijos, turinčios tokį patį spektro tipą. Todėl didelė koreliacija tarp

1/f elektrinio ir optinio triukšmų rodo, kad šių triukšmų šaltinis yra šviesos diodo aktyviojoje srityje. Aktyviojoje srityje esantys defektai ne tik įtakoja triukšmų lygį, bet ir padidina nespinduliuojamosios rekombinacijos lygį, dėl to sumažėja šviesos diodo našumas. Artimas nuliui mėlynos, raudonos ir oranžinės šviesos diodų koreliacijos koeficientas (4.4, 4.5 pav.) iš vienos pusės gali reikšti, kad defektai yra ne aktyviojoje



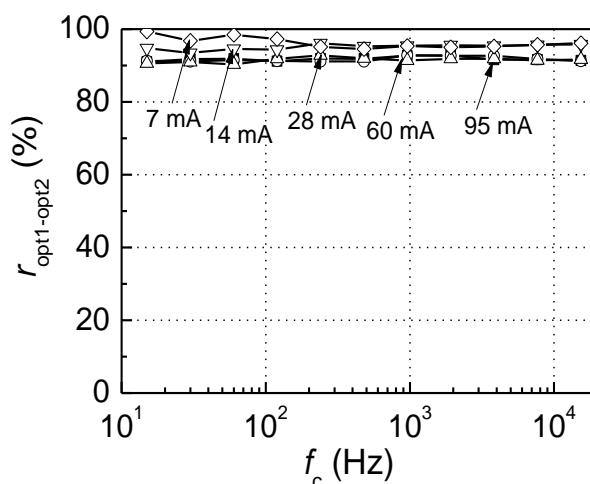
4.4 pav. InGaN šviesos diodų koreliacijos koeficiento (dažnio srityje nuo 10 Hz iki 20 kHz) tarp optinio ir elektrinio triukšmų priklausomybė nuo srovės stiprio.



4.5 pav. AlInGaP šviesos diodų koreliacijos koeficiento tarp elektrinio ir optinio triukšmų (dažnio diapazonas 10 Hz - 20 kHz) priklausomybė nuo srovės stiprio.

ŠD dalyje (pavyzdžiui, metalo – puslaidininkio sandūroje). Bet iš kitos pusės gali būti ir taip, kad optinis 1/f triukšmo lygis yra mažesnis už „balto“ triukšmo sandą. Baltos spalvos ŠD triukšmai yra stipriau koreliuoti ($r \approx 24\%$). Žalios šviesos diodo atveju matome, kad 1/f optinis ir elektrinis triukšmai yra stipriai koreliuoti ($r \approx 75\%$) tik esant srovei mažesnei už 10 mA. Tekant didesnei srovei nekoreliuoti triukšmo sandai yra intensyvesni.

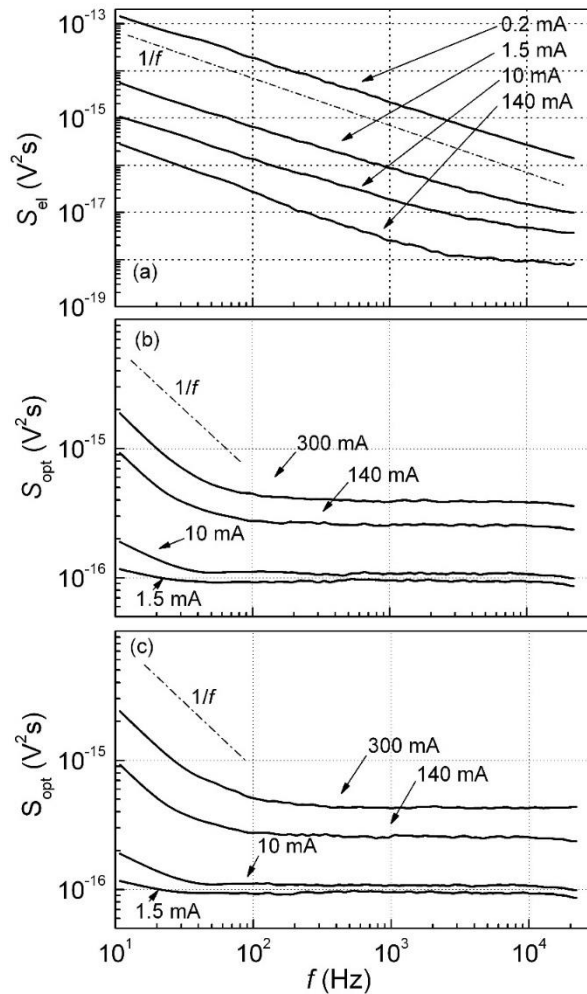
Antroje šio paragrafo dalyje aptariama šviesos diodo lęšiuko įtaka jo triukšmams [S3]. Tuo tikslu buvo tirti šviesos diodai skleidžiantys šviesą į šonus (maksimumas ties 75–85° nuo optinės ašies). Šviesos diodo spinduliuotė buvo nukreipta į du identiškus fotodiodus. Buvo matuojamos elektrinio bei optinio triukšmų charakteristikos ir koreliacijos koeficientas tarp elektrinio ir optinio bei tarp dviejų optinių triukšmų, išmatuotų dviejuose fotodioduose, apšviestuose tiriamojo ŠD. Tirtų šoninės spinduliuotės šviesos diodų, kaip ir anksčiau aptartų su Lamberto tipo spinduliuotės kryptingumo diagrama, charakteristikose vyrauja $1/f$ pobūdžio elektrinis triukšmas. Optinio triukšmo spektre $1/f$ triukšmo sandą aukštame dažnyje (virš 1 kHz) nustelbia šratinis triukšmas. Koreliacijos koeficientas tarp dviejų optinių signalų buvo išmatuotas kiekvienoje dažnio oktavoje 4.6 pav. Artimas 100% koreliacijos koeficientas parodo, kad



4.6 pav. Koreliacijos koeficiento tarp dviejų optinių signalų, matuotų priešingose šviesos diodo spinduliuotės kryptinės diagramos pusėse, priklausomybė nuo dažnio tekant skirtingai srovei.

skirtingais fotodiodais užregistruota šviesa sugeneruojama toje pačioje vietoje, ir lęšiukas neįtakoja šviesos diodo triukšmų charakteristikų.

