

ՀՀ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ, ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ, ՄՇԱԿՈՒՅԹԻ ԵՎ ՍՊՈՐՏԻ
ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ
ԵՐԵՎԱՆԻ ՊԵՏԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

Հովհաննես Սամվելի Հարոյան

ԷԼԵԿՏՐԱՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ԱԼԻՔՆԵՐԻ ԿԱՌԱՎԱՐՈՒՄԸ ՌԵԶՈՆԱՆՍԱՅԻՆ,
ԵՆԹԱԱԼԻՔԱՅԻՆ ՏԱՐԻԵՐՈՎ ԿԱՌՈՒՅՎԱԾՔՆԵՐՈՎ
Ա.04.03 – «Ռադիոֆիզիկա» մասնագիտությամբ ֆիզիկամաթեմատիկական
գիտությունների դոկտորի գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ – 2026

MINISTRY OF EDUCATION, SCIENCE, CULTURE AND SPORT RA
YEREVAN STATE UNIVERSITY

Hovhannes S. Haroyan

MANIPULATION OF ELECTROMAGNETIC WAVES BY RESONANT,
SUBWAVELENGTH ELEMENTS STRUCTURES

ABSTRACT

of the dissertation for competition of scientific degree of
Doctor of Science (D.Sc. in Physics and Mathematics) on specialty
01.04.03 – “Radiophysics”

YEREVAN – 2026

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Երևանի Պետական
Համալսարանում:

Գիտական խորհրդատու՝ ֆիզ. մաթ. գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր
Խ. Վ. Ներկարարյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ ֆ.մ.գ.դ. Պապոյան Արամ Վարդգեսի
ֆ.մ.գ.դ. Գևորգյան Ժիրայր Սերգեյի
տ.գ.դ. Ավետիսյան Վահան Հենրիկի

Առաջատար կազմակերպություն՝ ՀՀ ԳԱԱ Ռադիոֆիզիկայի և
Էլեկտրոնիկայի Ինստիտուտ

Պաշտպանությունը տեղի կունենա 2026 թ. Ապրիլի 11-ին ժամը 12.00-ին
Երևանի Պետական Համալսարանի «Ֆիզիկա» 049 մասնագիտական խորհրդի
նիստում: Հասցեն՝ Ա. Մանուկյան 1, 0025 Երևան:

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ԵՊՀ գրադարանում:

Սեղմագիրը առաքված է 2026 թ. մարտի 10-ին:

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

The theme of dissertation approved in the Yerevan State University.

Scientific advisor: Prof. Dr. of Sciences (Phys. and Math.) Kh. V. Nerkararyan

Official opponents: Dr. of Sciences (Phys. and Math.) A. V. Papoyan

Dr. of Sciences (Phys. and Math.) Zh. S. Gevorgyan

Dr. of Sciences (Tech.) V. H. Avetisyan

Leading organization: Institute of Radiophysics & Electronics of NAS RA

The defense of the Dissertation should be held on the 11 April 2026 at 12:00 on the
session of the specialized council “Physics” 049 of the Yerevan State University.

Address: A. Manoogian 1, Yerevan 0025, Armenia.

It is possible to familiarize with the Dissertation in library of YSU

The Abstract is dispatched at 10 March 2026.

Scientific secretary of the Specialized Council  Dr. V. P. Kalantaryan

Ուսումնասիրության արդիականությունը

Էլեկտրամագնիսական (ԷՄ) ալիքների էֆեկտիվ կառավարումը մշտապես գրավել է հետազոտողների ուշադրությունը ինչպես ֆունդամենտալ, այնպես էլ կիրառական բազմաթիվ խնդիրների լուծման տեսանկյունից:

ԷՄ ալիքների կառավարումը ենթալիքային չափերի կառուցվածքների միջոցով ժամանակակից ֆոտոնիկայի և էլեկտրամագնիսականության հիմնական մարտահրավերներից է, սակայն միևնույն ժամանակ ստեղծում է ղեկավարման նոր հնարավորություններ: Ավանդական օպտիկական և միկրոալիքային բաղադրիչները՝ ոսպնյակները, զտիչները և անտենաները, «կաշկանդված» են դիֆրակցիոն սահմանով, որը ալիքի երկարությունից փոքր մասշտաբներում սահմանափակում է ԷՄ ալիքների կառավարման հնարավորությունը: Սակայն տեխնոլոգիական առաջընթացի՝ չափափոքրացման և ինտեգրման ուղղությամբ զարգանացման պայմաններում, աճում է կոմպակտ սարքերի պահանջարկը, որոնք կարող են ճշգրիտ կերպով վերահսկել ԷՄ ալիքների տարածումը, կլանումը և ցրումը: Ենթալիքաչափային տարրական բջիջներից կազմված պարբերական կառուցվածքները՝ մետանյութերն ու մետամակերևույթները, հնարավորություն են տալիս աննախադեպ կերպով կառավարել ԷՄ դաշտերը՝ օգտագործելով մետակառուցվածքի տարր հանդիսացող մետատոմներում ռեզոնանսային երևույթները՝ արդյունքում ստանալով նոր էֆեկտիվ նյութական բնութագրեր, որոնք բնության մեջ չեն հանդիպում [1,2]: Ենթալիքաչափային տարրերի երկրաչափության, դասավորության և կազմության ճշգրիտ նախագծման միջոցով հնարավոր է կարգավորել այդ կառուցվածքների տեղային էլեկտրական և մագնիսական արձագանքները՝ ստանալով այնպիսի երևույթներ, ինչպիսիք են բացասական բեկումը, կատարյալ կլանումը, անոմալ անդրադարձումը/անցումը և այլն [3,4]: ԷՄ ալիքների ամպլիտուդի և փուլի վերահսկումը ենթալիքաչափային մասշտաբներում հնարավորություն է տալիս ստեղծել հարթ ոսպնյակներ, բարակ կլանիչ թաղանթներ, կոմպակտ զտիչներ, մոդուլյատոններ և այլն [5,6]:

Գործնական առումով ԷՄ ալիքների ենթալիքաչափային կառավարումը կենսական նշանակություն ունի հեռահաղորդակցության, սենսորիկայի և էներգիայի փոխակերպման նոր սերնդի տեխնոլոգիաների զարգացման համար: Օրինակ՝ տերահերցային և օպտիկական տիրույթներում ենթալիքաչափային ռեզոնատորները հնարավորություն են տալիս նախագծել մինիատյուրիզացված և բարձր զգայունությամբ սենսորներ, գերբարակ կլանիչներ՝ քողարկման և էներգիայի հավաքման կիրառությունների համար, կարգաբերվող զտիչներ: Միկրոալիքային տիրույթում նման կառուցվածքների կիրառումը կնպաստի գերբարակ և լայնաշերտ կլանիչների մշակմանը, ինչպես նաև էլեկտրականապես փոքր չափի անտենաների (ESA) ստեղծմանը:

Վերջիններիս անհրաժեշտությունը բխում է ժամանակակից տեխնոլոգիաներում կոմպակտ, թեթև և բարձր արդյունավետությամբ հաղորդակցական համակարգերի պահանջարկի աճից:

Մինևույն ժամանակ օպտիկական տիրույթի EՄ ալիքների կառավարումը ենթալիքաչափային մասշտաբներում հանդիսանում է ժամանակակից ֆոտոնիկայի և նանոտեխնոլոգիայի հիմնասյուններից մեկը՝ թույլ տալով վերահսկել լույս-նյութ փոխազդեցությունները՝ շատ ավելի լայն սահմաններում, քան դա հնարավոր է ավանդական ծավալուն նյութերով: Ավանդական դիէլեկտրիկ բաղադրիչները սահմանափակված են դիֆրակցիոն շեմով, որը նվազեցնում է դաշտի տեղայնացման և տարածական լուծողունակության հնարավորությունները: Սակայն պլազմոնային և մետանյութային կառուցվածքների ի հայտ գալը հեղափոխական ազդեցություն է ունեցել՝ թույլ տալով կառավարել EՄ ալիքները՝ դրանց երկարությունից շատ փոքր մասշտաբներում:

EՄ ալիքների կառավարումը ենթալիքաչափային պլազմոնային- և մետա-կառուցվածքների միջոցով հետաքրքրական է թե՛ հիմնարար խնդիրների լուսաբանման, և թե՛ կիրառական լուծումներ առաջարկելու տեսանկյունից: Հիմնարար առումով այն հնարավորություն է տալիս ուսումնասիրել էլեկտրամագնիսական դաշտերի ենթալիքային տեղայնացումը, քվանտային մասշտաբի փոխազդեցությունները (օրինակ Պարսել գործոնի մեծացմամբ) և էներգիայի փոխանցման պրոցեսները, որոնք հնարավոր չէ դիտարկել բնական համակարգերում: Գործնական առումով՝ այն ծառայում է որպես հիմք կոմպակտ, կարգավորվող և բազմաֆունկցիոնալ բաղադրիչների ստեղծման համար՝ տվյալների հողորդման և մշակման, զգայունության-կենսազգայունության (biosensing), պատկերավորման (imaging), օպտիկական կապի և այլ կիրառություններում:

Ներկայացվող ատենախոսությունը նվիրված է վերը թվարկված խնդիրների լուսաբանմանը:

Աշխատանքի նպատակը

- Միաֆոտոն լույսի աղբյուրների ստացում քվանտային ինֆորմատիկայի որոշ խնդիրների լուծման համար: Միաֆոտոնային աղբյուրները հնարավորություն են տալիս ըստ պահանջի ստեղծել առանձին ֆոտոններ՝ մեծ «մաքրությամբ» (մեկ ֆոտոն մեկ ակտիվացնող իրադարձության համար) և կոհերենտությամբ, ինչը կարող է լավ հիմք ծառայել անվտանգ/պաշտպանված հաղորդակցության և մեծ ճշգրտությամբ քվանտային գործողությունների համար: Այս աղբյուրների ինտեգրումը մասշտաբավորվող ֆոտոնային հարթակների մեջ ապահովում է լուսային դաշտով քվանտային վիճակների կայուն և ճշգրիտ կառավարումը: Այդ նպատակների իրականացմանը կարելի է հասնել՝ ապահովելով ենթալիքային տիրույթներում EՄ ալիքների տեղայնացումը և Պարսել գործոնի մեծացումը տարատեսակ՝ գլանային, ակոսածև, տորոիդալ

մակերևութային պլազմոն-պոլարիտոնային (ՄՊՊ) միկրոռեզոնատորների կիրառմամբ: ՄՊՊ միկրոռեզոնատորներում Պարսել գործոնի մեծացման (ընդհուպ մինչև 10^3 կարգի) հանարավորության ցուցադրումը՝ հարաբերականորեն մեծ բարորակության և փոքր մոդալ ծավալների ստացման շնորհիվ:

- Մեծ բարորակությամբ (մինչև 10^4 կարգի) կիսազանային միկրոռեզոնատորներում շնչացող մոդերի էֆեկտիվ գրգռման եղանակների հետազոտումը՝ ալիքատարային մոդի կամ ընկնող հարթ ալիքի հետ փոխազդեցության միջոցով:
- Մետակառուցվածք կազմող մետատոմների՝ գլանաձև կամ շերտավոր երկրաչափությամբ տարրերի, կառուցվածքային ռեզոնանսային երևույթի բացահայտումը: Գրաֆիտային խառնուրդներով միկրոշերտերից կազմված համակարգերի հետ փոխազդող միկրոալիքային ճառագայթման ամլիտուդա-փուլային արձագանքի կառավարման հետազոտումը:
- Ենթաալիքային չափերի՝ գլանաձև կամ շերտավոր մետաղական տարրերով գերբարակ մետակառուցվածքներում լայնաշերտ և արդյունավետ կլանման հնարավորության ցուցադրումը հաճախությունների տարբեր՝ միկրոալիքային, տերահերցային (S<g) և օպտիկական տիրույթներում:
- Միկրոալիքային տիրույթում մեծ արդյունավետություն ապահովող էլեկտրականապես փոքր չափերի անտենաների հետազոտումը՝ հիմնված մագնսադիէլեկտրիկ նյութերի կամ լրացուցիչ ռեզոնանսային տարրերի վրա՝ կոմպակտ հեռահաղորդակցական սարքեր մշակելու նպատակով:
- Գերբարձ հաճախությունների և S<g տիրույթում փոքր օմական կորուստներով, տվյալների հաղորդման մեծ արագություններ ապահովող և լայնաշերտ ռեզոնանսային արձագանքով համակարգերի մշակման տեսանկյունից, ենթաալիքային չափերի հաղորդիչ գծերում մակերևութային ձմերֆելդյան ալիքների գրգռման մեխանիզմների ուսումնասիրումը:
- Երկշերտ մետամակերևույթներում անոմալ խիստ դիսպերսիոն անցման երևույթի բացահայտումը. որպես կիրառություն օպտիկական և S<g տիրույթներում երկշերտ մետակառուցվածքների միջոցով լայնաշերտ և կարգավորվող փակոցային զտիչների իրականացման ուսումնասիրումը:

Գիտական նորույթ

Տարատեսակ՝ գլանային, ակոսաձև, տորոիդալ մակերևութային պլազմոն-պոլարիտոնային (ՄՊՊ) միկրոռեզոնատորներում ռեզոնանսային մոդերի տարածական բաշխվածության ու դիսպերսիոն բնութագրերի ստացում ադիաբատիկ մոտավորության սահմաններում, նանոմետրական չափերում

դաշտերի տեղայնացման հնարավորության բացահայտում և Պարսել գործոնի մեծացման հնարավորության ցուցադրում:

Մեծ բարորակությամբ կիսագլանային միկրոռեզոնատորներում Ֆաբրի-Պերո ռեզոնանսային պայմանների համադրմամբ շնչացող մոդերի ձևավորման պարզաբանում: Բացահայտվել են ռեզոնատորների արդյունավետ գրգռման եղանակներ՝ ընկնող հարթ ալիքի կամ ալիքատարային մոդի փոխազդեցության միջոցով: Ստացված անալիտիկ արտահայտությունների և մոդելավորումների միջոցով ցուցադրվել են ռեզոնանսային մոդերի բաշխվածության տեսքերը և լուսաբանվել են ռեզոնանսային պայմանները:

Բացահայտվել են մետակառուցվածքը կազմող զլանածև կամ շերտավոր երկրաչափությամբ տարրերի կառուցվածքային ռեզոնանսային երևույթները, ինչի հիման վրա ցուցադրվել է լայնաշերտ և արդյունավետ կլանման հնարավորությունը տարբեր՝ միկրոալիքային (ԳԲՀ), տերահերցային (ՏՀց) և օպտիկական տիրույթներում:

Իրականացվել է միկրոալիքային տիրույթի, էլեկտրականապես փոքր չափի անտենաների մշակում, փորձարարական նմուշների պատրաստում և թեստավորում: Ցույց է տրվել մագնիսադիէլեկտրիկ կիսագնդաձև ռեզոնատորի կիրառմամբ անտենայի չափափոքրացման հնարավորությունը մոտ յոթ անգամ՝ միաժամանակ ապահովելով լայնաշերտությունը, բարձ էֆեկտիվությունը և ընդունելի ուժեղացումը:

Միկրոալիքային և ՏՀց տիրույթում ցույց է տրվել մակերևութային Չոմերֆելդից կանգուն ալիքների գրգռման հնարավորությունը ենթաալիքային չափերի հաղորդիչ ձողերում՝ փոքր օժանակ կորուստներով, ցածր դիսպերսիայով և ռեզոնանսային արձագանքով համակարգերի մշակման միջոցով: Արտապատկերվել են հաղորդիչ ձողերի մոտակայքում միկրոալիքային դաշտի էլեկտրական և մագնիսական բաղադրիչները:

Ցույց է տրվել գրաֆիտային խառնուրդային նյութերով միկրոշերտերից կազմված համակարգերի վրա ընկնող միկրոալիքային ճառագայթման արձագանքի փուլային կառավարման հնարավորությունը՝ կախված գրաֆիտային խառնուրդի հաղորդականությունից, և արձագանքի ռեզոնանսային վարքը՝ կախված միկրոշերտերի երկրաչափական և էլեկտրադինամիկ բնութագրերից:

Բացահայտվել է հաղորդիչ ձողերից կազմված երկշերտ մետակառուցվածքներում ԷՄ ալիքների անոմալ, խիստ դիսպերսիոն անցման երևույթը: Ցույց է տրվել, որ այս երևույթը պայմանավորված է երկու գործոնով. առաջինը՝ միկրոալիքային դաշտի և ձողերի միջև ռեզոնանսային փոխազդեցությունն է, որը հանգեցնում է մակերևութային կանգուն ալիքների առաջացմանը, որոնք հնարավոր են դարձնում միջձողային գոտիներում մոտակա դաշտերի փոխազդեցությունը: Երկրորդը՝ տարբեր շերտերում գտնվող ձողերի միջև կապի գործակցի կոմպլեքս արժեքն է՝ պայմանավորված դրանց միջև փոխազդեցության ուշացմամբ: Այստեղ էլեկտրամագնիսական

արձագանքը կարող է արդյունավետորեն կառավարվել՝ փոփոխելով շերտերի միջև հեռավորությունը և միջշերտային միջավայրի դիէլեկտրիկ հատկությունները:

Տույց է տրվել երկշերտ մետակառուցվածքների որպես օպտիկական տիրույթի լայնաշերտ և կարգվորվող փակոցային գոտիներ գործելու ունակությունը:

Գործնական արժեքը

Առաջարկվող ՄՊՊ միկրոռեզոնատորները կարող են կիրառվել որպես ինտեգրալային օպտոէլեկտրոնիկայի տարրեր՝ հնարավորություն ստեղծելով ազդանշանների գերարագ մշակում՝ մոդուլում, մուլտիպլեքսավորում, գտում և այլն, անմիջապես օպտիկական տիրույթում:

Քննարկված մետակառուցվածքները հնարավորություն են տալիս կառուցել գերբարակ, արդյունավետ, լայնաշերտ կլանիչներ ինչպես միկրոալիքային-գիգահերցային, անպես էլ ավելի բարձրհաճախային՝ տերահերցային և օպտիկական տիրույթներում:

Դիտարկված կիսազլանային ռեզոնատորները կարող են ծառայել որպես էֆեկտիվ հարթակ օպտիկական մոդուլատորների և սենսորների իրականացման համար:

Շնորհիվ իրենց կոմպակտության և լայնաշերտության՝ աշխատանքում մշակված էլեկտրականապես փոքր անտենաները կարող են արդյունավետորեն կիրառվել հեռակառավարման և հեռահաղորդակցության ժամանակակից համակարգերում (օրինակ՝ անօդաչու թռչող սարքերում (ԱԲՍ), շարժական կայաններում, փոքրաչափ ռոբոտատեխնիկայում և այլն): Դրանք խոստումնային կիրառական ներուժ ունեն նաև կենսաբժշկության ոլորտում՝ ծառայելով որպես ախտորոշիչ, ինչպես նաև տվյալների հավաքագրման և հեռահար փոխանցման հանգույցների առանցքային բաղադրիչ:

ԳՀց և ՏՀց տիրույթում մակերևութային Չոմերֆելդյան կանգուն ալիքների գրգռման հնարավորությունը ենթաալիքային չափերի հաղորդիչ ձողերում հնարավորություն է ստեղծում կառուցել փոքր օմանակ կորուստներով և տվյալների փոխանցման ցածր դիսպերսիայով սարքեր՝ հաջորդ սերնդի հեռահաղորդակցային համակարգերում կիրառման մեծ հեռանկարով:

Առաջարկվող երկշերտ մետամակերևույթները օպտիկական և ՏՀց տիրույթներում կարող են կիրառվել որպես լայնաշերտ և կարգավորվող փակոցային գոտիներ:

Հարկ է նշել, որ առաջարկվող բոլոր լուծումները աչքի են ընկնում կառուցվածքային պարզությամբ և իրականացման տեսանկյունից բարդություն չեն ներկայացնում:

Պաշտպանության ներկայացվող հիմնական դրույթները

1. Գլանային համաչափությամբ (սիմետրիայով) ՄՊՊ ռեզոնատորների դիսպերսիոն առնչությունների, ռեզոնանսային պայմանների և դաշտերի բաշխվածության համար ստացված անալիտիկ արտահայտությունները հնարավորություն են ընձեռում արդյունավետորեն օպտիմալացնել ռեզոնատորների բնութագրերը, ճշգրտորեն գնահատել դաշտի ենթաալիքային տեղայնացման աստիճանը, ինչպես նաև հստակ նախանշել դրանց գործնական կիրառման ոլորտները:
2. Կիսազլանային միկրոռեզոնատորներում Ֆաբրի-Պերո ռեզոնանսային պայմանի իրականացումը շնչացող մոդերի ձևավորման գործընթացում ապահովում է համակարգի մեծ բարորակություն ($\approx 2.5 \cdot 10^4$), ինչպես նաև համակարգի կոր պարագծին մոտ ձևավորվող մոդերի ստացում, ինչը հնարավոր է դարձնում այն տարատեսակ սենսորային կիրառություններում (օրինակ՝ արտաքին միջավայրի բեկման ցուցիչի մինչև չորրորդ տասնորդական նիշի ճշտությամբ): Կիսազլանի հիմքում տեղակայված՝ սկին շերտի կարգի հաստությամբ հարթ մետաղական շերտը հնարավորություն է տալիս էվանեսցենտ կապի միջոցով ռեզոնատորի էֆեկտիվ գրգռում՝ ընկնող հարթ ալիքի կամ ալիքատարային մոդի հետ փոխազդեցության միջոցով: Ռեզոնանսային մոդերի բաշխվածությունը և ռեզոնանսային պայմանները հստակորեն լուսաբանվում են ստացված անալիտիկ արտահայտությունների և թվային հաշվարկների համադրմամբ:
3. Օգտագործելով աշխատանքային ալիքի երկարություններից էապես բարակ մետամակերկույթներ՝ կազմված գլանաձև կամ շերտավոր հաղորդիչ տարրերից, հնարավոր է իրականացնել լայնաշերտ և արդյունավետ կլանում հաճախությունների միկրոալիքային (ԳԲՀ), տերահերցային (ՏՀց) և օպտիկական տիրույթներում՝ պայմանավորված մետակառուցվածքի միավոր բջիջներում ի հայտ եկող կառուցվածքային ռեզոնանսով:
 - Ցույց է տրվել, որ ԳԲՀ տիրույթում մետամակերկույթի տարր հանդիսացող՝ գրաֆիտի խառնուրդ պարունակող շերտերի կլանման լայնական հատույթը շուրջ 22 անգամ գերազանցում է դրանց երկրաչափական լայնական հատույթի մակերեսը: Այս առանձնահատկության արդյունքում 8–12 ԳՀց հաճախականային շերտում հնարավոր է ապահովել 0.82 արժեքը գերազանցող համաչափ կլանում՝ 0.13 անդրադարձման և 0.05 անցման միջին գործակիցների պայմաններում:
 - VO_2 շերտերից կազմված մետամակերկույթի և անդրադարձնող ոսկյա շերտի համադրումը՝ միմյանցից տարանջատված բարակ դիէլեկտրիկ շերտով (35 մկմ հաստությամբ), ապահովում է 0.9 արժեքը գերազանցող կլանում 0.66 ՏՀց-ից 1.84 ՏՀց շերտում: Ընդ որում, ցույց է տրվել կլանման մակարդակի ղեկավարման հնարավորությունը՝ VO_2 -ի հաղորդականության ջերմաստիճանային կախվածությամբ:

- Ինֆրակարմիր տիրույթում նիկելե (Ni) ժապավեններից կազմված մետամակերևույթը և նույն մետաղից պատրաստված անդրադարձնող էկրանի համադրումը՝ միմյանցից տարանջատված սիլիցիումի երկօքսիդի (SiO₂) բարակ դիէլեկտրիկ շերտով, ապահովում է 0.9 արժեքը գերազանցող լայնաշերտ կլանում 8.2-18 մկմ ալիքային երկարությունների տիրույթում:
4. Մագնիսադիէլեկտրիկ նյութերի կիրառմամբ հնարավոր է զգալի նվազեցնել անտենայի չափերը շուրջ 7 անգամ, և մոտ 6 անգամ լայնացնել անտենայի թողարկման շերտը՝ ստանալով լայնաշերտ, էլեկտրականապես փոքր անտենա և արդյունքում հաղթահարելով փոքր անտենաների նախագծման սահմանափակումը՝ կապված դրանց բնորոշ բարձր բարորակության հետ: Ծնորհիվ միկրոշերտավոր անտենայի վրա տեղադրված կիսազնդածն մագնիս-դիէլեկտրիկ ռեզոնատորներում գրգռված ռեզոնանսային շնչացող մոդերի, անտենան սկսում է արդյունավետորեն ճառագայթել էապես ավելի ցածր հաճախություններում (սկզբնական նախագծված 13 ԳՀ-ի փոխարեն մոտ հինգ անգամ ավելի ցածր՝ 2.5 ԳՀ-ում)՝ պահպանելով ճառագայթման ուժեղացման գործակցի ընդունելի արժեքներ:
 5. Ենթաալիքային չափերի հաղորդիչ ձողերում հնարավոր է գրգռել Զմներֆելդյան մակերևութային ալիքներ՝ ձևավորելով այսպես կոչված Գուբոյի գծեր: Վերջիններս գիգահերցային (ԳՀ) և տերահերցային (ՏՀ) տիրույթներում ապահովում են փոքր օհմային կորուստներ, տվյալների փոխանցման բարձր արագություն և ցածր դիսպերսիա, ինչը հնարավորություն է ընձեռում դրանք հաջողությամբ կիրառել նշված տիրույթներում էլեկտրամագնիսական ալիքների կառավարման և ազդանշանների արդյունավետ մշակման գործընթացներում:
 6. Գրաֆիտային խառնուրդ պարունակող միկրոշերտերից կազմված մետամակերևույթներում հնարավոր է արդյունավետորեն կառավարել միկրոալիքային (ԳԲՀ) ճառագայթման ռեզոնանսային ամպլիտուդափոփոխյին արձագանքը: Նշված կառավարումն իրագործվում է խառնուրդում գրաֆիտի կոնցենտրացիայի և, դրանով պայմանավորված, միկրոշերտի էլեկտրական հաղորդականության նպատակային փոփոխման միջոցով:
 7. Հաղորդիչ ձողերից կազմված երկշերտ մետամակերևույթներում դիտվող խիստ դիսպերսիոն անցման երևույթը պայմանավորված է երկու հիմնական գործոնով: Նախ՝ միկրոալիքային ճառագայթման ազդեցությամբ ձողերի վրա ձևավորվում են մակերևութային կանգուն ալիքներ, ինչը հնարավորություն է ընձեռում ապահովելու մերձակա դաշտերի արդյունավետ փոխազդեցություն միջձողային տիրույթներում: Երկրորդ՝ հակադիր շերտերում տեղակայված ձողերի միջև կապի գործակիցն ունի կոմպլեքս բնույթ, որի կեղծ մասի առկայությունը

հանգեցնում է ռեզոնանսային գծի ասիմետրիայի (անհամաչափության) և համակարգի թափանցելիության կտրուկ փոփոխությունների:

Աշխատանքի ներկայացումը

Ատենախոսության հիմնական արդյունքները քննարկվել են Երևանի պետական համալսարանի ռադիոֆիզիկայի և հեռահաղորդակցության, ֆիզիկական պրոցեսների մոդելավորման և ազդանշանների մշակման ամբիոնների և Լայբնիցի ֆոտոնիկ տեխնոլոգիաների նանոբիոֆոտոնիկայի լաբորատորիայի սեմինարներում և ներկայացվել են հետևյալ միջազգային գիտաժողովներում՝

"Laser Physics 2011" international conference (2011), Photonics and Micro-and Nano-structured Materials (2011), International Conference on "Microwave and THz Technologies and Applications" (IRPhE'2014), SMR 2633: 2nd International Symposium on Optics and its Applications (2014), SPIE Optical Systems Design 2015, "Laser Physics 2015" international conference, (Photonics and Wireless Communications(IRPhE'2016), Nanoscience and Technology Forum (2017), International Conference on Microwave & THz Technologies and Wireless Communications (IRPhE'2018), Optics and Its Applications: 9th International Symposium (2021), International Conference on Microwave & THz Technologies and Optoelectronics (IRPhE'2022), Molecular Plasmonics conference (2023), The 4th International Conference on Materials Science & Nanotechnology (2023), International Conference on Microwave & THz Technologies, Wireless Communications and OptoElectronics (IRPhE'2024), Molecular Plasmonics conference (2023), ESA Space Microwave Week (2023), The 11th International Conference on Surface Plasmon Photonics, SPP11 (2025).

