ՀՀ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ
ԵՐԵՎԱՆԻ ՊԵՏԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

Սահակյան Խաչիկ Սուրիկի

ՄԱԿԵՐԵՎՈՒԹԱՅԻՆ ԷԼԵԿՏՐԱՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ԱԼԻՔՆԵՐԸ ՊԱՐԲԵՐԱԿԱՆ ԵՎ ԲԱԶՄԱՇԵՐՏ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔՆԵՐՈՒՄ

Ա.04.03 - Ռադիոֆիզիկա մասնագիտությամբ
ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների թեկնածուի
գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության
ՍԵՂՄԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ 2017

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РА
ЕРЕВАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Саакян Хачик Сурикович

ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ В ПЕРИОДИЧЕСКИХ И МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУРАХ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук по специальности
01.04.03 – “Радиофизика”

ЕРЕВАН – 2017

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Երևանի պետական համալսարանում:

Գիտական ղեկավար՝ ֆ.մ.գ.դ., պրոֆեսոր
Խ.Վ. Ներկարարյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ ֆ.մ.գ.դ., պրոֆեսոր
Լ.Ս. Ասլանյան
ֆ.մ.գ.թ., պրոֆեսոր
Հ.Վ. Բաղդասարյան

Առաջատար կազմակերպություն՝ ՀՀ ԳԱԱ Ռադիոֆիզիկայի և Էլեկտրոնիկայի Ինստիտուտ

Պաշտպանությունը կայանալու է 2017թ. հունիսի 10-ին ժամը 12:00-ին Երևանի պետական համալսարանի 049 ֆիզիկայի մասնագիտական խորհրդի նիստում: Հասցե՝ 0025, Երևան, Ա. Մանուկյան 1:
Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ԵՊՀ գրադարանում:
Սեղմագիրն առաքված է 2017թ. մայիսի 5-ին:

Մասնագիտական խորհրդի գիտական քարտուղար՝ ֆ.մ.գ.թ., դոցենտ
Վ.Պ. Քալանթարյան

Тема диссертации утверждена в Ереванском государственном университете.

Научный руководитель: д.ф.м.н., профессор
Х.В. Неркарарян

Официальные оппоненты: д.ф.м.н., профессор
Л.С. Асланян
к.ф.м.н., профессор
О.В. Багдасарян

Ведущая организация: Институт радиофизики и электроники НАН РА

Защита диссертации состоится 10 июня 2017г. в 12:00 часов, на заседании специализированного совета 049 по физике Ереванского государственного университета по адресу: 0025, Ереван, ул. А. Манукяна 1.
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЕГУ.
Автореферат разослан 5 мая 2017г.

Ученый секретарь специализированного совета: к.ф.м.н., доцент
В.П. Калантарян

ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԸՆԴՀԱՆՈՒՐ ԲՆՈՒԹԱԳԻՐԸ

Աշխատանքի արդիականությունը

Մետաղական բարակ շերտում բացված ենթաալիքային անցքերով լույսի արտասովոր անցման (ԼԱԱ) երևույթի բացահայտումից [1] հետո այն մեծ հետաքրքրություն առաջացրեց գիտական աշխարհում: Փորձնական արդյունքները ցույց էին տալիս, որ ի տարբերություն մինչ այդ գոյություն ունեցող ենթաալիքային անցքերով էլեկտրամագնիսական ալիքի անցումը նկարագրող տեսական արդյունքների, որոշ դեպքերում, դիտարկվում է ենթաալիքային անցքից ալիքի անցման հսկայական աճ՝ 10 – ից 100 անգամ գերազանցելով ակնկալվող արդյունքները: Երևույթի բացահայտումը խթանել է ենթաալիքային խոռոչների հիմնարար տեսական և փորձնական ինտենսիվ հետազոտությունների իրականացմանը, ինչպես նաև կտրուկ աճել է այս խոռոչների և նրանցով կազմված պարբերական համակարգերի՝ բազմաթիվ օպտիկական սարքավորումներում որպես հիմնարար տարր հնարավոր կիրառության հետաքրքրությունը: Այս նանոհամակարգերի հատկությունների վրա են հիմնված ժամանակակից տեսական և կիրառական ֆիզիկայի այնպիսի պահանջված ուղղություններ ինչպիսիք են՝ մոտակա դաշտի միկրոսկոպիան, մակերևույթին ուժեղացված ռամանյան սպեկտրոսկոպիան (ՄՈՒՌՍ) , միկրո լազերները, մի մոլեկուլի զոնդավորումը և ֆլյուրեսցենցիան, լուսադիոդներից լույսի էֆեկտիվ դուրս բերումը և այլն [2]: Ենթաալիքային անցքերով լույսի արտասովոր անցման երևույթի վրա են հիմնված վերջերս հայտնաբերված լույսի նեղուղղված փունջ ստանալու տեխնիկան [3] և անցքերի պարբերական համակարգերի վրա լույսի իդեալական կլանումը [2]:

Վերջերս տերահերցային տիրույթում կատարված փորձերն ի հայտ բերեցին ենթաալիքային ճեղքում լույսի արտասովոր անցման ոչ ռեզոնանսային (լայնաշերտ) բնույթը [4], ինչը մինչ այդ չէր կանխատեսվում ԼԱԱ – ը նկարագրող տեսական բանաձևերով: Մինչ այդ պահը ԼԱԱ բացատրող բոլոր մեխանիզմներում անցումը ռեզոնանսային էր և կապված էր մակերևութային

պլազմոն պոլյարիտոնների (ՄՊՊ) էֆեկտիվ գրգռման և ընկնող դաշտի հետ էլեկտրամագնիսական ինտերֆերենցի հետ [2,5]: Խնդիր առաջացավ գրել նոր տեսական բանաձևեր, որոնք կնկարագրեն լույսի ոչ ռեզոնանսային արտասովոր անցումը ենթաալիքային ճեղքերով և ճեղքերի պարբերական համակարգերով: Աշխատանքի առաջին գլուխը նվիրված է հենց այս խնդրի լուսաբանմանը:

Գիտական աշխարհում այժմ փոխհամաձայնություն կա, որ ԼԱԱ – ը ունի երկու բնույթ՝ ռեզոնանսային և լայնաշերտ [1,4]: Ռեզոնանսային բնույթը պայմանավորված է ճեղքերում առաջացող ՄՊՊ լոկալ ռեզոնատորների և ընկնող էլեկտրամագնիսական ալիքի ինտերֆերենցով: Այստեղ լույսի անցումը նկարագրելու համար անհրաժեշտ է իմանալ ենթաալիքային ճեղքի եզրից ՄՊՊ ալիքի անդրադարձման ամպլիտուդը և փուլը: Այս համակարգերում իրականացվում են այնպիսի նանոհամակարգեր, ինչպիսիք են՝ ՄՊՊ մոդուլյատորները, օպտիկական բիստաբիլության հիման վրա աշխատող հաշվողական տարրերը և այլն [6]: Բացի այս, ենթաալիքային ճեղքում լոկալ ՄՊՊ ռեզոնատորների աշխատանքի վրա է հիմնված պլազմոնային նանո անտենաների աշխատանքը [7]: Նպաստավոր ալիքի երկարության վրա աշխատող նանո անտենա նախագծելու համար ամենակրիտիկական պարամետրը ճեղքի եզրից ՄՊՊ ալիքի անդրադարձման ժամանակ փուլի փոփոխությունն է, ինչն անդրադարձման և անցման գործակիցների հետ միասին ստացված է երկրորդ գլխում:

Մանրաթելային և ինտեգրալային օպտիկայի զարգացումը բերեց տարբեր օպտիկական սարքերի ստեղծմանը և զարգացմանը, ինչպիսիք են օրինակ՝ ֆիլտրերը, մոդուլյատորները, օպտիկական հիշողության սարքերը և այլն: Գրեթե բոլոր բարդ օպտիկական սարքերի անբաժանելի մասն են կազմում օպտիկական ռեզոնատորները: Ներկայումս ֆիզիկայի զարգացման հիմնական ուղղություններից է հանդիսանում չափումների քվանտային տեսությունը և նրա հետ կապված առանձնացված քվանտային օբյեկտների մանիպուլյացիայի խնդիրը: Օպտիկական ռեզոնատորները կատարում են անփոխարինելի

աշխատանք և հանդիսանում են այս հետազոտությունների կարևորագույն տարրը: Օպտիկական միկրոռեզոնատորների դերն անփոխարինելի է նաև օպտիկական բիստաբիլության և ռամանյան ցրման խնդիրներում [8,9]: Հենց օպտիկական միկրոռեզոնատորների օգնությամբ են առաջին անգամ իրականացրել առանձին ֆոտոնի և էլեկտրոնի փոխազդեցության հետազոտությունը [10]: Բացի այս, օպտիկական ռեզոնատորները լայն կիրառություն են գտնում քվանտային համակարգիչների, քվանտային գաղտնագրման կիրառական խնդիրներում [8]: Քվանտային էֆեկտների գրանցման համար կարևոր է հետազոտվող համակարգը իզոլացնել արտաքին դասական աշխարհից և համակարգում փոքրացնել դիսիպացիան, ինչը ռեզոնատորների դեպքում համարժեք է Q բարորակության մեծացմանը: Գործնական կիրառությունների համար հետաքրքրություն են ներկայացնում այն ռեզոնատորները, որոնք բացի մեծ բարորակությունից, զբաղեցնում են փոքր ծավալ (ունեն մոդի փոքր V ծավալ): Աշխատանքի երրորդ գլխում առաջարկված է միամոդ ծավալային ռեզոնատորի գրգռման նոր մեթոդ, ինչը հանգեցնում է ռեզոնատորի բարորակության մեծացմանը և դյուրացնում է կիրառելիությունը:

<u>Ատենախոսության նպատակը</u>

Ատենախոսության հիմնական նպատակը ինֆորմացիայի օպտիկական մշակման և փոխանցման բարելավմանը միտված հաջորդ սերնդի նանոմետրական և միկրոմետրական չափսերով ինտեգրալային սարքերի տարրային հենքն ապահովող ենթաալիքային ճեղքով և ճեղքերի պարբերական համակարգերով լույսի արտասովոր անցման ընթացքում հանդես եկող ֆիզիկական պրոցեսների հետազոտումն է:

<u>Գիտական նորույթը</u>

Աշխատանքում առաջին անգամ ստացվել են պարզ և ճշգրիտ անալիտիկ արտահայտություններ, որոնք նկարագրում են ենթաալիքային ճեղքով և ճեղքերի պարբերական համակարգով լույսի ոչ ռեզոնանսային անցման երևույթը:

Բանաձևերը լայն հաճախականային տիրույթում ճշգրիտ նկարագրում են անցման կախվածությունը ճեղքի լայնությունից, պարբերությունից, ինչպես նաև ընկնող լույսի ալիքի երկարությունից: Բացահայտված են պայմանները, երբ իրականանում է բևեռացված լույսի անկորուստ անցում ճեղքերի պարբերական համակարգով:

Առաջարկվել է էլեկտրամագնիսական դաշտն ալիքատարային միամոդ ռեզոնատորներ մտցնելու նոր էֆեկտիվ մեթոդ՝ ենթաալիքային ճեղքի օգնությամբ, ինչը զգալիորեն պարզեցնում է նման ռեզոնատորների գրգռումը և նպաստում բարորակության աճին:

Առաջին անգամ ստացվել են ենթաալիքային ճեղքի և ճեղքերի պարբերական համակարգի ազատ եզրերից ՄՊՊ անցման և անդրադարձման անալիտիկ մատչելի բանաձևեր, որոնք հնարավորություն կտան պարզեցնել պլազմոնային նանո անտենաների և այլ պլազմոնային նանո կառուցվածքների նախագծումը:

<u>Գործնական արժեքը</u>

Ատենախոսությունում լուսաբանված նանոմետրական ճեղքերով և դրանցով կազմված պարբերական համակարգերով ոչ ռեզոնանսային ԼԱԱ տեսությունը կարող է կիրառվել ենթաալիքային ճեղքերով իրականացվող մոտակա դաշտի ՏՀց միկրոսկոպիայում, լույսի նեղուղղված փունջ ձևավորող համակարգերում, մակերևույթին ուժեղացված գծային և ոչ գծային սպեկտրոսկոպիայում, լույսի իդեալական կլանման և անցման խնդիրներում, ինչպես նաև տարատեսակ տվիչներ մշակելու ընթացքում:

Մետաղական էկրանին բացված ենթաալիքային ճեղքի և դրանցով կազմված պարբերական համակարգի ազատ եզրերից ՄՊՊ անցման և անդրադարձման տեսական նկարագրությունը և անալիտիկ բանաձևերը հնարավոր է կիրառել ճեղքային պլազմոնային ռեզոնատորների և պլազմոնային նանո անտենաների նախագծման մեջ՝ ապահովելով ալիքի նպաստավոր

երկարության վրա աշխատող սարքի կառուցվածքային պարամետրերի օպտիմալ ընտրությունը:

Ենթաալիքային ճեղքի միջոցով միամոդ ալիքատարային միկրոռեզոնատորի գրգռումը ոչ միայն մեծացնում է ռեզոնատորի բարորակությունը, այլև իր պատրաստման պարզության, էլեկտրական կոնտակտների առկայության և կառուցվածքային պարամետրերից զգայուն կախվածության շնորհիվ ռեզոնատորը կիրառելի է դարձնում այնպիսի էլեկտրաօպտիկական սարքերում ինտեգրելու համար, ինչպիսիք են՝ մոդուլյատորները, ինֆորմացիայի մշակման օպտիկական համակարգերը և փոխանջատիչները:

<u>Պաշտպանության ներկայացվող հիմնական դրույթները</u>

1. Ինֆրակարմիր և տերահերցային տիրույթներում բարակ, անթափանց մետաղական էկրանին բացված նանոմետրական ճեղքերում իրականանում է մինչև 100 անգամ դաշտի ոչ ռեզոնանսային ուժեղացում՝ վերահսկվող փուլային շեղման պայմաններում: Այս նանոմետրական ճեղքով անցած ուղղությունից անկախ, ճառագայթման հզորությունը հավասար է ալիքի երկարության չափսով մակերեսին ընկած ճառագայթման հզորությանը: Ստացված արդյունքները գործնականում կախված չեն մետաղական թաղանթի ընտրությունից:
2. Մետաղական էկրանին բացված ճեղքերի պարբերական համակարգն ապահովում է բևեռացված ալիքի՝ գործնականում անկորուստ փոխանցում՝ պարբերության ալիքի երկարությունից փոքր լինելու պայմաններում:
3. Թվային հաշվարկների օգնությամբ ցույց է տրվում, որ լույսի արտասովոր ոչ ռեզոնանսային անցման պայմաններում, անցած հզորության կախումն ալիքի անկման անկյունից նկարագրվում է աստիճանաձև կորով՝ զգալիորեն չի փոխվում մինչև որոշակի սահմանային արժեքը, որից հետո կտրուկ նվազում է: Սահմանային արժեքը կախված է ընկնող լույսի բևեռացումից և p –

բևեռացված ալիքների համար հավասար է 62°, իսկ s –բևեռացված ալիքների համար՝ 44°՝ անկախ ալիքի երկարությունից, մետաղի տեսակից, հաստությունից ու ճեղքի լայնությունից:

4. Ստացվել է անալիտիկ արտահայտություն հարթ պլազմոնային ալիքատարի եզրից մակերևութային պլազմոն պոլյարիտոնի անդրադարձման գործակցի համար, որի օգնությամբ որոշվում է նանոմետրական չափսերով պլազմոնային ռեզոնատորի բնութագրիչների կախումն ալիքի երկարությունից, ալիքատարի լայնությունից և համակարգը կազմող միջավայրերի դիէլեկտրիկ թափանցելիություններից: Նմանատիպ արդյունքներ են ստացվել նաև ալիքատարների պարբերական համակարգի համար:
5. Միամոդ ալիքատարային միկրոռեզոնատորում լուսային էներգիայի կառավարելի մուտքն ու ելքը կարելի է ապահովել դրա մետաղական բարակ շրջադիրներից մեկում բացված ալիքի երկարությունից էապես փոքր լայնությամբ ճեղքի օգնությամբ, ուր պրոցեսի պարզությունը համատեղվում է բարորակության աճով:

<u>Աշխատանքի ներկայացումը</u>

Աշխատանքի արդյունքները ներկայացվել են “Optics & its Applications” (Երևան – Աշտարակ, Հայաստան, 2016), “IONS” (Նեապոլ, Իտալիա, 2016) միջազգային գիտաժողովներում, ԵՊՀ ԳԲՀ ռադիոֆիզիկայի և հեռահաղորդակցության ամբիոնի սեմինարներում, ԵՊՀ ուսանողական գիտական ընկերության 2015 և 2016 թվականների գիտաժողովներում:

<u>Հրապարակումները</u>

Ատենախոսության թեմայով տպագրվել է 7 գիտական աշխատանք՝ 5 հոդված գրախոսվող գիտական ամսագրերում և 2 թեզիս, որոնք ներկայացված են սեղմագրի վերջում:

Ատենախոսության կառուցվածքը

Ատենախոսությունը բաղկացած է ներածությունից, երեք գլխից, եզրակացությունից, 159 անուն գրականության ցանկից: Ատենախոսության ընդհանուր ծավալը 122 էջ է, որում առկա է 66 նկար և 1 աղյուսակ:

ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ներածությունում ներկայացված է աշխատանքի արդիականությունը, ձևակերպված են նպատակներն ու խնդիրները, պաշտպանության ներկայացվող հիմնական դրույթները, աշխատանքի գիտական նորույթը և գործնական արժեքը:

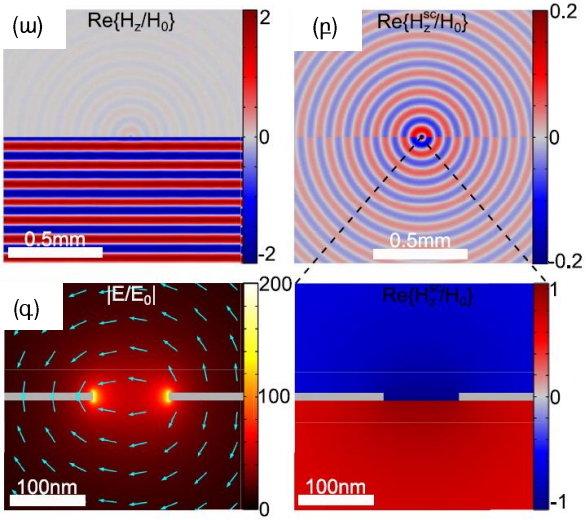
Առաջին գլխում դիտարկված է մետաղում բացված ենթաալիքային ճեղքերից էլեկտրամագնիսական ալիքների ոչ ռեզոնանսային արտասովոր անցումը:

1.1 պարագրաֆն իրենից ներկայացնում է ակնարկ, որտեղ մանրակրկտորեն ներկայացվում են լույսի արտասովոր անցման (ԼԱԱ) երևույթը, մինչ այս կատարված փորձերը տարբեր կառուցվածքների համար, տեսական բացատրությունները, ԼԱԱ -ով պայմանավորված կիրառությունները: Ներկայացված է նաև վերջերս հայտնաբերված ԼԱԱ ոչ ռեզոնանսային բնույթը, որի տեսական բացատրությունը և պրոցեսի անալիտիկ բանաձևերը մինչ այժմ ստացված չէին:

1.2 պարագրաֆում բերված է ԼԱԱ ոչ ռեզոնանսային անցման (նկ.1) տեսական բացատրությունը, ինչպես նաև ստացված են պարզ անալիտիկ բանաձևեր, որոնք մեծ ճշտությամբ և բավական լայն հաճախային տիրույթում նկարագրում են երևույթը: Ենթաալիքային նանոմետրական չափերի ճեղքերում ընկնող էլեկտրամագնիսական ալիքի ամպլիտուդը ուժեղանում է ~ 100 անգամ և նկարագրվում է հետևյալ անալիտիկ բանաձևով՝

$$A = \frac{\lambda}{d}\frac{i}{i\pi+2\left[ln\left(\frac{\lambda}{\pi d}\right)+1\right]}E_0, \qquad (1)$$