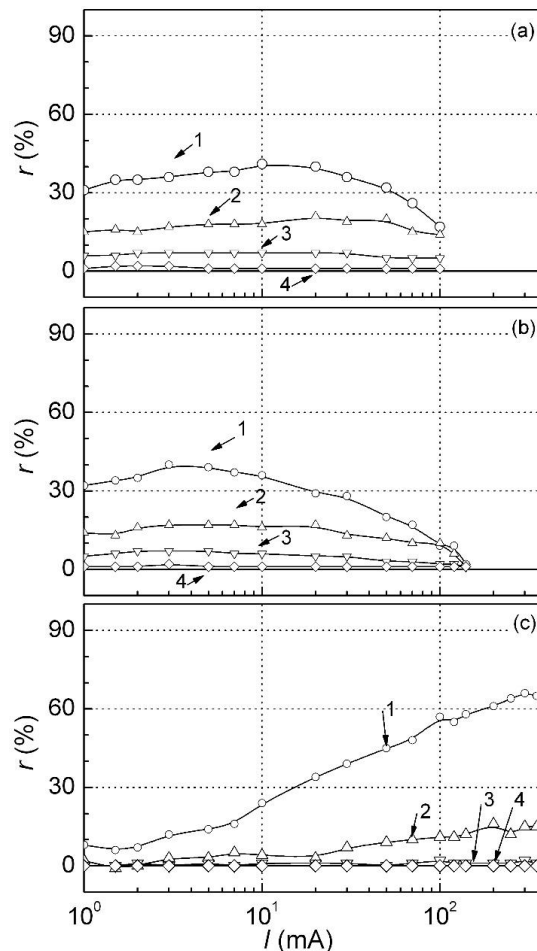
Trečioje šio paragrafo dalyje aptariama fosforo sluoksnio įtaka baltos šviesos diodų triukšmų charakteristikoms. Tam, kad atskirti mėlyną šviesą, sklindančią iš aktyviosios srities, bei geltoną, gautą fosforo sluoksnyje, naudojama fotodiodų matrica sudaryta iš trijų fotodiodų, jautrių skirtingoms matomos šviesos spektro sritims: mėlynai (maksimumas ties 460 nm), žaliai (maksimumas ties 540 nm) ir raudonai (maksimumas ties 620 nm). Tirtu šviesos diodo elektrinio triukšmo spektre vyrauja $1/f^\alpha$ triukšmas 4.7 (a) pav. Tiek mėlynos tiek raudonos šviesos sandų optinių triukšmų spektruose aukštame dažnyje vyrauja baltas triukšmas, o žemame dažnyje $1/f^\alpha$ fliktuacijos (4.7 (b), (c) pav.).



4.7 pav. Elektrinio (a) ir optinio ((b) – matuota su mėlynai šviesai jautriu fotodetektoriumi, (c) – matuota su raudonai šviesai jautriu fotodetektoriumi) triukšmų spektrai tekant skirtingai srovei.

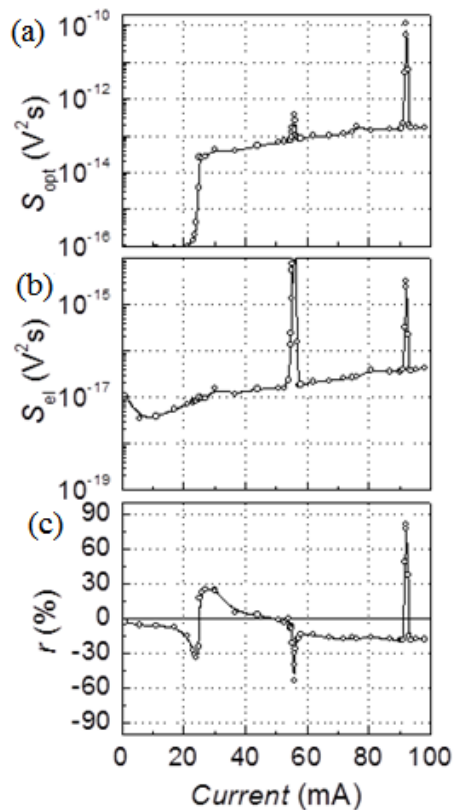
Koreliacijos koeficiento dažnio oktavose tarp elektrinio ir optinių triukšmų bei dviejų optinių triukšmų, išmatuotų su mėlynai bei raudonai šviesai jautriais fotodetektoriais, priklausomybės nuo srovės stiprio pavaizduotos 4.8 pav. Matome, kad stipriau koreliuotas ($r \approx 30\%$) triukšmas yra labai žemame dažnyje (10 – 20 Hz): tiek elektrinio triukšmo koreliacija su abiem optiniais, tiek koreliacija tarp dviejų optinių triukšmo signalų. Tik $1/f^\alpha$ pobūdžio elektrinės ir optinės fliktuacijos yra koreliuotos. Dalinė koreliacija tarp elektrinio ir optinio triukšmų žemame dažnyje parodo, kad ne visa srovė teka per šviesos diodo aktyviają sritį: dalis jos teka per periferinius sluoksnius ir nedalyvauja šviesos emisijoje. Panašios koreliacijos koeficientų vertės tarp elektrinio bei optinių triukšmų ir didelė koreliacija tarp optinių triukšmų parodo, kad fosforo sluoksnis neturi ženklios įtakos $1/f^\alpha$ triukšmams – šio triukšmo šaltinis turėtų būti aktyviojoje

šviesos diodo srityje.



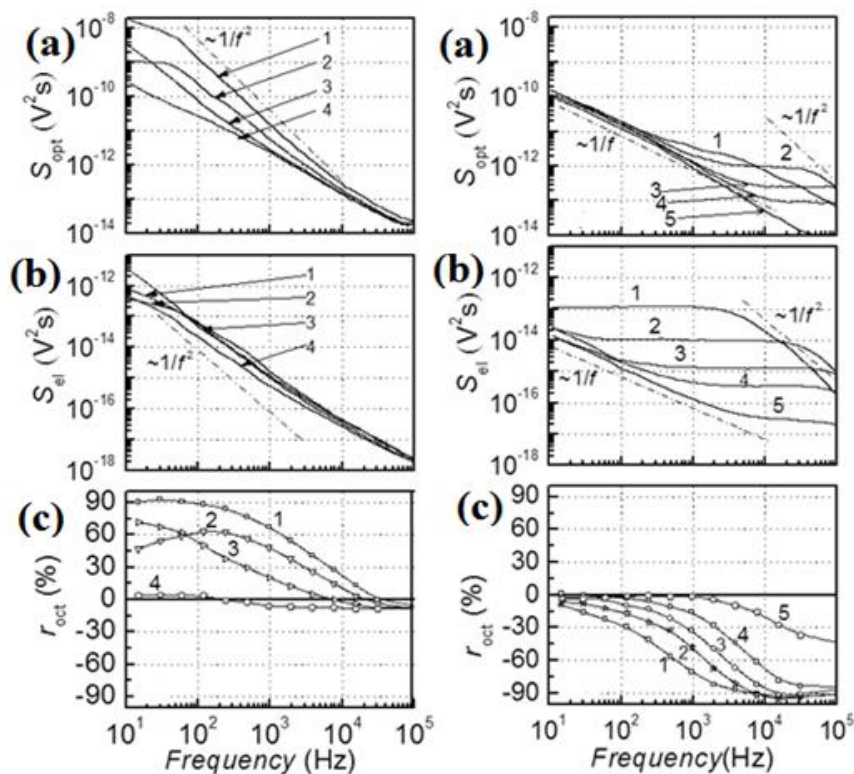
4.8 pav. Koreliacijos koeficiento, matuoto skirtingose dažnio oktavose (1 – (10 - 20) Hz, 2 – (80 - 160) Hz), 3 – (0,64 – 1,28) kHz, 4 – (10,24 – 20,48) kHz) priklausomybė nuo srovės stiprio: (a) tarp elektrinio ir optinio signalo, matuoto mėlynai šviesai jautriu fotodetektoriumi, (b) - tarp elektrinio ir optinio signalo, matuoto raudonai šviesai jautriu fotodetektoriumi; (c) tarp dviejų optinių signalų, matuotų mėlynai ir raudonai šviesai jautriais fotodetektoriais.