Հրապարակումները

Ատենախոսության հիմնական արդյունքները տպագրված են միջազգային գիտաժողովների նյութերի ժողովածուների 11 գիտական հրապարակումներում և գիտական ամսագրերի 21 հոդվածներում, որոնց ցուցակը ներկայացված է սեղմագրի վերջում:

Ատենախոսության կառուցվածքը

Ատենախոսությունը բաղկացած է ներածությունից, չորս գլուխներից, եզրակացությունից և 471 անուն պարունակող հղումների ցանկից: Աշխատանքում առկա են 102 նկար և 2 աղյուսակ: Աշխատանքի ընդհանուր ծավալը 253 էջ է:

ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ներածության մեջ հիմնավորված է աշխատանքի արդիականությունը, ձևակերպված են նպատակներն ու խնդիրները, ինչպես նաև պաշտպանության

ներկայացվող հիմնական դրույթները: Նշված են ստացված արդյունքների գիտական նորույթը և գործնական արժեքը:

Առաջին գլխում դիտարկված են պլազմոնային միկրոռեզոնատորները, դրանց դիսպերսիոն առնչությունները և մոդալ կառուցվածքը նկարագրող տեսական և թվային հաշվարկման եղանակները:

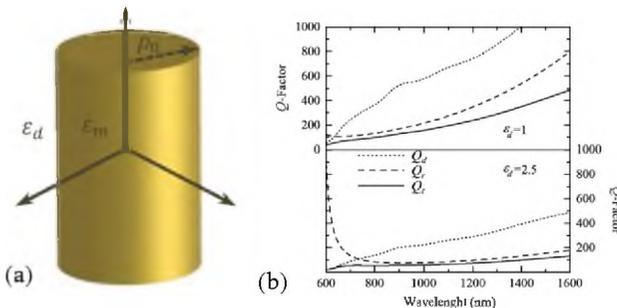
1.1 պարագրաֆը ներածական է, որտեղ վերլուծված են օպտիկական տիրույթի միկրոռեզոնատորների տեսակները, հիմնական առանձնահատկությունները, զրգոման մեթոդներն ու դրանց հետազոտման տեսական, թվային և փորձարարական եղանակները: Ներկայացված են մինչ այժմ հաճախությունների օպտիկական տիրույթում ՄՊՊ միկրոռեզոնատորների հիմնական տեսակները, դրանց կառուցվածքային յուրահատկություններն ու կիրառման հնարավորությունները:

1.2 պարագրաֆում հետազոտված են ՄՊՊ ալիքատարային մոդերի ձևավորման հնարավորությունները գլանային միկրոռեզոնատորում (տե՛ս Նկ. 1 (a)): Ստացված վերլուծական արտահայտությունները հնարավորություն են տալիս որոշել ՄՊՊ ալիքատարային մոդերի հիմնական բնութագրիչները, իսկ բարորակության համար ստացվել է հետևյալ արտահայտությունը [7]

$$Q_i^{-1} = \left\{ \frac{1}{4} \left(\frac{|\varepsilon_m|^4}{\varepsilon_d} \right) \cdot \left(1 + \frac{1}{\varepsilon_d} \right) \cdot \left(1 - \frac{\varepsilon_d}{|\varepsilon_m|^4} \right)^{-2n+1} \right\}^{-1} + \left\{ \frac{|\varepsilon_m|^2}{\varepsilon_m^n \varepsilon_d} \left(1 - \frac{\varepsilon_d}{|\varepsilon_m|^4} \right) \right\}^{-1}, \quad (1)$$

որտեղ ձևավոր առաջին փակագծի արտահայտությունը իրենից ներկայացնում է բարորակության ճառագայթային Q , բաղադրիչը, իսկ երկրորդը՝ օժմական Q_d բաղադրիչը:

Նկար 1 (b)-ում ներկայացված է ոսկուց պատրաստված ՄՊՊ միկրոռեզոնատորի ընդհանուր բարորակության կախվածությունը ալիքի երկարությունից: Հատկանշական է, որ մոդերի թվի մեծացմանը զուգընթաց գրեթե գծային աճում է նաև բարորակությունը:



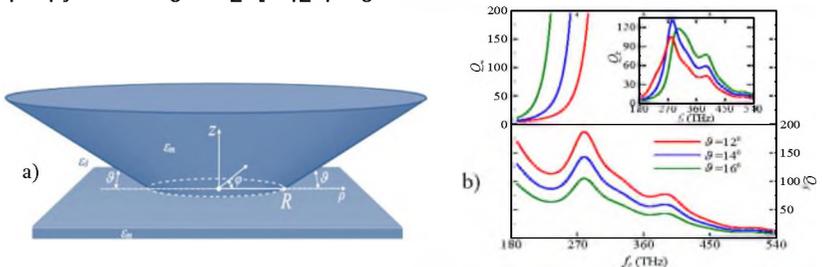
Նկ. 1: (a) ՄՊՊ գլանային միկրոռեզոնատորի սխեմատիկ պատկերը: (b) Գլանային միկրոռեզոնատորի բարորակության կախվածությունը ալիքի երկարությունից տարբեր դիէլեկտրիկ միջավայրերում, մոդերի թիվը՝ $n=10$:

Այստեղ դիտարկված է այն դեպքը, երբ գլանի շառավիղը համեմատական է ՄՊՊ ալիքի երկարությանը՝ $\rho_0 \sim n \cdot \frac{\lambda_{\text{pp}}}{2\pi}$, որտեղ $n \propto 10$ մոդերի թիվն է, իսկ միջավայրի դիէլեկտրիկ թափանցելիությունը էապես փոքր է մետաղի դիէլեկտրիկ թափանցելիության իրական մասից: Կառուցվածքի հետաքրքիր առանձնահատկություններից է ճառագայթող ալիքների գլանային բնույթը, այն բխում է մագնիսական դաշտի z բաղադրիչի համար ստացված արտահայտությունից, որը գլանային սիմետրիայի արդյունք է: Իսկ գլանային ալիքները պարաբոլիկ հայելիների օգնությամբ հեշտությամբ կարելի է ձևափոխվել շրջանային բևեռացված ալիքների: Մինևույն ժամանակ ռելաքսացիայի կարճ ժամանակը, որ հատուկ է ՄՊՊ ալիքներին, կարող է նպաստել ֆեմտովայրկյանային լազերային իմպուլսների ձևավորմանը:

1.3 պարագրաֆում հետազոտված են V-տիպի ակոսաձև (Նկ. 2 (a)) ՄՊՊ միկրոռեզոնատոր, որում ալիքային էներգիան հիմնականում կենտրոնացված է մետաղական մակերևույթներով սահմանափակված մեկուսիչ միջավայրով՝ ակոսաձև տիրույթում: Ստացված վերլուծական արտահայտությունները թույլ են տալիս որոշել միկրոռեզոնատորի աշխատանքի առավել նպաստավոր պայմանները, էՄ էներգիայի տեղայնացման տիրույթը՝ մոդալ ծավալը [8]: Ստացվել են ակոսաձև միկրոռեզոնատորում ընդհանուր բարորակության (Q_t) և նրա ճառագայթային (Q_r) ու օհմական (Q_d) կորուստներով պայմանավորված բաղադրիչների կախվածությունները ռեզոնանսային հաճախությունից (Նկ. 2 (b)):

$$Q_t^{-1} = \left\{ \frac{\theta^2}{2r^2} \exp \left[\frac{4\pi R \varepsilon_d^2 f_r}{3c |\varepsilon_m|^{1/2} g^2} \right] \right\}^{-1} + \left\{ \theta^2 \frac{|\varepsilon_m|^{1/2}}{\varepsilon_d \varepsilon_m f} \right\}^{-1} \quad (2)$$

Հավասարության աջ մասում գրված առաջին արտահայտությունը՝ բարորակության ճառագայթային բաղադրիչը՝ Q_r -ն, արագ աճում է ՄՊՊ ռեզոնանսային հաճախության աճին զուգընթաց, մինչդեռ բարորակության օհմական կորուստների Q_d բաղադրիչը նվազում է: Q_d -ն ընդունում է 500-ին մոտ առավելագույն արժեքը 283 SՀg-ի դեպքում, իսկ Q_r -ն մոտոտն աճում է հաճախության մեծացմանը զուգընթաց:



Նկ. 2 (a) V-տիպի ակոսաձև ՄՊՊ միկրոռեզոնատորի սխեմատիկ պատկերը: (b) Ակոսաձև միկրոռեզոնատորում լրիվ բարորակության (Q_t) և նրա բաղադրիչների (Q_r և Q_d) կախումը ռեզոնանսային հաճախությունից՝ $\theta = 12^\circ, 14^\circ, 16^\circ$, $R = 2$ մկմ և $\varepsilon_m = -57.35 + 0.56i$, $\varepsilon_d = 2.5$ -ի համար:

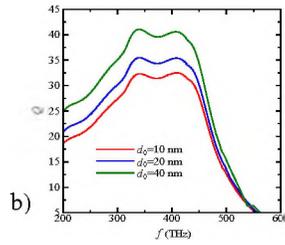
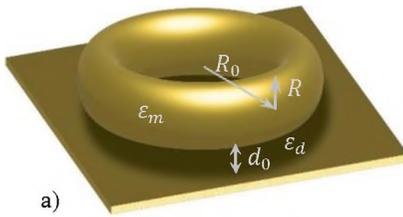
Արդյունքում, ընդհանուր բարորակությունը՝ Q_r -ն նույնպես վերջավոր է և իր առավելագույն՝ 131, արժեքն է ընդունում 14° անկյան և 283 S<g (1059 մկմ ալիքի երկարության) հաճախության դեպքում (Նկ. 2(b) ներդիր):

Չնայած բարորակության համար ստացված համեմատաբար ոչ շատ բարձր արժեքի, ի շնորհիվ մոդալ ծավալի խիստ տեղայնացմանը՝ նանոչափական տիրույթում ($\sim \lambda/10$), էապես աճում է սպոնտան ճառագայթումը բնութագրող Պարսել գործոնը, որը համեմատական է բարորակության և մոդալ ծավալի հարաբերությանը: Այս հանգամանքը նման ռեզոնատորների բազմաթիվ կիրառությունների հնարավորություն է տալիս, ինչպիսիք են՝ լուսարձակող դիոդները, սենսորները, քվանտային տեղեկատվության մշակման և ֆոտովոլտային համակարգերը:

1.4 պարագրաֆում դիտարկված է դիէլեկտրիկ շերտով տարանջատված տորոիդալ և հարթ մետաղական մակերևույթներով կազմված պլազմոնային ռեզոնատորը (տե՛ս Նկ. 3 (a)):

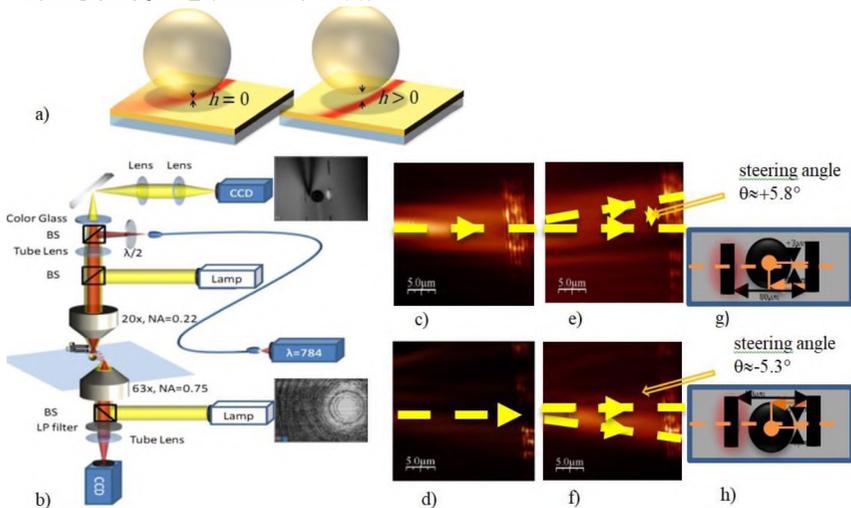
Այստեղ, որպես մետաղական միջավայր ծառայում է ոսկին՝ ϵ_m դիէլեկտրական թափանցելիությամբ, իսկ ճեղքի դիէլեկտրիկական թափանցելիությունը ϵ_d է, d_0 -ն ճեղքի նվազագույն հաստությունն է, իսկ կառուցվածքը բնութագրող R և R_0 շառավիղներն էապես ավելի մեծ են ռեզոնատորում ՄՊՊ մոդի ալիքի երկարությունից: Հաշվարկները ցույց են տալիս, որ $d_0 = 10$ նմ և $R, R_0 \geq \lambda_0$ դեպքում ՄՊՊ մոդը տեղայնացվում է մետաղական մակերևույթների միջև ընկած դիէլեկտրիկ ճեղքում՝ $\lambda_0/10$ տիրույթում (λ_0 -ն ռեզոնատորում ՄՊՊ ռեզոնանսային հաճախությանը համապատասխանող ալիքի երկարությունն է ազատ տարածությունում): Օղակաձև ռեզոնատորի ռեզոնանսային հաճախությունը փոքրանում է մետաղական տորոիդի երկարության՝ $2\pi R_0$ -ի, աճին զուգընթաց, միևնույն ժամանակ R_0 -ի մեծացման հետ աճում է նաև ռեզոնանսային ալիքի երկարությունը և, հետևաբար, մոդի հաստատուն թվերի համար փոքրանում է f_r ռեզոնանսային հաճախությունը:

Նկար 3 (b)-ում բերված է ՄՊՊ ռեզոնատորի բարորակության կախվածությունը հաճախությունից: Բարորակության համեմատաբար փոքր արժեքը՝ $Q = 40$, պայմանավորված է մետաղական մակերևույթների միջև ընկած տարածությունում ՄՊՊ ենթաալիքային մոդերի ուժեղ տեղայնացմամբ [9]: Ինչպես և նախորդ պարագրաֆում, այնպես էլ այստեղ, ուսումնասիրված ռեզոնատորի բարորակությունն ունի բավականին համեստ արժեք, սակայն մոդի զբաղեցրած փոքր ծավալը և արդյունքում Պարսելի գործակցի մեծացումը կարող է նպաստել ինքնակամ ճառագայթման զգալի աճին [10]:



Նկ. 3: (a) Դիէլեկտրիկ միջավայրով առանձնացված մետաղական հարթությունից և մետաղական տորոիդից կազմված ՄՊՊ ռեզոնատորի կառուցվածքը և (b) նրա բարորակության կախվածությունը կառուցվածքի ռեզոնանսային հաճախությունից՝ $R_0 = 3$ մկմ, $R = 1.5$ մկմ և $\varepsilon_d = 2,5$ դեպքում:

1.5 պարագրաֆում փորձնկանորեն հետազոտված է դիէլեկտրիկ շերտով տարանջատված, կամ անմիջապես միմյանց հպված գնդաձև և հարթ մետաղական մակերևույթներով կազմված պլազմոնային ռեզոնատորների միջոցով էլեկտրամագնիսական ալիքների կառավարման և «արգելափակման» հնարավորությունը (տե՛ս Նկ. 4 (a)):

