

VILNIAUS UNIVERSITETAS
FIZINIŲ IR TECHNOLOGIJOS MOKSLŲ CENTRO
PUSLAIDININKIŲ FIZIKOS INSTITUTAS

Jan Devenson

TRUMPABANGIAI InAs/AlSb KVANTINIAI KASKADINIAI LAZERIAI

Daktaro disertacijos santrauka
Fiziniai mokslai, fizika (02 P), puslaidininkų fizika (P 265)

Vilnius, 2010

Disertacija rengta 2005–2010 metais Pietiniame elektronikos institute (*IES* – Institut d'Electronique du Sud), Montpellier II universitete, Prancūzijoje bei Fizinių ir technologijos mokslų centro Puslaidininkių fizikos institute.

Disertacija ginama eksternu.

Moksliniai konsultantai:

habil. dr. Alexei Baranov (Nacionalinis mokslinių tyrimų centras / Universitetas Montpellier II, Prancūzija, Fiziniai mokslai, fizika – 02 P)

prof. dr. Gintaras Valušis (Fizinių ir technologijos mokslų centras, fiziniai mokslai, fizika – 02 P, puslaidininkių fizika – P 265)

Disertacija ginama Vilniaus universiteto Fizikos mokslų krypties taryboje:

Pirmininkas

prof. habil. dr. Saulius Antanas Juršėnas (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P, puslaidininkių fizika – P 265)

Nariai:

doc. dr. Irena Šimkienė (Fizinių ir technologijos mokslų centro Puslaidininkių fizikos institutas, fiziniai mokslai, fizika – 08 T, medžiagų technologija – T 150)

prof. habil. dr. Eugenijus Šatkovskis (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P, puslaidininkių fizika – P 265)

dr. Gediminas Račiukaitis (Fizinių ir technologijos mokslų centro Fizikos institutas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P, kondensuotos medžiagos – P 260)

dr. Irmantas Kašalynas (Fizinių ir technologijos mokslų centro Puslaidininkių fizikos institutas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P, puslaidininkių fizika – P 265)

Oponentai:

dr. Vincas Tamošiūnas (Fizinių ir technologijos mokslų centro Puslaidininkių fizikos institutas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P, matematinė ir bendroji teorinė fizika – P 190)

prof. habil. dr. Sigitas Tamulevičius (Kauno technologijos universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P, puslaidininkių fizika – P 265)

Disertacija bus ginama viešame Fizinių mokslų krypties tarybos posėdyje 2010 m. spalio 26 d. 14 val. Fizinių ir technologijos mokslų centro Puslaidininkių fizikos instituto posėdžių salėje
Adresas: Goštauto 11, LT–01108 Vilnius, Lietuva

Disertacijos santrauka išsiuntinėta 2010 m. rugsėjo 25 d.

Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus universiteto bei Fizinių ir technologijos mokslų centro Puslaidininkių fizikos instituto bibliotekose.

VILNIUS UNIVERSITY
SEMICONDUCTOR PHYSICS INSTITUTE OF
CENTER FOR PHYSICAL SCIENCES AND TECHNOLOGY

Jan Devenson

InAs/AlSb SHORT WAVELENGTH QUANTUM CASCADE LASERS

Summary of doctoral dissertation
Physical Sciences, Physics (02 P), Semiconductor Physics (P 265)

Vilnius, 2010

Doctoral dissertation was prepared in 2005–2010 at Southern Electronics Institute (*IES* – Institut d'Electronique du Sud), University Montpellier II, France and Semiconductor Physics Institute of Center For Physical Sciences And Technology, Vilnius, Lithuania.

Dissertation defended externally

Scientific consultants:

habil. dr. Alexei Baranov (CNRS / University Montpellier II, France, Physical Sciences, Physics – 02 P)

prof. habil. dr. Gintaras Valušis (Center For Physical Sciences and Technology, Physical Sciences, Physics – 02 P, Semiconductor Physics – P 265)

Council of defense of the Doctoral thesis of Physical Science at Vilnius University

Chairman:

prof. habil. dr. Saulius Antanas Juršėnas (Vilnius University, Physical Sciences, Physics – 02 P, Semiconductor Physics – P 265)

Members:

doc. dr. Irena Šimkienė (Semiconductor Physics Institute of Center For Physical Sciences And Technology, Technological Sciences, Materials Engineering – 08 T, Materials Technology – T 150)

prof. habil. dr. Eugenijus Šatkovskis (Vilnius Gediminas Technical University, Physical Sciences, Physics – 02 P, Semiconductor Physics – P 265)

dr. Gediminas Račiukaitis (Physics Institute of Center For Physical Sciences And Technology, Physical Sciences, Physics – 02 P, Solid State Physics – P 260)

dr. Irmantas Kašalynas (Semiconductor Physics Institute of Center For Physical Sciences And Technology, Physical Sciences, Physics – 02 P, Semiconductor Physics – P 265)

Opponents:

dr. Vincas Tamošiūnas (Semiconductor Physics Institute of Center For Physical Sciences And Technology, Physical Sciences, Physics – 02 P, Mathematical and Theoretical Physics – P 190)

prof. habil. dr. Sigitas Tamulevičius (Kaunas University of Technology, Physical Sciences, Physics – 02 P, Semiconductor Physics – P 265)

The official defense of the doctoral thesis will be held at 2.00 p.m. on October 26, 2010, in conference room of Semiconductor Physics Institute of Centre For Physical Sciences And Technology.

Address: Goštauto 11, LT–01108 Vilnius, Lietuva

Summary of the doctoral thesis has been distributed on September 25, 2010.

The doctoral thesis is available at Vilnius University Library and Library of Semiconductor Physics Institute of Centre For Physical Sciences And Technology.

Ivadas

Kvantiniai kaskadiniai lazeriai (*KK lazeriai* arba *KKL*) šiuo metu yra laikomi pagrindiniais šviesos šaltiniais infraraudonojoje cheminių junginių spektroskopijoje, srityje, kurioje bangos ilgis $\lambda > 4 \mu\text{m}$. Kai kuriems spektroskopiniams taikymams reikalingi injekciniai puslaidininkiniai lazeriai, emituojantys apie $3 \mu\text{m}$ bangos ilgio spinduliuotę. Šis spektro ruožas kambario temperatūroje yra pasiekiamas tiek tarpjuostiniams lazeriniams diodams, tiek KK lazeriams. Tačiau dėl nespindulinės Ožė (Auger) rekombinacijos, tarpjuostinių lazerinių diodų efektyvumas virš $3 \mu\text{m}$ bangos ilgio ribos sparčiai mažėja. A. Evans ir kt. [1,2] pademonstravo aukštos kokybės InP technologijos pagrindu veikiančius kvantinius kaskadinius lazerius, spinduliuojančius virš $3,8 \mu\text{m}$ bangos ilgio ribos, bet šios technologijos lazerių veikimo srities praplėtimas trumpesnių bangų link yra ginčytinas dėl panaudotos medžiagų sistemos savybių. Visgi, naudojant tinkamas medžiagas, gali būti sukurti didelio našumo kvantiniai kaskadiniai lazeriai, spinduliuojantys $3 \mu\text{m}$ ir trumpesnio ilgio bangas.

Maksimali elektroninių šuolių energija kvantiniuose kaskadiniuose lazeriuose yra apibrėžta barjero ir šulinio medžiagų laidumo juostų trūkio. Kitas parametras, svarbus trumpabangių kvantinių kaskadinių lazerių realizavimui, yra šulinio medžiagos šoninių slėnių X arba L laidumo juostos minimumo padėtis. Jei lygmenys, priklausantys šoniniams slėniams yra arti Γ slėnio lygmenų, elektronai gali būti pagaunami šoniniuose slėniuose. Tokiu būdu gali pablogėti užpildos apgraža ir, atitinkamai, lazerinio prietaiso našumas. InP suderintos gardelės konstantos medžiagų sistema, nuo kurios prasidėjo kvantinių kaskadinių lazerių era [3], turi santykinai mažą ($0,52 \text{ eV}$) laidumo juostos trūkį, todėl šie lazeriai aprėpia spektro sritį, prasidedančią nuo $\sim 4,5 \mu\text{m}$. Didžiulė pažanga, gerinant kvantinių kaskadinių lazerių našumą bei trumpabangę tarpjuostinės emisijos spektro ribą buvo pasiekta, naudojant sukompensuoto įtempio InP pagrindo medžiagas. Didinant In santykinę dalį šuliniuose ir Al koncentraciją barjeruose, tokiuose dariniuose yra įmanoma padidinti ir laidumo juostos trūkį, ir Γ -X tarpą. Šioje medžiagų sistemoje išgauta $3,5 \mu\text{m}$ bangos ilgio lazerinė emisija ilgą laiką buvo laikoma trumpabange kvantinių kaskadinių lazerių spinduliuotės riba [4]. Šios sistemos tinkamumas trumpesnių bangų sričiai gali būti pagerintas panaudojant AlInAs/AlAs kompozitinius barjerus. Tokiuose prietaisuose žemoje temperatūroje buvo pasiekta $3,05 \mu\text{m}$ bangos ilgio lazerinės emisijos riba [5]. Kitas būdas išgauti trumpesnių bangų spinduliuotę yra AlAsSb barjerų, suderintų su InP padėklo gardelės konstanta, panaudojimas. Šiuo atveju laidumo juostos trūkis yra pakankamai didelis, šulinio medžiaga išlieka tokia pati, kaip ir klasikinėje InP sistemoje, o Γ -X energijos tarpas yra mažas. Šios medžiagų sistemos kvantiniai kaskadiniai lazeriai, spinduliuojantys $3,05 \mu\text{m}$ bangos ilgio šviesą arti skistojo azoto temperatūroje buvo pademonstruoti [6].

InAs/AlSb medžiagų sistema dėl itin didelio ($2,1 \text{ eV}$) laidumo juostos trūkio ir didelio ($0,73 \text{ eV}$) Γ -L energijos tarpo InAs medžiagoje šiuo metu atrodo patraukliausia trumpabangių kvantinių kaskadinių lazerių kūrimui. Kitas InAs/AlSb sistemos privalumas yra maža elektrono efektinė masė InAs medžiagoje, o tai yra palanku, kuriant lazerius su dideliu šviesos stiprinimu ir žema slenkstine srove. Tačiau išlieka ir eilė neišspręstų problemų, panaudojant šią medžiagų sistemą. InAs ir AlSb medžiagos neturi bendrų atomų sandūrose, o tai apsunkina kvantinių kaskadinių darinių epitaksiją. Siauras

draustinės juostos tarpas InAs medžiagoje gali būti tarpjuostinės absorbcijos priežastis trumpesnėms bangoms. Taipogi nėra tiksliai žinoma L-slėnio minimumo pozicijos padėtis InAs medžiagoje. Tokiu būdu nėra aiški ir šios medžiagų sistemos trumpabangė riba. Šios disertacijos rengimo atraminiu tašku buvo Montpellier II universiteto Elektronikos ir mikro-optoelektronikos centre sukurtas InAs/AlSb medžiagų sistemos pagrindu veikiantis kvantinis kaskadinis lazeris, emituojantis kambario temperatūroje 4,5 μm bangos ilgio spinduliuotę [7]. Tai buvo pirmasis InAs/AlSb kvantinis kaskadinis lazeris, veikiantis kambario temperatūroje. Tačiau nors ši medžiagų sistema pasižymi aukščiau minėtais privalumais, sukurtų lazerių spinduliuotės intensyvumas buvo mažesnis, nei InP kvantiniuose kaskadiniuose lazeriuose. Šiame darbe aprašyti tyrimai ir sprendimai, kurie buvo taikomi tobulinant InAs/AlSb kvantinius kaskadinius lazerius ir jų technologiją. Darbo metu atlikti tyrimai leido sukurti didelio našumo trumpabangius ($\lambda < 4 \mu\text{m}$) InAs/AlSb kvantinius kaskadinius lazerius, veikiančius aukštoje ($> 400 \text{ K}$) temperatūroje, bei praplėsti trumpabangę tarppajuostinės spinduliuotės ribą iki 2,65 μm bangos ilgio vertės.

Darbo tikslas:

Sukurti didelio kvantinio našumo InAs/AlSb trumpabangį kvantinį kaskadinį lazerį.

Darbo uždaviniai:

1. Išplėtoti InAs/AlSb įvairialyčių darinių molekulinį pluoštelių epitaksijos ant InAs padėklų technologiją, leidžiančią auginti daugiasluoksnes kelių šimtų periodų ir kelių mikronų storio kvantines struktūras.
2. Ištirti InAs/AlSb medžiagų sistemos tinkamumą trumpabangių ($\lambda < 4 \mu\text{m}$) kvantinių kaskadinių lazerių kūrimui.
3. Ištirti trumpabangę InAs/AlSb įvairialyčių darinių tarppajuostinės emisijos ribą.
4. Sukurti naujo dizaino trumpabangį kvantinį kaskadinį lazerį, leidžiantį pasiekti didelį našumą.

Atliktų tyrimų naujumas ir aktualumas

Šio darbo rengimo pradžioje InAs/AlSb medžiagų sistema buvo laikoma nauja sistema tarppajuostinių puslaidininkinių prietaisų kūrimui. Pirmasis NANOMIR grupės sukurtas InAs/AlSb trumpabangis kvantinis kaskadinis lazeris, spinduliuojantis 4,5 μm bangos ilgio emisiją, liudijo apie šios medžiagos panaudojimo perspektyvas, kuriant kvantinius kaskadinius lazerius. Tačiau pirmųjų pagamintų lazerių našumas bei emisijos bangos ilgis ženkliai skyrėsi nuo teorinės ribos. Šiame darbe pristatomi atlikti tolimesni

tyrimai, įrodantys InAs/AlSb medžiagų sistemos tinkamumą didelio kvantinio našumo trumpabangių tarppajuostinių lazerių kūrimui.

Buvo išplėta molekulinė pluoštelė epitaksijos technologija, leidžianti auginti daugiaperiodines neįtemptas InAs/AlSb įvairialytes sandūras su mažu 1–2 atominių sluoksnių šurkštumu.

Atlikti stipriai legiruotos n^+ -InAs medžiagos optinių savybių tyrimai parodė, kad ši medžiaga yra tinkama naudoti InAs/AlSb kvantinių kaskadinių lazerių bangolaidžio plakiravimo sluoksnyje (angl. *cladding layer*), sukuriant efektyvų optinį ribojimą, ir tokiu būdu išvengiant tarpjuostinės absorbcijos, atsirandančios dėl siauros InAs draustinės juostos. Taikant plazmoninį bangolaidį su stipriai legiruotais InAs plakiravimo sluoksniais, pirmą kartą InAs/AlSb kvantinių kaskadinių lazerių emisijos bangos ilgis buvo pastumtas žemiau 4 μm ribos. Panaudojant plazmoninį bangolaidį, pagaminta eilė InAs/AlSb kvantinių kaskadinių lazerių, emituojančių 3,1–3,6 μm bangos ilgio spinduliuotę.

Silpnai legiruotų InAs tarpiklių pakeitimas mažojo periodo InAs/AlSb supergardelėmis InAs/AlSb kvantiniuose kaskadiniuose lazeriuose, pasiūlytas šiame darbe, turėjo didelę įtaką lazerių kvantiniam našumui. Pirmą kartą buvo pagaminti didelio našumo InAs/AlSb kvantiniai kaskadiniai lazeriai, spinduliuojantys žemiau 4 μm bangos ilgio ribos ir veikiantys temperatūroje virš 400 K. Šis pakeitimas leido pagaminti ir pirmąjį kvantinį kaskadinį lazerį, spinduliuojantį žemiau 3 μm bangos ilgio ribos kambario temperatūroje.

Sukaupta patirtis ir tolimesni aktyviosios terpės patobulinimai leido sukurti InAs/AlSb kvantinį kaskadinį lazerį, spinduliuojantį ties $\sim 2,6 \mu\text{m}$ bangos ilgiu. Šiuo metu tai yra trumpiausias tarppajuostinių šuolių pagrindu veikiančių puslaidininkinių lazerių pasiektas bangos ilgis.

Praktinė vertė

Išplėta InAs/AlSb įvairialyčių sandūrų auginimo technologija leido sukurti didelio kvantinio našumo trumpabangius kvantinius kaskadinius lazerius. Šie lazeriai gali būti panaudoti cheminių junginių spektroskopijoje, o ypač efektyvus šio tipo lazerių panaudojimas gali būti aukštatemperatūroje terpeje. Tokio panaudojimo pavyzdys yra vandens molekulių aptikimas giluminiuose naftos gręžiniuose, kur temperatūra siekia 400 K. Šiai dienai InAs/AlSb kvantiniai kaskadiniai lazeriai yra vienintelis spinduliuotės šaltinis, kuris spinduliuoja 3 μm bangos ilgio emisiją, tinkančią vandens jutikliams gaminti, aukštoje temperatūroje ($> 400 \text{ K}$).