Ketvirtoje šio paragrafo dalyje palyginamos lazerinio diodo ir šviesos diodo triukšmų charakteristikos [S2]. Tirtas InGaAsP/InP Fabry-Perot daugiamodis lazerinis diodas su kvantinėmis duobėmis, spinduliuojantis 1,33 μm spinduliuotę. Triukšmų charakteristikos, esant stabiliai lazerinio diodo veikai, yra panašios į šviesos diodo: tiek elektriniame, tiek optiniame triukšme vyrauja $1/f^\alpha$ sandas. Esant tam tikroms lazerinio diodo veikimo sąlygoms stipriai padidėja koreliuoto elektrinio ir optinio triukšmų lygis (4.9 pav.). Šios smailės atsiranda dėl lazeriniuose dioduose pasireiškiančių modų šuolių ir priklauso nuo srovės stiprio bei temperatūros. Modų šuolių reiškinys vyksta, kai kintant lazerio temperatūrai ar srovei keičiasi spinduliuojamų modų bangos ilgis.



4.9 pav. Optinio (a) ir elektrinio (b) triukšmų spektrinio tankio ($f = 10$ kHz) ir koreliacijos koeficiento (c) (dažnio srityje nuo 10 Hz iki 20 kHz) priklausomybė nuo srovės stiprio.

Vykstant modų šuoliams pasikeičia ir optinio bei elektrinio triukšmų spektro pobūdis – atsiranda Lorencio tipo triukšmas su skirtingomis ribinio dažnio vertėmis (4.10 pav.). Skirtingas koreliacijos ženklas bei skirtingos ribinio dažnio vertės rodo, kad modų šuolių metu lazeriniuose dioduose vyksta keli skirtingi procesai, sąlygojantys elektrinio bei optinio triukšmo lygio padidėjimą. 4.10 (c) pav. pateikta koreliacijos koeficiento tarp elektrinio ir optinio triukšmų priklausomybė nuo dažnio. Stipriausia koreliacija tarp elektrinio bei optinio triukšmų stebima ties Lorencio tipo triukšmo spektro ribinio dažnio vertėmis. Toks Lorencio tipo triukšmų spektras yra būdingas generaciniam – rekombinaciniam procesui ir atsiranda dėl krūvininkų pagavimo ir išlaisvinimo proceso pagavimo centruose, atsiradusiuose dėl defektų lazerinio diodo struktūroje. Aukštas ($30\% < k < 90\%$) koreliacijos koeficientas rodo, kad šie centrai yra aktyviojoje lazerinio diodo srityje.

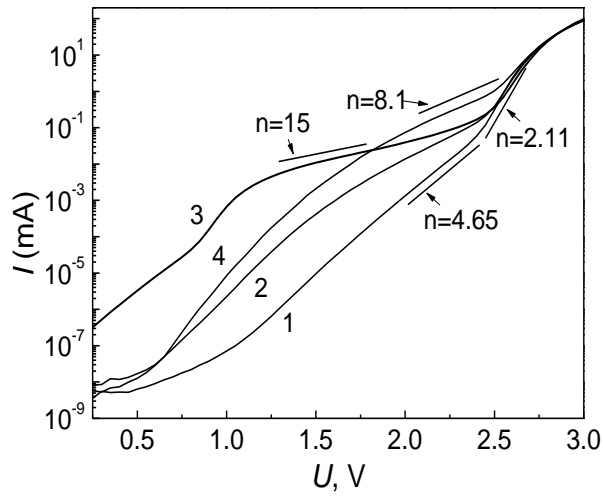


4.10 pav. Optinio (a) ir elektrinio (b) triukšmų spektrai ir koreliacijos koeficiento priklausomybė nuo oktavos centrinio dažnio (c) vykstant modų šuoliams esant skirtingoms srovės stiprio ir temperatūros vėrtėms: kairėje (1- 96,5 mA, 291,3 K, 2- 91,3 mA, 292,3 K, 3- 88,2 mA, 293,3 K, 4- 85,8 mA, 294,0 K) dešinėje (1- 61,1 mA, 288,8 K, 2- 54,4 mA, 291,0 K, 3- 50,70 mA, 291,5 K, 4- 49,3 mA, 292,3 K, 5- 43,1 mA, 293,3 K)

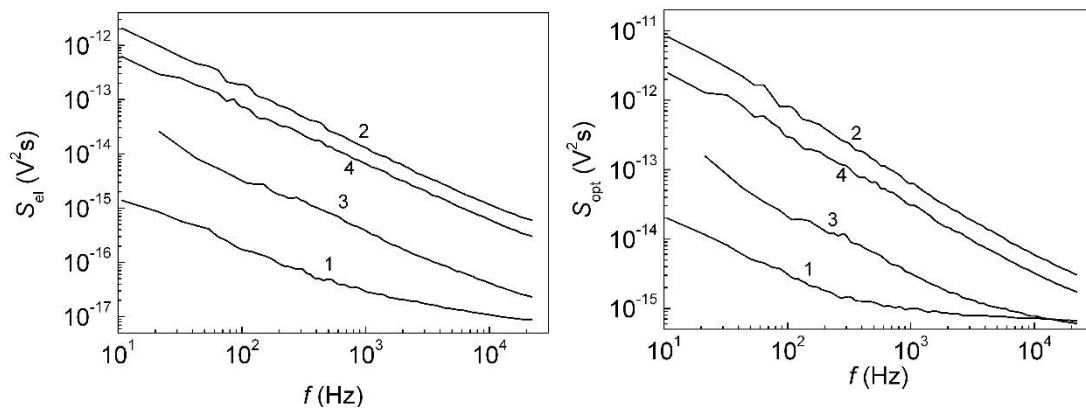
Šviesos diodų patikimumo ir kokybės tyrimas nagrinėjant jų triukšmų charakteristikas

Pirmojoje šio paragrafo dalyje nagrinėjamas šviesos diodų nuotėkio srovės bei triukšmų charakteristikų sąryšis [S1]. Buvo ištirta vienodų InGaN mėlynos šviesos diodų grupė, analizuojant jų voltamperines bei triukšmų charakteristikas. Voltamperinės charakteristikos buvo matuojamos ne tik srityje, kai ŠD spinduliuoja šviesą, bet ir tekant labai mažai srovei (4.11 pav.). Visame matuotos srovės stiprio diapazone pirmasis bandinys (1 kreivė 4.11 pav.) pasižymi mažiausia nuotėkio srove. Kadangi nuotėkio srovės stipris priklauso nuo šviesos diodo defektiškumo, tai pirmasis bandinys turėtų turėti ir mažiausią triukšmų lygį, lyginant su kitais bandiniais. Tai patvirtina elektrinio bei optinio triukšmų spektrai (4.12 pav.). Šis bandinys pasižymi mažu $1/f$ optiniu

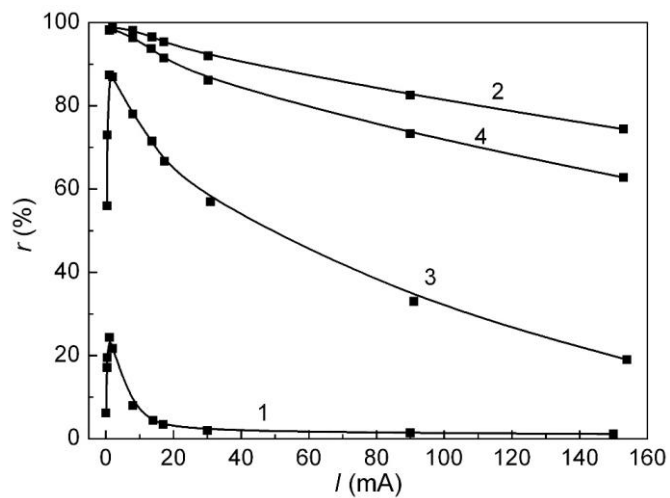
triukšmu, kurį aukštesniame dažnyje nustelbia „baltas“ triukšmas. Kitiems bandiniams optinio triukšmo spektre vyrauja $1/f$ triukšmas visame matuoto dažnio diapazone.