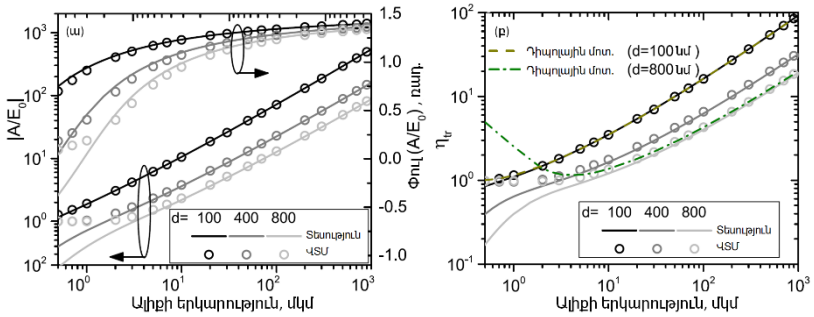
որտեղ λ –ն ընկնող ալիքի երկարությունն է, d –ն՝ ճեղքի լայնությունը, E_0 –ն՝ ընկնող ալիքի ամպլիտուդը:



Նկ. 1 Մագնիսական լրիվ դաշտը (ա) և միայն ցրված բաղադրիչը (բ) t = 10 նմ հաստությամբ իդեալական մետաղական հաղորդչում փորված d = 100 նմ ճեղքով անցնելիս: Ալիքի երկարությունը վերցված է 100 մկմ: (գ) Էլեկտրական լրիվ դաշտը ճեղքի մոտ տիրույթում: Սլաքներով ցույց է տրված էլեկտրական դաշտի ուղղությունը: Պատկերներում դաշտը նորմավորված է ընկնող դաշտի մեծությանը:

Հատկանշական է, որ (1) բանաձևը ճշգրտորեն համընկնում է վերջավոր տարրերի մեթոդով թվային մոդելավորման արդյունքներին հաճախության լայն տիրույթում (նկ. 2ա): Անցման էֆեկտիվությունը, որը սահմանվում է որպես ճեղքից անցած հզորության հարաբերություն ճեղքի մակերեսին ընկած հզորությանը (նկ. 1, նկ. 2բ) կգրվի՝

$$\eta_{tr} = \frac{\lambda}{d}\frac{1}{\pi+\frac{4}{\pi}\left[ln\left(\frac{\lambda}{\pi d}\right)+1\right]^2}: \qquad (2)$$



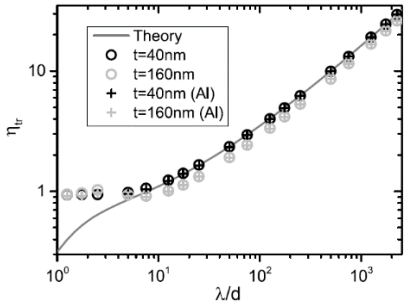
Նկ. 2 Տեսական (հոծ գծեր) և թվային մեթոդներով (շրջանագծեր) հաշվարկները: (ա) Էլեկտրական դաշտի միջին արժեքը ճեղքում և (բ) անցման էֆֆեկտիվությունը՝ կախված ալիքի երկարությունից, 10 նմ հաստությամբ իդեալական մետաղում բացված տարբեր լայնության ճեղքերի համար:

Ստացված արդյունքները չեն կորցնում իրենց ճշտությունը նաև վերջավոր հաստությամբ մետաղների համար, ընդ որում ինֆրակարմիր և ավելի երկարալիք տիրույթներում գործում են գրեթե բոլոր մետաղների համար (նկ. 3):

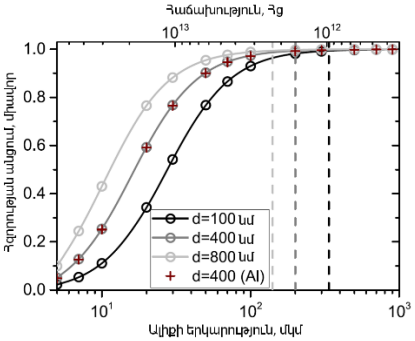
Ցույց է տրվում, որ այսպիսի ճեղքերից կազմված պարբերական համակարգը իրականացնում է էլեկտրամագնիսական ալիքների ոչ ռեզոնանսային (լայնաշերտ) իդեալական անցում (նկ. 4), երբ

$$\eta_{tr} d \geq \Lambda , \qquad (3)$$

որտեղ Λ -ն համակարգի պարբերությունն է:



Նկ. 3 Անցման էֆֆեկտիվության սպեկտրի տեսական (հոծ գծեր) և թվային մեթոդներով (շրջանագծեր) հաշվարկները t = 40 նմ և t = 160 նմ դեպքերի համար, երբ d = 400 նմ: «+» նշաններով ցույց է տրված նույնը, երբ իդեալական մետաղի փոխարեն օգտագործված է ալյումին:

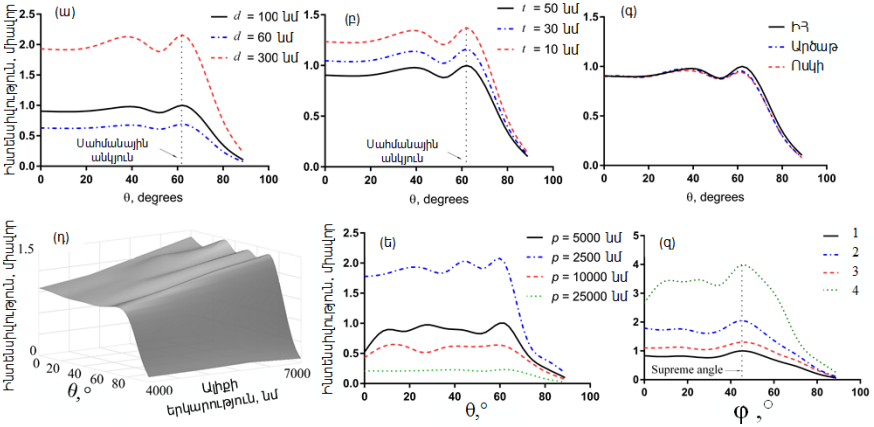


Նկ. 4 Պարբերական ճեղքերի համակարգից անցման սպեկտրը, երբ t = d/10, d =100, 400, 800 նմ և Λ = 4 մկմ: «+» նշաններով ցույց է տրված d =100 նմ դեպքում անցումն արծաթե մետաղական էկրանից: Ուղղահայաց ընդհատ գծերը ցույց են տալիս բանաձևերով կանխատեսված իդեալական անցման ալիքի երկարությունը:

1.3 պարագրաֆում թվային մեթոդներով հետազոտված են ճեղքում և նրանցով կազմված պարբերական համակարգերում ոչ ռեզոնանսային ԼԱԱ երևույթի կախվածությունն ընկնող հարթ ալիքի անկման անկյունից ալիքի տարբեր բևեռացումների դեպքում:

Անցած հզորության կախումն ալիքի անկման անկյունից զգալի կերպով չի փոխվում մինչև սահմանային արժեքը (62° p – բևեռացված ալիքների և 44° s –