Sukurti didelio kvantinio našumo trumpabangiai kvantiniai kaskadiniai lazeriai taipogi gali būti taikomi medicinoje – iškvėpiamųjų dujų analizei. Tai gerokai sumažintų diagnostinės įrangos matmenis bei kainą.

Miniatiūriniai lazerinės spinduliuotės šaltiniai būtų ne mažiau naudingi ir saugumo sistemose – narkotinių bei sprogstamųjų medžiagų aptikimui.

Ginamieji teiginiai

1. InAs/AlSb medžiagų sistema yra tinkama kvantinių kaskadinių lazerių, spinduliuojančių žemiau $3,5 \mu\text{m}$ bangos ilgio ribos, sukūrimui. Tai patvirtinta, demonstruojant kvantinius kaskadinius lazerius, kurių emisijos bangos ilgis yra $2,65 \mu\text{m}$. Šiuo metu tai yra trumpiausias pasiektas kvantinių kaskadinių lazerių emisijos bangos ilgis.
2. Stipriai legiruotas n^+ -InAs, dėl legiravimo nulemtu lūžio rodiklio sumažėjimo, yra tinkama medžiaga optinei lokalizacijai sudaryti InAs/AlSb kvantiniuose kaskadiniuose lazeriuose. Dėl InAs sugerties krašto poslinkio, nulemtu laidumo juostos užpildos, ši medžiaga gali būti sėkmingai naudojama kvantiniuose kaskadiniuose lazeriuose, veikiančiuose esant fotonų energijoms, viršijančioms InAs draustinės juostos tarpą.
3. Mažo periodo InAs/AlSb supergardenės galima naudoti kvantinių kaskadinių lazerių bangolaidyje plakiravimo sluoksnio atskyrimui nuo aktyviosios terpės. Tam, kad išvengtume supergardenėje abiejų rūšių – tarpjuostinės ir tarppajuostinės sugerties – draustiniai tarpai turi būti suderinti, tinkamai parenkant supergardenės periodą.
4. Tarpjuostinė sugertis InAs/AlSb kvantinių kaskadinių lazerių aktyviojoje terpėje neturi įtakos lazerinei emisijai, nes ji visada pasireiškia esant aukštesnėms negu tarppajuostinės emisijos energijoms.
5. Krūvininkų nuotėkis InAs kvantiniuose šuliniuose InAs/AlSb kvantinių kaskadinių lazerių aktyviojoje terpėje į L-slėnį, esant spinduliuotės bangos ilgiui virš $3 \mu\text{m}$, yra nereikšmingas. Priešingai, žemiau $2,75 \mu\text{m}$ bangos ilgio lazerinės emisijos ribos, šis efektas trukdo emisijos bangos ilgio mažinimui.

Darbo aprobacija

Disertacinio darbo rezultatai paskelbti 12-oje mokslinių straipsnių (visi Mokslinės informacijos instituto (ISI) pagrindinio sąrašo leidiniuose) ir pristatyti 21-oje tarptautinių mokslinių konferencijų (sąrašas pateikiamas santraukos gale).

Disertacijos santrauka

Disertaciją sudaro šeši pagrindiniai skyriai, įskaitant įvadinį skyrių bei pagrindinius darbo rezultatus ir išvadas, ir priedas, kuriame aprašyti lokalizuotų būsenų apskaičiavimo metodai, naudojami šiame darbe.

Įvadiniam skyriuje aprašyti pagrindiniai vidutiniosios infraraudonosios srities (MIR) kvantinių kaskadinių lazerių taikymai ir jų privalumai, paminėtos pagrindinės medžiagos, kurios naudojamos KK lazerių kūrimui ir gamybai, suformuluoti darbo uždaviniai, aprašytas atlikto darbo naujumas ir aktualumas, pateikti ginamieji teiginiai.

1 skyrius. Kvantinių kaskadinių lazerių veikimo principai

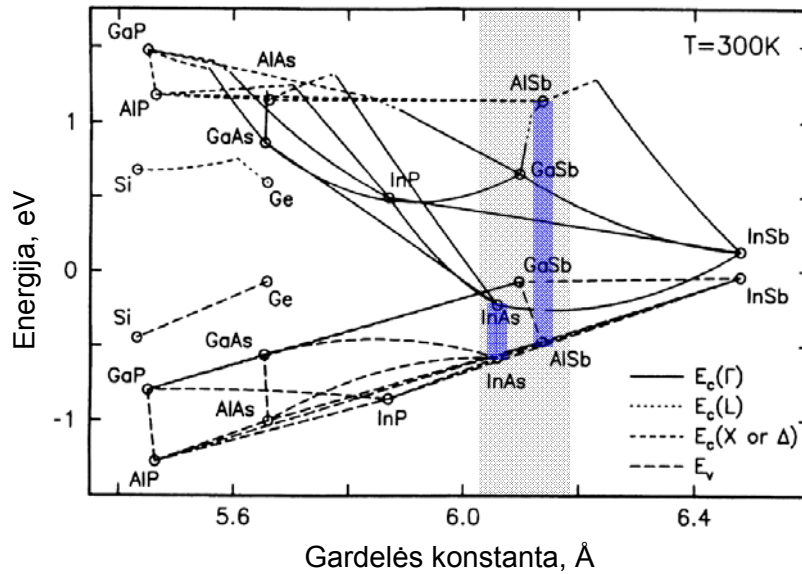
Šiame skyriuje aprašyta trumpa tarppajuostinių lazerių atsiradimo istorija, kvantinių kaskadinių lazerių veikimo principai, pateikta teorinė medžiaga, grindžianti šio tipo puslaidininkinių lazerių privalumą bei leidžianti atkreipti dėmesį į pagrindinius parametrus, į kuriuos reikia atsižvelgti, parenkant medžiagas ir projektuojant aktyviąją sritį. Pateiktos pagrindinės aktyviosios srities projektavimo metodikos, palygintos medžiagos, naudojamos tarppajuostinių puslaidininkinių lazerių gamybai. Nurodyti InAs/AlSb medžiagų sistemos privalumai.

2 skyrius. InAs/AlSb kvantinių kaskadinių lazerių molekulinį pluoštelių epitaksija ir prietaisų gamyba

InAs/AlSb kvantinių kaskadinių struktūrų auginimas buvo viena pagrindinių užduočių man dirbant NANOMIR laboratorijoje Montpellier II universitete. Visi šiame darbe aprašyti bandiniai buvo užauginti molekulinį pluoštelių epitaksijos metodu.

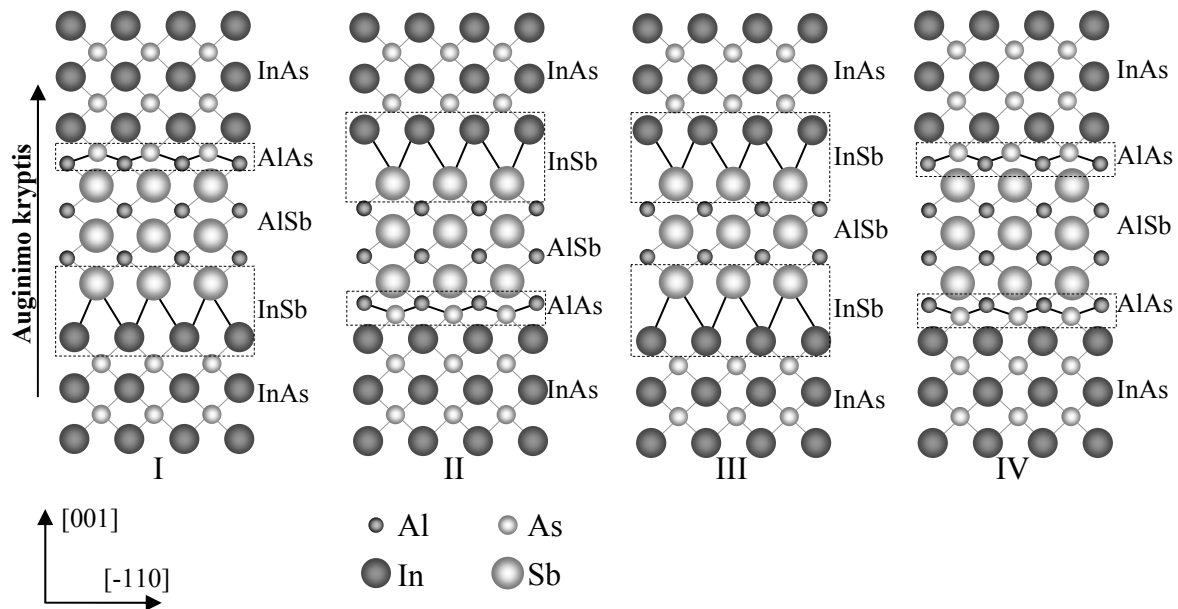
Šiame skyriuje aprašyti InAs/AlSb įvairialyčių darinių epitaksinio auginimo ypatumai, pristatyta šiame darbe naudojamos RIBER COMPACT 21E molekulinį pluoštelių epitaksijos įranga, aprašyti bandinių auginimo procesas, užaugintų bandinių litografijos ir montažo procedūra, naudojami *in-situ* auginimo kontrolės metodai bei užaugintų bandinių tyrimo metodai.

InAs/AlSb medžiagų sistema priklauso taip vadinamajai 6,1 Å šeimai (1 pav.), tai atitinka abiejų medžiagų gardelės konstantą (InAs 6,05903 Å; AlSb 6,1355 Å). Iš pirmo žvilgsnio šių medžiagų epitaksija neturėtų pasižymėti kokiais nors ypatumais, nes abiejų medžiagų gardelės konstantos skiriasi nežymiai ir, auginant ant InAs padėklų, pakaktų į AlSb įterpti nedidelį kiekį arseno atomų. Tokiu būdu turėtume medžiagas su artimomis gardelės konstantų vertėmis. Tačiau InAs ir AlSb neturi bendrų atomų, ir tai apsunkina šių medžiagų epitaksiją. Yra įmanomi du sandūrų tipai tarp InAs ir AlSb sluoksnių – AlAs tipo sandūra ir InSb tipo sandūra. Taigi, auginant gali formuotis skirtingos sandūrų kombinacijos (2 pav.). InSb gardelės konstanta yra 6,479 Å, o AlAs gardelės konstanta yra 5,65 Å. Pirmuoju atveju turėsime stiprų įtempimą sandūroje, antruoju – stiprų ištempimą. Netroliuojant sandūrų tipų sudarymo, negalime užauginti tobulos sandūros. Sandūrose tiesiog turėsime kelių atominių sluoksnių AlInAsSb lydinį. Tačiau egzistuoja būdai, leidžiantys priverstinai formuoti vieno arba kito tipo sandūras [8].

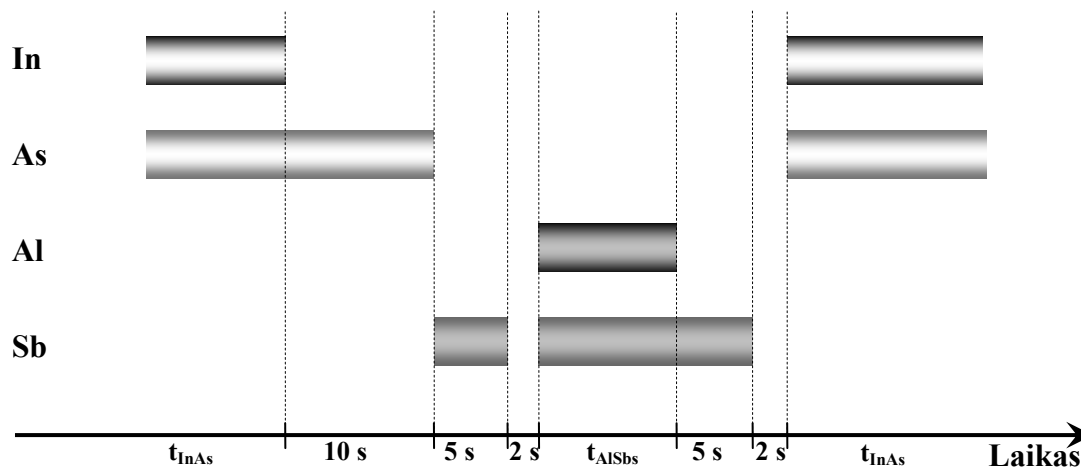


1 pav. Skirtingų puslaidininkinių medžiagų energijos diagrama, vaizduojanti laidumo (atitinkančios Γ , L, X arba Δ slėnius) ir valentinės juostų padėtys Fermio lygmens aukse atžvilgiu. Pilku fonu pažymėta 6,1 Å medžiagų šeima.

Parentant tinkamą sklendžių uždarymo/atidarymo seką ir pertraukimų laikus, galime priverstinai formuoti vienokio arba kitokio tipo sandūras. Nuo šių parametrų taipogi priklauso ir suformuotų sandūrų kokybė. Akivaizdu, kad auginant periodines InAs/AlSb struktūras, yra naudinga formuoti skirtingų tipų sandūras tarp epitaksinių sluoksnių, t.y. suformavus InAs sluoksnį, formuoti InSb sandūrą, o suformavus AlSb sluoksnį – AlAs



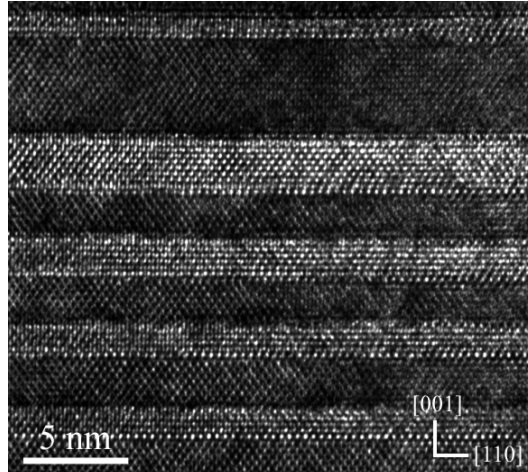
2 pav. Įmanomos sandūrų tipų kombinacijos tarp InAs ir AlSb epitaksinių sluoksnių išilgai auginimo krypties.



3 pav. *InAs/AlSb periodinių struktūrų auginimui naudojama sklendžių uždarymo/atidarymo laikinė diagrama. Ši seka leidžia formuoti InSb tipo sandūras po InAs epitaksinių sluoksnių ir AlAs tipo sandūras po AlSb sluoksnių.*

sandūrą, arba atvirkščiai. Tokiu būdu galime sukompensuoti įtempį, esantį priešingoje epitaksinio sluoksnio sandūroje, tuo pačiu metu suformuojant beveik idealios kokybės sandūras. Eilė tyrimų leido mums parinkti sklendžių atidarymo/uždarymo seką, leidžiančią auginti didelio InAs/AlSb periodų skaičiaus įvairialyčius darinius su aukšto kontrasto puikios kokybės sandūromis. 3 pav. pavaizduota sklendžių uždarymo/atidarymo sekos laikinė diagrama. Epitaksinis InAs sluoksnis 10 s išlaikomas arseno molekulių sraute. Per šį laiką susiformuoja InAs paviršius, kurį užbaigia As atomai. Po to arseno sklendė yra uždaroma ir atidaroma stibio sklendė. Paviršius 5 sekundes yra išlaikomas stibio molekulių sraute. Per šį laiką įvyksta arseno desorbcija nuo paviršiaus, o desorbuotus arseno atomus pakeičia stibio atomai. Tokiu būdu mes suformuojame InSb sluoksnį InAs paviršiuje. Po to dviem sekundėms uždaroma Sb sklendė. Tai leidžia nuo paviršiaus desorbuotis likusiems As atomams, kurių vietas vėliau užims Sb atomai. Atsidarius Sb ir Al sklendėms, auginamas AlSb sluoksnis, kuris po to 5 s išlaikomas Sb molekulių sraute, kad susiformuotų lygus AlSb paviršius, užsibaigiantis Sb atomais. Po to dviem sekundėms uždaroma Sb sklendė ir įvyksta Sb atomų desorbcija. Atidarius In ir As sklendes, AlSb paviršiuje susiformuoja vieno atominio sluoksnio AlAs sluoksnis, tada pradeda augti InAs sluoksnis. Šiuo metodu užaugintos InAs/AlSb kvantinio kaskadinio lazerio aktyviosios srities fragmento pralaidžiosios elektroninės mikroskopijos būdu padaryta nuotrauka pateikta 4 pav. Nuotraukoje galima matyti puikios kokybės 1–2 atominio sluoksnio šiuurkštumo sandūras tarp kelių atomų storio epitaksinių InAs ir AlSb sluoksnių. Tamsesnės sritys atitinka InAs sluoksnius, šviesesnės – AlSb.