4.11 pav. Tirtų šviesos diodų voltamperinės charakteristikos.



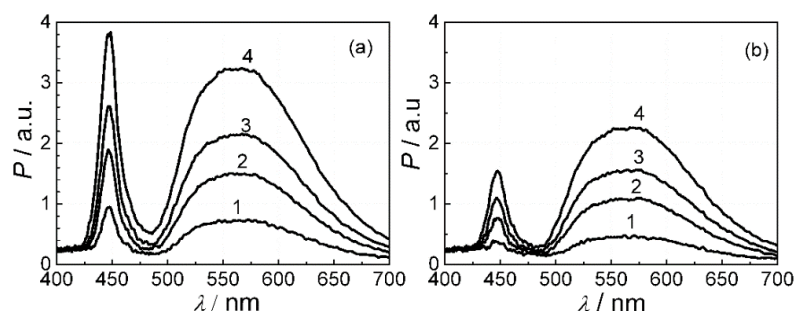
4.12 pav. Tirtų šviesos diodų elektrinio (kairėje) ir optinio (dešinėje) triukšmų spektrai ($I=8$ mA).



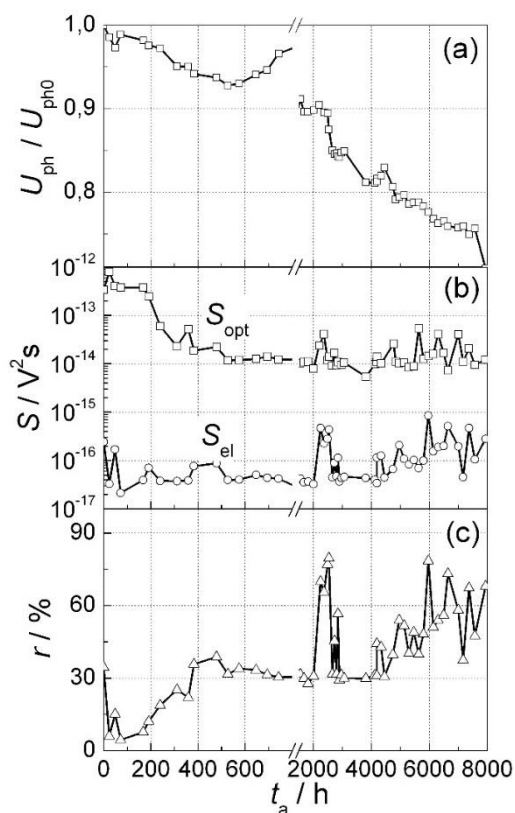
4.13 pav. Tirtų šviesos diodų koreliacijos koeficiento tarp elektrinio bei optinio triukšmų priklausomybė nuo srovės stiprio.

Pirmojo bandinio elektrinio triukšmo spektre taip pat aukštame dažnyje vyrauja „baltas“ triukšmas. Nors antrojo bandinio nuotėkio srovė ir mažesnė už trečiojo ir ketvirtojo bandinių, bet elektrinio ir optinio triukšmų lygis yra didžiausias. Taip galėjo nutikti dėl to, kad voltamperinės charakteristikos ir triukšmų matavimai buvo atliekami ne vienu metu – galėjo pakisti defektų tankis. Didelį defektų kiekį aktyviojoje srityje parodo ir didelė koreliacija tarp elektrinio ir optinio triukšmų (2 kreivė 4.13 pav.).

Antroje šio paragrafo dalyje aptariama šviesos diodo degradacija atliekant ilgalaikį paspartintą sendinimą. Tirtas AlInGaN baltos šviesos diodas buvo sendinamas kambario



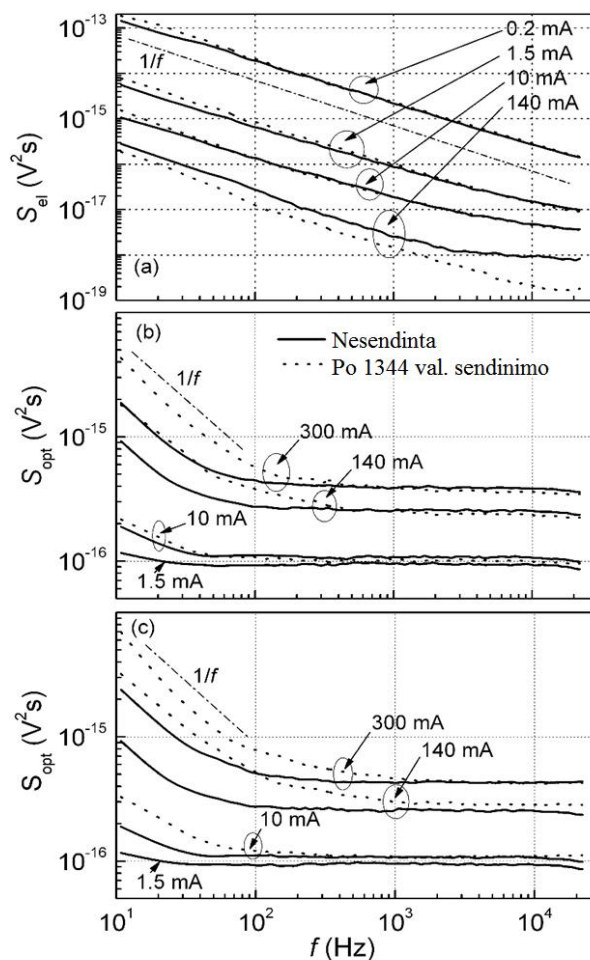
4.14 pav. Baltos šviesos diodo optiniai spektrai tekant skirtingai srovei: 1- 20.9 mA, 2- 55.5 mA, 3- 86.4 mA, 4-141.3 mA, (a) – prieš sendinimą (b) - po 8000 val. sendinimo;



4.15 pav. Normuotos optinės galios (a); elektrinio bei optinio triukšmų spektrinio tankio ties 280 Hz (b); bei koreliacijos koeficiento (c) priklausomybės nuo sendinimo trukmės ($I = 30$ mA).