բևեռացված ալիքների համար), որից հետո կտրուկ նվազում է: Սահմանային անկյան արժեքը կախված չէ ալիքի երկարությունից, մետաղի տիպից կամ հաստությունից, ճեղքի լայնությունից այս պարամետրերի բավական մեծ տիրույթում (նկ.5): Անկման անկյունից անկախ անցած դաշտի բաշխվածությունը կարելի է նկարագրել Հանկելի ֆունկցիաների օգնությամբ:



Նկ. 5 Բարակ իդեալական մետաղական հաղորդչում փորված ենթաալիքային ճեղքով անցած հզորության կախվածությունը ընկնող հարթ ալիքի անկման անկյունից: (ա), (բ), (գ) միաճեղք համակարգում, 5000 նմ ալիքի երկարության և p – բևեռացման դեպքում, երբ (ա) փոփոխվում է ճեղքի լայնությունը, (բ) փոփոխվում է մետաղի հաստությունը և (գ) փոփոխվում է մետաղի տեսակը: (դ) Միաճեղք համակարգում անկյան կախվածության սպեկտրը: (ե) Ճեղքերի պարբերական համակարգում, երբ t = 30 նմ և d = 100 նմ: (զ) Անցած հզորության կախվածությունը s –բևեռացված ալիքի անկման անկյունից, երբ λ = 5000 նմ: (1) Ենթաալիքային ճեղքում, t = 50 նմ, d = 100 նմ, (2) ենթաալիքային ճեղքում, t = 50 նմ, d = 300 նմ, (3) ենթաալիքային ճեղքում, t = 10 նմ, d = 100 նմ, (4) p = 5000 նմ պարբերությամբ ճեղքերի համակարգով, t = 50 նմ, d = 100 նմ: (ա-ե) Բոլոր կորերը նորմավորված են միաճեղք համակարգում 5000 նմ ալիքի երկարության t = 50 նմ և d = 100 նմ (հոծ գիծ) կորի նկատմամբ, իսկ (զ) – ում կորերը նորմավորված են (1) կորի նկատմամբ:

1.4 պարագրաֆում ներկայացված են էլեկտրամագնիսական խնդիրների թվային հաշվարկների ժամանակակից, ամենից հաճախ օգտագործվող մեթոդները: Հաջորդիվ ներկայացված են վերջավոր տարրերի մեթոդի (FEM) և ժամանակային տիրույթում վերջավոր տարբերությունների (FDTD) մեթոդի

մաթեմատիկական ապարատները և այս մեթոդներով հետազոտված խնդիրների քայլ առ քայլ մոդելավորման նկարագրությունը:

Երկրորդ գլխում քննարկված է մակերևութային պլազմոն-պոլյարիտոնների (ՄՊՊ) անցումը մետաղում բացված ենթաալիքային ճեղքերով և ճեղքերի պարբերական համակարգերով:

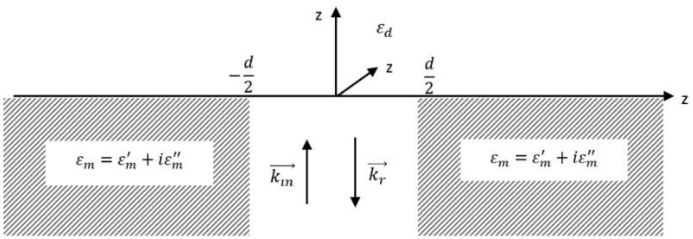
2.1 պարագրաֆում ներկայացված են ՄՊՊ հիմնական հատկությունները, նրանց գրգռումը, ճառագայթումը, ինչպես նաև կիրառությունները: Ցույց է տրված ՄՊՊ – ների դերը լույսի գերֆոկուսացման և խորը ենթաալիքային տիրույթում լույսը տեղայնացնելու խնդիրներում:

2.2 պարագրաֆում ներկայացված են ՄՊՊ ալիքատարարի տարբեր տիպեր, ցույց է տրված այս ալիքատարերի կիրառելիության լայն սպեկտրը, հատկապես ինտեգրալային օպտիկական սխեմաներում օպտիկական ազդանշանների փոխմիացման և փոխանջատման խնդիրներում:

2.3 պարագրաֆում քննարկված է ՄՊՊ տարածման հատկությունները մետաղում բացված ենթաալիքային ճեղքերով և պարբերական համակարգերով: Միաճեղք համակարգում (նկ. 6) կիսաանվերջ մետաղում բացված ճեղքի եզրից ՄՊՊ անդրադարձման և անցման գործակիցների համար ստացվում են պարզ արտահայտություններ, իսկ ճեղքից դուրս եկած հզորության հարաբերությունը ճեղքի եզրին ընկնող ՄՊՊ ալիքի հզորությանը գրվում է՝

$$T_{21} = \frac{P_e}{P_0} = \frac{|k_{in}|d}{\left(1+\frac{2+\mu}{\pi\sqrt{1+\mu}}\frac{\varepsilon_m''}{\sqrt{|\varepsilon_m'|\varepsilon_d}}\right)^2 + \left(\frac{4\sqrt{1+\mu}}{\pi\ \ 2}\sqrt{\frac{|\varepsilon_m'|}{\varepsilon_d}}\right)^2}, \qquad (4)$$

որտեղ $\mu = \frac{2}{k_0 d}\sqrt{\frac{\varepsilon_d}{|\varepsilon_m'|}}$, $k_0 = \sqrt{\varepsilon_d}\frac{\omega}{c}$, c –ն լույսի արագությունն է վակուումում, ω-ն էլեկտրամագնիսական ալիքի անկյունային հաճախությունն է, ε_d –ն դիէլեկտրիկ միջավայրի էլեկտրական թափանցելիությունն է, ε_m –ը մետաղի կոմպլեքս դիէլեկտրիկ թափանցելիությունն է, իսկ k_{in} –ն ընկնող ՄՊՊ –ի ալիքային թիվն է:



Նկ. 6 Հետազոտվող խնդրի սխեման:

Վերջավոր հաստությամբ մետաղում ՄՊՊ – ն անդրադառնում է ճեղքի երկու եզրերից և ձևավորում Ֆաբրի Պերո տիպի մոդեր: Ռեզոնանսային ալիքի երկարության վրա ճեղքով փոխանցված և ճեղքի եզրին ընկնող հզորության համար ստացվում է՝

$$T_{max} = \frac{(1-R_{21})^2(1-2k''h)}{(1-R_{21}+2k''hR_{21})^2}, \qquad (5)$$

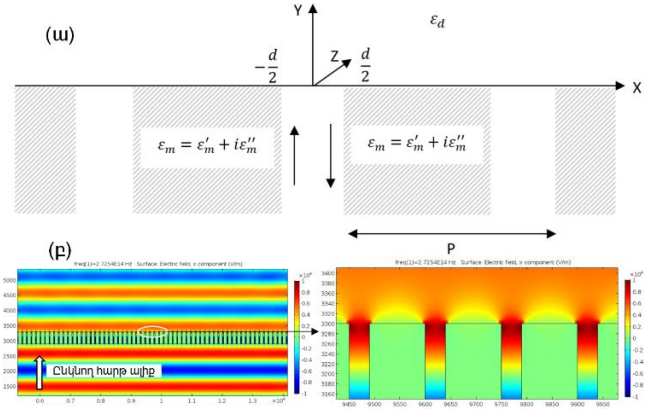
որտեղ $R_{21} = 1 - T_{21}$, k'' – ը ՄՊՊ ալիքային թվի կեղծ մասն է, իսկ h – ը մետաղի հաստությունն է:

Ենթաալիքային ճեղքերից կազմված պարբերական համակարգում (նկ. 7) համակարգից անդրադարձած և անցած դաշտերի համար նույնպես ստացվում են պարզ արտահայտություններ: Պարբերական համակարգում մի ճեղքով անցած հզորության և ճեղքի եզրին ընկնող հզորության հարաբերության համար ստացվում է՝

$$T_{periodic} = \frac{4\sqrt{\varepsilon_d}\frac{d}{p}}{1+\left(\frac{4k}{\pi\varkappa^2 d}\right)^2}\frac{k}{k_0}, \qquad (6)$$

որտեղ p –ն համակարգի պարբերությունն է, k_0 –ն՝ ընկնող ալիքի ալիքային թիվը:

2.4 պարագրաֆում ներկայացված է համակարգի թվային մոդելավորումը COMSOL Multuphysics միջավայրում:

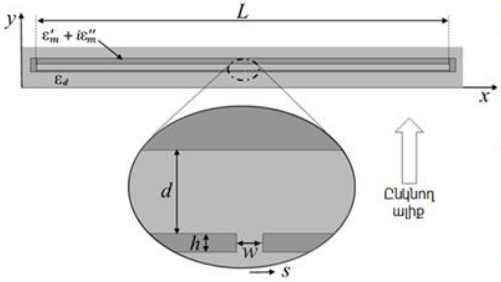


Նկ. 7 ՄՊՊ - ով պայմանավորված անցումը մետաղում բացված պարբերական ճեղքերի համակարգում: (ա) Համակարգի կառուցվածքը և (բ) դաշտի E_x բաղադրիչի ընդհանուր տեսքը (ձախից) և խոշորացված տեսքը (աջից) 1100 նմ ալիքի երկարության, 40 նմ ճեղքի հաստության, 320 նմ արծաթի հաստության և 150 նմ պարբերության դեպքում:

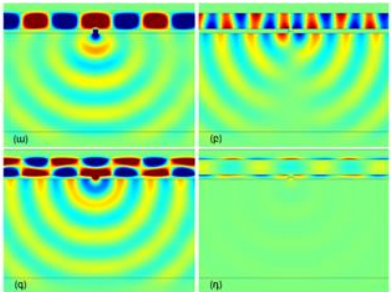
Երրորդ գլխում քննարկված է ենթաալիքային ճեղքով մեծ բարորակությամբ ալիքատարային միամոդ ռեզոնատորի գրգռման հնարավորությունը և այդ ռեզոնատորի հատկությունները:

3.1 պարագրաֆը նվիրված է մեծ բարորակությամբ ժամանակակից տերահերցային և օպտիկական ռեզոնատորներին: Դիտարկվում են ծավալային, շշնջացող տիպի մոդերով և ֆոտոնային բյուրեղների հիման վրա ստեղծված ռեզոնատորները, որտեղ ստացվում են ռեկորդային՝ 10^4 – 10^9 կարգի բարորակություններ, մոդի համեմատաբար փոքր ծավալում:

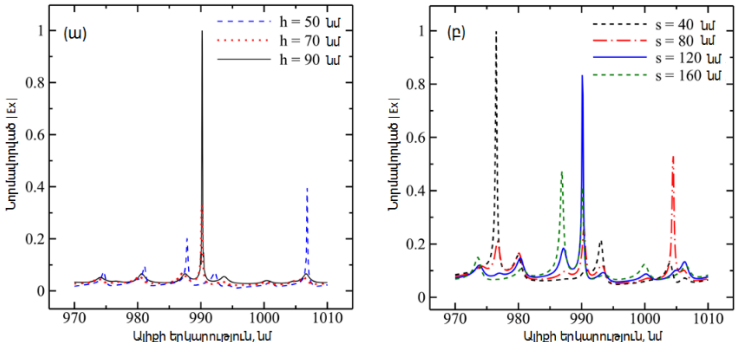
3.2 պարագրաֆում, օգտագործելով նախորդ երկու գլուխներում ենթաալիքային ճեղքից արտասովոր անցման հատկությունները (հատկապես ճեղքով անցած դաշտի փուլի խիստ կախվածությունը ալիքի երկարությունից), դիտարկվում է ենթաալիքային ճեղքով զուգահեռ թիթեղներով ալիքատարային ռեզոնատորում հիմնական տատանողական TM մոդի գրգռման հնարավորությունը (նկ. 8,9): Պարզված է ռեզոնատորում դաշտի կուտակման կախվածությունը մետաղի հաստությունից և ռեզոնատորի կենտրոնից ճեղքի շեղումից (նկ. 10):



Նկ. 8 Ռեզոնատորի կառուցվածքի երկայնական հատույթը: Մուգ տիրույթը լցված է արծաթով, մինչդեռ մնացած մասը՝ ε_d թափանցելիություն ունեցող դիէլեկտրիկ նյութով: s – ը ճեղքի շեղման չափն է ռեզոնատորի կենտրոնից:



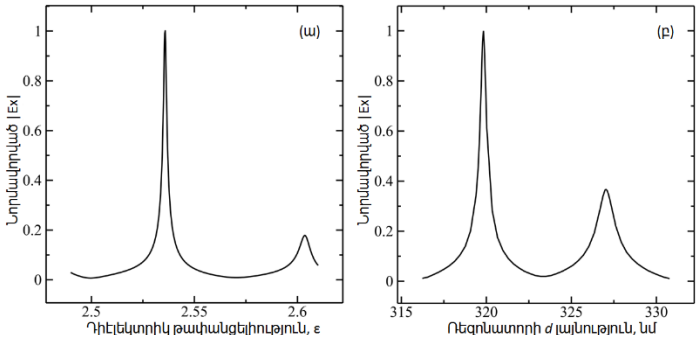
Նկ. 9 Ռեզոնատորում էլեկտրամագնիսական դաշտի (ա) E_x, (բ) E_y, (գ) H_z բաղադրիչները և (դ) հոսանքի խտությունը 1008.75 նմ ռեզոնանսային ալիքի երկարության համար, երբ L = 20 մկմ, d = 316 նմ, w = 70 նմ, h = 70 նմ, s = 0 նմ և ε_d = 2.5:



Նկ. 10 Ռեզոնատորում էլեկտրական դաշտի E_x բաղադրիչի մոդուլի կախվածությունն ալիքի երկարությունից (ա) h - ի տարբեր արժեքների դեպքում, երբ ճեղքի շեղումը ռեզոնատորի կենտրոնից՝ s = 120 նմ է, և (բ) տարբեր s արժեքների դեպքում, երբ ներքևի մետաղի հաստությունը՝ h = 70 նմ է: Ռեզոնատորի երկարությունը՝ L = 20 մկմ է, լայնությունը՝ d = 316 նմ, ճեղքի լայնությունը՝ w = 100 նմ, և դիէլեկտրիկ միջավայրի թափանցելիությունը՝ ε_d = 2.5:

Կողային մետաղական թիթեղի բավարար հաստության դեպքում, երբ թափանցումը մետաղից բացակայում է, համակարգի բարորակությունը հասնում է մի քանի տասնյակ հազարների՝ ~10^4:

Պարագրաֆում ներկայացված է նաև ռեզոնատորում դաշտի կուտակման կախվածությունը ռեզոնատորում դիէլեկտրիկ թափանցելիությունից և ռեզոնատորի լայնությունից (նկ.11):



Նկ. 11 Ռեզոնատորում էլեկտրական դաշտի E_x բաղադրիչի մոդուլի կախվածությունը (ա) դիէլեկտրիկ միջավայրի թափանցելիությունից, երբ ռեզոնատորի լայնությունը՝ d = 316 նմ և (բ) ռեզոնատորի d լայնությունից, երբ դիէլեկտրիկ միջավայրի թափանցելիությունը՝ ε_d = 2.5: Ռեզոնատորի երկարությունը՝ L = 20 մկմ է, ճեղքի լայնությունը՝ w = 100 նմ, ներքևի մետաղի հաստությունը՝ h = 70 նմ, ալիքի երկարությունը՝ λ = 1000 նմ, ճեղքի շեղումը ռեզոնատորի կենտրոնից՝ s = 0 նմ:

3.3 պարագրաֆում ներկայացված է համակարգի թվային մոդելավորումը COMSOL Multuphysics միջավայրում:

ԵԶՐԱԿԱՑՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐ

1. Առաջին անգամ ստացվել են պարզ և ճշգրիտ անալիտիկ բանաձևեր, որոնք նկարագրում են ենթաալիքային ճեղքով և ճեղքերի պարբերական համակարգով լույսի ոչ ռեզոնանսային անցման երևույթը: Ստացված բանաձևերը լայն հաճախականային տիրույթում ճշգրիտ նկարագրում են անցման կախվածությունը ճեղքի լայնությունից, պարբերությունից, ինչպես նաև ընկնող լույսի ալիքի երկարությունից: Արդյունքները կիրառելի են մոտիկ գոտու SՀg միկրոսկոպիայում, լույսի նեղուղղված փունջ ձևավորող համակարգերում, մակերևութային ուժեղացված գծային և ոչ գծային սպեկտրոսկոպիայում, լույսի իդեալական կլանման և անցման խնդիրներում, ինչպես նաև տարատեսակ տվիչներ մշակելիս:
2. Ինֆրակարմիր և տերահերցային տիրույթներում բարակ, անթափանց մետաղական էկրանին բացված նանոմետրական ճեղքերում իրականանում է ~100 անգամ դաշտի ոչ ռեզոնանսային ուժեղացում՝ վերահսկվող փուլային շեղման պայմաններում: Ստացված արդյունքները գործնականում կախված չեն մետաղական թաղանթի ընտրությունից:

3. Մետաղական էկրանին բացված ճեղքերի պարբերական համակարգն ապահովում է բևեռացված ալիքի գործնականում անկորուստ փոխանցում՝ պարբերության ալիքի երկարությունից փոքր լինելու պայմաններում:
4. Թվային հաշվարկների օգնությամբ ցույց է տրված, որ լույսի արտասովոր ոչ ռեզոնանսային անցման պայմաններում, անցած հզորության կախումն ալիքի անկման անկյունից նկարագրվում է աստիճանաձև կորով՝ զգալիորեն չի փոխվում մինչև որոշակի սահմանային արժեքը, որից հետո կտրուկ նվազում է: Սահմանային արժեքը կախված է ընկնող լույսի բևեռացումից և p – բևեռացված ալիքների համար հավասար է 62°, իսկ s – բևեռացված ալիքների համար՝ 44°՝ անկախ ալիքի երկարությունից, մետաղի տեսակից, հաստությունից ու ճեղքի լայնությունից:
5. Ստացվել է անալիտիկ արտահայտություն հարթ պլազմոնային ալիքատարի եզրից մակերևութային պլազմոն պոլյարիտոնի անդրադարձման գործակցի համար, որի օգնությամբ որոշվում է նանոմետրական չափսերով պլազմոնային ռեզոնատորի բնութագրիչների կախումն ալիքի երկարությունից, ալիքատարի լայնությունից և համակարգը կազմող միջավայրերի դիէլեկտրիկ թափանցելիություններից: Նմանատիպ արդյունքներ են ստացվել ալիքատարերի պարբերական համակարգի համար: Արդյունքները կիրառելի են ՄՊՊ նանոռեզոնատորների նախագծման, նանո անտենաների և ԼԱԱ հետազոտություններում:
6. Միամոդ ալիքատարային միկրոռեզոնատորում լուսային էներգիայի կառավարելի մուտքն ու ելքը կարելի է ապահովել դրա մետաղական բարակ շրջադիրներից մեկում բացված ալիքի երկարությունից էապես փոքր լայնությամբ ճեղքի օգնությամբ, ուր պրոցեսի պարզությունը համատեղվում է բարորակության աճով:
7. Մեծ զգայունությունը, պատրաստման պարզությունը և էլեկտրական կոնտակտների առկայությունը հնարավորություն են տալիս ռեզոնատորը: կիրառել էլեկտրաօպտիկական սարքավորումներում և զանազան տվիչների ստեղծման համար:

Հղված գրականություն

1. Ebbesen, T. W. *et al. Nature* **86,** 1114–7 (1998).
2. Garcia-Vidal, F. J. *et al.* Rev. Mod. Phys. **82**, 729–787, (2010).
3. Lezec, H. J. *et al. Science* **297,** 820–822 (2002).
4. Seo, M. A. *et al. Nat. Photonics* **3,** 152–156 (2009).
5. Liu, H. & Lalanne, P. *Nature* **452,** 728–731 (2008).
6. Jun, Y. C., Huang, K. C. Y. & Brongersma, M. L. *Nat. Commun.* **2,** 283 (2011).
7. Novotny, L. *Phys. Rev. Lett.* **98,** 1–4 (2007).
8. Duan, L. M., Lukin, M. D., Cirac, J. I. & Zoller, P. *Nature* **414,** 413–418 (2001).
9. Wang, G., Lu, H., Liu, X., Gong, Y. & Wang, L. *Appl. Opt.* **50,** 5287–5290 (2011).
10. Greentree, A. D *et al.* L. *Nat. Phys.* **2,** 856 (2006).