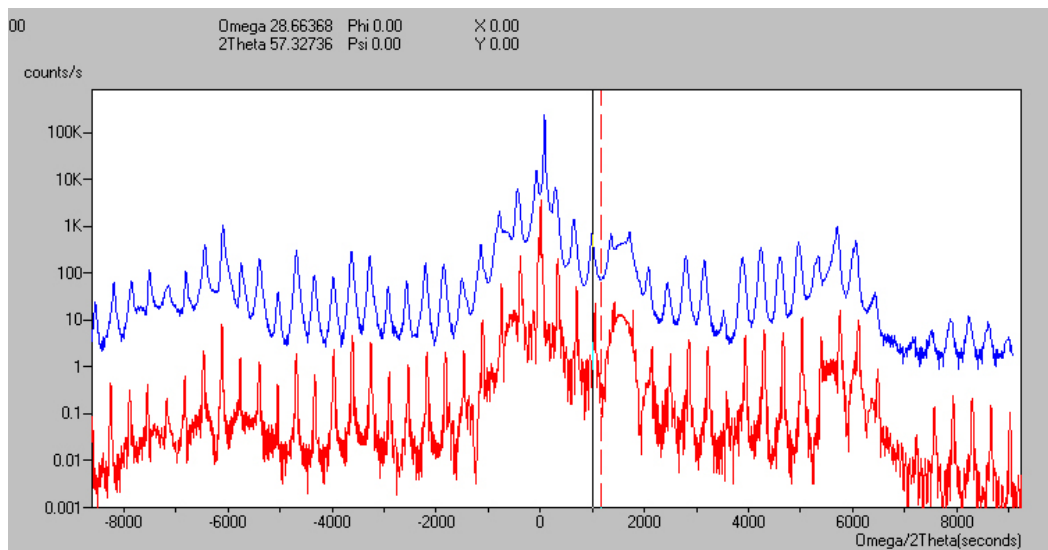
Auginimo metu vienintelis pasiekiamas bandinio paviršiaus kontrolės metodas šiame darbe naudojamoje Riber Compact 21E molekulių pluoštelių epitaksijos sistemoje yra aukštos energijos atspindžio elektronų difrakcijos (angliškai *RHEED* – *Reflection High Energy Elektron Diffraction*) stebėjimas. Šis metodas leidžia matuoti



4 pav. Pralaidžiosios elektroninės mikroskopijos būdu padaryta InAs/AlSb kvantinio kaskadinio lazerio aktyviosios srities fragmento nuotrauka. Tamsoesnės sritys atitinka InAs sluoksnius. (Nuotrauka padarė Anne Ponchet ir Christophe Gatel, CEMES/CNRS, Tulūza, Prancūzija)

auginimo spartą, stebėti oksido desorbciją bei paviršiaus rekonstrukciją. Visos kitos užaugintų bandinių savybės yra tiriamos atskirai.

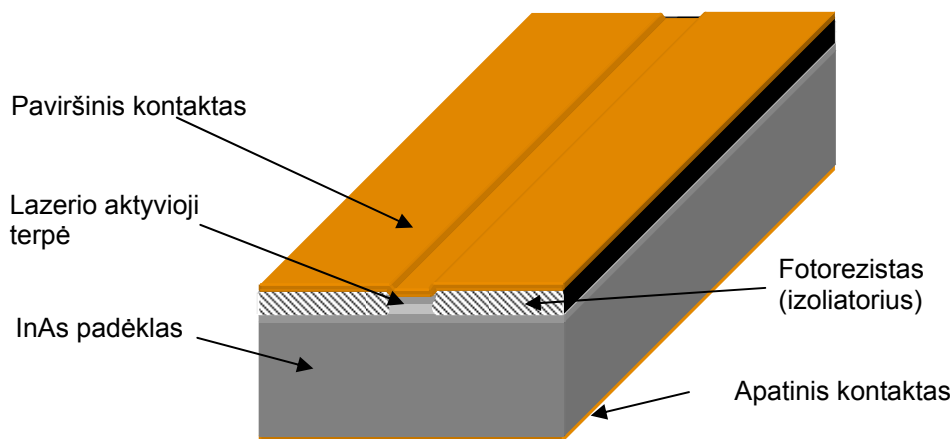
Pagrindinis užaugintų darinių struktūrinės analizės metodas, naudojamas šiame darbe, yra Rentgeno spindulių difrakcijos tyrimas. Šis metodas leidžia nustatyti epitaksinių sluoksnių gardelių tarpusavį suderinamumą bei gardelių suderinamumą su padėklu, nustatyti epitaksinių sluoksnių storius ir jų sąstatą, supergardelių periodą bei periodinių struktūrų superperiodą. Išmatuotos difrakcijos intensyvumo kontrastas taipogi atspindi ir sandūrų kokybę. Epitaksinių struktūrų rentgeno difrakcijos modeliavimui šiame darbe buvo naudojama *Philips X-pert Epitaxy* programinė įranga. Lygindami



5 pav. InAs/AlSb kvantinio kaskadinio lazerio aktyviosios terpės išmatuota (viršuje) ir sumodeliuota (apačioje) Rentgeno spindulių difrakcijos kreivės.

bandinių rentgeno spindulių difrakcijos intensyvumo sumodeliuotas ir išmatuotas kreives, mes galime pakankamai tiksliai nustatyti bandinio struktūrą. Tai yra labai svarbi informacija, nes žinodami tikrą bandinio struktūrą ir turėdami išmatuotas optines bei elektrines bandinio charakteristikas, galime tiksliai pakoreguoti modeliavimo parametrus. 5 pav. pateiktos tipinės InAs/AlSb kvantinio kaskadinio lazerio aktyviosios terpės, užaugintos ant (100) InAs padėklo, išmatuotos bei sumodeliuotos Rentgeno difrakcijos intensyvumo kreivės.

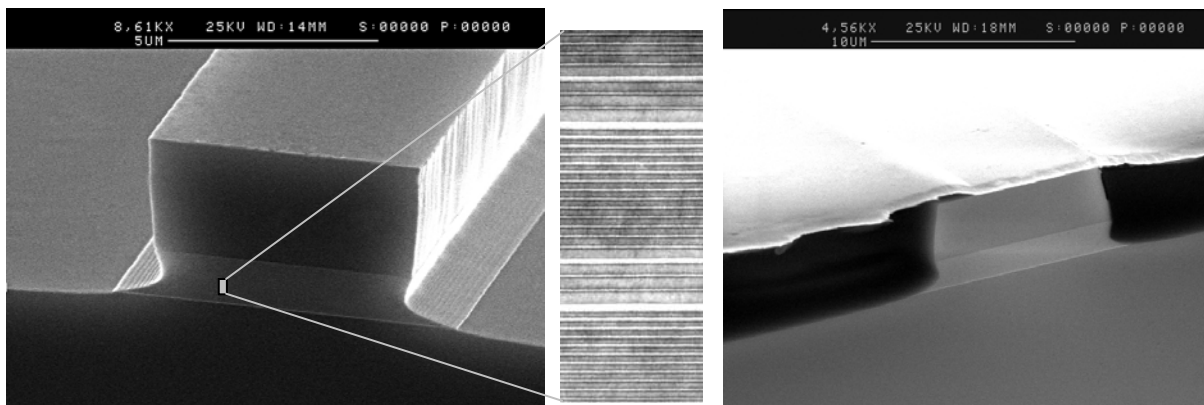
Pagrindinis poepitaksinis užaugintų bandinių paviršiaus analizės metodas yra paviršiaus skenavimas atominių jėgų mikroskopu. Šis metodas leidžia įvertinti paviršiaus šiurkštumą bei homogeniškumą. Paviršinio sluoksnio struktūrą taipogi leidžia įvertinti ir apatinių sluoksnių kokybę.



6 pav. *Suformuoto lazerinio prietaiso struktūra.*

Ne mažiau informatyvus yra ir antrinių jonų masių spektroskopijos metodas (angliškai SIMS – Secondary Ion Mass Spectroscopy). Tai yra paviršių ardantis metodas, tačiau jis leidžia nustatyti epitaksinių sluoksnių sudėtį. Šis metodas yra ypač naudingas tiriant segregaciją ir sluoksnių švarumą.

Kitas etapas po epitaksijos procedūros yra prietaiso gaminimas ir surinkimas. Šiame darbe buvo naudojamas įprastinis fotolitografijos metodas, o elektrodai buvo formuojami

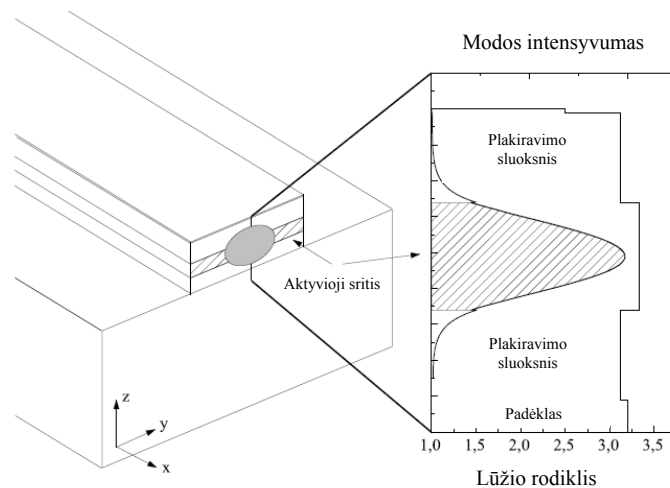


7 pav. *Pagaminto InAs/AlSb kvantinio kaskadinio lazerio nuotrauka padaryta elektroniniu mikroskopu.*

vakuuminio garinimo būdu. Tais atvejais, kai ant vienos iš lazerio rezonatoriaus briaunų buvo formuojamas veidrodinis sluoksnis, plonas SiO₂ sluoksnis buvo formuojamas plazminio garinimo būdu, o metalizacijai naudojamas vakuuminis garinimas. Suformuoto lazerio prietaiso struktūra pavaizduota 6 pav., o atspindžio elektroninės mikroskopijos metodu gautos nuotraukos pateiktos 7 pav.

3 skyrius. Bangolaidžio konstrukcija

Optinis ribojimas išilgai auginimo krypties kvantiniuose kaskadiniuose lazeriuose pasiekiamas įprastiniu būdu, panaudojant planarinį dielektrinį bangolaidį, sudarant lūžio rodiklio kontrastą tarp šerdies (aktyvioji lazerio terpė), turinčios didesnę lūžio rodiklį, ir ją dengiančių plakiravimo sluoksnių, turinčių mažesnę lūžio rodiklį (8 pav.). Vidiniai



8 pav. Kvantinio kaskadinio lazerio bangolaidžio schema. Intarpe pavaizduota fundamentinės TM modos pasiskirstymas bangolaidyje ir lūžio rodiklio profilis.

nuostoliai tokiam bangolaidyje išreiškiami formule $\alpha_w = \frac{4\pi k}{\lambda}$ ir nulemti didžiąja dalimi laisvųjų krūvininkų absorbcijos sluoksniuose. Lygiagrečios lazerio kristalo briaunos natūraliai sudaro išilginį optinį ribojimą ir veikia kaip Fabri-Pero rezonatorius. Atspindys nuo briaunų susidaro dėl lūžio rodiklio skirtumo tarp puslaidininkio ir oro. Tokio veidrodžio atspindžio koeficientas yra $R = \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2}$. Čia n_1 ir n_2 yra oro ir puslaidininkio lūžio rodikliai. Nuostoliai veidrodžiuose tokiam rezonatoriuje yra:

$$\alpha_m = -\frac{1}{L_w} \ln(R) = \frac{1}{L_w} \ln\left(\frac{1}{R}\right).$$

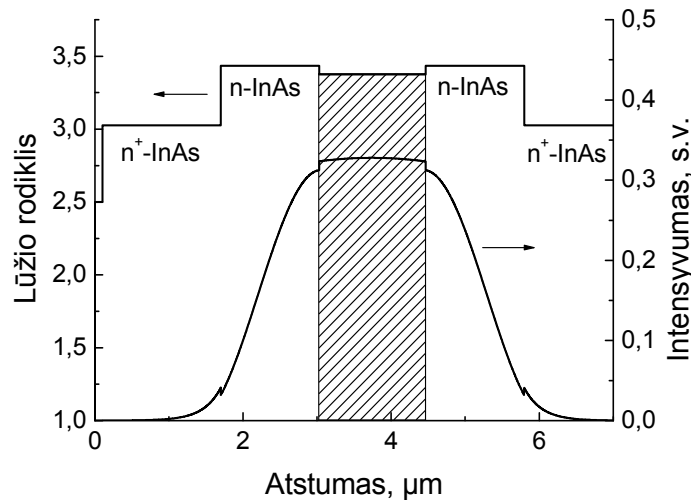
Čia L_w yra rezonatoriaus ilgis. Pilnutiniai nuostoliai lazerio rezonatoriuje yra nuostolių bangolaidyje ir nuostolių veidrodyje suma:

$$\alpha_{tot} = \alpha_w + \alpha_m = \alpha_w + \frac{1}{L_w} \ln\left(\frac{1}{R}\right).$$

Kadangi emisija kvantiniame kaskadiniame lazeryje atsiranda dėl tarpjauostinių šuolių, ji yra poliarizuota statmenai epitaksiniam sluoksniams ir tokiu būdu yra susieta tik su TM modomis. Modos intensyvumas priklauso tik nuo z koordinatės ir yra proporcingas $|\mathbf{E}(z)|^2$. Kvantiniuose kaskadiniuose lazeryuose tik dalis ertmės modos surišta su aktyviaja sritimi. Šis santykis vadinamas *Persiklojimo faktoriumi*. Maksimalus persiklojimas gaunamas fundamentinėms TE ir TM modoms [9]. Lazero slenkstinė sąlyga yra $G = g\Gamma J_{th} = \alpha_{tot}$. Čia Γ – persiklojimo faktorius, G – stiprinimas, g – stiprinimo koeficientas, J_{th} – slenkstinis srovės tankis. Tai reiškia, kad stiprinimas turi būti lygus arba didesnis už nuostolius. Tokiu būdu slenkstinis srovės tankis yra:

$$J_{th} = \frac{\alpha_{tot}}{g\Gamma} = \frac{\alpha_w}{g\Gamma_w} - \frac{1}{g\Gamma L_w} \ln(R).$$

Ši išraiška rodo, kad slenkstinis srovės tankis yra proporcingas nuostoliams bangolaidyje ir atvirkščiai proporcingas persiklojimo faktoriui. Taigi norėdami sumažinti lazero slenkstinį srovės tankį, turime maksimizuoti dydį $\chi = \Gamma/\alpha_w$.