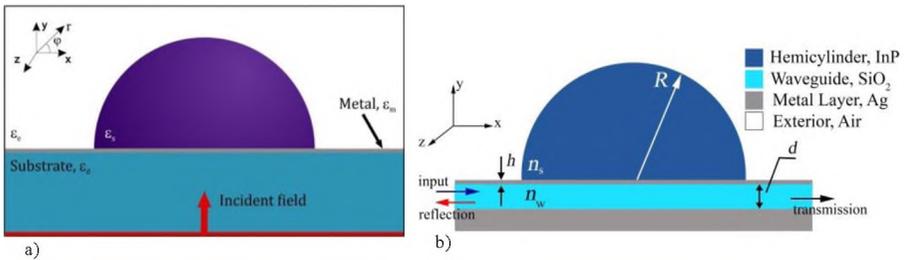


Նկ.4. a) գնդաձև և հարթ մետաղական մակերևույթներով կազմված պլազմոնային ռեզոնատորի սխեմատիկ պատկերը, b) փորձարարական համակարգի սխեմատիկ պատկերը, c) պլազմոնային փնջի SNOM պատկեր՝ առանց մետաղական գնդի: d) պլազմոնային «սև խողով» կողմից «որսված» պլազմոնային փնջի SNOM պատկեր (պլազմոնային փնջի ելքային ինտենսիվությունը նվազել է մոտ 32 անգամ): (e) և (f) պլազմոնային փնջի ուղղորդումը համապատասխանաբար g) և h) կետերում ներկայացված տարբեր հարաբերական դիրքերի համար:

Փորձարարական հետազոտությունը կատարվել է մոտակա դաշտի սկանավորող մանրադիտակի՝ SNOM-ի միջոցով: Այստեղ ՄՊՊ-երը գրգռվել են ստորին լազերի ֆոկուսացված փնջի և մետաղի վրա բացված ճեղքերի փոխազդեցությամբ: Երկաշտարակ SNOM-ի մի ծայրի (tuning-fork) միջոցով կառավարվել է մետաղական ոսկե գնդի դիրքը (գնդի շառավիղը հավասար է 25 մկմ) իսկ մյուս ծայրով տեսաձրվել է ՄՊՊ դաշտը՝ բաշխումը և սկանավորված տիրույթի պատկերը ստանալու համար: Եթե ոսկե գունդը տեղակայված է ՄՊՊ ալիքի տարածման առանցքի վրա ապա այն ամբողջովին «արգելափակում» է դաշտը գործելով որպես «սև խողջ», իսկ եթե գնդի դիրքը շեղված է ՄՊՊ ալիքի տարածման ուղղությունից, օրինակ ± 3 մկմ, ապա տեղի է ունենում ՄՊՊ ալիքի տարածման ուղղության շեղում $\sim \pm 5.5^\circ$, ինչը ապացուցում է նմանատիպ կառուցվածքով ՄՊՊ տարածման ուղղության դեկավարման հնարավորությունը:

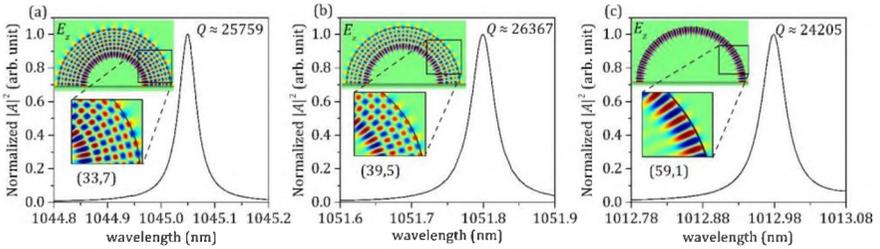
Կառուցվածքի գնդաձևության պատճառով ստացվում է շրջանաձև սիմետրիկ ռադիալ նվազող արդյունավետ բեկման ցուցիչ, որը անհրաժեշտ պահանջ է «սև խողջի» իմիտացիայի համար: Յուրադրվել են նման կառուցվածքի ՄՊՊ դաշտերի ուղղորդող հատկությունները, որոնք տեսականորեն կանխատեսվել էին [11]:

1.6 և **1.7** պարագրաֆներում ուսումնասիրված են կիսազլանային միկրոռեզոնատորների էֆեկտիվ գրգռման եղանակները՝ արտաքին հարթ ալիքի (1.6) և ալիքատարային մոդերի միջոցով (1.7): Կիսազլանային ռեզոնատորում Ֆաբրի-Պերո ռեզոնանսային պայմանի իրականացումը շնչացող մոդերի ձևավորման գործընթացում ապահովում է համակարգի մեծ բարորակություն ($\approx 2.5 \times 10^4$), ինչպես նաև համակարգի կոր պարագծին մոտ մոդերի ձևավորում:



Նկ. 5. a) Կիսազլանային միկրոռեզոնատորի կառուցվածքի լայնական հատույթը, $\epsilon_a = 2.25$, $\epsilon_s = 1$ համապատասխանաբար տակդիրի (SiO_2 սիլիցիումի երկօքսիդ) և շրջակա միջավայրի (օդ) դիէլեկտրիկ թափանցելիություններն են: Որպես մետաղական և կիսազլանային միջավայրեր համապատասխանաբար օգտագործվել են Ag և GaAs, InP: b) Կապված ալիքատարով գրգռվող կիսազլանային ռեզոնատորի սխեմատիկ պատկերը, որտեղ h-ը կիսազլանի և ալիքատարի միջև մետաղի հաստությունն է, d-ն ալիքատարի լայնքը, R-ը՝ կիսազլանի շառավիղը: Ուսումնասիրված կառուցվածքում այդ բնութագրերը հետևյալ արժեքներն ունեն՝ $d = 500$ nm, $h = 50$ nm և $R = 3$ μm

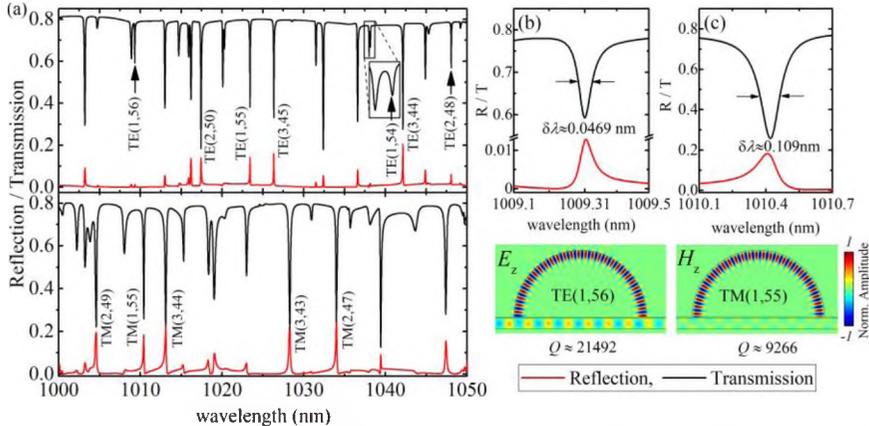
Լուծելով Հելմհոլցի հավասարումը գլանային կոորդինատական համակարգում և կիրառելով համապատասխան եզրային պայմանները կիսագլանային կառուցվածքի համար՝ ստացվել են դաշտի նկարագրման ֆունկցիաները կիսագլանի ներսում և դրսում՝ համապատասխանաբար Բեսսելյան և Հանկելյան ֆունկցիաների տեսքով: Դաշտի անխզելիության պայմաններից որոշվել են անորոշ գործակիցները և ստացվել են շնչացող մոդերի համար դիսպերսիոն արտահայտությունները, ինչպես նաև գնահատվել է բարորակությունը [12]: Թվային հաշվարկների միջոցով ցուցադրվել են դաշտի բաշխվածության տեսքերը տարբեր ռադիալ և ազիմուտալ մոդերի համար և գնահատվել բարորակության արժեքները, որոնք պատկերված են Նկ.6-ում:



Նկ.6 Էլեկտրական դաշտի E_z բաղադրիչի լայնույթի բաշխվածությունը ռեզոնատորում որոշակի մոդերի համար և Q բարորակության արժեքները: (a) $m=33, \ell=7$ ($WG_{33,7}$), $\lambda_0 = 1045.05$ նմ (b) $m=39, \ell=5$ ($WG_{39,5}$), $\lambda_0 = 1051.8$ նմ և (c) $m=59, \ell=1$ ($WG_{59,1}$), $\lambda_0 = 1012.98$ նմ:

Դիտարված միկրոռեզոնատորի կարևոր առանձնահատկությունն այն է, որ այն հնարավոր է գրգռել հարթ ալիքի միջոցով՝ հիմքի բարակ մետաղական շերտում ձևավորված էվանեսցենտ դաշտի օգնությամբ: Ռեզոնատորում մոդերի ձևավորումը կարելի է դիտարկել որպես երկու՝ շնչացող մոդերի և Ֆարի-Պերո ռեզոնանսային մոդերի համադրում: Այս հանգամանքը թույլ է տալիս կառավարելի դարձնել և՛ կապի գործակիցը՝ մետաղական շերտի հաստության փոփոխմամբ, և՛ մոդերի ձևավորումը՝ կիսագլանի շառավղի արժեքի և նյութի ընտրությամբ: Բարորակության մեծ արժեքները՝ 10^4 կարգի, ինչպես նաև շառավղից և բեկման ցուցիչից (բեկման ցուցիչի $\Delta n_s \approx 10^{-4}$ տարբերության պարագայում դաշտի էներգիայի էական փոփոխություն է նկատվում) կուտակված էներգիայի խիստ կախվածությունը հնարավորություն է ստեղծում այսպիսի համակարգերը կիրառել որպես խիստ զգայուն սենսոր՝ մոլեկուլյար բարակ շերտերի գրանցման համար, ինչպես նաև լույսի կառավարման հնարավորություն տարատեսակ էլեկտրասոպտիկական և ոչգծային էֆեկտների միջոցով:

Կիսազլանային ռեզոնատորի էֆեկտիվ գրգռման և դաշտի կառավարման առավել արդյունավետ եղանակ և քննարկված է, որտեղ ռեզոնատորային մոդերը ձևավորվում են ալիքատարային մոդի հետ կապակցման միջոցով՝ բարակ մետաղական շերտի օգնությամբ: Այս համակարգում, ալիքատարում անցման և անդրադարձման գործակիցների փոփոխությամբ, հստակ կարելի է արձանագրել ռեզոնատորի գրոման փաստը և հայտնաբերել ռեզոնանսային հաճախությունները:



Նկ.7. (a) Անցման (սև կոր) և անդրադարձման (կարմիր կոր) սպեկտրերը երբ InP կիսազլանային միկրոռեզոնատորը գրգռված է TE (վերին) և TM (ստորին) ալիքատարային մոդերով: Նույնը (b) TE(1,56) և (c) TM(1,55) մոդերի համար համապատասխան դաշտերի բաշվածություններով: Առաջին (d) և երկրորդ (e) մոդալ թվերը համապատասխանում են շնչացող մոդերի ռադիալ և ազիմուտալ մոդալ ինդեքսներին: Սլաքները տարված են FWHM մակարդակով:

Հատկանշական է, որ այս եղանակով գրոմված կիսազլանային ռեզոնատորի բարորակությունը նույն կարգի է ինչ հարթ ալիքով գրգռման դեպքում, երբ ալիքատարում տարածվում է TE մոդ, իսկ TM մոդի պարագայում բարորակությունը գրեթե երեք անգամ փոքր է: Այս հանգամանքը պայմանավորված է նրանով, որ TM մոդով գրգռման դեպքում ռեզոնատորի հիմքը կազմող մետաղական մակերևույթին առաջանում են $\Gamma\Gamma$ տարածվող մոդեր, որոնք ունեն մեծ կորուստներ, ինչի արդյունքում նվազում է ռեզոնատորի լրիվ բարորակությունը:

1.8 պարագրաֆում դիտարկված է միմյանց հետ կապված կիսազլանային երկու միկրոռեզոնատորների համակարգը, որտեղ ռեզոնատորների փոխազդեցության արդյունքում առաջանում են «պայծառ» ու «մութ» ռեժիմներ: Ռեզոնանսային ալիքի երկարությունը տրոհվում է երկու ռեզոնանսների, որոնցում որոշակի պայմանների բավարարման դեպքում համակարգը

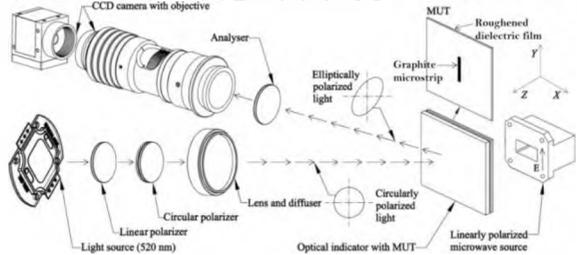
դրսևորում է մոտ 1.5 անգամ ավելի բարձր բարորակություն: Հետևաբար կապված ռեզոնատորներով համակարգը դրսևորում է ավելի բարձր զգայունություն և կարող է էֆեկտիվորեն կիրառվել սենսորիկայում:

Երկրորդ գլխում ուսումնասիրված է գրաֆիտային խառնուրդներով միկրոշերտերից կազմված համակարգերի վրա ընկնող միկրոալիքային ճառագայթման արձագանքի փուլային կառավարման հետազոտումը: Դիտարկված է մետակառուցվածք կազմող մետատոմների՝ զլանածև կամ շերտավոր երկրաչափությամբ տարրերի կառուցվածքային ռեզոնանսային երևույթի բացահայտումը: Քննարկված են ենթաալիքային տարրերով մետակառուցվածքներում լայնաշերտ և կառավարելի կլանման երևույթները:

2.1 պարագրաֆում ուսումնասիրված է գրաֆիտային խառնուրդներով միկրոշերտերից կազմված համակարգերի վրա ընկնող միկրոալիքային ճառագայթման արձագանքի փուլային կառավարման հնարավորությունը:

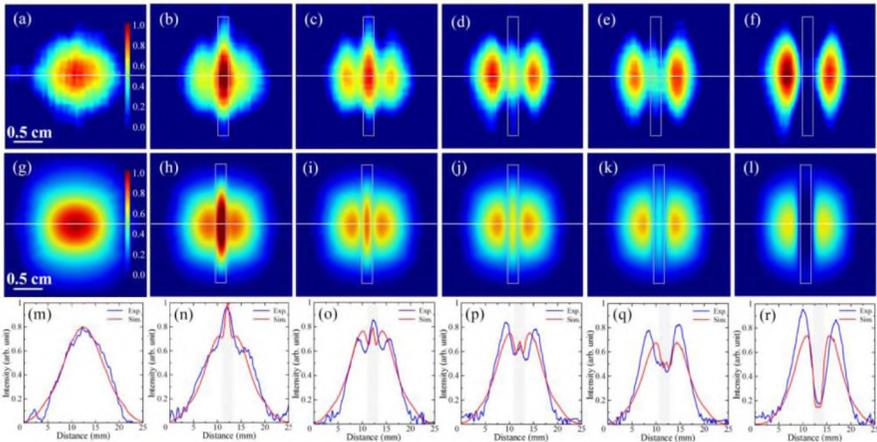
Փորձարարական և թվային մոդելավորման մեթոդներով ուսումնասիրվել է մետանյութի տարր հանդիսացող ածխածնային ցածր հաղորդականությամբ գրաֆիտային խառնուրդով միկրոժապավենի (սկին շերտից փոքր հաստությամբ) և գծային բևեռացված միկրոալիքային ճառագայթումների փոխազդեցության բնութագիրը: Նպատակն է որոշել դրանց մոտակայքում ձևավորվող էլեկտրամագնիսական դաշտի ամպլիտուդի և փուլի կառավարման հնարավորությունները: Սա թույլ կտա վերահսկել միկրոալիքային տիրույթում մետանյութը կազմող հաղորդիչ տարրերի միջև փուլային համապատասխանեցմամբ կապը, որոշելով մետանյութերի առավել բարենպաստ կառուցվածքները՝ օպտիմալ կլանումը, ֆոկուսավորումը և ճառագայթի ուղղորդումն, ապահովելու համար:

Մոտակա դաշտի վիզուալիզացիայի համար օգտագործվել է թերմոէլաստիկ օպտիկական ինդիկատորային մանրադիտակը, որի փորձարարական համակարգի սխեմատիկ պատկերը ներկայացված է Նկ.8-ում [13]:



Նկ.8 Միկրոալիքային դաշտերը տեսապատկերող փորձարարական համակարգի, փորձարկվող նմուշի՝ MUT-ի և միկրոալիքային աղբյուրի սխեմատիկ պատկերը:

Փորձարարական համակարգը բաղկացած է երկու հիմնական մասից՝ օպտիկական մաս, որտեղ չափվում է բևեռացման վիճակի փոփոխությունը, և միկրոալիքային մաս, որտեղ միկրոալիքներով լուսավորված օպտիկական ինդիկատորը հանդես է գալիս որպես ջերմության աղբյուր: Գծային բևեռացված միկրոալիքային ճառագայթը, որը ստացվել է ուղղանկյուն բաց ալիքատարից ընկնում է փորձանմուշի՝ գրաֆիտային խառնուրդով ժապավենի, վրա: Ստեղծված մոտակա դաշտի վիզուալ բաշխումը 11 ԳՀց հաճախականության համար փորձանմուշից 1 մմ հեռավորության վրա ցույց է տրված Նկար 9-ում: Այստեղ փորձարարական արդյունքները ներկայացված են Նկ.9 (a-f)-ում, սիմուլյացիոն արդյունքները Նկ.9 (g-l)-ում, և դրանց համեմատությունը՝ Նկ.9 (m-r)-ում:



Նկ. 9 (a) չափված և (g) սիմուլյացված գծային բևեռացված 11 ԳՀց հաճախությամբ միկրոալիքային դաշտի (այսինքն՝ առանց փորձանմուշի) բաշխումը: (b–f) չափված և (h–l) սիմուլյացված մոտակա դաշտերի բաշխումները գրաֆիտային միկրոժապավենի շուրջ փորձանմուշից 1 մմ հեռավորության վրա, տարբեր դիմադրությունների՝ (p) 3.0 ԿՕհմ, (q) 1.3 ԿՕհմ, (r) 1.0 ԿՕհմ, (b) 0.8 ԿՕհմ, (c) 0.6 ԿՕհմ և հաղորդունակությունների՝ (h) 10 Սիմ/մ, (i) 60 Սիմ/մ, (d) 80 Սիմ/մ, (k) 120 Սիմ/մ, (j) 250 Սիմ/մ դեպքերում: Մոխրագույն ուղղանկյունը ներկայացնում է գրաֆիտային միկրոժապավենի ուրվագիծը: (m–r) Չափված և սիմուլյացված մոտակա դաշտերի պատկերների լայնական հատույթի պրոֆիլների համեմատությունը ներկայացված է սպիտակ հոծ գծերի երկայնքով:

Գրաֆիտային միկրոշերտի հաղորդականության փոփոխության պատճառով նկատվում է մերձակա մագնիսական դաշտի բաշխվածության զգալի փոփոխություն: Թժվային հաշվարկի և համակարգչային մոդելավորման նմանատիպ արդյունքների հիման վրա ընդգծվել է արդյունավետ դիէլեկտրիկ թափանցելիության ($\varepsilon = \varepsilon_r + i\varepsilon_i$) իրական ε_r և կեղծ (ε_i) մասերի հարաբերակցության կարևորությունը: Երբ $\varepsilon_i \ll \varepsilon_r$, մոտակա դաշտը

հիմնականում տեղայնացված է միկրոշերտի կենտրոնում, իսկ ε_i -ի ($\varepsilon_i \rightarrow \varepsilon_r$) աճով մոտակա դաշտը կենտրոնանում է միկրոշերտի եզրերի մոտ: Դաշտի բաշխման փոփոխությունը հիմնականում պայմանավորված է ցրված միկրոալիքային դաշտի փուլի զգալի փոփոխությամբ, այսինքն՝ միկրոշերտի հաղորդականության փոփոխությամբ դրանից արձագանքի փուլի շեղումը կարող է վերահսկվել:

Ստացված արդյունքների համաձայն, մերձակա դաշտի տարածական բաշխումը մեծապես կախված է գրաֆիտային միկրոշերտի հաղորդականությունից և ընկնող միկրոալիքային ճառագայթման բևեռացումից:

2.2 պարագրաֆում քննարկված է լայնաշերտ և միևնույն ժամանակ արդյունավետ կլանիչ իրականացման հնարավորությունը: Առաջարկվող կառուցվածքի հիմնական առավելություններն են պարզությունը և հեշտ պատրաստումը, ցածր պրոֆիլը (չափերը շատ ավելի փոքր են աշխատանքային ալիքի երկարություններից), ինչպես նաև ազիմուտային հարթության մեջ ընկնող դաշտի անկյունից բնութագրերի անկախությունը: Մշակվել է տեսական մոդել երկարավուն գնդաձև կոնֆիգուրացիաների համար, կատարվել են նաև թվային հաշվարկներ: Տեսական մոդելը կառուցելիս հիմք է վերցվել երկարացված էլիպսոիդի բևեռացվածության համար արտահայտությունը, որից ստանվել են կլանման և ցրման էֆեկտիվ մակերեսները [14]՝

$$Q_{abs} = \frac{\sigma_{abs}}{S}, \text{ և } Q_{scat} = \frac{\sigma_{scat}}{S} \quad (3)$$

$$\text{որտեղ՝ } \sigma_{abs} = \frac{8\pi^2}{\lambda} \frac{a^3}{3 \ln \frac{2a}{2.7b}} \frac{\varepsilon_2 \eta_i}{(\varepsilon_2 + \eta_r)^2 + (\eta_i)^2} \quad (4)$$

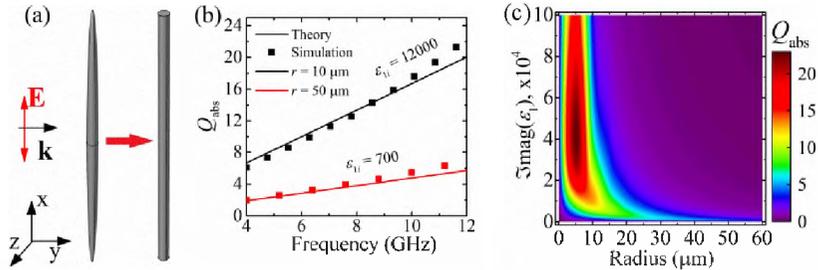
$$\sigma_{scat} = \frac{2^7 \pi^5}{3^4} \frac{a^6}{\lambda^4} \frac{1}{\left(\ln \frac{2a}{2.7b}\right)^2} \frac{(\eta_r)^2 + (\eta_i)^2}{(\varepsilon_2 + \eta_r)^2 + (\eta_i)^2} \quad (5)$$

Կլանման էֆեկտիվության մաքսիմումի պայմանից ստացվում է երկարացված էլիպսոիդի (սահմանային դեպքում այն կարելի է մոտարկել որպես երկար ձող ինչպես պատկերված է Նկ. 10 (a)-ում) դիէլեկտրիկ հաստատունի և երկարաչափական բնութագրերի միջև կապը, որն իրենից ներկայացնում է կառուցվածքային ռեզոնանսի պայամանի իրականացումը՝

$$\varepsilon_{1i} = \varepsilon_2 \frac{L^2}{4r^2} \frac{1}{\ln(L/r) - 1} \quad (6)$$

Այստեղ L -ը ձողի երկարությունն է, r -ը՝ շառավիղը, ϵ_v -ն ձողը կազմող նյութի դիէլեկտրիկ թափանցելիության կեղծ մասն է, ϵ_2 -ը՝ շրջակա միջավայրի դիէլեկտրիկ թափանցելիությունը:

Հաճախությունների միկրոալիքային տիրույթում իրականացվել են թվային սիմուլյացիաներ ձողերի համար և համեմատվել արդյունքները տեսական մոդելով հաշվարկված կլանման էֆեկտիվությունների հետ: Նկատվել է բավական մեծ համընկնում, ինչը վկայում է թե՛ տեսական մոդելի ճիշտ կառուցման և թե՛ թվային հաշվարկների հուսալիության մասին (տե՛ս Նկ. 10 (b)):



Նկ. 10 (a) Երկարացված էլիպսոիդի (տեսություն) և համարժեք ձողի (սիմուլյացիա) սխեմատիկ պատկերը, (b) Տեսական (գիծ) և սիմուլյացված (սիմվոլներ) կլաման էֆեկտիվության սպեկտրերը $\epsilon_{v_i} = 12000$ (սև կոր) դիէլեկտրիկ թափանցելիության կեղծ մասով, $r = 10$ մկմ ձողի շառավղով և $\epsilon_{v_i} = 700$ (կարմիր կոր) $r = 50$ մկմ շառավղով ձողի համար: Երկու դեպքում էլ ձողի երկարությունը՝ $L = 5$ մմ իսկ դիէլեկտրիկ թափանցելիության իրական մասը՝ $\epsilon_{r_i} = 10$: (c) Կլանման էֆեկտիվության 2D կախվածության գրաֆիկը ձողի շառավղից և նյութի դիէլեկտրիկ թափանցելիության կեղծ մասից:

Թվային և տեսական վերլուծությունները ցույց են տալիս, որ տրված կառուցվածքի կլանման արդյունավետությունը գծայնորեն աճում է հաճախությունից՝ հասնելով համապատասխանաբար մոտ 22-ի և 7-ի՝ $r = 10$ մկմ և $r = 50$ մկմ շառավղով ձողերի դեպքում: Նշենք, որ ձողերի երկրաչափական հատույթի մակերեսը հաշվարկվել է, որպես՝ $S = 2rL$:

Հատկանշական է, որ ձողի շառավղի $r = 10$ մկմ արժեքի դեպքում կլանման էֆեկտիվության համար $Q_{\text{abs}} \geq 10$ պայմանը իրականացվում է ϵ_{v_i} -ի բավական լայն տիրույթում 5×10^3 -ից 2.6×10^4 : Հարկ է նշել, որ նման դիէլեկտրիկ թափանցելիությամբ նյութեր կարելի է ստանալ տարբեր կոնցենտրացիայով գրաֆիտային խառնուրդների միջոցով:

Համակարգի բնութագրերը քիչ են փոփոխվում հաճախությունների բավական լայն տիրույթում (տե՛ս Նկ 11 (a)), սակայն կլանման արժեքները բավական փոքր են: Կլանման էֆեկտիվության մեծացում, միևնույն ժամանակ անդրադարձումների փոքր մակարդակը պահպանելով, կարելի է ստանալ բազմաշերտ համակարգի միջոցով:

8-12 ԳՀց հաճախությունների տիրույթում 80%-ից բարձր կլանում կարելի է ապահովել $N=8$ շերտերի պարագայում: Ավելի ցածր հաճախություններում կլանման նման մակարդակ ապահովելու համար անհրաժեշտ է շերտերի ավելի մեծ թիվ, օրինակ՝ 4 ԳՀց-ում անհրաժեշտ է $N=18$ շերտ:

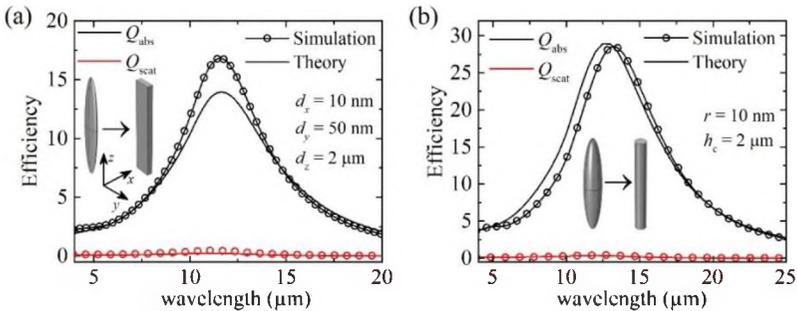
Այսպիսով, ենթաալիքային չափերի հաղորդիչ ձողերի միջոցով, որոնք դասավորված են ընկնող դաշտի բևեռացմանը զուգահեռ, հնարավոր է իրականացնել լայնաշերտ և արդյունավետ կլանում հաճախությունների միկրոալիքային՝ 4-12 ԳՀց տիրույթում: Այսպիսի համակարգի կլանումը կարելի է մեծացնել ճիշտ ընտրելով համակարգի նյութական և երկրաչափական բնութագրերի փոխհարաբերակցությունը՝ ապահովելով այսպես կոչված կառուցվածքային ռեզոնանսի պայմանը:

2.3 պարագրաֆում դիտարկված է լայնաշերտ էֆեկտիվ կլանման ստացումը միջին ինֆրակարմիր տիրույթում՝ կիրառելով ենթաալիքային չափի հաղորդիչ ձողերից կամ ժապավեններից բաղկացած մետամակերևույթ:

Նախորդ պարագրաֆում դիտարկված տեսական մոդելի զարգացման արդյունքում ստացվել են պայմաններ տափակեցված (սահմանային դեպքում մոտարկվում է որպես ժապավեն) էլիպսոիդական երկրաչափությանը համակարգերի համար կառուցվածքային ռեզոնանսի ապիովման համար [15]՝

$$\frac{a_x a_y}{a_z^2} \cdot \ln \frac{1.5 a_z}{a_y} = \frac{|\varepsilon_{1T} \varepsilon_2}{|\varepsilon_1|^2} \quad (7)$$

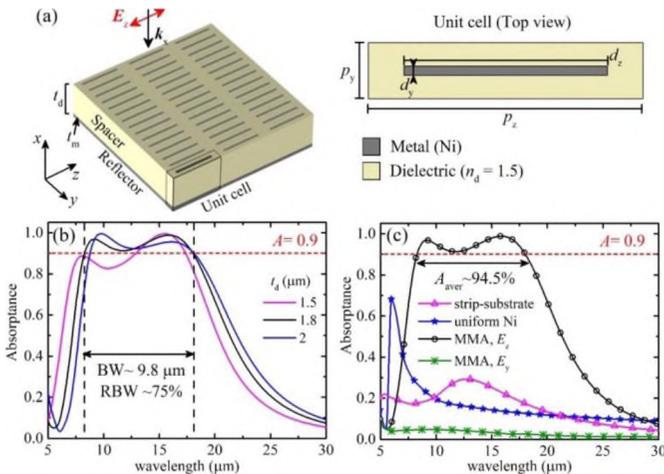
Այստեղ a_x և a_y մեծությունները բնութագրում են էլիպսոիդի լայնական չափերը, իսկ a_z -ը՝ երկայնականը, ε_1 -ը էլիպսոիդը կազմող նյութի կոպլեքս հիլեկտրիկ թափանցելիությունն է, ε_2 -ը՝ շրջակա միջավայրի:



Նկ. 11. Կլանման (սև) և ցրման (կարմիր) էֆեկտիվությունների սպեկտրերը տեսականորեն հաշվված (զծեր) և սիմուլյացիաներով ստացված (սիմվոլներ) Ni (a) տափակեցված էլիպսոիդի և ուղանկուն ժապավենի $d_x = 10$ նմ, $d_y = 50$ նմ չափերով և (b) երկարացված սֆերոիդի և $r = 10$ նմ շառավղով նանուլարի դեպքում: Շրջակա միջավայրը օդ է՝ $\varepsilon_2 = 1$.