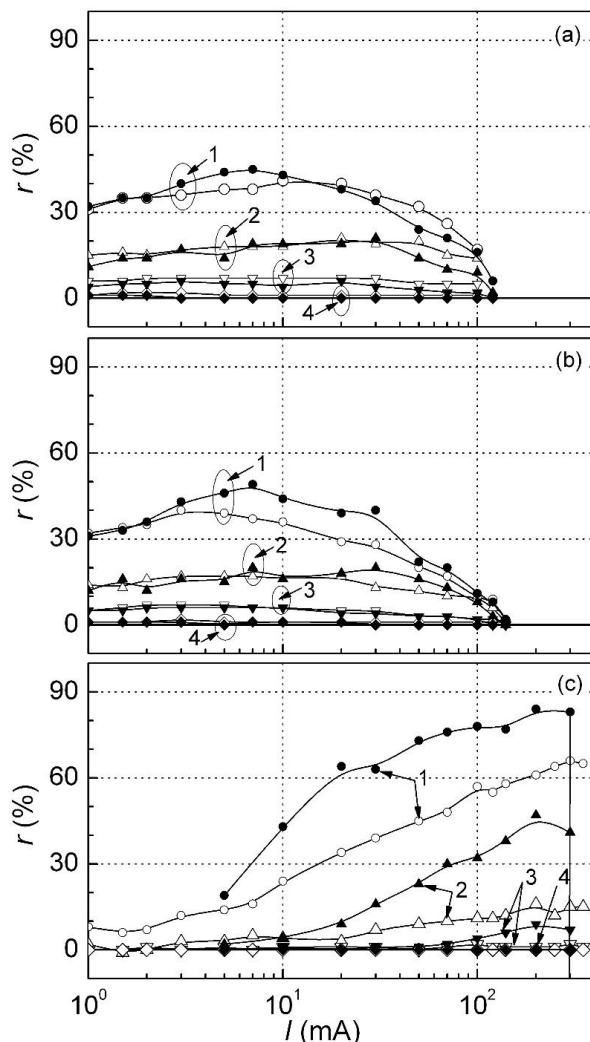
temperatūroje leidžiant 1 A srovę. Tirtos šviesos diodo spinduliuotės spektrai prieš ir po sendinimo pavaizduoti 4.14 pav. Po sendinimo mėlynos spalvos smailė sumažėjo daugiau kaip 2 kartus, o geltonos spalvos dalis sumažėjo tik apie 30%. Optinės spinduliuotės galia mažėjo viso sendinimo metu (4.15 pav.). Tam tikrame sendinimo intervale (2010 – 2500 val.) pasireiškia spartesnė šviesos diodo degradacija: stebimas suintensyvėjęs labai koreliuotas $1/f$ pobūdžio elektrinis ir optinis triukšmas bei staigus spinduliuotės galios mažėjimas. Tai parodo, kad aktyviajame sluoksnyje atsiranda mikrodefektai. Šviesos diodas degraduoja dėl paspartinto sendinimo metu aktyviojoje srityje susiformavusių defektų migracijos. Šviesos diodo staigi degradacija įvyksta, kai pasiekiamas tam tikras ribinis defektų tankis. Šie defektai formuoja nuotėkio mikrokanalus, padidina nespinduliuojamosios rekombinacijos bei fotonų absorbcijos centrų tankį.

Trečioje šio paragrafo dalyje aptariama fosforo sluoksnio įtaka baltos šviesos diodo degradacijai. Buvo tiriami baltos šviesos diodai, panaudojant fotodiodų matricą, prieš atliekant paspartintą sendinimą ir po 1344 valandų sendinimo. Voltamperinė charakteristika bei šviesos intensyvumo priklausomybė nuo srovės stiprio po sendinimo pasikeitė nežymiai. Elektrinio ir optinio triukšmų spektro pobūdis išliko nepakitęs (4.16 pav.), tik $1/f^\alpha$ sando intensyvumas, tekant didelei srovei, pasikeitė: elektrinis



4.16 pav. Elektrinio (a) ir optinio (matuota su mėlynai (b) ir raudonai (c) šviesai jautriu fotodetektoriumi) triukšmų spektrai esant skirtingai srovei (išsines kreivės – prieš sendinimą, punktyrinės – po 1344 val. sendinimo).

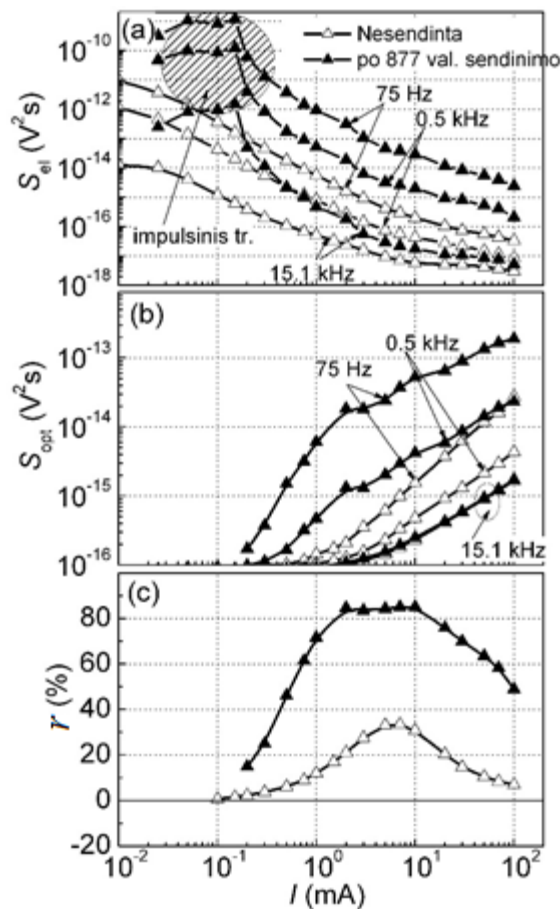
sumažėjo, o optinis padidėjo. Tai rodo, kad periferiniuose sluoksniuose kai kurie defektai išnyko, bet jų padaugėjo aktyviojoje srityje arba fosforo sluoksnyje. Po sendinimo koreliacijos koeficientas tarp elektrinio bei optinių triukšmų mažai pakito (4.17 pav.). Bet koreliacijos koeficientas tarp dviejų optinių triukšmų žemame dažnyje



4.17 pav. Koreliacijos koeficiento (matuoto dažnio oktavose: 1 – (10 - 20) Hz, 2 – (80 - 160) Hz), 3 – (0.64 – 1.28) kHz, 4 – (10.24 – 20.48) kHz) priklausomybė nuo srovės stiprio prieš sendinimą (neužpildyti simboliai) ir po 1344 val. sendinimo (užpildyti simboliai): (a) tarp elektrinio ir optinio signalo matuoto su mėlynai šviesai jautriu fotodetektoriu, (b) - tarp elektrinio ir optinio signalo matuoto su raudonai šviesai jautriu fotodetektoriu; (c) tarp dviejų optinių signalų matuotų su mėlynai ir raudonai šviesai jautriais fotodetektoriais.