9 pav. InAs plazmoninio bangolaidžio, apskaičiuoto emisijai ties $4,5 \mu\text{m}$, optinės modos intensyvumo ir lūžio rodiklio profilis. $\Gamma = 47.5\%$, $\alpha_w = 4.2 \text{ cm}^{-1}$
 $N_{cladd.} = 1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
 $N_{spacers} = 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

9 pav. pateiktas fundamentinės modos intensyvumo profilis ir lūžio rodiklio profilis InAs/AlSb kvantinio kaskadinio lazero bangolaidyje, apskaičiuotame emisijai ties $4,5 \mu\text{m}$. Optinis ribojimas šiame bangolaidyje sudaromas stipriai legiruotų InAs plakiravimo sluoksnių pagalba, atskiriant juos nuo aktyviosios srities silpnai legiruotais InAs tarpikliais. Silpnai legiruotų ($N = 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) InAs tarpiklių lūžio rodiklis nežymiai skiriasi nuo aktyviosios srities lūžio rodiklio. Jų pagrindinis vaidmuo yra atskirti aktyviąją sritį nuo stipriai šviesą sugeriančių plakiravimo sluoksnių kartu dirbtinai praplečiant lazero aktyviąją sritį ir tokiu būdu padidinant optinės modos, sklindančios

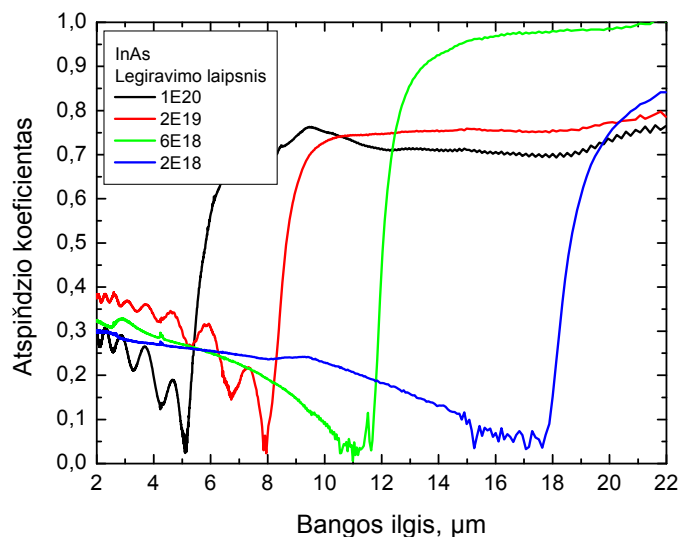
mažiau absorbuojančioje terpėje, dalį. Stipriai legiruoti InAs plakiravimo sluoksniai atlieka svarbų vaidmenį šiame bangolaidyje. Padidinto legiravimo ($N = 1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) dėka plazminis dažnis paslinktas arčiau emisijos bangos ilgio, tuo pačiu metu dėl anomaliosios dispersijos, sumažintas plakiravimo sluoksnių lūžio rodiklis, padidinant lūžio rodiklio kontrastą. Šio tipo bangolaidžiai yra vadinami *plazmoniniais bangolaidžiais* ir buvo naudojami šiame darbe.

Legiruoto InAs optinių savybių tyrimas

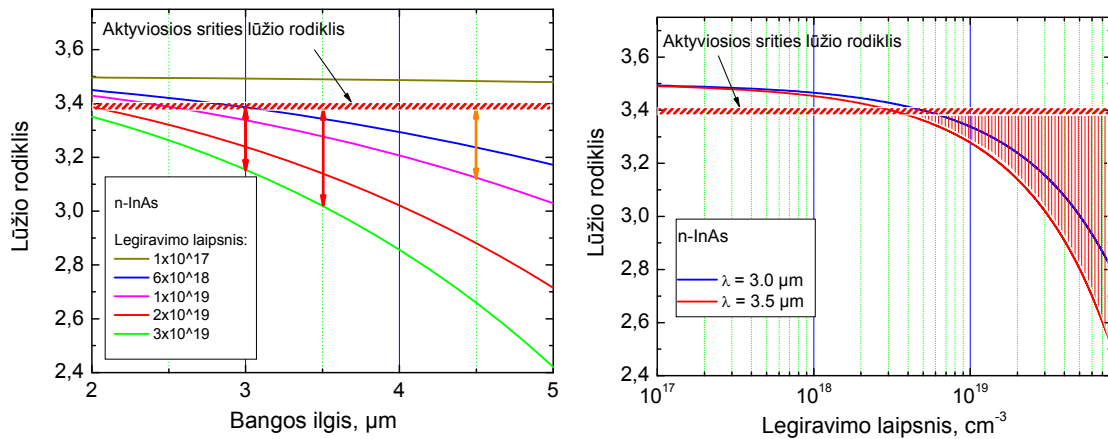
Taigi plazmoninis bangolaidis buvo sėkmingai pritaikytas kvantiniuose kaskadiniuose lazeriuose, spinduliuojančiuose 4,5 μm bangos ilgio šviesą. Tačiau norint panaudoti šio tipo bangolaidį trumpesnėms bangoms, buvo atlikti InAs lūžio rodiklio skaičiavimai pagal klasikinį Drude modelį. Šių skaičiavimų tikslas buvo nustatyti, ar stipriai legiruoto InAs lūžio rodiklis gali būti pakankamai mažas, kad pasiektume optinį ribojimą, ir, ar galima tuo pačiu metu išlaikyti pakankamai mažą absorbciją. Lūžio rodiklis buvo skaičiuojamas iš kompleksinės dielektrinės funkcijos:

$$(n + ik)^2 = \varepsilon(\omega) = \varepsilon_\infty \left[1 - \frac{\omega_p^2}{(\omega^2 + i\omega\tau^{-1})} \right].$$

Plazminis dažnis šioje išraiškoje yra išreiškiamas formule $\omega_p^2 = \frac{Ne^2}{m^* \varepsilon_\infty}$, o elektronų

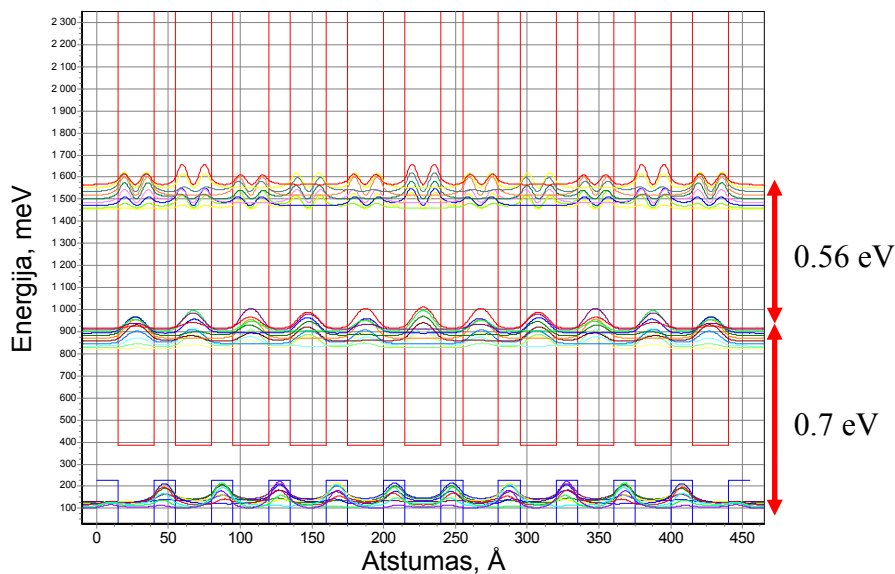


10 pav. Atspindžio koeficiento priklausomybė nuo bangos ilgio, išmatuota esant skirtingiems InAs bandinių legiravimo laipsniams.



11 pav. InAs lūžio rodiklio skaičiavimai skirtingiems bangos ilgiams esant skirtingiems legiravimams. Štrichuota sritis žymi InAs/AlSb aktyviosios srities lūžio rodiklį.

sklaidos laikas $\tau = \frac{\mu m^*}{e}$. Čia e – elektrono krūvis, m^* – elektrono efektinė masė ir N – krūvininkų tankis. Siekiant padidinti skaičiavimų patikimumą, skaičiavimai buvo atlikti pasitelkus nepriklausomus atskirų parametrų matavimus. Plazminis dažnis gautas matuojant specialiai užaugintų skirtingo legiravimo bandinių atspindį (10 pav.). Iš eksperimentiniu būdu gauto plazminio dažnio buvo ištraukta elektrono efektinė masė. Elektrono sklaidos laikas gautas matuojant Holo elektronų judrį ir ištrauktą elektrono efektinę masę. Gauti rezultatai (11 pav.) parodė, kad pakankamas lūžio rodiklio kontrastas tarp InAs plakiravimo sluoksnių ir aktyviosios srities gali būti lengvai pasiektas esant $2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ir didesniai plakiravimo sluoksnių legiravimui. Pvz., legiruodami plakiravimo InAs sluoksnius $3 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, mes turėsime tokį pat lūžio



12 pav. InAs/AlSb supergardenės energijos juostų diagrama.

rodiklio kontrastą $3 \mu\text{m}$ bangoms, kaip ir $4,5 \mu\text{m}$ bangoms, legiruojant plakiravimo InAs sluoksnius $1 \cdot 10^{19} \text{cm}^{-3}$.

Panaudojant tą patį modelį, buvo apskaičiuota absorbcija laisvaisiais krūvininkais skirtingiems bangos ilgiams, esant skirtingiems legiravimams. Taikant šį modelį, absorbcija laisvaisiais krūvininkais mažėja kaip λ^2 , ir, kaip matyti grafike, plazmoninis InAs bangolaidis gali būti naudojamas bangos ilgiams trumpesniems nei $3 \mu\text{m}$.

Silpnai legiruoti InAs tarpikliai yra kritinė bangolaidžio dalis esant trumpesnėms bangoms dėl galimos tarpjuostinės absorbcijos. Tačiau sugerties matavimai, atlikti skirtingo legiravimo InAs padėkluose, parodė, kad trumpabangis absorbcijos krašto poslinkis, mažinant temperatūrą ir nežymiai didinant legiravimą, skystojo azoto temperatūroje leidžia sumažinti tarpjuostinę absorbciją tarpikliuose ir pritaikyti šio tipo bangolaidžius bangos ilgiams arti $3 \mu\text{m}$.

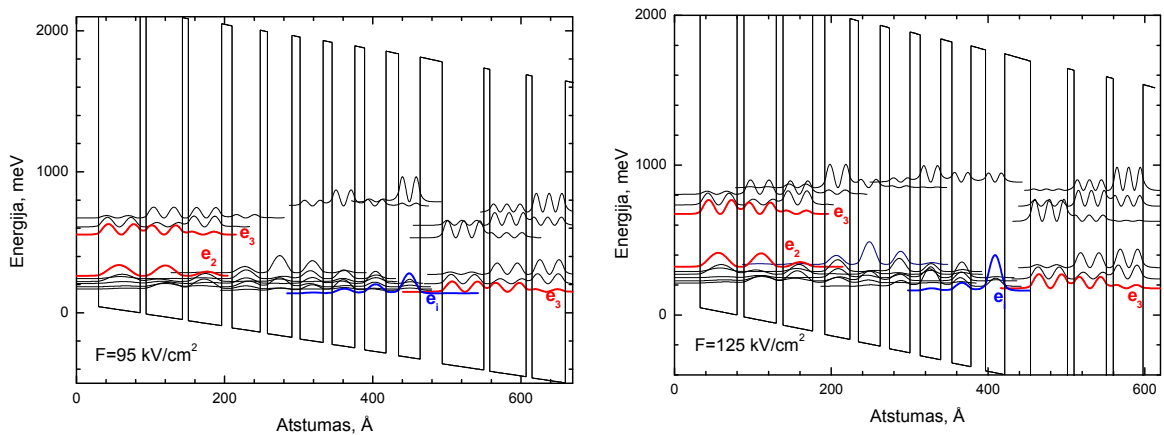
Plazmoninis bangolaidis su InAs/AlSb supergardelėmis

Siauras draustinis tarpas InAs medžiagoje riboja plazmoninio bangolaidžio panaudojimo galimybes kvantiniuose kaskadiniuose lazeriuose, kurių emisijos bangos ilgis yra trumpesnis nei $4 \mu\text{m}$. Ši riba ypač pasireiškia aukštesnėse temperatūrose. $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{AsSb}$ dielektrinis bangolaidis patraukliausiai atrodė taikymui trumpose bangose. Tačiau tolimesni tyrimai atskleidė ir visą eilę trūkumų, kurie privertė ieškoti kitų sprendimų. Rengiant šį darbą buvo pasiūlyta panaudoti InAs/AlSb supergardes. Parenkant tinkamą supergardelės periodą, galima parinkti tokias pajuosčių energijas, kad būtų galima išvengti tiek tarpjuostinės, tiek ir tarppajuostinės sugerties. Be to, InAs/AlSb – identiška medžiagų sistema, kuri yra naudojama aktyviojoje terpėje. Tokiu būdu nekyla papildomų problemų ir dėl lūžio rodiklio, ir dėl epitaksijos. 12 pav. pavaizduota InAs/AlSb supergardelės, apskaičiuotos $2,5 \text{ nm}$ InAs, $1,5 \text{ nm}$ AlSb sluoksnių storiams, juostinė diagrama. Energijos tarpas tarp HH_0 ir E_0 būsenų yra apytiksliai $0,7 \text{ eV}$, o tarp E_0 ir E_1 elektroninių būsenų – apie $0,6 \text{ eV}$. Tokiu būdu turime $3 \mu\text{m}$ bangoms visiškai skaidrią struktūrą. Šios supergardelės panaudojimas plazmoniniame bangolaidyje vietoje InAs tarpiklių leido efektyviai panaudoti plazmoninius bangolaidžius trumpabangiuose kvantiniuose kaskadiniuose lazeriuose. Ši modifikacija ženkliai pagerino mūsų lazerių charakteristikas ir leido sukurti didelio našumo trumpabangius lazerinius prietaisus, veikiančius temperatūroje, siekiančioje 420 K .

4 skyrius. Trumpabangiai InAs/AlSb kvantiniai kaskadiniai lazeriai

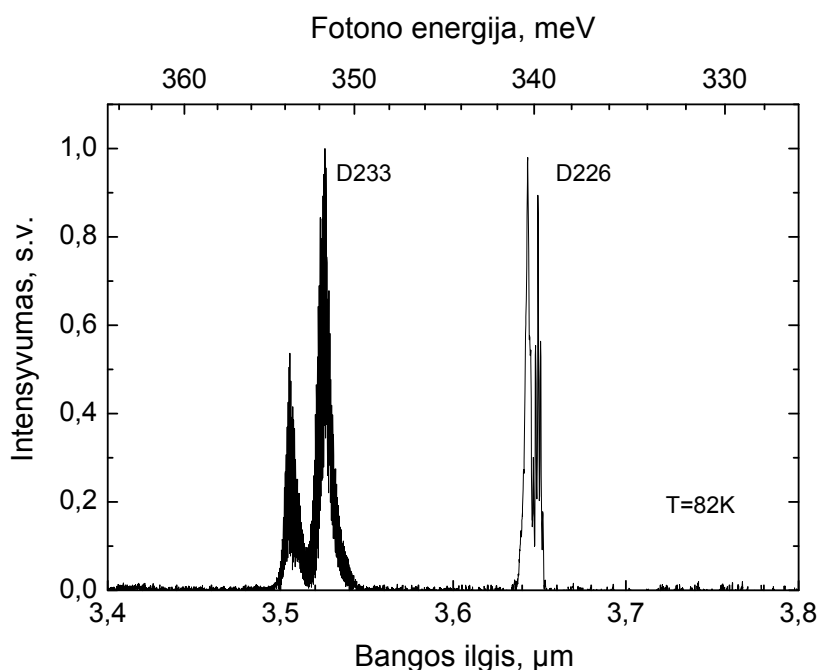
InAs/AlSb KK lazeriai, spinduliuojantys $3,5\text{--}3,6 \mu\text{m}$ bangas

Aukščiau aprašyti stipriai legiruotos InAs medžiagos optinių savybių tyrimai parodė, kad stipriai legiruotų InAs plakiravimo sluoksnių panaudojimas plazmoniniame bangolaidyje leidžia praplėsti šio tipo bangolaidžių panaudojimo trumpabangią sritį iki $3,5 \mu\text{m}$ ribos. Siekiant patikrinti šių rezultatų patikimumą, buvo užauginti du bandiniai, kuriuose buvo panaudotas $4,5 \mu\text{m}$ aktyviosios srities dizainas [7]. Kad būtų galima gauti

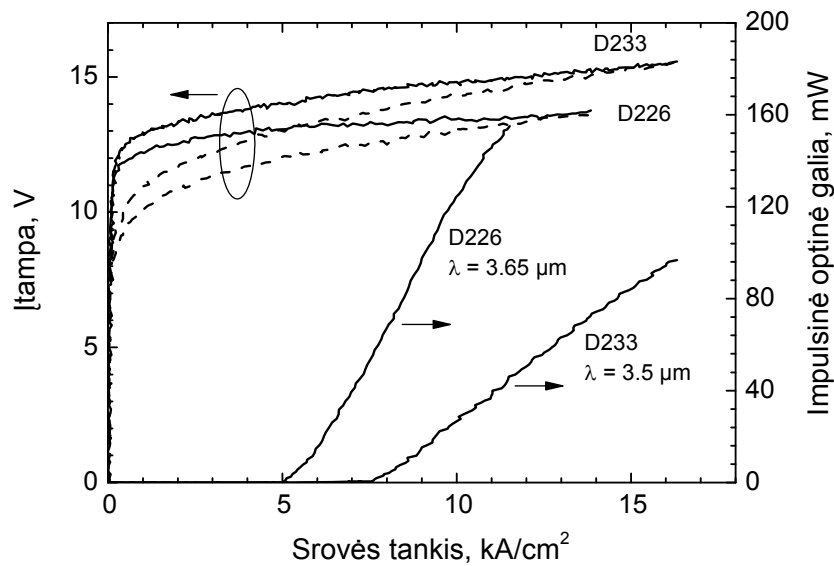


13 pav. Pradinės 4,5 μm ir adaptuotos 3,5 μm bangos ilgio emisijai InAs/AlSb kvantinių kaskadinių lazerių aktyviosios srities energijos juostų diagramos.

trumpesnę emisijos bangos ilgį, InAs sluoksnių storiai buvo sumažinti 20 %. Tai padaryta auginimo metu sumažinant InAs auginimo spartą nuo 1 $\text{\AA}/\text{s}$ iki 0,8 $\text{\AA}/\text{s}$. 13 pav. pateiktos pradinės 4,5 μm lazerio aktyviosios srities bei adaptuotos 3,5 μm emisijai aktyviosios srities juostinės diagramos. Užaugintų struktūrų (D226, D233) rentgeno difrakcijos analizė parodė, kad abi struktūros nežymiai skiriasi. D266 struktūroje InAs sluoksnių auginimo sparta buvo 0,8 $\text{\AA}/\text{s}$, o D233 bandinio – 0,76 $\text{\AA}/\text{s}$. Lazerinė emisija



14 pav. Pirmųjų InAs/AlSb kvantinių kaskadinių lazerių spinduliuojančių žemiau 4 μm ribos, emisijos spektrai. Šiuose lazeriose panaudotas plazmoninis bangolaidis.