Հրատարակված աշխատանքների ցուցակ

Հոդվածներ

[1] A. Pors, Kh. V Nerkararyan, Kh. Sahakyan, and S. I. Bozhevolnyi, “Enhanced nonresonant light transmission through subwavelength slits in metal.,” *Opt. Lett.*, vol. 41, no. 2, pp. 242–5, 2016.

[2] Kh. Sahakyan, “Analytical description of wave propagation trough subwavelength slit of perfectly electric conductor membrane.,” in *Collection of scientific articles of YSU SSS*, 2015, no. 1, pp. 115–119.

[3] Kh. Sahakyan and Kh. Nerkararyan, “Numerical Analysis of Light Non-Resonant Transmission Through a Sub- Wavelength Slit at Angular Incidence,” *Armen. J. Phys.*, vol. 10, no. 1, pp. 30–35, 2017.

[4] Kh. Sahakyan, “Analytical description of plasmon reflection from the free edges of metal slit structures,” Proc. Yerevan State Univ. Physical and Mathematical Sciences, no. 3, pp. 84–91, 2016.

[5] K. Sahakyan, H. Haroyan, and K. Nerkararyan, “Waveguide resonator with high quality factor excited through the subwavelength slit,” *J. Contemp. Phys. (Armenian Acad. Sci.*, vol. 52, no. 1, pp. 32–37, 2017.

Х. Саакян, О. Ароян, Х. Неркарарян “Возбуждение волноводного резонатора с высокой добротностью через субволновую щель,” *Известия НАН Армении, Физика*, vol. 52, no. 1, pp. 45–52, 2017.

Կոնֆերանսների թեզիսներ

[1] Kh. Sahakyan, "High Q parallel plate resonator excited by the subwavelength slit", Book of abstracts of the IONS Naples 2016 conference, p. 23, 2016.

[2] Kh. Sahakyan, Kh. Nerkararyan, "Peculiarities of the cavity with parallel plate at excitation through subwavelength slit" Book of abstracts of the Armenia in FOCUS SPIE: 4th International Symposium, p. 126, 2016.

ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ В ПЕРИОДИЧЕСКИХ И МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУРАХ

АННОТАЦИЯ

Последние два десятилетия были началом новых оптических явлений, улучшающих наше понимание процессов взаимодействия света. Необыкновенная передача света через субволновые металлические периодические отверстия вызвала большой интерес для изучения физики лежащей в основе, разработки новых теорий и выяснения возможных приложений. Эти наноструктуры играют ключевую роль в микроскопии ближнего поля, поверхностно-усиленной рамановской спектроскопии, микролазеров, зондирования и флуоресценции одного молекула, взаимодействия между одним фотоном и електроном, идеального пропускания света и т. д.

Диссертация посвящена исследованию физических процессов необыкновенной передачи светавого излучения через щель и периодическую структуру щелей, которая лежит в основе нано и микромасштабных оптических интегральных устройств следующего поколения.

Основные результаты, полученные в диссертации, следующие:

1. Субволновые щели в тонком непрозрачном металлическом экране способствуют в ~ 100 раз нерезонансного усиление поля, фаза которого контролируется. Передаваемая мощность через эти нанощели равна мощности падающей плоской волны, которая падает на длину равной одной длины волны. Полученные результаты практически не зависят от типа металлического экрана.
2. Периодическая структура щелей может поддерживать практически без потерянную передачу, когда период меньше длины волны.

3. Численный анализ показывает, что зависимость интенсивности передачи от угла падения не претерпевается существенных изменений до ее высшей величины (62 ° для p -поляризованной волны и 44 ° для s -поляризованной волны), после чего интенсивность быстро падает. Высшая величина угла падения не зависит от длины волны, ширины щели, типа или толщины металлического экрана в широком диапазоне этих параметров. Независимо от структурных параметров и длины волны распределение полей прошедшей волны представляется функциями Ганкеля и однородно по углу.
4. Получены аналитические выражения, описывающие отражение и пропускание поверхностного плазмон-поляритона через свободные края металлических щелей. Эти выражения выявляют зависимость характеристик наноплазмонического резонатора от длины волны, ширины резонатора и диэлектрических проницаемостей металлических и диэлектрических сред. Поверхностное плазмонно-поляритонное пропускание через одиночную щель сравнивается с полученным пропусканием периодической структуры щелей, где период принимает роль длины волны.
5. Субволновые щели, фрезерованные на одной из пластин одномодового волноводного резонатора, могут быть использованы для эффективного управления вводом энергии волны в резонатор для возбуждения основного ТМ колебательного режима. Здесь упрощение возбуждения резонатора сочетается с повышением добротности до десятков тысяч (~ 10^4) в ближней инфракрасной области.

SURFACE ELECTOMAGNETIC WAVES IN PERIODIC AND MULTILAYER STRUCTURES

ANNOTATION

The past two decades gave a rise to new optical phenomena enhancing our understanding of light-media interaction processes. The extraordinary transmission (EOT) of light through a subwavelength metallic hole arrays has inspired great interest to explore the underlying physics, develop new theories and find out possible applications. These nano structures became the base components of near field microscopy, surface-enhanced Raman spectroscopy, microlasers, single molecule imaging and fluorescence, single photon and electron interaction, light perfect transmittance, etc.

The dissertation is devoted to the investigation of physical processes behind the light extraordinary transmission through the slit and periodic array of slits which lays in basics of next generation nano and microscale optical integrated devices.

The main results obtained in the dissertation are as follows:

1. ~100 times nonresonant field enhancement is registered in subwavelength slits milled in thin opaque metal screen, the phase of which can be controlled. The transmitted power through these nanoslits is equal to the power of falling plane wave that falls on the length of one wavelength. The obtained results practically are independent on metal screen type.
2. Periodic structure of slits can support practically lossless transmission when the period is smaller than the wavelength.
3. Numerical analysis revealed that transmission intensity dependence on incident angle does not undergo significant changes until its supreme value (62° for the p -polarized wave and 44° for the s -polarized wave) after which intensity falls rapidly. The supreme value of incident angle does not depend on wavelength, slit

width, metal screen type or thickness in the wide range of these parameters. Independently of the structural parameters and wavelength the distribution of transmitted wave fields are represented by the Hankel functions and are homogeneous by angle.

4. Was obtained analytic expressions that describe surface plasmon-polariton reflection and transmission through the free edges of metal slits. These expressions reveal the dependence of nanoplasmonic cavity resonator characteristics on the wavelength, cavity width, and dielectric permittivities of metal and dielectric media. The surface plasmon-polariton transmission through single slit is compared with the obtained transmission of periodic array of slits where period takes the role of wavelength.
5. Subwavelength slits milled on one of the plates of single mode waveguide resonator can be used to effectively control the wave energy input to resonator for excitation of base TM oscilary mode. Here the simplification of resonator excitation is combined with the raise of resonator Q factor up to tens of thousand ($\sim 10^4$) in the near infrared region.