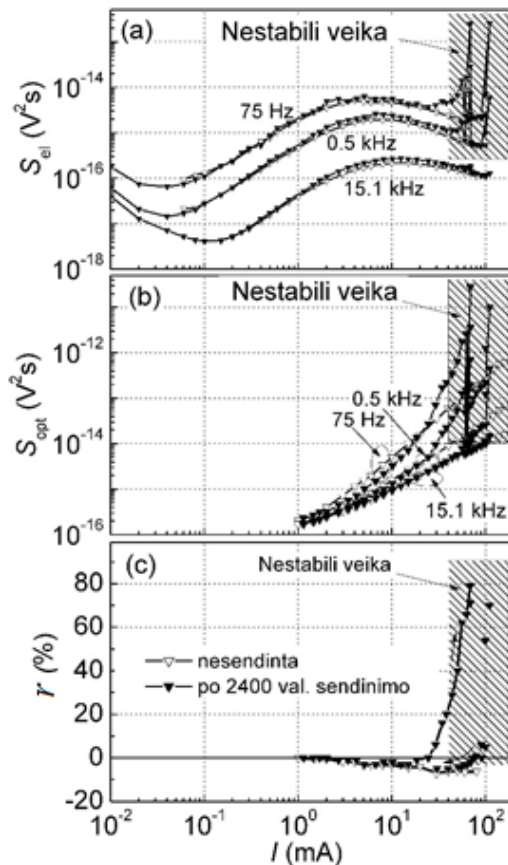
padidėjo dėl pakitusio $1/f^\alpha$ optinio triukšmo lygio. Panašios koreliacijos koeficiento vertės tarp elektrinio ir optinių triukšmų bei labai koreliuoti abu optiniai triukšmai parodo, kad fosforo sluoksnis neturi įtakos $1/f^\alpha$ pobūdžio optiniams triukšmams – šio triukšmo šaltinis yra aktyviojoje šviesos diodo srityje.

Ketvirtoje šio paragrafo dalyje aptariamos šviesos diodų su nitridiniais (mėlynos šviesos) bei fosfidiniais (raudonos šviesos) sluoksniais degradacijos priežastys [S4]. Mėlynos šviesos diodo $1/f^\alpha$ pobūdžio elektrinis ir optinis triukšmai žemame dažnyje ženkliai padidėja po sendinimo (4.18 pav.): po 877 val. sendinimo elektrinis triukšmas padidėja 2 – 3 eilėmis, o optinis – 1 – 2 eilėmis. Taip pat po sendinimo elektriniame triukšme stebimas impulsinis triukšmas tekant mažai srovei (4.18 pav. (a)). Manoma, kad vykstant sendinimui šviesos diodo struktūroje atsirado makrodefektai.



4.18 pav. Mėlynos šviesos diodo elektrinio (a) ir optinio (b) triukšmų spektrinių tankių skirtingame dažnyje ir koreliacijos koeficiento (c) (dažnyje nuo 10 Hz iki 20 kHz) priklausomybė nuo srovės stiprio prieš sendinimą (tuščiaviduriai simboliai) ir po 877 val. sendinimo (pilnaviduriai simboliai).

Mažos srovės diapazone srovė teka per defektų suformuotus kanalus. Didėjant srovės stipriui srovė pradeda tekėti per visą skerspjūvio plotą ir defektų įtaka sumažėja. Tirtas raudonos šviesos diodas prieš sendinimą pasižymėjo pakankamai intensyviu elektriniu triukšmu tekant srovei didesnei už 1 mA (4.19 pav.). Jis buvo silpnai neigiamai ($r \approx -$



4.19 pav. Raudonos šviesos diodo elektrinio (a) ir optinio (b) triukšmų spektrinio tankio (dažnis: 75 Hz, 0,5 kHz, ir 15,1 kHz) ir koreliacijos koeficiento (c) (dažnio diapazone nuo 10 Hz iki 20 kHz) priklausomybė nuo srovės sturio prieš sendinimą bei po 2400 val. sendinimo.

7%) koreliuotas su optiniu triukšmu. Po 2400 val. paspartinto sendinimo šviesos diodo veika pasidarė nestabili. Tekant srovei didesnei nei 20 mA, ženkliai išaugo elektrinio ir optinio triukšmų $1/f^\alpha$ sando intensyvumas bei teigiamas koreliacijos koeficientas. $1/f^\alpha$ pobūdžio fliuktuacijos (kur α yra artimas 2) yra nestabilios dėl ŠD struktūroje atsiradusių nestabilių defektų. Didelė koreliacija tarp elektrinio ir optinio triukšmų parodo, kad šie defektai yra aktyviojoje srityje.

Šviesos diodų triukšmų charakteristikų modeliavimas ir analizė

Pirmoje šio paragrafo dalyje apžvelgiamas šviesos diodų triukšmų charakteristikų modeliavimo ir analizės principas [S5, S6]. Šviesos diodo elektrinės ir optinės

fliktuacijos gali būti išreiškiamos kaip atskirų nepriklausomų $1/f$, $1/f^\alpha$, Lorencio tipo ir šratinio triukšmų spektrų suma:

$$S_{\text{el sum}}(f) = \frac{A_{\text{el}1/f}}{f} + \frac{A_{\text{el}1/f^\alpha}}{f^\alpha} + \frac{A_{\text{el gr}}\tau}{1+(2\pi f\tau)^2} + S_{\text{el shot}}; \quad (4.1)$$

$$S_{\text{ph sum}}(f) = \frac{A_{\text{ph}1/f}}{f} + \frac{A_{\text{ph}1/f^\alpha}}{f^\alpha} + \frac{A_{\text{ph gr}}\tau}{1+(2\pi f\tau)^2} + S_{\text{ph shot}}; \quad (4.2)$$

kur A_j apibūdina kiekvieno triukšmų sando intensyvumą. Eksperimento metu koreliacijos koeficientas buvo apskaičiuojamas pagal formulę:

$$r = \langle u_{\text{el total}}(t) \cdot u_{\text{ph total}}(t) \rangle / (\sigma_{\text{el total}}^2 \cdot \sigma_{\text{ph total}}^2)^{1/2}; \quad (4.3)$$

čia skliausiai $\langle \dots \rangle$ reiškia vidurkinimą pagal laiką ir realizacijų skaičių, o $\sigma_{\text{el total}}^2 = \langle u_{\text{el total}}^2(t) \rangle$, $\sigma_{\text{ph total}}^2 = \langle u_{\text{ph total}}^2(t) \rangle$ yra elektrinių ir optinių fliktuacijų suminės dispersijos. Kadangi ne visa elektrinio triukšmo dalis koreliuoja su optiniu triukšmu, tai suminių spektrą galima užrašyti kaip koreliuotos ir nekoreliuotos dalių sumą:

$$S_{\text{el } j}(f) = S_{\text{el } j \text{ cor}}(f) + S_{\text{el } j \text{ uncor}}(f) = d_j S_{\text{el } j}(f) + (1 - d_j) S_{\text{el } j}(f); \quad (4.4)$$