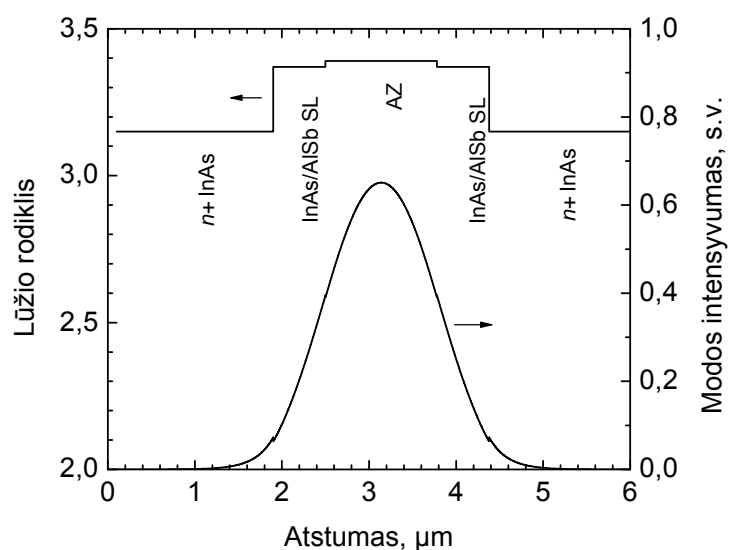


15 pav. Optinės galios nuo srovės bei įtampos nuo srovės charakteristikos, išmatuotos 3 mm ilgio lazeriniuose dioduose LN₂ temperatūroje (ištininės kreivės) ir kambario temperatūroje (punktūrinės kreivės).

buvo gauta abiejuose bandiniuose (14 pav.). Prietaisų bangos ilgis skystojo azoto temperatūroje buvo 3,63–3,65 μm (D226) ir 3,5–3,53 μm (D233). Šis nežymus emisijos bangos ilgių skirtumas yra dėl skirtingu InAs sluoksnių storių. Maksimali lazerių veikimo temperatūra yra, atitinkamai, 200 K ir 140 K. Kaip matyti optinėje šių lazerių charakteristikoje (15 pav.), lazerių našumas degraduoja trumpesnėse bangose. Šis efektas yra aiškinamas tarpjuostine absorbcija InAs tarpikliuose. Taigi abu lazeriai nepasižymėjo ypatingomis charakteristikomis, tačiau tai buvo pirmieji InAs/AlSb kvantiniai kaskadiniai lazeriai, kurių charakteristikos buvo palyginamos su trumpiausio tai dienai bangos ilgio InGaAs/AlInAs ant InP medžiagų sistemos lazeriais [10].

InAs/AlSb KK lazeriai, spinduliuojantys 3,1–3,3 μm bangas

Kaip buvo pasakyta aukščiau, pagrindinė priežastis, dėl kurios buvo sunku sumažinti emisijos bangos ilgį InAs/AlSb kvantiniuose kaskadiniuose lazeriuose, buvo tarpjuostinė absorbcija InAs tarpikliuose. Bandymai panaudoti AlGaAsSb dielektrinių bangolaidį buvo nesėkmingi dėl paaiškėjusių šios medžiagos trūkumų, o žemas šios medžiagos elektrinis laidumas žemiau 200 K temperatūros apsunkina kvantinių kaskadinių lazerių aktyviųjų sričių tyrimus. Kaip alternatyva, buvo nuspręsta pakeisti InAs tarpiklius mažo periodo InAs/AlSb supergardenėmis. Šis bangolaidžio patobulinimas leido padaryti kitą žingsnį trumpesnių bangų link. 16 pav. pavaizduotas lūžio rodiklio bei optinės modos profilis bangolaidyje, suprojektuotame emisijai ties 3,3 μm. TM₀ modos persiklojimo faktorius šiame bangolaidyje siekia 70%, tačiau dėl stiprios absorbcijos laisvuosiuose krūvininkuose stipriai legiruotuose plakiravimo sluoksniuose nuostoliai tokiam bangolaidyje padidėja iki 7 cm⁻¹. Panaudojus tokį bangolaidį bei 3,3 μm bangos ilgio emisijai suprojektuotą aktyviają sritį (17 pav.), buvo

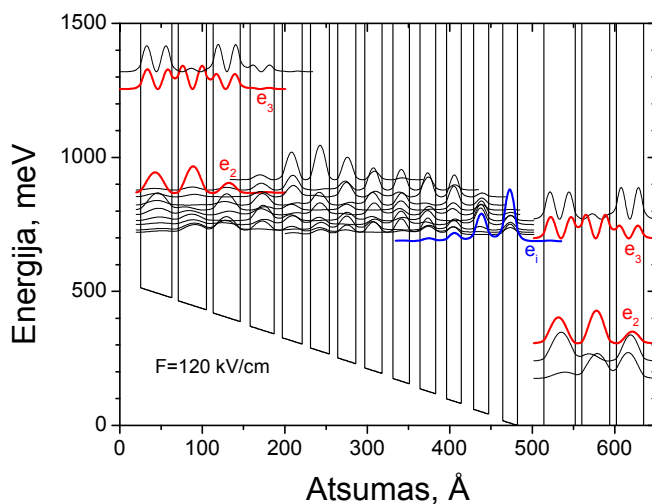


16 pav. *InAs plazmoninio bangolaidžio su InAs/AlSb supergardelėmis tarpikliuose, apskaičiuoto emisijai ties 3,3 μm optinės modos intensyvumo ir lūžio rodiklio profilis.*

$$\Gamma = 70\%, \alpha_w = 7 \text{ cm}^{-1}$$

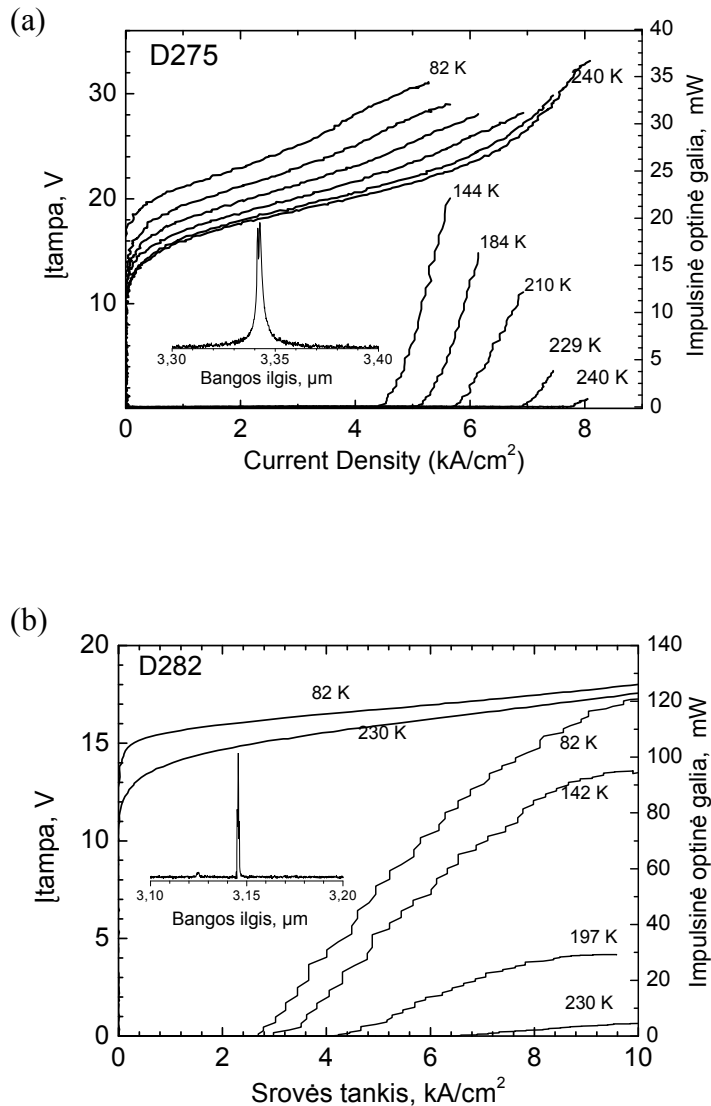
$$N_{cladd.} = 3 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$$

$$N_{spacers} = 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$



17 pav. *InAs/AlSb kvantinių kaskadinių lazerių aktyviosios srities, suprojektuotos 3,3 μm bangos ilgio emisijai, energijos juostų diagrama.*

pagaminti du kvantinių kaskadinių lazerių bandiniai. Vienas iš bandinių buvo auginamas esant 0,94 Å/s vietoje 1 Å/s InAs auginimo spartai. Šis metodas aprašytas aukščiau ir yra taikomas norint sumažinti emisijos bangos ilgį, neatliekant sudėtingo modeliavimo. Lazerinė emisija buvo gauta abiejuose bandiniuose. 18 pav. pateiktos šių bandinių išmatuotos optinės bei elektrinės charakteristikos. Intarpuose pateikti emisijos spektrai.



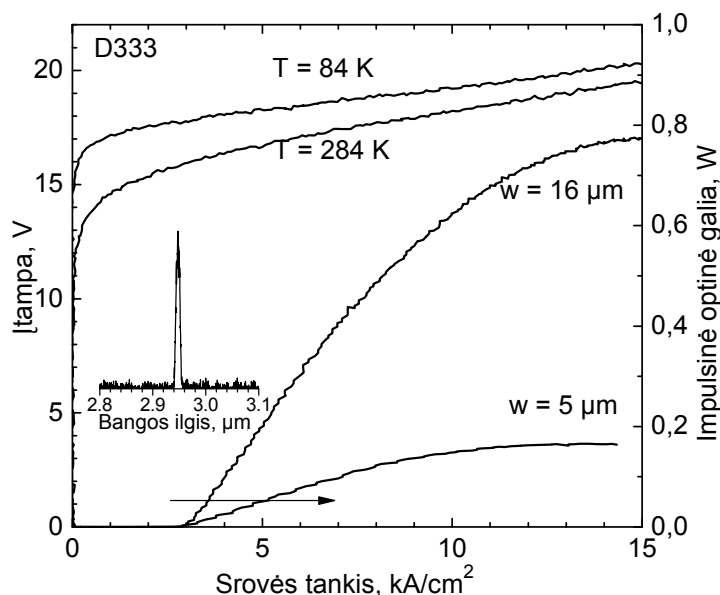
18 pav. 3 mm ilgio kvantinių kaskadinių lazerinių diodų D275 (a) ir D282 (b) voltamperinės bei vatamperinės charakteristikos, išmatuotos naudojant 100 ns impulsus su 5 kHz pasikartojimo dažniu skirtingose temperatūrose. Intarpuose pateikti emisijos spektrai, užrašyti skystojo azoto temperatūroje.

D275 bandinys skystojo azoto temperatūroje turėjo 3,3 μm bangos ilgio emisiją, 3,5 kA/cm² slenkstinės srovės tankį bei apie 150 mW impulsinę galią. Aukšta veikimo įtampa (virš 20 V) siejama su nesuderintais tarpiklio supergardenės ir aktyviosios srities injektoriaus lygmenimis. Šis trūkumas buvo pašalintas D282 bandinyje, pritaikant gradientinę supergardenę tarp tarpiklio ir lazerio injektoriaus. Dėl geresnio tarpiklio ir injektoriaus suderinimo, pastarajame lazeryje slenkstinės srovės tankis sumažėjo iki 2,5 kA/cm², o maksimali veikimo temperatūra padidėjo iki 240 K. Emisijos bangos ilgis šiame lazeryje buvo sumažintas iki 3,1 μm. Tuo metu tai buvo trumpiausias tarpajuostinių elektroninių prietaisų emisijos bangos ilgis. Be to, šių lazerių našumas

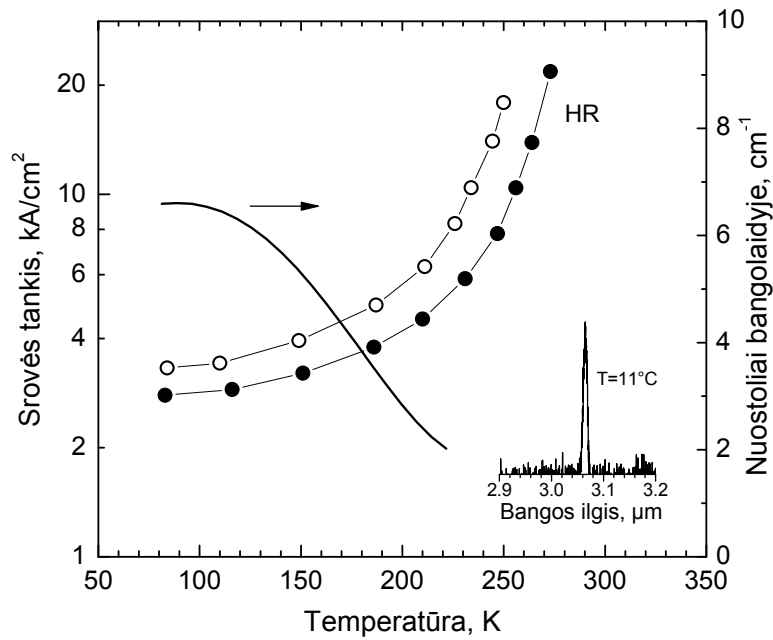
nesumažėjo, mažinant bangos ilgį. Tai paryškino InAs/AlSb medžiagų sistemos privalumą trumpesnėse bangose.

Pirmasis InAs/AlSb KK lazeris, spinduliuojantis žemiau 3 μm bangos ilgio ribos

Turint patirties, kuriant 3,1–3,3 μm emisijos bangos ilgio InAs/AlSb lazerius, buvo sėkmingai sukonstruotas lazeris, veikiantis žemiau 3 μm bangos ilgio ribos. Taikant aukščiau aprašytą bangolaidžio su supergardeliniais tarpikliais dizainą bei tarpiklio ir injektoriaus lygmenų suderinimo sritį, buvo užauginta InAs/AlSb kvantinio kaskadinio lazerio struktūra. Iš jos buvo pagaminti dviejų tipų bandiniai – vienas įprastinis, kitas su veidrodiniu sluoksniu vienoje iš rezonatoriaus briaunų. Tai buvo atlikta nusodinant ploną SiO₂ sluoksnį ir užgarinant ant jo Cr/Au sluoksnį. Abu pagaminti bandiniai skystojo azoto temperatūroje emitavo 2,95–2,97 μm bangos ilgio lazerinę spinduliuotę. 19 pav. pateiktos elektrinės bei optinės charakteristikos, pamatuotos bandiniuose be veidrodinio sluoksnio, esant dviem skirtingiems rezonatoriaus pločiams – 5 μm ir 16 μm. Kaip matyti grafike, bandinių slenkstinės srovės tankis (šiuo atveju be veidrodinio sluoksnio), nepriklauso nuo bandinio geometrijos, tačiau optinė galia skiriasi 5 kartus. Veidrodinio sluoksnio panaudojimas, kaip ir buvo tikėtasi, sumažina slenkstinės srovės tankį. Žemiau 200 K temperatūrose jis sumažėja apie 20 %, o aukštesnėse temperatūrose iki 40 %. Charakteristikų matavimas su veidrodiniu sluoksniu ir be jo leidžia įvertinti nuostolius bangolaidyje. Pasinaudojus



19 pav. 3,5 mm rezonatoriaus ilgio lazerio vatamperinės charakteristikos, išmatuotos 16 μm ir 5 μm pločio lazeriuose 84 K temperatūroje bei voltamperinės charakteristikos 16 μm pločio lazeriuose, išmatuotos 84 K ir 284 K temperatūrose. Intarpe pateiktas emisijos spektras, įrašytas skystojo azoto temperatūroje.



20 pav. Slenkstinės srovės temperatūrinės priklausomybės, išmatuotos bandiniuose su veidrodiniu sluoksniu ir be jo. Ištinė kreivė parodo nuostolius bangolaidyje; qpskėiuotus iš eksperimentinių duomenų. Intarpe pateiktas spektras, įrašytas 11 °C temperatūroje.

slenkstinės srovės tankio išraiška, esant veidrodiniam sluoksniui ir be jo, galime išreikšti nuostolių bangolaidyje priklausomybę:

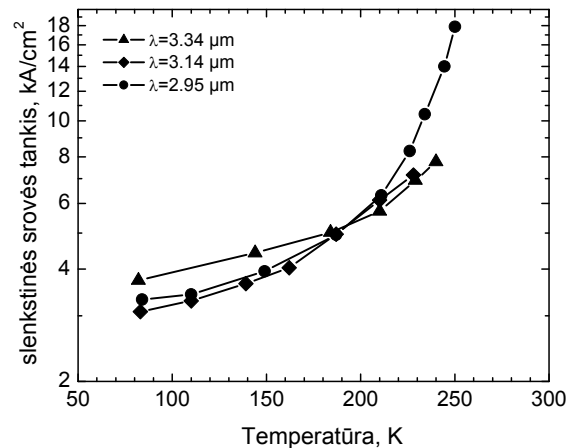
$$\alpha_w = \frac{\ln(0.3)}{L_w} \frac{\left(J_{thHR} + \frac{J_{th}}{2} \right)}{J_{thHR} - J_{th}}.$$

Čia J_{th} – slenkstinės srovės tankis be veidrodinio sluoksniu, o J_{thHR} – slenkstinės srovės tankis esant veidrodiniam sluoksniui. 20 pav. pateiktos slenkstinės srovės tankio temperatūrinės priklausomybės, išmatuotos bandiniuose su veidrodiniu sluoksniu ir be jo. Ištinė kreivė rodo nuostolių bangolaidyje priklausomybę. Tokiu būdu mes galime realiai įvertinti nuostolius mūsų aktyviojoje terpėje. Šiuo atveju turime vidutiniškai 2–7 cm^{-1} nuostolius. Matyti, kad mūsų bandiniuose nuostoliai bangolaidyje ženkiai priklauso nuo temperatūros. Paminėsimė, kad tai buvo pirmasis kvantinis kaskadinis lazeris, spinduliuojantis žemiau 3 μm bangos ilgio ribos.

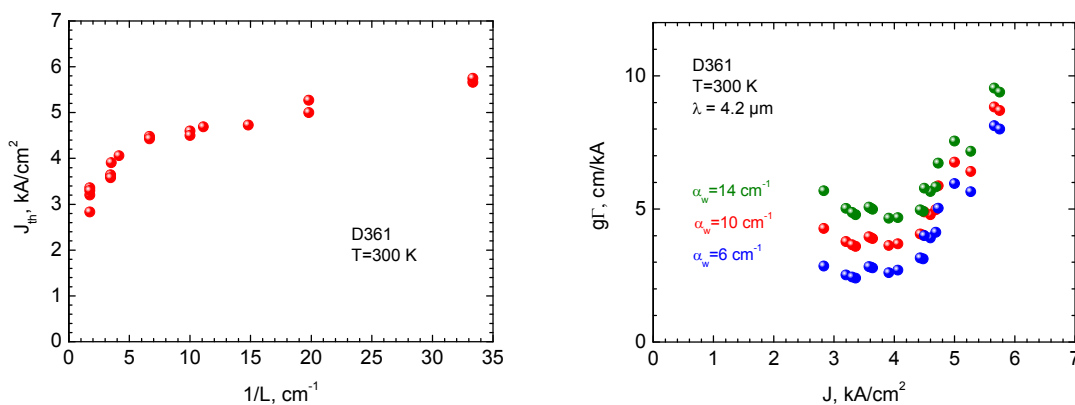
Naujosios kartos InAs/AlSb kvantiniai kaskadiniai lazeriai

Stiprinimo bei nuostolių aktyviojoje terpėje analizė

Stipri slenkstinės srovės priklausomybė nuo temperatūros (21 pav.) visuose mūsų lazeriuose, spinduliuojančiuose arti 3 μm bangos ilgio šviesą, bei, kaip buvo parodyta aukščiau, stipri nuostolių bangolaidyje priklausomybė nuo temperatūros leidžia manyti,



21 pav. InAs/AlSb kvantinių kaskadinių lazerių, spinduliuojančių 3 μm bangos ilgio srityje, slenkstinės srovės tankio priklausomybės nuo temperatūros.



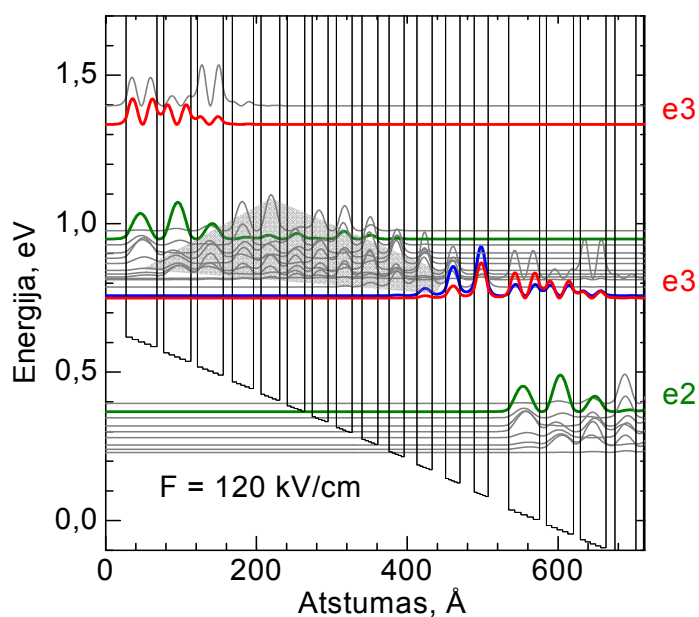
22 pav. Slenkstinės srovės tankio nuo $1/L$ priklausomybė, pamatuota 4,2 μm bangos ilgio lazeriuose 300 K temperatūroje (a) ir skirtingiems bangolaidžio nuostoliams apskaičiuotas optinės modos stiprinimas (b).

kad to priežastis slypi ne bangolaidyje, o aktyviojoje terpėje. Tikėtina to priežastis – šoninio slėnio įtaka. Kadangi lazerių našumas nedegraduoja trumpinant bangos ilgį, tai rodo, kad L-slėnis šiuo atveju neturi jokios įtakos. Siekiant išsiaiškinti šias savybes, mes

atlikome stiprinimo ir nuostolių analizę mūsų ilgesnių bangų lazeriuose. Tokiu būdu galėjome išvengti L-slenčio įtakos. Tyrimai buvo atlikti užaugintuose $4,2 \mu\text{m}$ bangos ilgio lazeriuose, taikant matavimus lazeriuose su veidrodiniu sluoksniu ir be jo. Mes aptikome netiesinę $1/L$ slenkstinės srovės tankio priklausomybę, o skirtingiems bangolaidžio nuostoliams apskaičiuota stiprinimo priklausomybė nuo srovės tankio parodė, kad visais atvejais stiprinimas padidėja, didinant srovės tankį, o kartu ir elektrinio lauko stiprį (22 pav.). Ši savybė leido padaryti išvadą, kad mes turime stiprią atgalinę apgrąžą mūsų lazeriuose.

Aktyviosios srities modifikacija

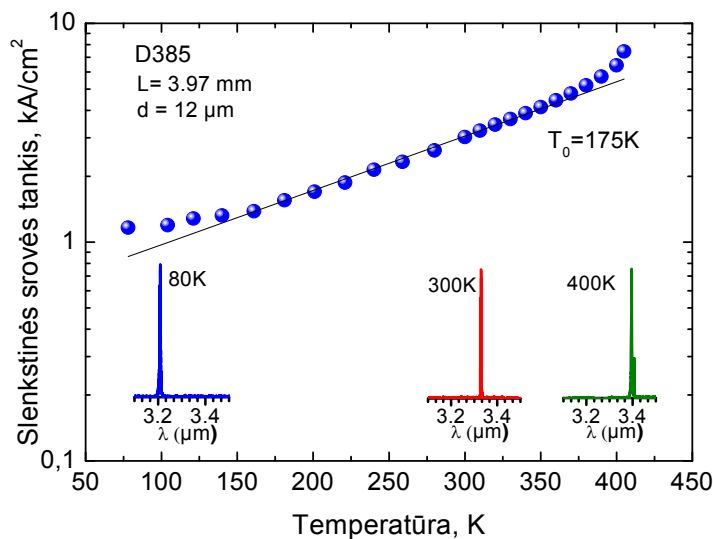
Išnagrinėję aktyviają sritį, naudojamą $3 \mu\text{m}$ emisijos bangos ilgio lazeriuose, buvo pastebėta, kad atgalinė užpilda (angl. *backfilling*) tikrai gali pasireikšti mūsų lazeriuose, nes kaip matyti, pvz., 23 pav., aktyviuose šuliniuose mes vis dar galime turėti elektronus apatiniuose lygmenyse net tuo momentu, kai injektoriaus lygmuo yra viename lygyje su viršutiniu lygmeniu aktyviajame šulinyje. Aktyviosios srities dizainas buvo patobulintas pertvarkant injektoriaus sritį tokiu būdu, kad neliktų elektroninių būsenų aktyviajame šulinyje injektoriaus apatiniame lygmenyje rezonanso metu. Buvo suformuota „piltuvėlio“ formos minijuosta injektoriuje (23 pav.).



23 pav. InAs/AlSb kvantinio kaskadinio lazerio aktyviosios srities, adaptuotos $3,3 \mu\text{m}$ bangos ilgio emisijai, diagrama. Siekiant sumažinti atgalinės užpildos efektą, pritaikytas „piltuvėlio“ formos injektorius.

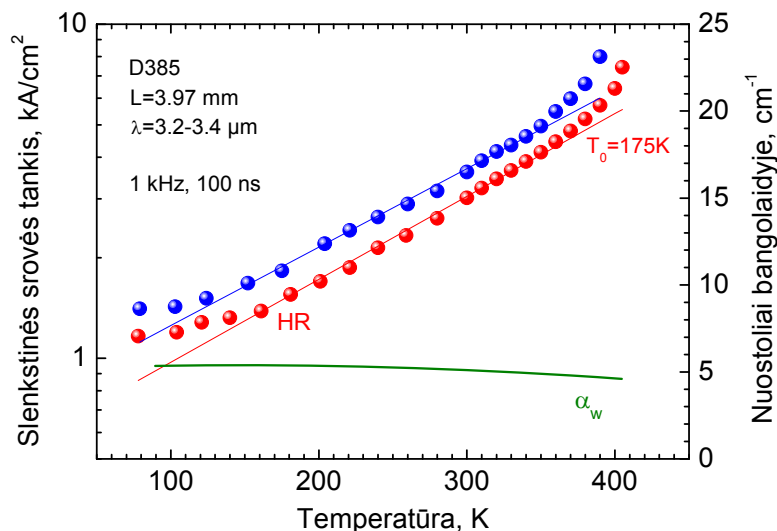
Didelio našumo InAs/AlSb kvantiniai kaskadiniai lazeriai, spinduliuojantys 3,3 μm bangų ruože

Panaudojus modifikuotą aktyviosios srities dizainą (23 pav.), suprojektuotą 3,3 μm bangos ilgio emisijai, bei plazmoninį bangolaidį su InAs/AlSb supergardelėmis buvo užauginta kvantinio kaskadinio lazerio epitaksinė struktūra bei surinkti keli bandiniai su veidrodiniu sluoksniu ir be jo. Pagaminti lazeriai turėjo puikias optines, elektrines ir temperatūrinės charakteristikas. Buvo gauta 3,3 μm emisija skystojo azoto temperatūroje, 3,3 μm emisija kambario temperatūroje. Maksimali veikimo temperatūra kiek viršijo 400 K, kur emisijos bangos ilgis pasislinkdavo iki 3,4 μm . Maksimali optinė galia kambario temperatūroje siekė 1 W, o skystojo azoto temperatūroje – 2,5 W.



24 pav. *InAs/AlSb kvantinių kaskadinių lazerių su modifikuotu aktyviosios srities dizainu slenkstinės srovės tankio temperatūrinė priklausomybė. Intarpuose pateikti skirtingose temperatūrose išrašyti emisijos spektrai.*

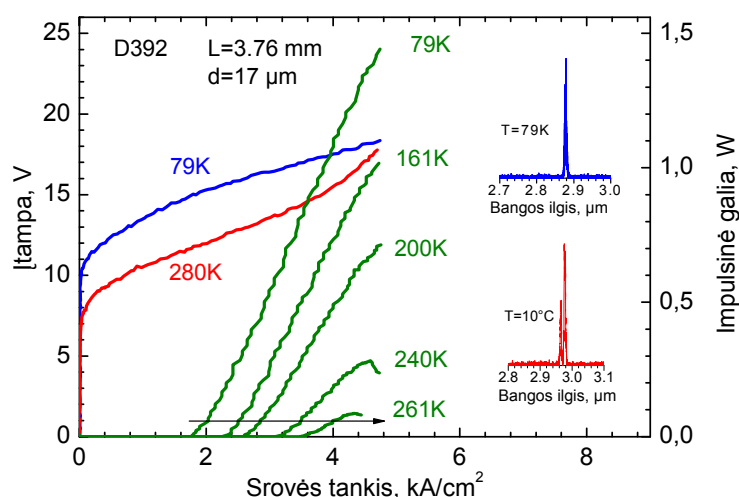
Kambario temperatūroje slenkstinės srovės tankis sumažėjo iki 3 kA/cm². 24 pav. pateikta slenkstinės srovės tankio temperatūrinė priklausomybė, išmatuota bandiniuose be veidrodinio sluoksnio. Intarpuose pateikti emisijos spektrai skirtingose temperatūrose. Slenkstinės srovės tankio temperatūrinės priklausomybės matavimai bandiniuose su veidrodiniu sluoksniu ir be jo (25 pav.) leido įvertinti nuostolius bangolaidyje. Kaip galime matyti, gavome nepriklausomą nuo temperatūros 5 cm⁻¹ vertės nuostolių priklausomybės kreivę. Tai parodo, kad naujajame aktyviosios srities dizaine neturime atgalinės užpildos problemų. Taigi aktyviosios srities modifikacija ženkliai pagerino InAs/AlSb kvantinių kaskadinių lazerių našumą, tačiau pakankamai dideli nuostoliai bangolaidyje rodo, kad šio tipo lazerio našumas dar gali būti pagerintas.



25 pav. Srovės tankio temperatūrinės priklausomybės, išmatuotos bandiniuose su veidrodiniu sluoksniu ir be jo bei apskaičiuota nuostolių bangolaidyje temperatūrinė priklausomybė.