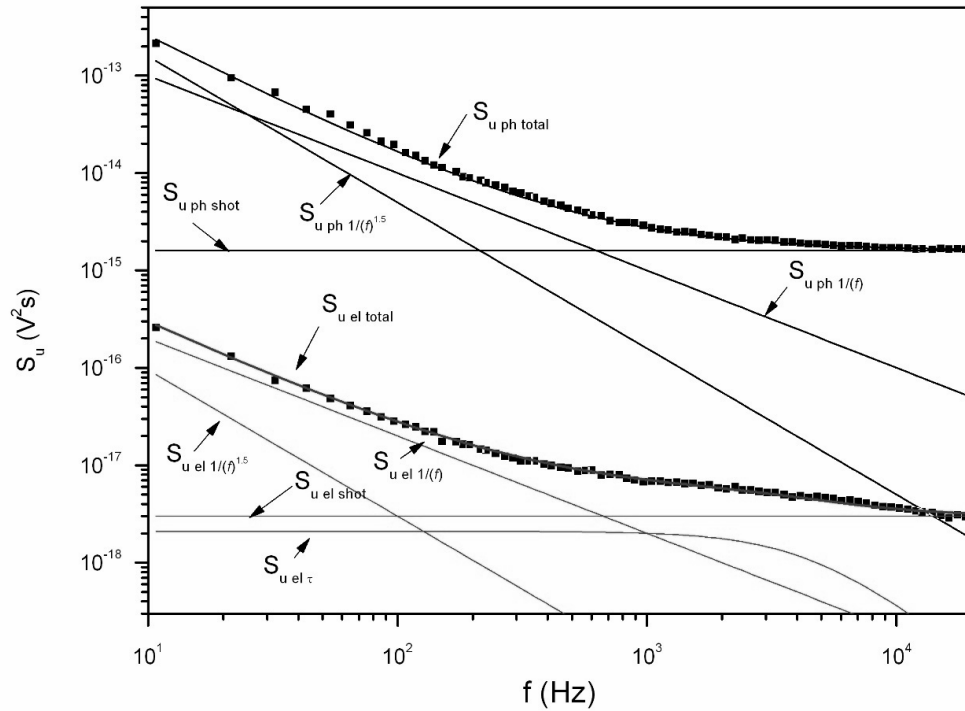
kur dydis d_j parodo, kuri elektrinio triukšmo spektro $S_{\text{el } j}(f)$ dalis yra koreliuota su optiniu triukšmu; $j = 1 - 1/f$ triukšmui, $j = 2 - 1/f^\alpha$ triukšmui, ir $j = 3 -$ Lorencio tipo fliktuacijoms.

Koreliacijos koeficientas kiekvienoje dažnio oktavoje gali būti užrašomas:

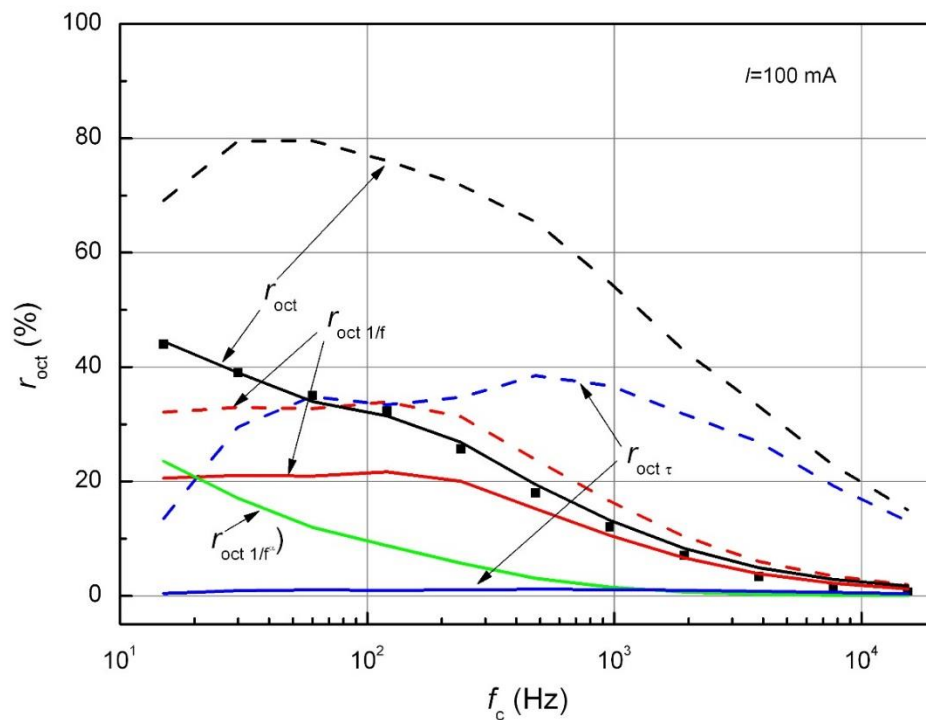
$$r_{\text{oct}} = \left[\sum_{j=1}^3 (d_j \sigma_{\text{el } j \text{ oct}}^2 \cdot \sigma_{\text{ph } j \text{ oct}}^2)^{1/2} \right] / (\sigma_{\text{el total oct}}^2 \cdot \sigma_{\text{ph total oct}}^2)^{1/2}. \quad (4.5)$$

Šis būdas leidžia įvertinti koreliacijos koeficiento dažninį pasiskirstymą ir $1/f$ bei Lorencio tipo triukšmų įtaką koreliacijos koeficientui.

Antroje šio paragrafo dalyje pateikiama detali mėlynos šviesos diodo triukšmų analizė. Išmatuotų elektrinio ir optinio triukšmų spektrai išskaidyti į atskirus sandus panaudojant (4.1) ir (4.2) formules pateikti 4.20 pav. Optinio triukšmo spektre žemame dažnyje vyrauja $1/f$ ir $1/f^{1.5}$, o aukštesniame šratinis triukšmas. Elektrinio triukšmo spektre be anksčiau jau minėtų sandų yra ir generacinis – rekombinacinis triukšmas. Kadangi tarpusavyje gali koreliuoti tik fliktuacijos, turinčios tokio paties pobūdžio spektrą, tai galima apskaičiuoti koreliacijos koeficientą kiekvienam spektro sandui. Koreliacijos koeficiento priklausomybė nuo dažnio bei $1/f$, $1/f^{1.5}$ ir Lorencio tipo triukšmo sandų įtaka koreliacijos koeficientui pateikta 4.21 pav. Koeficientai d_j buvo



4.20 pav. Šviesos diodo elektrinio ir optinio triukšmų spektrų išskaidymas į atskirus sandus (taškai – išmatuotos vertės; ištisinės linijos – aproksimacijos; $I=100$ mA).



4.21 pav. Koreliacijos koeficiento priklausomybė nuo dažnio ($I=100$ mA). Taškai – išmatuotos vertės; stora ištisinė linija – apskaičiuota pagal (4.5) su $d_1=0,64$, $d_2=1$, $d_3=0,03$; plonos ištisinės linijos $1/f$, $1/f^{1,5}$ ir Lorencio tipo fliuktuacijų įnašas į bendrą koreliacijos koeficientą; punktyrinės linijos vaizduoja atvejį, jeigu $1/f$, $1/f^{1,5}$ ir Lorencio tipo elektrinis bei optinis triukšmai būtų pilnai koreliuoti.

gauti išmatuotus rezultatus lyginant su apskaičiuotais pagal (4.5) formulę. Matome, kad žemame dažnyje vyrauja abu $1/f$ ir $1/f^{1.5}$, o aukštesniame dažnyje - tik $1/f$ triukšmo sandai. Lorencio tipo triukšmo sandas yra pastebimas tik elektrinio triukšmo spektre (4.20 pav.), ir jis silpnai koreliuoja su to paties tipo optiniu triukšmu. $1/f^{1.5}$ pobūdžio elektrinis ir optinis triukšmai yra pilnai koreliuoti ($d_2=1$) – šio triukšmo šaltinis yra aktyviojoje šviesos diodo srityje. Aukštesniame dažnyje koreliacijos koeficientas sumažėja, nes padidėja nekoreliuoto triukšmo įtaka.