InAs/AlSb kvantiniai kaskadiniai lazeriai, veikiantys žemiau 3 μm bangos ilgio ribos kambario temperatūroje

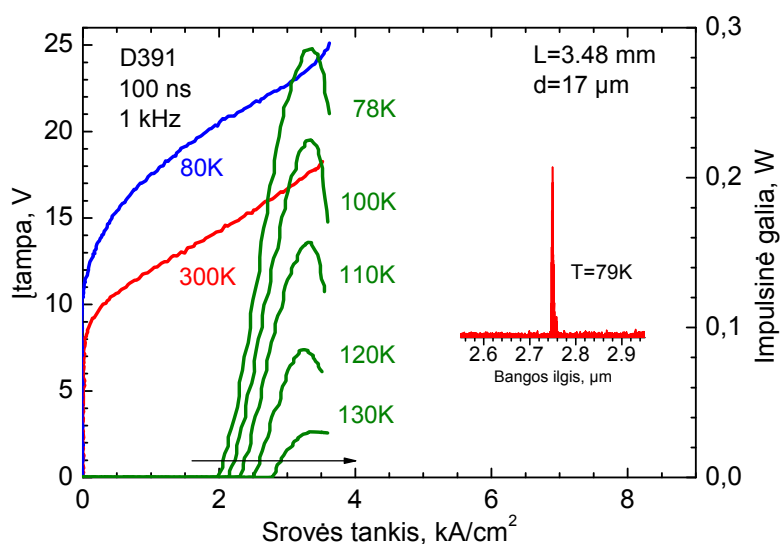
Rezultatai, gauti po aktyviosios srities patobulinimo 3,3 μm bangos ilgio lazeriuose, paskatino pritaikyti modifikuotą aktyviosios srities dizainą trumpesnėse bangose. Taikant „piltuvėlio“ injektoriaus strategiją buvo suprojektuota 2,9 μm bangos ilgio emisijai pritaikyta aktyvioji sritis. Naudojant jau tradicinę plazmoninę bangolaidį su InAs/AlSb supergirdelėmis, buvo pagaminti kvantiniai kaskadiniai lazeriai. Šių lazerių charakteristikos pavaizduotos 26 pav. Pagaminti lazeriai turėjo 2,88 μm bangos ilgio emisiją skysto azoto temperatūroje bei 2,97 μm bangos ilgio emisiją kambario temperatūroje. Slenkstinės srovės tankis šiuose lazeriuose beveik nesiskiria nuo išmatuotos slenkstinės srovės 3,3 μm bangos ilgio lazeriuose. Skystajame azote ir kambario temperatūroje gautos, atitinkamai, 1,8 kA/cm² bei 4 kA/cm² vertės. Vienintelis skirtumas – mažesnė maksimali veikimo temperatūra. Tai gali būti siejama su ankstyvu neigiamos diferencinės varžos pasireiškimu dėl nepakankamo injektoriaus suderinimo su aktyviaja sritimi. Tačiau tai pirmasis kvantinis kaskadinis lazeris, spinduliuojantis žemiau 3 μm ribos kambario temperatūroje.



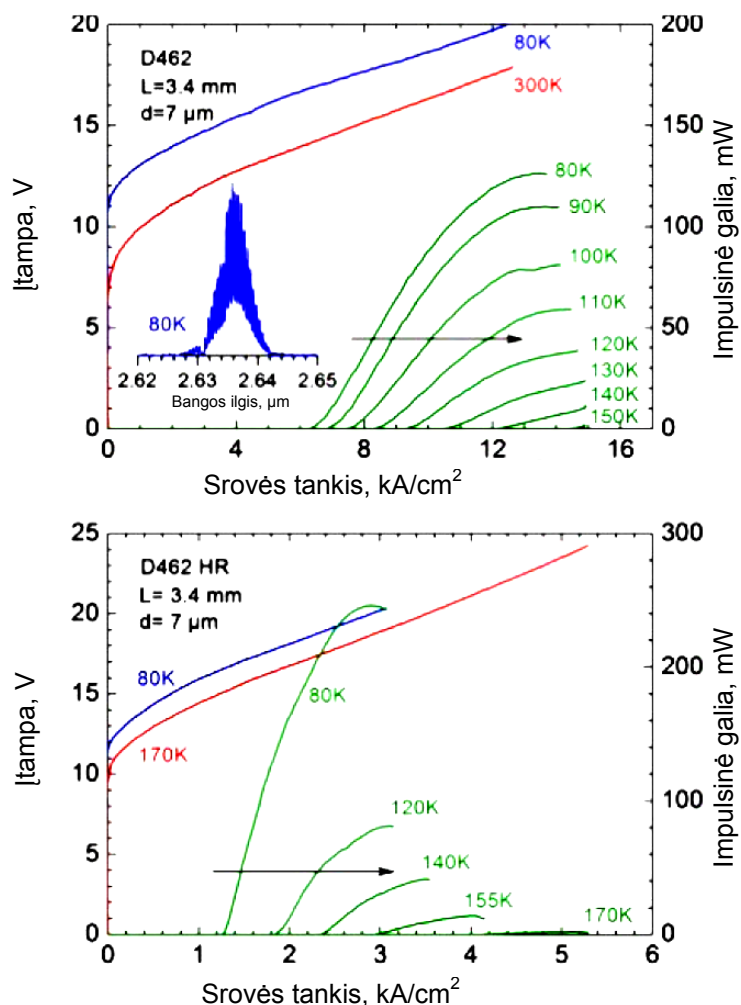
26 pav. *InAs/AlSb* kvantinio kaskadinio lazerio, spinduliuojančio žemiau $3 \mu\text{m}$ bangos ilgio ribos kambario temperatūroje, optinės bei elektrinės charakteristikos. Intarpuose pateikti emisijos spektrai, užrašyti 79 K bei 10°C temperatūrose.

Trumpabangiai InAs/AlSb kvantiniai kaskadiniai lazeriai, spinduliuojantys $2,75 \mu\text{m}$ bei $2,65 \mu\text{m}$ ilgio bangas

Siekiant aptikti trumpabangę kvantinių kaskadinių lazerių emisijos ribą, pasinaudojus aktyviosios srities bei bangolaidžio koncepcija, kuri buvo pritaikyta $3,3 \mu\text{m}$



27 pav. *Kvantinio kaskadinio lazerio, spinduliuojančio $2,75 \mu\text{m}$ bangos ilgio šviesą, voltamperinės bei vatamperinės charakteristikos, išmatuotos skysto azoto temperatūroje. Intarpe pateiktas emisijos spektras, užrašytas skysto azoto temperatūroje.*



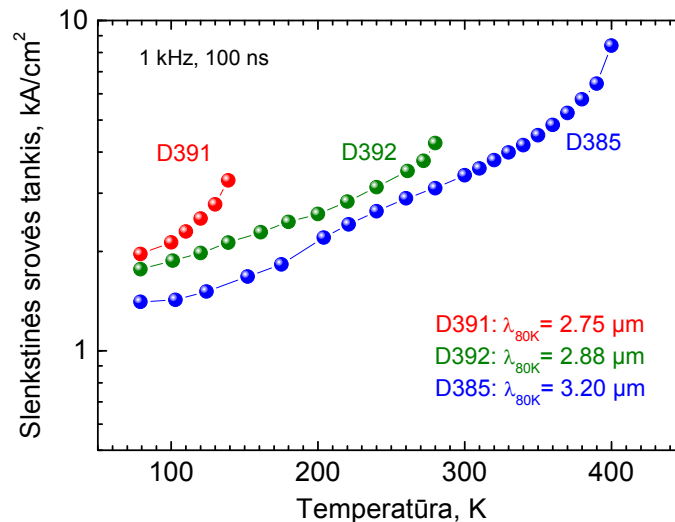
28 pav. Kvantinio kaskadinio lazerio, spinduliuojančio 2,65 μm bangos ilgio šviesą, voltamperinės bei vatamperinės charakteristikos. Intarpe pateiktas emisijos spektras, užrašytas skysto azoto temperatūroje.

bei 2,88 μm bangos ilgio lazeriuose, buvo sukurtas InAs/AlSb medžiagų sistemos kvantinis kaskadinis lazeris, spinduliuojantis 2,75 μm bangos ilgio šviesą. Šio lazerio aktyvioji sritis pritaikyta 2,8 μm bangos ilgio emisijai. Vienintelis skirtumas – tai nežymiai padidintas barjerų tarp aktyviųjų šulinių storis. Tai puvo padaryta siekiant nutolinti sužadintą lygmenį aktyviajame šulinyje nuo L-slėniui priklausančių lygmenų. Šio lazerio charakteristikos pateiktos 27 pav. Skystojo azoto temperatūroje šis lazerinis diodas turėjo 0,3 W maksimalią optinę galią. Maksimali veikimo temperatūra siekė 140 K.

Kiek vėliau buvo atliktas kitas sėkmingas bandymas pasistūmėti trumpųjų bangų link. Nežymiai modifikavus aktyviają sritį, kuri buvo naudojama 2,75 μm emisijos bangos ilgio lazeriuose, pašalinant sužadintų būsenų delokalizaciją į antrąjį kvantinį šulinį, buvo gauta 2,65 μm bangos ilgio spinduliuotė. Šiuo metu tai yra trumpiausias tarpjauostinių lazerių emisijos bangos ilgis. Šių lazerių optinės bei elektrinės charakteristikos pateiktos 28 pav. Kaip matyti, padidėjo šių lazerių maksimali veikimo temperatūra, tačiau padidėjo ir slenkstinės srovės tankis bei sumažėjo optinė galia. Šis našumo sumažėjimas gali būti siejamas su L-slėnio įtaka, kuri bus nagrinėjama kitame skyriuje.

L-slėnio įtaka

Kaip jau buvo paminėta, pagrindinis faktorius, ribojantis trumpabangį kvantinių kaskadinių lazerių veikimą, yra šoninių slėnių įtaka. Kaip matyti iš 29 pav. pateiktos InAs/AlSb trumpabangių lazerių slenkstinės srovės temperatūrinių priklausomybių suvestinės, skystojo azoto temperatūroje stebimas labai nežymus slenkstinės srovės



29 pav. InAs/AlSb trumpabangių lazerių slenkstinės srovės temperatūrinių priklausomybių suvestinė.

tankio kitimas, tad galima teigti, kad mes neturime L-slėnio įtakos žemose temperatūrose. Tačiau aukštesnėse temperatūrose krūvininkų nuotėkis į šoninį slėnį gali būti pagrindinė lazerių našumo sumažėjimo priežastis. Siekiant tai patikrinti, buvo atlikti bandinių, spinduliuojančių 2,9 μm bei 3,3 μm ilgio šviesos bangas, tyrimai aukštame hidrostatiniame slėgyje. Bandymai buvo atlikti Surrey universiteto laboratorijoje (Didžioji Britanija). Buvo tiriamos bandinių slenkstinės srovės temperatūrinės priklausomybės skirtinguose slėgiuose. Kadangi Γ-slėnio padėtis yra labiau jautri slėgiui, nei L-slėnio, todėl tai galima panaudoti atskiriant efektus, susietus su juostine struktūra bei temperatūra. Tyrimai parodė, kad 3,3 μm šviesą spinduliuojančiame bandinyje nėra krūvininkų nuotėkio į L-slėnį, tačiau 2,9 μm bangos ilgio lazeriuose mes turime ženklų elektronų nuotėkį į šoninį slėnį aukštesnėse temperatūrose, kuris 190 K temperatūroje siekia 13%, o kambario temperatūroje gali siekti 33%. Tai parodo, kad sužadinti lygmenys aktyviuosiuose šuliniuose mūsų lazeriuose yra arti L-slėnio lygmenų. Tad norėdami pagerinti lazerių našumą, turėsime patobulinti aktyviają sritį, nuleidžiant žemyn lygmenis aktyviuosiuose šuliniuose.

Pagrindiniai rezultatai ir išvados

Molekulinių pluoštelių epitaksijos sklendžių uždarymo/atidarymo sekos tyrimai parodė, kad skirtingų tipų sandūrų priverstinis formavimas tarp InAs ir AlSb sluoksnių periodiniuose InAs/AlSb dariniuose leidžia auginti neįtemptus įvairialyčius epitaksinius sluoksnius. Užauginti kvantinių kaskadinių lazerių dariniai, turintys iki 30 aktyviųjų sričių pakartojimo periodų su 2×250 periodų tarpikliais. Bendras InAs/AlSb sandūrų skaičius atskiruose lazeriuose siekia 1300. Tokiu būdu pagaminti kvantiniai kaskadiniai lazeriai turėjo tinkamas elektrines ir optines savybes bei pasižymėjo aukšta sandūrų kokybe.

Atlikti pusiau empiriniai legiruoto InAs optinių savybių skaičiavimai parodė, kad stipriai legiruotos InAs medžiagos lūžio rodiklis gali būti pakankamai žemas ir gali užtikrinti pakankamą lūžio rodiklio kontrastą su aktyviaja terpe, leidžiančia pasiekti gerą optinį ribojimą $3 \mu\text{m}$ bangos ilgio srityje. Šie rezultatai leido sukurti InAs/AlSb kvantinius kaskadinius lazerius, spinduliuojančius arti $3 \mu\text{m}$ bangos ilgio ribos.

Stiprinimo ir nuostolių analizė atskleidė stiprią atgalinę užpildą lazerių aktyviojoje terpėje. Aktyviosios srities modifikavimas leido ženkliai pagerinti lazerių elektrines savybes, tačiau siauras InAs draustinis tarpas išliko pagrindiniu faktoriumi, trukdančiu InAs/AlSb lazerių veikimui aukštesnėje temperatūroje.

Silpnai legiruotų InAs tarpiklių pakeitimas mažo periodo InAs/AlSb supergardenėmis ženkliai pagerino InAs/AlSb kvantinių kaskadinių lazerių našumą. Maksimali veikimo temperatūra buvo padidinta iki 420 K, esant $3,3 \mu\text{m}$ bangos ilgio emisijai. Maksimali optinė galia pasiekė 1 W. Kambario temperatūroje buvo pasiekta $3 \mu\text{m}$ bangos ilgio emisijos riba. Šiuo metu InAs/AlSb medžiagų sistemos kvantiniai kaskadiniai lazeriai yra vieninteliai tarppajuostiniai prietaisai kambario temperatūroje spinduliuojantys žemiau $3 \mu\text{m}$ bangos ilgio ribos.

Taikant naująją aktyviosios srities dizaino strategiją bei InAs/AlSb supergardenes tarpikliuose, buvo sukurti $2,75 \mu\text{m}$ bei $2,6 \mu\text{m}$ emisijos bangos ilgio kvantiniai kaskadiniai lazeriai. Šiuo metu tai yra trumpiausias tarppajuostinių lazerių emisijos bangos ilgis.

Pasiekti rezultatai rodo InAs/AlSb medžiagų sistemos tinkamumą trumpabangių tarppajuostinių lazerinių prietaisų gamybai.

Tolimesnis InAs/AlSb kvantinių kaskadinių lazerių vystymas gali būti siejamas su šių prietaisų optinės galios didinimu. Pagrindinė problema čia yra siejama su InAs šoninio slėnio įtaka. Parodyta, kad iki $3 \mu\text{m}$ bangos ilgio šis slėnis realios įtakos neturi. Tačiau trumpesnėms bangoms šoninių slėnių įtaka yra esminė. Šio slėnio įtaka gali būti sumažinta pakeičiant aktyviosios srities dizainą, nuleidžiant žemiau aktyvias elektronų pajuostas. Kita priežastis, trukdanti pasiekti didesnę šių lazerių galią, yra žemas InAs/AlSb supergardenių šiluminis laidumas. Ši problema gali būti sprendžiama, ieškant tinkamos alternatyvos šiai bangolaidžio komponentei.

Literatūra

- [1] A. Evans, S. R. Darvish, S. Slivken, J. Nguyen, Y. Bai, and M. Razeghi, *Buried heterostructure quantum cascade lasers with high continuous-wave wall plug efficiency*. Appl. Phys. Lett. 91, 071101 (2007).
- [2] J. S. Yu, A. Evans, S. Slivken, S. R. Darvish, and M. Razeghi, *Temperature dependent characteristics of $\lambda \sim 3.8 \mu\text{m}$ room-temperature continuous-wave quantum-cascade lasers*. Appl. Phys. Lett. 88, 251118 (2006).
- [3] J. Faist, F. Capasso, D. L. Sivco, C. Sirtori, A. L. Hutchinson, and A. Y. Cho. *Quantum Cascade Laser*. Science, 264, 553, (1994).
- [4] M. P. Semtsiv, M. Wienold, S. Dressler, and W.T. Masselink, *Short-wavelength ($\lambda \sim 3.05 \mu\text{m}$) InP-based strain-compensated quantum-cascade laser*. Appl. Phys. Lett. 90, 051111 (2007).
- [5] D. G. Revin, J. W. Cockburn, M. J. Steer, R. J. Airey, M. Hopkinson, A. B. Krysa, L. R. Nilson, S. Menzel, Appl. Phys. Lett. 90, 021108 (2007).
- [6] J. Devenson, R. Teissier, O. Cathabard, and A. N. Baranov, *InAs/AlSb quantum cascade lasers emitting below $3 \mu\text{m}$* . Appl. Phys. Lett. **90**, 111118 (2007)
- [7] R. Teissier, D. Barate, A. Vicet, C. Alibert, A. N ; Baranov, X. Marcadet, C. Renard, M. Garcia, C. Sirtori, D. Revin, and J. Cockburn. *Room temperature operation of InAs/AlSb quantum Cascade lasers*. Appl. Phys. Lett., **85**(2), 167 (2004).
- [8] K. C. Wong, C. Yang, M. Thomas and H-R Blank. *Study of the morphology of the InAs-on-AlSb interface*. J. Appl. Phys. 82, 4904 (1997).
- [9] E. Rosencher and B. Vinter, *Optoélélectronique* (MASSON, Paris, 1998), p. 234.
- [10] J. Faist, F. Capasso, D. L. Sivco, A. L. Hutchinson, S. G. Chu, and A. Y. Cho. *Short wavelength ($\sim 3\text{-}4 \mu\text{m}$) quantum cascade laser based on strained compensated InGaAs/AlInAs*. Appl. Phys. Lett., 72(6), 680 (1998).

Jan Devenson
Publikuotų darbų sąrašas (2005-2010)

STRAIPSNIAI:

1. O. Cathabard, R. Teissier, J. Devenson, J. C. Moreno, and A. N. Baranov. *Quantum cascade lasers emitting near 2.6 μm* . Appl. Phys. Lett. **96**, 141110 (2010).
2. O. Cathabard, R. Teissier, J. Devenson, A. N. Baranov, *InAs-based distributed feedback quantum cascade lasers*, Electron. Lett. **45**, 1028, (2009).
3. E. Benveniste, A. Vasanelli, A. Delteil, J. Devenson, R. Teissier, A. Baranov, A. M. Andrews, G. Strasser, I. Sagnes, and C. Sirtori. *Influence of the material parameters on quantum cascade devices*. Appl. Phys. Lett. **93**, 131108 (2008)
4. J. Devenson, O. Cathabard, R. Teissier, and A. N. Baranov. *InAs/AlSb quantum cascade lasers emitting at 2.75–2.9 μm* . Appl. Phys. Lett. **91**, 251102 (2007).
5. J. Devenson, O. Cathabard, R. Teissier, and A. N. Baranov, *High temperature operation of 3.3 μm quantum cascade lasers*. Appl. Phys. Lett. **91**, 141106 (2007).
6. J. Devenson, R. Teissier, O. Cathabard, and A. N. Baranov, *InAs/AlSb quantum cascade lasers emitting below 3 μm* . Appl. Phys. Lett. **90**, 111118 (2007).
7. S. Menzel, E. A. Zibik, D. G. Revin, J. W. Cockburn, J. Devenson, R. Teissier, and A. N. Baranov, *Relaxation and dephasing of the intersubband transitions in n-type InAs/AlSb multi quantum wells*. Appl. Phys. Lett. **91**, 071918 (2007).
8. Aji A. Anappara, A. Tredicucci, D. Barate, G. Biasiol, L. Sorba, J. Devenson, R. Teissier, and A. Baranov, *Controlling polariton coupling in intersubband microcavities*. AIP Conf. Proc. **893**, 523 (2007).
9. Aji A. Anappara, David Barate, Alessandro Tredicucci, Jan Devenson, Roland Teissier and Alexei Baranov, *Giant intersubband polariton splitting in InAs/AlSb microcavities*. Solid State Communications, Vol. **142**, Iss. **6**, 311-313, (2007).
10. J. Devenson, D. Barate, O. Cathabard, R. Teissier, and A. N. Baranov, *Very short wavelength ($\lambda=3.1\text{-}3.3 \mu\text{m}$) quantum cascade lasers*. Appl. Phys. Lett. **89**, 191115 (2006).
11. C. Faugeras, A. Wade, A. Leuliet, A. Vasanelli, C. Sirtori, G. Fedorov, D. Smirnov, R. Teissier, A. N. Baranov, D. Barate, and J. Devenson, *Radiative quantum efficiency in an InAs/AlSb intersubband transition*. Phys. Rev. B **74**, 113303 (2006).

12. J. Devenson, O. Cathabard, R. Teissier, and A. N. Baranov, *Short wavelength ($\lambda=3.5 - 3.65 \mu\text{m}$) InAs/AlSb quantum cascade lasers*. Electron. Lett. 42, 1284, (2006).

PRANEŠIMAI KONFERENCIJOSE:

1. O. Cathabard, R. Teissier, J. Devenson, and A. Baranov, *InAs/AlSb distributed feedback quantum cascade lasers*, EDISON 16, (Montpellier, France, August 24–28, 2009).
2. A. N. Baranov, J. Devenson, R. Teissier, O. Cathabard, *InAs-based quantum cascade lasers*. Photonics West 2008, (San Jose, USA, 19–25 January, 2008).
3. R. Teissier, J. Devenson, O. Cathabard, A. N. Baranov, *Single Mode Quantum Cascade Lasers emitting at $3.3\mu\text{m}$* , International Quantum Cascade Lasers School & Workshop (IQCLSW), (Monte Verita, Suisse, 14–19 September 2008).
4. A. N. Baranov, J. Devenson, R. Teissier, O. Cathabard, *InAs quantum cascade lasers*. MIOMD IX, (Freiburg, Germany, 7–11 September, 2008).
5. R. Teissier, J. Devenson, O. Cathabard, A. N. Baranov, *Short wavelength quantum cascade lasers emitting around $3 \mu\text{m}$* . CLEO 2008, (San Jose, USA, 4–9 May, 2008).
6. Roland Teissier, Jan Devenson, Olivier Cathabard, Alexei Baranov, *Short wavelength InAs-based Quantum Cascade Lasers*, ITQW07, (Ambleside, UK, September 9–14, 2007).
7. Jan Devenson, Roland Teissier, Olivier Cathabard, Alexei Baranov, *High temperature InAs based Quantum Cascade Lasers*. NGS13 (Guildford, UK, July 8–12, 2007);
8. R. Teissier, J. Devenson, O. Cathabard, and A. N. Baranov, *Short wavelength InAs/AlSb quantum cascade lasers*. MIOMD-VIII (Bad Ischl, Austria, May 14–16, 2007).
9. Roland Teissier, Thibaut Daoud, Jan Devenson, Alexei Baranov, *InAs Quantum Hot Electron Transistors*, NGS13 (Guildford, UK, July 8–12, 2007).
10. Jan Devenson, Roland Teissier, Olivier Cathabard, Alexei N. Baranov, *Quantum Cascade Lasers Emitting below $3\mu\text{m}$* . CLEO 07 (Baltimore, Maryland, USA, May 8–10, 2007).

11. J. Devenson, R. Teissier, O. Cathabard, and A. N. Baranov, Short wavelength InAs/AlSb Quantum Cascade Lasers. POISE annual meeting (Montpellier, FR, April 13, 2007).
12. J. Devenson, R. Teissier, D. Barate, and A. N. Baranov, *Short wavelength InAs/AlSb Quantum Cascade Lasers*. POISE annual meeting (Cambridge, UK, November 13, 2006).
13. J. Devenson, R. Teissier, D. Barate, and A. N. Baranov, InAs/AlSb *Quantum Cascade Lasers: Plasmon-Enhanced Waveguide for 3-4 μm* . POISE annual meeting (Neuchatel, Switzerland, March 30, 2006).
14. J. Devenson, R. Teissier, A. N. Baranov, *Lasers à cascade quantique InAs/AlSb de courte longueur d'onde ($\lambda \sim 3,5 \mu\text{m}$)*. JNMO 2006 (Lyon, France, April 2006).
15. J. Devenson, R. Teissier, A. N. Baranov, *Short wavelength ($\sim 3.1 \mu\text{m}$) InAs/AlSb quantum cascade lasers*, POISE Summer School, (Cortona, Italy, June 25-30, 2006).
16. J. Devenson, D. Barate, R. Teissier, and A. N. Baranov, *Short wavelength antimonide quantum cascade lasers*, AOMD-5 (Vilnius, Lithuania, August 27–30, 2006).
17. A. N. Baranov, J. Devenson, O. Cathabard, R. Teissier, *Antimonide quantum cascade lasers for short wavelength emission*, 3rd Russian-French Workshop on Nanoscience and Nanotechnologies, (St. Petersburg, Russia, June 20–23, 2006).
18. Aji A. Anappara, Alessandro Tredicucci, Fabio Beltram, Giorgio Biasiol, Lucia Sorba, Jan Devenson, David Barate, Roland Teissier, Controlling polariton coupling in intersubband microcavities. International Conference on the Physics of Semiconductors, ICPS 2006.
19. R. Teissier, J. Devenson, D. Barate, O. Cathabard, and A. N. Baranov, Short wavelength ($\lambda \sim 3.1\text{--}3.6 \mu\text{m}$) Quantum Cascade Lasers. QCL Brindisi, Sept. 6-9, 2006.
20. J. Devenson, R. Teissier, D. Barate, and A. N. Baranov, Short Wavelength InAs/AlSb Quantum Cascade Lasers. POISE midterm meeting (Cambridge, UK, November 13, 2006).
21. A. N. Baranov, D. Barate, J. Devenson, R. Teissier, InAs/AlSb Quantum Cascade Lasers: towards short wavelengths. POISE annual meeting (Vienna, Switzerland, October 6, 2005).

Informacija apie autorių

Jan Devenson

Gimimo data: 1971 02 28

Gimimo vieta: Vilnius, Lietuva

Mokslinio darbo patirtis:

- 2005-2010 Universitetas Montpellier II, (IES - *Institute d'Electronique du Sud*), sutartis tiriamajam darbui. Tema: InAs/AlSb kvantinių kaskadinių lazerių molekulinė pluoštelių epitaksija.
- 2003-2005 Lietuvos teismo ekspertizės centras, Kompiuterinių tyrimų skyrius, vyriausiasis ekspertas.
- 2002-2008 Puslaidininkių fizikos institutas, laborantas.

Išsilavinimas:

- 2004 Magistro laipsnis. Vilniaus universitetas, Fizikos fakultetas.
- 2002 Bakalauro laipsnis. Vilniaus universitetas, Fizikos fakultetas.

Tyrimų kryptis: III-V puslaidininkių molekulinė pluoštelių epitaksija; kvantiniai kaskadiniai lazeriai; InAs/AlSb kvantinių darinių tyrimai; puslaidininkių optoelektroninių prietaisų technologija.

SUMMARY

Quantum cascade lasers (QCLs) are considered now as standard light sources for many chemical sensing applications in the mid-infrared above 4 μm . Some spectroscopic applications require injection semiconductor lasers emitting at shorter wavelengths in the vicinity of 3 μm . This spectral region is, in principle, accessible both for interband diode lasers and quantum cascade lasers (QCLs) operating at room temperature (RT). It deserves to note that performances of diode lasers rapidly degrade above 3 μm due to fundamental limitations such as increasing influence of nonradiative Auger recombination. High quality QCLs based on the InP technology are suited for $\lambda > 3.8 \mu\text{m}$ but the extension their operation range towards shorter wavelengths is still a challenge due mainly to material limitations. Using adequate materials high performance QCLs operating at wavelengths as short as 3 μm or even below can be developed.

The InAs/AlSb material system seems to be at present the most promising for the development of short wavelength QCLs thanks to the high conduction band offset of 2.1 eV and the large Γ -L distance of 0.73 eV in InAs. Another advantage of this system is the small electron mass in InAs, which is favorable to obtain QCLs with high gain and low threshold. However, InAs/AlSb material system was not used for development of short wavelength QCLs mainly due to the difficulties associated with the epitaxial growth as there are no common atoms at the well/barrier interfaces. The first short wavelength antimonide-based QCL emitting near 4.5 μm at room temperature has been developed by NANOMIR group of the IES (*Institut d'Electronique du Sud*) in University Montpellier II in France and it was a starting point of my work at the same laboratory. The advantage of this new material system for development of short wavelength QCLs was obvious, however to fully exploit it variety of investigations on this material properties and technology were needed.

The main task of this work:

To develop high performance short-wavelength Quantum cascade laser.

Major goals of this work

- To investigate high energy limits of exploitation of intersubband transitions in the InAs/AlSb material system for development of unipolar semiconductor lasers operating at wavelengths below 4.5 μm .
- To investigate suitability of InAs/AlSb material system for development of short wavelength QC lasers.

- To investigate optimal growth conditions for Molecular Beam Epitaxy of InAs/AlSb heterostructures in order to obtain high interface quality unstrained epitaxial layers.
- To develop high performance short-wavelength InAs/AlSb based QCLs emitting at wavelengths below 4 μm .

Importance for application

The mid-infrared range, sometimes called the fingerprint region of the electromagnetic spectrum, is of enormous scientific and technological interest since many molecules have their fundamental rotational-vibrational absorption bands in this range. The MIR absorption spectrum is very specific to the structure of a particular molecule, allowing highly selective detection. In addition, since these absorption lines are very strong (several orders of magnitude stronger than the overtone and combination bands in the NIR), concentrations in the parts-per-billion (ppb) to parts-per-trillion (ppt) ranges can be detected using relatively compact laser-based sensors. Fast, sensitive, and selective chemical sensors are needed in numerous applications. In industrial process control they are used for detection of contamination in semiconductor fabrication lines and for plasma monitoring, in law enforcement for drug and explosive detection, in automotive industry for engine exhaust analysis, in environmental science for pollution monitoring, in medical diagnostics for exhaled breath analysis, and in homeland security for detection of chemical airfare agents.

Another interesting feature of the mid-infrared are the atmospheric transmission windows between 3-5 μm and 8-12 μm which enable free-space optical communications, remote sensing, and thermal imaging. High power lasers in the 3–5 μm range will also enable the development of infrared counter-measures for homeland security.

Especially, application of intersubband transition based lasers is indispensable in a hot test environment such as the oil boring or other applications where temperature may reach 400 K.

Novelty of scientific investigation

The appropriate molecular beam epitaxy procedure has been developed to obtain smooth interfaces with roughness of 1-2 atomic monolayers in thick periodic InAs/AlSb unstrained epitaxial layers.

Investigation on the optical properties of heavily doped n^+ -InAs material exhibited, that this material is suitable for application in InAs-based QCL cladding layers to obtain efficient optical confinement at the same time avoiding interband absorption, which is expected due to the narrow band gap of InAs. Applying plasmon-enhanced waveguide with heavily doped InAs claddings for the first time the short wavelength limit of antimonide-based QC lasers has been pushed below 4 μm . A set of InAs-based QCLs

with a plasmon-enhanced waveguide, emitting at wavelength of 3.1 – 3.6 μm has been realized.

Replacement of the low doped InAs spacers by short period superlattices in our QC lasers is a key achievement of this work. This modification made a strong impact on laser performances. For the first time high performance InAs-based QCLs emitting at wavelengths near 3 μm and operating above 400 K temperature were realized. This modification allowed us to realize the first QC laser, emitting below 3 μm wavelength at room temperature.

Gathered experience and further active region modifications using “funnel” type of injector allowed us to develop InAs/AlSb quantum cascade laser, emitting at 2.6 μm wavelength. This is a shortest to date intersubband transition-based laser emission wavelength.

Statements carried out for defense

1. The InAs/AlSb material system is suitable for the development of quantum cascade lasers emitting below 3.5 μm . This is proven by demonstration of QCLs emitting at wavelengths as short as 2.6 μm , the shortest to date QCL emission wavelength.
2. Heavily doped n⁺-InAs is appropriate material for optical confinement in the InAs/AlSb QCLs due to the doping-induced decrease in the refractive index. It can be successfully used even in QCLs operating at photon energies above the InAs bandgap because of the shift of the InAs absorption edge due to the conduction band filling.
3. Short-period InAs/AlSb superlattice is a suitable material for use in the QCL waveguide for separation of the active region from the cladding layers. To avoid optical absorption both interband and intersubband gaps of the superlattice can be adjusted by a proper choice of its period.
4. Despite the small bandgap of InAs interband absorption in the active region of InAs/AlSb QCLs does not affect operation of InAs/AlSb QCLs because it always occurs at higher energies compared with the intersubband transition energy.
5. Carrier leakage into L-valley of InAs quantum wells in the active region is negligible in InAs/AlSb QCLs operating above 3 μm . On the contrary, below 2.75 μm this effect limits further decrease in the QCL emission wavelength.

Publication and approbation of scientific results

Major results of this work have been published in 12 scientific papers and were presented at 21 international conferences.