5 Išvados

Šviesos diodų su nitridiniais bei fosfidiniais sluoksniais triukšmų charakteristikos yra panašios. Ištyrus šoninės spinduliuotės šviesos diodus nustatyta, kad optinių triukšmų šaltinis yra aktyviojoje srityje ir lęšiukas neturi įtakos šviesos diodo triukšmų charakteristikoms. Ištyrus baltos šviesos diodus panaudojant fotodiodų matricą sudarytą iš fotoelementų jautrių skirtingai bangos ilgio spinduliuotei, nustatyta, kad fosforo sluoksnis neturi įtakos baltos šviesos diodo triukšmų charakteristikoms. Palyginus šviesos ir lazerinių diodų triukšmų charakteristikas, nustatyta, kad esant stabiliai pastarųjų veikai, triukšmų charakteristikos yra panašios į šviesos diodų. Tačiau esant tam tikroms veikimo sąlygoms lazeriniuose dioduose vyksta modų šuoliai, kurių metu stebimi Lorencio tipo elektrinis bei optinis triukšmai. Šie triukšmai atsiranda dėl generacinių – rekombinacinių procesų aktyviojoje srityje.

Ilgalaikio paspartinto sendinimo metu nustatyta, kad pradiniam sendinimo etape bandinio charakteristikos pagerėjo – nestabilūs defektai aktyviojoje srityje perėjo į stabilias būsenas. Atliekant paspartintą ŠD sendinimą iki 2000 val. šviesos diodas lėtai ir tolygiai degradavo, o po to prasidėjo sparti jo degradacija. Stipriai koreliuoti mėlynos ir raudonos spektro dalies optiniai triukšmai parodė, kad baltos šviesos diodo degradacija po sendinimo įvyko ne fosforo sluoksnyje, o aktyviojoje srityje. Atliekant šviesos diodų su nitridiniais ir fosfidiniais sluoksniais sendinimą, nustatyta, kad šiuose dioduose vyksta panašūs degradacijos procesai.

Pateikta metodika, leidžianti eksperimentiškai išmatuoti triukšmo spektrą išskaidyti į skirtingo pobūdžio spektro sandus. Toks išskaidymas padeda perskaičiuoti išmatuotą koreliacijos koeficientą atsižvelgiant tik į sandus, kurie gali būti tarpusavyje

koreliuoti ir tiksliau nustatyti triukšmų šaltinius. Taip pat naudojant šią metodiką galima įvertinti kiekvieno sando įtaką koreliacijos koeficientui. Antroje paragrafo dalyje buvo pritaikyta minėta metodika vieno iš tirtų šviesos diodo triukšmų charakteristikų modeliavimui ir analizei. Atlikta analizė parodė, kad nors ir $1/f$ elektrinis ir optinis triukšmai yra ne visiškai koreliuoti, bet jų įtaka bendram koreliacijos koeficientui yra didžiausia. $1/f^{1.5}$ pobūdžio elektrinis ir optinis triukšmai yra pilnai koreliuoti ir jų įtaka bendram koreliacijos koeficientui yra ženkliai žemesnė.

LITERATŪRA

- [1] M. R. Krames, H. Amano, J. J. Brown, P. L. Heremans, Introduction to the issue on high-efficiency light-emitting diodes, Special issue of IEEE Journal. Selected Topics in Quantum Electronics 8, 185-188, (2002), <http://dx.doi.org/10.1109/2944.999171>
- [2] E. F. Schubert, *Light-Emitting Diodes* (Cambridge University Press, 2nd edition, 2006). 978-0521865388
- [3] S. Nakamura, G. Fasol, *The blue laser diode, GaN Based Light Emitters and Lasers* (Springer, Berlin, 1997), <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-03462-0>
- [4] L. K. J. Vandamme, Noise as a Diagnostic Tool for Quality and Reliability of Electronic Devices”, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 41. No 11, (1994), <http://dx.doi.org/10.1109/16.333839>
- [5] Brian K. Jones, Low-Frequency Noise spectroscopy, IEEE Transactions on Electronic Devices, Vol 41, No. 11. (1994), <http://dx.doi.org/10.1109/16.333840>
- [6] V. Palenskis, Flicker noise problem, Lith. Phys. J. 30(1) 107-152, (1990)

STRAIPSNIŲ SĄRAŠAS DISERTACIJOS TEMA

- S1. S. Pralgauskaitė, V. Palenskis, J. Matukas, J. Glemža, G. Muliuk, B. Šaulys, A. Trinkūnas, Reliability investigation of light-emitting diodes via low frequency noise characteristics, Microelectronics reliability. Vol. 55, No. 1. p. 52-61 (2015).
- S2. S. Pralgauskaitė, V. Palenskis, J. Matukas, B. Šaulys, V. Kornijčuk, V. Verdingovas, Analysis of mode-hopping effect in Fabry-Pérot multiple-quantum

- well laser diodes via low frequency noise investigation, *Solide-State Electronis*, V. 79, p. 104-110, DOI: 10.1016/j.sse.2012.07.021 (2013).
- S3. B. Šaulys, V. Kornijčuk, J. Matukas, V. Palenskis, S. Pralgauskaitė, K. Glemža, Optical and electrical noise characteristics of side emitting LEDs, *Acta Physica Polonica A*, V. 119, No. 2, p. 244-246 (2011).
- S4. B. Šaulys, J. Matukas, V. Palenskis, S. Pralgauskaitė, G. Kulikauskas, Light-Emitting Diode Degradation and Low-Frequency Noise Characteristics, *Acta Physica Polonica A*, V. 119, No. 4, p. 514-520 (2011).
- S5. V. Palenskis, J. Matukas, S. Pralgauskaitė, B. Šaulys, A detail analysis of electrical and optical fluctuations of green light-emitting diodes by correlation method, *Fluctuations and Noise Lett.* 9, No. 2, p. 179-192 (2010).
- S6. V. Palenskis, J. Matukas, B. Šaulys. A detailed analysis of electrical and optical fluctuations of light-emitting diodes by correlation method. *Lithuanian Journal of Physics/ Lithuanian Physical Society, Lithuanian Academy of Science*, vol. 49, no. 4 p. 453-460 (2009).

TRUMPA INFORMACIJA APIE DISERTACIJOS AUTORIŲ

2000 - 2004 m. studijavo Vilniaus universiteto Fizikos fakultete ir įgijo elektronikos inžinerijos mokslo bakalauro laipsnį.

2004 - 2005 m. studijavo Vilniaus universiteto Fizikos fakultete ir įgijo inžinieriaus profesinę kvalifikaciją.

2008 - 2013 m. studijavo Vilniaus universiteto Fizikos mokslo krypties doktorantūroje.

Kontaktams: bronius.saulys@gmail.com .