$a_x = 5$ մմ, $a_y = 25$ մմ, $a_z = 1$ մմ չափերով տափակեցված էլիպտական մասնիկի Q_{abs} կլանման էֆեկտիվության ռեզոնանսը դիտվում է 11.6 մկմ ալիքի երկարության շուրջ և հասնում է 14-ի (սիմուլացված արդյունքը նույն չափերով ժապավենի համար՝ $Q_{abs} \sim 17$), մինչդեռ Q_{scat} ցրման էֆեկտիվությունը մոտ 0.44 է: Մեր հետազոտություններում մետաղի ընտրությունը՝ Ni, պայմանավորված է նրանով, որ նրա դիէլեկտրիկ թափանցելիության (Ni $\epsilon_{Ni} = -1573.3 + 820.42i$ 11.56 մկմ ալիքի երկարության վրա [16]) իրական և կեղծ մասերը հետազոտվող տիրույթում նույն կարգի են, ինչը հնարավորություն է տալիս ապահովել կառուցվածքային ռեզոնանսի պայմանը:

Թվային հաշվարկները լավ համընկնում են տեսական արդյունքների հետ նաև երկարացված էլիպտոիդի համար: Կլանման մաքսիմումը նիկելից պատրաստված երկարացված էլիպտոիդի տեսքով մասնիկի համար դիտվում է 13.5 մկմ ալիքի երկարության մոտ $Q_{abs} \sim 29$ և $Q_{scat} \sim 0.4$ արժեքներով:

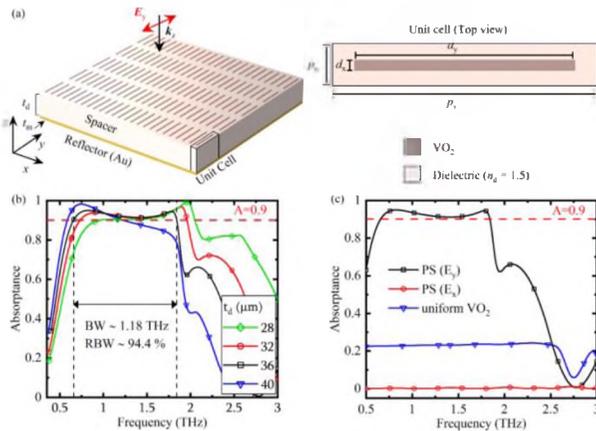


Նկ. 12. (a) Ni անդրադարձիչից, $nd = 1.5$ բեկման ցուցիչով դիէլեկտրիկ միջադիրից և Ni ուղղանկյուն ժապավեններից կազմված պարբերական կառուցվածքի եռաչափ սխեմատիկ պատկերը՝ որպես մետալերևույթի միավոր տարր: t_m -ը և t_d -ն համապատասխանաբար անդրադարձիչի և միջադիրի հաստություններն են: (b) Կլանման սպեկտրը՝ դիէլեկտրիկ միջադիրի հաստության տարբեր արժեքների դեպքում: (c) Դիէլեկտրիկ հիմքից և միայն Ni ժապավեններից կազմված պարբերական կառուցվածքի կլանման սպեկտրների համեմատություն (մանուշակագույն եռանկյունի), Ni-դիէլեկտրիկ-Ni հարթ կառուցվածքի (կապույտ աստղ) և առաջարկվող մետամալերևույթի կլանումը z- և y-բևեռացված հարթ ալիքների ազդեցությամբ (համապատասխանաբար՝ սև օղակ և կանաչ աստղանիշ): Երկրաչափական պարամետրերն են՝ $td = 1.8$ մկմ, $py = 400$ մմ, $pz = 2.7$ մկմ, $dx = 10$ մմ, $dy = 50$ մմ և $dz = 2$ մկմ:

Դիէլեկտրիկ հիմքից և միայն Ni ժապավեններից կազմված պարբերական կառուցվածքի, Ni-դիէլեկտրիկ-Ni հարթ կառուցվածքի կլանման սպեկտրների

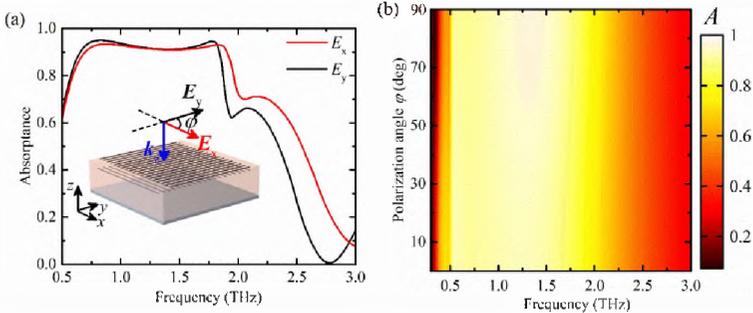
համեմատությունը և առաջրկվող պարբերականորեն դասավորված Ni ժապավենների դիէլեկտրիկ շերտի և Ni հարթ անդրադարձնող տակդիրի կլանման հատկությունները ներկայացված են Նկ.12 (c)-ում: Կլանման առավելագույն արժեքը դիէլեկտրիկ հիմքից և միայն Ni ժապավեններից կազմված համակարգում ընդամենը 0.3-ի կարգի է: Ni-դիէլեկտրիկ-Ni հարթ կառուցվածքի կլանման սպեկտրը ունի խիստ արտահայտված ռեզոնանսային մաքսիմում՝ հասնելով $A \sim 0.7$ -ի մոտ 6.6 մկմ ալիքի երկարության վրա: Այդպիսի ռեզոնանսային վարքը պայմանավորված է համակարգում Ֆաբրի-Պերո ռեզոնանսային մոդի առկայությամբ: Առաջարկվող մետամակերևույթի կլանման սպեկտրը խիստ կախված է ընկնող դաշտի բևեռացվածությունից, ինչը նկատելի է E_x և E_y բևեռացված ալիքի խիստ տարբեր արձագանքներից (տե՛ս Նկ.12 (c)): Այն հնարավոր է լուծել երկու փոխադրահայց շերտերի համադրման միջոցով:

2.4 պարագրաֆում քննարկված է SՀց տիրույթում լայնաշերտ և կառավարելի կլանման ստացումը վանադիում երկօքսիդից ժապավեններից կազմված մետակառուցվածքի միջոցով: Այստեղ տեսական հաշվարկները իրականացված են նախորդ պարագրաֆներում կառուցված տեսական մոդելի շրջանակներում:



Նկ. 13. (a) Պարբերական մետակառուցվածքի եռաշափ սխեմատիկ պատկերը, որը կազմված է Au անդրադարձիչից, $nd = 1.5$ դիէլեկտրիկ միջադիրից և VO₂ ուղղանկյուն ժապավեններից, t_m -ը և td -ն համապատասխանաբար անդրադարձիչի և միջադիրի հաստություններն են: (b) Կլանման սպեկտրը դիէլեկտրիկ միջադիրի տարբեր հաստությունների դեպքում: Երկրաչափական պարամետրերը հետևյալն են՝ $td = 36$ մկմ, $t_m = 3$ մկմ, $px = 6$ մկմ, $py = 114$ մկմ, $dz = 200$ նմ, $dx = 1$ մկմ և $dy = 94$ մկմ: (c) Պարբերական կառուցվածքի (PS) կլանման սպեկտրերը x - և y -բևեռացված հարթ ալիքների (համապատասխանաբար կարմիր օղակներով և սև քառակուսիներով գծեր) և հարթ կառուցվածքի համար, որտեղ ժապավենները փոխարինված են համասեռ VO₂ մակերևույթով:

Ինչպես նկատում ենք նկ.13 (b)-ից գոյություն ունի դիէլեկտրիկ միջադիրի օպտիմալ հաստություն, որի դեպքում իրականանում է առավել լայնաշերտ և էֆեկտիվ կլանում: Միևնույն ժամանակ ակնհայտ է, որ էֆեկտիվ կլանումը չի պայմանավորված միայն VO_2 նյութի կլանման հատկությամբ, քանի որ համասեռ VO_2 մակերևույթով համակարգը ցուցաբերում է կլանման թույլ հատկություն, սա նշանակում է, որ էֆեկտիվ կլանումը կառուցվածքային ռեզոնանսի արդյունք է: Ինչպես և նախորդ դեպքում նկ.13 (a)-ում պատկերված կառուցվածքը ունի կլանման խիստ կախում ընկնող դաշտի բևեռացումից: Այս խնդիրը լուծելու համար կարելի է օգտագործել երկշերտ համակարգ, որի սխեմատիկ պատկերը ներկայացված է Նկ.14 (a)-ում:



Նկ.14 (a) Երկու փոխուղահայած շերտերից կազմված մետակառուցվածքում կլանման սպեկտրը, (b) Կլանման էֆեկտիվության երկչափ գրաֆիկը՝ կախված հաճախությունից և ընկնող դաշտի բևեռացման անկյունից:

Ինչպես և ակնկալվում էր այսպիսի համակարգի կլանման էֆեկտիվությունը այլևս կախված չէ ընկնող ալիքի բևեռացվածությունից (տե՛ս Նկ.14 (b))

Ուղղանկյուն ժապավենների նյութի՝ VO_2 -ի ընտրությունը պայմանավորված է նրանով, որ այդ տիրույթում հնարավոր է ջերմային ազդեցությամբ փոփոխել VO_2 -ի հաղորդականությունը՝ հնարավորություն ստեղծելով կառավարելի կլանում իրականացնել:

Այսպիսով ցույց տրվեց, որ ստորին անդրադարձնող ոսկե հարթությունից դիէլեկտրիկ շերտով առանձնացված VO_2 ժապավեններով մետակառուցվածքը ապահովում է 90%-ից ավելի կլանում 0.66 S<g>-ից մինչև 1.84 S<g> լայն հաճախականության տիրույթում՝ մոտ 1.18 S<g> շերտով:

Երրորդ գլխում ներկայացված են մագնիսադիէլեկտրիկ նյութերի կիրառմամբ և ռեզոնատորների հետ կապակցված էլեկտրականապես փոքր չափերի արդյունավետ և լայնաշերտ անտենաների ստացման եղանակները:

3.1 պարագրաֆում անդրադարձ է կատարվում էլեկտրականապես փոքր անտենաների նախագծման մեթոդներին և տեսակներին: Բերվում է համեմատական վերլուծություն առկա մեթոդների վերաբերյալ՝ շեշտելով

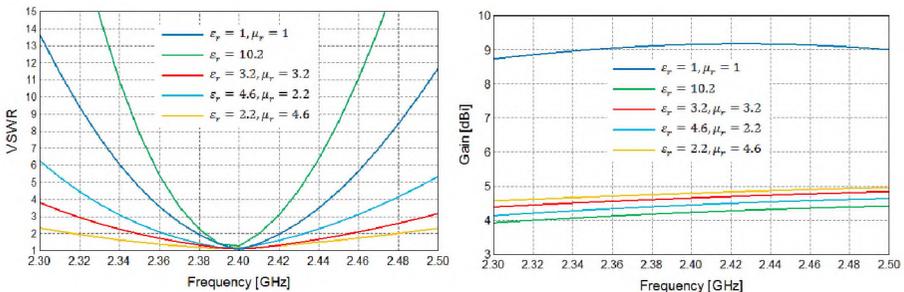
յուրաքանչյուր մեթոդի առավելություններն ու թերությունները: Նշվում է հետազոտվող մեթոդի հիմնական առաձնահատկությունները:

Մագնիսադիէլեկտրիկ նյութերի ($\epsilon_r > 1$, $\mu_r > 1$) հիման վրա անտենայի չափափոքացումը պայմանավորված է միջավայրում ալիքի տարածման արագության, հետևաբար ալիքի երկարության փոքրացմամբ:

3.2 պարագրաֆում քննարկվում է միկրոշերտավոր անտենայի էֆեկտիվության և հաճախային շերտի կախվածությունները դրա կառուցվածքից և կիրառվող նյութերից:

Տույց է տրվել, որ միկրոշերտավոր անտենայի մակերեսը գրեթե նույնն է ինչպես բարձր դիէլեկտրիկական թափանցելիությամբ դիէլեկտրիկ տակդիրով, այնպես էլ $\epsilon_r \mu_r = \epsilon_p = 10.2$ բնութագրերով մագնիսադիէլեկտրիկ կիրառման դեպքերում և 7.12 անգամ ավելի փոքր է առանց տակդիրի միկրոշերտավոր անտենայից: Բարձր դիէլեկտրիկական թափանցելիությամբ դիէլեկտրիկ կիրառմամբ անտենայի հաճախային տիրույթը փոքրանում է, ինչը պայմանավորված է անտենայի մակերևույթի մոտ դաշտի կուտակմամբ: Դիտարկված դիէլեկտրիկական թափանցելիության դեպքում $\epsilon_p = 10.2$, անտենայի բացարձակ հաճախային շերտը 1,12 % է: Մագնիսադիէլեկտրիկ կիրառմամբ անտենայի հաճախային տիրույթը աճում է, ընդ որում այն առավելագույնն է $\epsilon_r < \mu_r$ բնութագրերով տակդիրի դեպքում: Նկ. 15-ում բերվում են տարբեր բնութագրերով տակդիրների դեպքում միկրոշերտավոր անտենայի կանգուն ալիքի գործակցի (ԿԱԳ) և ուժեղացման գործակցի (ՈւԳ) հաճախային կախվածությունները:

Անտենայի հաճախային շերտի աճը բացատրվում է մակերևութային հոսանքների բաշխվածության միջոցով: Մագնիսադիէլեկտրիկ տակդիրի դեպքում անտենայում կուտակված էներգիան նվազում է մագնիսական թափանցելիության մեծացմանը զուգընթաց:



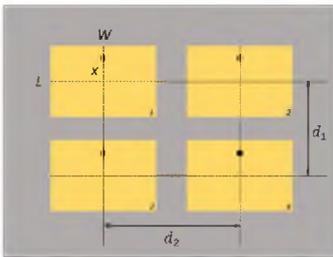
Նկ. 15: Միկրոշերտավոր անտենայի ԿԱԳ-ի և ՈւԳ-ի հաճախային կախվածությունները տարբեր տակդիրների դեպքում

Աղյուսակ 1-ում ամփոփ ներկայացված է տարբերի տակդիրների հիման վրա միկրոշերտավոր անտենաների մակերեսները և հաճախային շերտերը:

Աղյուսակ 1: Միկրոշերտավոր անտենայի մակերեսը և հաճախային շերտը տարբեր տակդիրների դեպքում

Տակդիրի (ϵ_r) թափանցելիություն	Տակդիրի (μ_r) թափանցելիություն	Անտենայի մակերեսը (մմ ²)	Անտենայի հաճախային շերտը ($\delta, \%$)
1	1	8143,5	1,66
3.58	1	3808,09	2,6
10,2	1	1964,58	1,12
3.2	3.2	1964,58	4,41
4.6	2.2	1964,58	2,91
2.2	4.6	1964,58	6,37

3.3 պարագրաֆում



Նկ.16 2x2 միկրոշերտավոր փուլավորված անտենային ցանցի կառուցվածքը:

ներկայացվում է անտենային ցանցում մագնիսադիէլեկտրիկ նյութերի օգտագործման հատկությունները: Նախագծվել է 2x2 չափի հարթ փուլավորված անտենային ցանց (նկ. 16) և հաշվարկվել է անտենային ցանցում էլեմենտների միջև փոփազդեցությունը՝ հիմնվելով անտենային ցանցում մակերևույթային հոսանքների բաշխվածության վրա: Դուրս է բերվել նյութի բնութագրերի ազդեցությունը անտենային ցանցի հաճախային շերտի և էլեմենտների միջև մեկուսացման վրա:

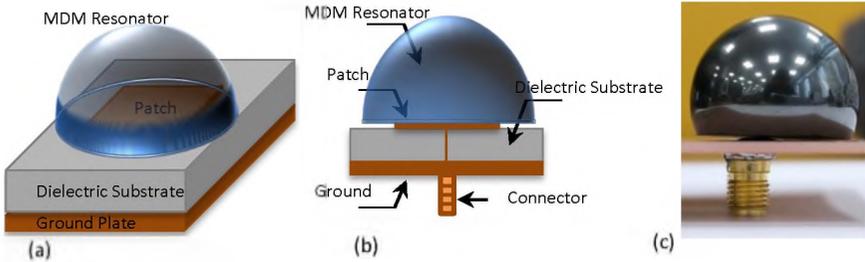
բաղադրիչ պարունակող տակդիրի դեպքում ($BW=7$ $U<g$): Տակդիրի դիէլեկտրիկական թափանցելիությունը մեծացնելիս անտենային ցանցի հաճախային շերտը նվազում է: Դրա արժեքը մեծանում է մագնիսադիէլեկտրիկական նյութի կիրառման դեպքում: Մեր դիտարկած օրինակում, որտեղ $\mu_r, \epsilon_r = 25$ և $\mu_r/\epsilon_r = 6,25$, հաճախային շերտը $BW = 96$ $U<g$ է: Միննույն ժամանակ պարզվում է, որ տարրերի միջև կապի գործակիցը նվազում է մեծ մագնիսական թափանցելիությամբ մագնիսադիէլեկտրիկ տակդիրի կիրառմամբ: Այս հանգամանքը թույլ է տալիս նախագծել ավելի կոմպակտ անտենային ցանցեր՝ տարրերի փոխադարձ ազդեցությունների նվազեցումով:

Հաճախային շերտը նվազագույնն է բարձր թափանցելիությամբ և առանց մագնիսական

3.4 պարագրաֆում

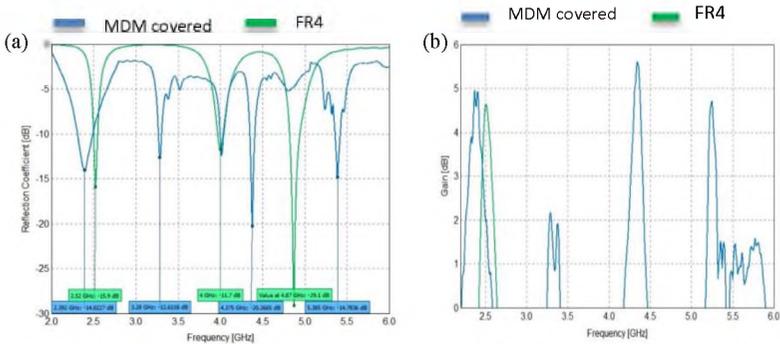
ներկայացվում է էլեկտրականապես փոքր անտենաների ուժեղացման գործակցի բարելավման խնդիրը: Իրենց փոքր չափերի պատճառով նախագծված անտենաների ուժեղացման գործակիցը փոքր է և չափերի փոքրացման հետ դրանց ճառագայթման հատկությունները նմանվում են էլեկտրական կամ մագնիսական դիպոլի: Այդ սահմանափակումը կարելի է հաղթահարել ներգրավելով լրացուցիչ հանգույց՝ ռեզոնատոր, որը

կապահովի համաձայնեցում և էֆեկտիվ ճառագայթում նախագծվածից փոքր հաճախությունների համար: Տեղադրելով մագնիսադիէլեկտրիկ ռեզոնատորը միկրոշերտավոր անտենայի վրա (Նկ. 17), անտենան ցածր հաճախային տիրույթում հեշտությամբ համաձայնեցվում է ազատ տարածության և սնուցման նկատմամբ [17]:



Նկ. 17 Մագնիսադիէլեկտրիկ ռեզոնատորով միկրոշերտավոր անտենային սխեմատիկ պատկերը (a) տեսք վերևից, (b) տեսք կողքից, և (c) պարտաստված փորձանմուշի նկարը:

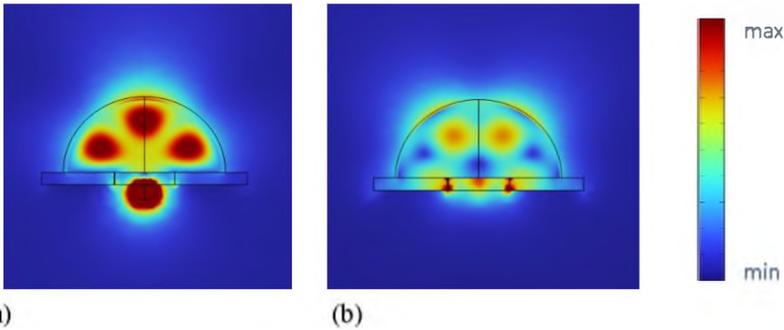
Տեղադրելով $r=10$ մմ շառավղով նեոդիմիումային կիսագնդային մագնիսադիէլեկտրիկ ռեզոնատոր դիտարկվում է առաջին հարմոնիկ հաճախության նվազում մինչև 2.39 ԳՀց, ինչպես նաև լայն 190 ՄՀց թողունակություն (2.3-2.49 ԳՀց), որտեղ անդրադարձման S_{11} գործակիցը փոքր է մնում -10 դԲ-ից: Մոդելավորման ընթացքում կիսագնդի կենտրոնի և անտենայի երկրաչափական կենտրոնի միջև հեռավորության օպտիմալ արժեքը որոշվել է որպես $x=4$ մմ՝ հիմնվելով կիսագնդում գրգռված դաշտերի վերլուծության վրա: Անտենայի հարաբերական թողունակությունը $\delta=7.91\%$ է: Անտենան ցուցադրում է բազմազոտի աշխատանք՝ 3.28, 4.37 և 5.38 ԳՀց և ավելի բարձր հաճախություններում, ինչպես ցույց է տրված գրաֆիկում (տե՛ս Նկ. 18 (a)): Նկ. 18 (b)-ում ցույց է տրված կիսագնդային մագնիսադիէլեկտրիկ ռեզոնատորով ծածկված անտենայի ուժեղացման գործակցի սպեկտրալ կախվածությունը:



Նկ. 18 (a) Մագնիսադիէլեկտրիկ ռեզոնատորով ծածկված (կապույտ կոր) և FR4 դիէլեկտրիկ հիմքով (կանաչ կոր) միկրոշերտավոր անտենայի անդրադարձման գործակցի կախումը հաճախությունից, և (b) ուժեղացման գործակիցների սպեկտրալ տեսքերը:

2.44 ԳՀց հաճախությամբ անտենայի ուժեղացումը կազմում է 4.83 դԲ: Համեմատական վերլուծություն է իրականացվել FR4 ($\epsilon_r = 4.6$; $\text{tg}\delta = 0.017$) տակդիրի վրա և 2.4 ԳՀց հաճախության համար նախագծված էլեկտրականապես փոքր միկրոշերտավոր անտենաների միջև: Անտենայի չափսերն են՝ $w = 36$ մմ, $L = 21$ մմ, $x = 1$ մմ, $W_s = 56.5$ մմ, $L_s = 48$ մմ: FR4 տակդիրով անտենայի թողունակությունը 55 ՄՀց է (2.5-2.55 ԳՀց), որտեղ $S_{11} < -10$ դԲ, առաջին ռեզոնանսային հաճախականությունը 2.52 ԳՀց է, որտեղ $S_{11} = -15.9$ դԲ, իսկ ուժեղացումը $G = 4.2$ դԲ (Նկ. 18 (a) և (b)): Այն ունի ռեզոնանսներ ավելի բարձր հաճախություններում, որտեղ ուժեղացումը շատ ցածր է:

Անդրադարձման գործակցի և անտենայի ուժեղացման սպեկտրներում դիտարկվող բազմակի ռեզոնանսային գագաթները հիմնականում պայմանավորված են մագնիսադիէլեկտրիկ կիսագնդային ռեզոնատորում տարբեր մոդալ ինդեքսներով շնչացող մոդերի գրգռմամբ (տե՛ս Նկ.19), որոնք տեղի են ունենում ինչպես ցածր, այնպես էլ բարձր հաճախականություններում:



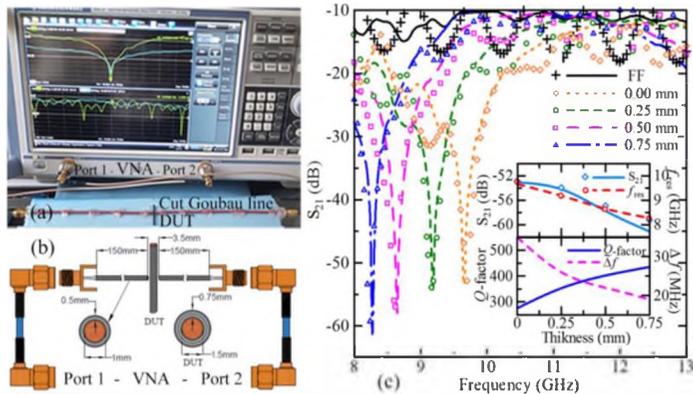
Նկ.19 մագնիսադիէլեկտրիկ ռեզոնատորով անտենայի մոտակա դաշտորի բաշխումները (a) E և (b) H բաղադրիչների համար ռեզոնանսային 2.4 ԳՀց հաճախության համար, կիսագնդի շառավիղը՝ $r=10$ մ:

Մագնիսադիէլեկտրիկ ռեզոնատորի բարորակության ճառագայթային բաղադրիչի պատճառով, կուտակված էներգիայի մի մասը ճառագայթվում է այդ ռեզոնանսային մոդերին համապատասխանող հաճախություններում՝ արդյունքում ապահովելով անտենայի ճառագայթում նրան ոչ բնորոշ հաճախություններում:

Այսպիսով առաջարկվող ճարտարապետությունը զգալի բարելավումներ է ապահովում, այդ թվում՝ անտենայի մակերեսի 4.3 անգամ փոքրացում, ավելի բարձր ուժեղացում և ավելի լայն թողունակություն (3.4 անգամ ավելի լայն՝ FR4-ի վրա հիմնված անտենայի համեմատ): Արդյունքում, այս էլեկտրականորեն փոքր անտենան ցուցադրում է բացառիկ աշխատանք՝ գրեթե կատարյալ իմպեդանսային համաձայնեցում ($S_{11} = -14$ դԲ 2.4 ԳՀց հաճախության վրա), բազմաշերտ աշխատանքով, լայն թողունակությամբ և բարձր ուժեղացմամբ:

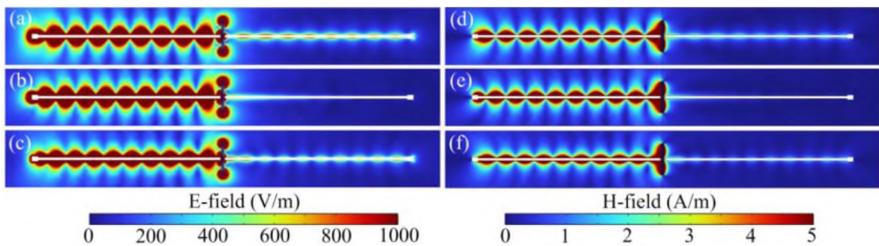
Չորրորդ գլխում լուսաբանված են ԳԲՀ և SՀց տիրույթում փոքր օհմական կորուստներով, տվյալների հաղորդման մեծ արագություններ ապահովող և լայնաշերտ ռեզոնանսային արձագանքով համակարգերի մշակման եղանակները, որոնք հիմնված են ենթաալիքային չափերի հաղորդիչ գծերում մակերևութային Չոմերֆելդյան ալիքների գրգռման և տարածման սկզբունքի վրա: Բացահայտված է երկշերտ մետամակերևութներում անոմալ խիստ դիսպերսիոն անցման երևույթը, իսկ որպես գործնական կիրառություն դիտարկված է օպտիկական և SՀց տիրույթներում լայնաշերտ և կարգավորվող փակոցային գոտիների իրականացումը երկշերտ մետամակերևութների միջոցով:

4.1 պարագրաֆում ներկայացվում է ենթաալիքային չափերի հաղորդիչ գծերում մակերևութային Չոմերֆելդյան ալիքների գրգռման մեխանիզմների ուսումնասիրումը և պարզաբանվում է հնարավոր կիրառությունների ոլորտը:



Նկ.20 (a) VNA փորձարարական համակարգի և կտրված Գուբայի գծի հետ ինտեգրված փորձանմուշ՝ դիելեկտրիկապատ պղնձե ձողի լուսանկարը և (b) սխեմատիկ պատկերները: (c) պղնձե ձողի (1.5 մմ տրամագծով և 25 մմ երկարությամբ) միկրոալիքային փոխանցման S_{21} գործակցի պրոֆիլները՝ շրջակա դիելեկտրիկ միջավայրի տարբեր հաստություններով՝ 0-0.75 մմ: Սև գիծը նշանակում է համակարգ առանց Cu ձողի, այսինքն՝ միայն կտրված Գուբաուի գիծ (FF): Վերին ներդիրը ցույց է տալիս S_{21} մինիմումների և ռեզոնանսային հաճախության կախվածությունը դիելեկտրիկ շերտի հաստությունից: Սիմուլյացիոն տվյալները պատկերված են սիմվոլներով, մինչդեռ փորձարարական տվյալները ներկայացված են հոծ գծերով: Ստորին ներդիրը ցույց է տալիս համակարգի Q բարորակության և թողունակության կախվածությունը դիելեկտրիկ թաղանթի հաստությունից:

Ինչպես երևում է Նկ.20-ից անցման մատրիցում նկարվում են սուր ռեզոնանսային անկումներ պայմանավորված դիելեկտրիկ թաղանթով պղնձե ձողի խիստ ռեզոնանսային վարքով:

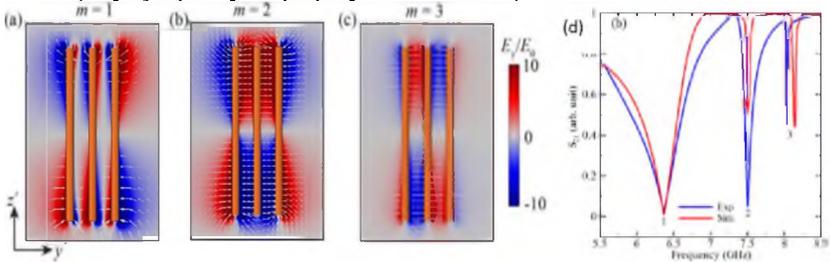


Նկ. 21 (a-c) 25 մմ երկարությամբ և 0.5 մմ հաստությամբ դիելեկտրիկ շերտով ծածկված պղնձե ձողի էլեկտրական և (d-f) մագնիսական դաշտի բաշխումները (a,d) 8.1 ԳՀց, (b,e) 8.6 ԳՀց և (c,f) 9.1 ԳՀց հաճախություններում:

Սիմուլյացիոն արդյունքները ևս ցույց են տալիս համակարգի խիստ հաճախաընտրողունակ անցման հատկություն, ինչը ևս մեկ անգամ

հիմանվորում է այս համակարգի որպես զտիչ աշխատելու ունակությունը: Իսկ ռեզոնանսային հաճախության խիստ կախվածությունը դիէլեկտրիկ թաղանթի հաստությունից հաստատում է զգայուն սենսոր կառուցելու պոտենցիալը:

4.2 պարագրաֆում դիտարկվում է արտաքին ԳԲՀ դաշտում տեղադրված պարբերականորեն դասավորված մի քանի ձողերի արձագանքը: Ցույց է տրվել, որ կախված ձողերի քանակից հնրավոր են առաջանալ նույն քանակի ռեզոնանսային արձագանքներ՝ ձևավորելով ձողերում լիցքերի ինչպես համափուլ այնպես էլ հակափուլ տատանումներ:



Նկ. 22 Գունային քարտեզներ և ուժագծերի ուղղությունները, որոնք ցույց են տալիս էլեկտրական դաշտի E_y բաղադրիչների բաշխումը երեք ձողերից կազմված համակարգի համար, որը համապատասխանում է (a) առաջին և (b) երկրորդ և երրորդ կարգի ռեզոնանսային ռեժիմներին, համապատասխանաբար 6.37 ԳՀց, 7.50 ԳՀց և 8.03 ԳՀց հաճախություններում: (d) Անցման S_{21} գործակցի փորձարարական և սիմուլյացիոն արդյունքների համեմատությունը: Երկրաչափական պարամետրերն են՝ պղնձե ձողի երկարություն՝ $l=17$ մմ, տրամագիծ՝ $D=1$ մմ:

Արդյունքում ստացվում է, որ համակարգը, որը բաղկացած է ենթաալիքաչափային երկարությամբ հաղորդիչ ձողերի վերջավոր շարքից գործում է որպես բաց ռեզոնատոր ԳԲՀ տիրույթում: Ռեզոնանսային ռեժիմների քանակը համապատասխանում է շարքում ձողերի քանակին: Այս ռեժիմները առաջանում են ձողերի ներսում կոհերենտ լիցքի տատանումներից, որոնք ցուցաբերում են տարբեր ամպլիտուդներ և փուլեր, և բնութագրվում են ալիքային դաշտի նշանակալի տեղայնացմամբ: Ճառագայթային կորուստները զգալիորեն նվազում են, երբ հարակից ձողերը տատանվում են հակադիր փուլերով՝ համակարգի Q բարորակությունը հասցնելով 400-ի: Նման պայմաններում ալիքային դաշտի տեղայնացման ծավալը մոտ երկու կարգի մեծությամբ փոքր է ռեզոնանսային ալիքի երկարության խորանարդից, որին ուղեկցում է էլեկտրական դաշտի ինտենսիվության 30 անգամյա աճը: Այս արդյունքները ընդգծում են նման համակարգերի ներուժը դաշտի բարձր տեղայնացում և ուժեղ ռեզոնանսային բնութագրեր պահանջող կիրառությունների համար:

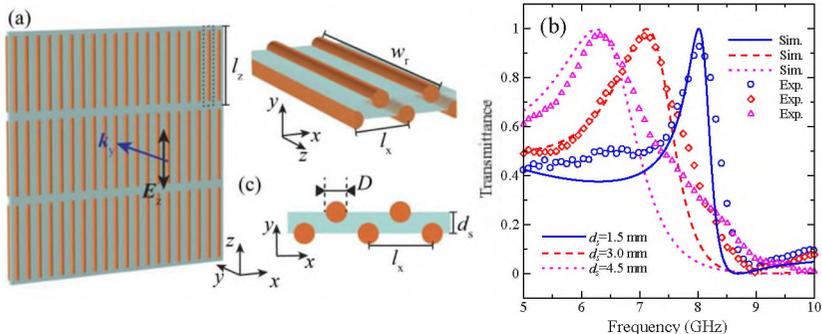
4.3 պարագրաֆը նվիրված է ենթաալիքային չափերի հաղորդիչ ձողերի վրա հիմնված գերբարակ երկշերտ մետամակերևույթում դաշտի խիստ դիսպերսիոն անցման պայմանների լուսաբանմանը հաճախությունների գիգահերցային տիրույթում:

Անոմալ դիսպերսիոն անցումը նկարագրելու համար մշակվել է տեսական մոդել՝ հիմնված կապված օսցիլյատորների հավասարումների վրա և ցույց է տրվել երկշերտ համակարգում անոմալ դիսպերսիոն անցման հնարավորությունը: Տեսական հաշվարկները հաստատվել են թե՛ սիմուլյացիոն մոդելի և թե՛ փորձարարական հետազոտությունների միջոցով: Անցման գործակցի համար տեսականորեն ստացված արտահայտությունն ունի հետևյալ տեսքը [18]՝

$$T = \frac{\Omega^2 + \gamma^2}{(\Omega - \chi\gamma)^2 + \left| \frac{j\omega_0}{\sqrt{\varepsilon_0}} \chi(\Omega + \delta) + \gamma \right|^2}, \quad (8)$$

որտեղ $\Omega = \omega - \omega_0 - 2|\beta|$, $\chi = \frac{\omega\alpha N_s}{4|\beta|}$, $\delta = 2(|\beta| - \beta_r)$, β -ն կապի կոմպլեքս գործակիցն է, N_s -ը ձողերի մակերևույթային խտությունն է, α -ն արտաքին դաշտի և ձողում առաջացած դիպոլ մոմենտի համեմատականության գործակիցն է:

Այս արտահայտության վերլուծությունը ցույց է տալիս, որ $\gamma \ll |\Omega|$ և $\sqrt{\mu_0/\varepsilon_0} \chi \sim 1$ պայմանների դեպքում T -ն ձգտում է մեկի երբ երբ $|\Omega + \delta| \ll |\Omega|$, և ընհակառակը՝ ձգտում գրոյի, երբ $|\Omega + \delta| \gg |\Omega|$:

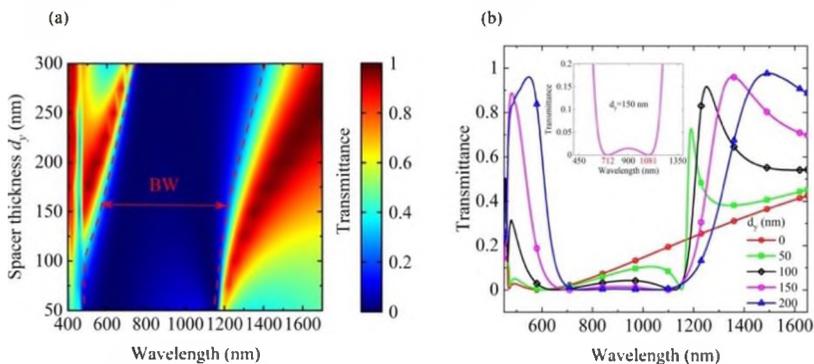


Նկ.23 (a) երկշերտ մետամակերևույթի սխեմատիկ պատկերը, (b) անցման գործակցի հաճախային բնութագիրը միջշերտային տարբեր հեռավորությունների դեպքում:

Նկար 23 (b)-ում պատկերված անցման գործակցի խիստ դիսպերսիոն հաճախային կախվածությունը չի կարող վերագրվել միայն հաղորդիչ ձողերի և ընկնող դաշտի հետ ռեզոնանսային փոխազդեցությանը: Երկշերտ մետամակերևույթի ռեզոնանսային անցմանը նպաստող մեկ այլ կարևոր

գործոն է երկու շերտերի միջև կապի β գործակցի կոմպլեքս բնույթը, որով իրականանում է երկու մետաշերտերի փոխազդեցությունը: Կոմպլեքս β -ի առկայությունը հանգեցնում է երկու միմյանց մոտ ռեզոնանսների առաջացմանը, որոնցից յուրաքանչյուրը կապված է այն պայմանի հետ, որ (8) հավասարման համարիչը կամ հայտարարը նեղ հաճախային միջակայքում ձգտում է զրոյի: Ավելին, ծայրահեղ դիսպերսիոն հատկությունները կարող են արդյունավետորեն վերահսկվել՝ փոփոխելով շերտերի միջև հեռավորությունը կամ միջշերտային գոտու դիէլեկտրիկ թափանցելիությունը: Կարևոր է, որ ներկայացված մոտեցումը ունիվերսալ է և կարող է կիրառվել նաև հաճախային այլ սպեկտրերում, եթե ընտրվեն համապատասխան նյութեր և կառուցվածքներ:

4.4 պարագրաֆում ներկայացված է երկշերտ մետամակերևույթի կիրառման հնարավորությունը որպես մոտ ինֆրակարմիր տիրույթի կառավարելի լայնաշերտ փակոցային զտիչ: Այստեղ, տեսական հաշվարկները կատարվել են նախորդ պարագրաֆում մշակված մոդելի շրջանակներում, սակայն ընդհանրացված են երկու դիսպերսիոն անցումները ներառելով, որոնց շնորհիվ ձևավորվում է փակոցային զտիչի գոտին: Ենթադրվում է, որ արտաքին դաշտի ազդեցությամբ գրգռվում են միայն վերին շերտում գտնվող ձողերը, որոնք հանդիսանալով ոչ մեծ բարորակությամբ բաց ռեզոնատորներ և փոխազդելով երկրորդ շերտի ձողերի հետ ստեղծում են մակերութային կապված մոդեր՝ առաջացնելով անցման սպեկտրում փակոցային շերտ:



Նկ. 24 (a) Անցման գործակցի երկչափ գրաֆիկը՝ կախված ալիքի երկարությունից և շերտերի միջև հեռավորությունից: (b) Երկշերտ մետամակերևույթի անցման գործակցի սպեկտրը տարբեր միջշերտային հեռավորությունների համար: Երկրաչափական պարամետրերը հետևյալն են՝ $p_x = 400$ նմ, $p_z = 360$ նմ, $D = 100$ նմ, $h = 300$ նմ, այստեղ p_x, p_z միավոր բջջի պարբերականություններն են:

Ստացված արդյունքները մեկնաբանվել են նաև համարժեք RLC կապված կոնտուրների մոդելի շրջանակներում:

Համաձայն կատարված հետազոտությունների և ստացված արդյունքների կարելի է պնդել, որ կառուցվածքային պարամետրերը, ինչպիսիք են նանոձողերի երկարությունը, տրամագիծը, շերտերի միջև հեռավորությունը և պարբերականությունը, կարևոր դեր են խաղում ֆիլտրի սպեկտրալ արձագանքի ձևավորման գործում: Միջշերտային միջավայրի դիէլեկտրիկ թափանցելիությունը կառավարելու հնարավորությունը, օրինակ՝ էլեկտրաօպտիկական նյութերի օգտագործման միջոցով, ապահովում է լրացուցիչ ազատության աստիճան ֆիլտրի պարամետրերը դինամիկ կարգավորելու համար: Բացի այդ, ձողի նյութի ընտրությունը զգալիորեն ազդում է ֆիլտրի աշխատանքի վրա. արծաթե և ոսկու վրա հիմնված կառուցվածքները ցուցաբերում են ավելի ցածր մուտքային կորուստներ և ձևավորման ավելի բարձր գործոն: Հստիչի օպտիմալացված դիզայնը ձևավորում է 600–1305 նմ միջակայքով փակոցային գոտի՝ 952.5 նմ կենտրոնական ալիքի երկարությամբ: Այս արդյունքները ընդգծում են երկշերտ մետամակերևույթի կիրառելիությունը առաջադեմ պլազմոնային և նանոֆոտոնային սարքերում, որտեղ բարձր ընտրողականությունը և ցածր կորուստները կարևոր են:

Եզրակացությունում ներկայացված են ատենախոսության արդյունքները:

Աշխատանքում քննարկված են էլեկտրամագնիսական ալիքների ենթալիքաչափային կառավարման մեխանիզմները պլազմոնային- և մետակառուցվածքների միջոցով: Ստացված հիմնական արդյունքները հակիրճ ներկայացված են ստորև.

1. Գլանային սիմետրիայով տարատեսակ ՄՊՊ ռեզոնատորների դիսպերսիոն առնչությունների, ռեզոնանսային պայմանների և դաշտերի բաշխվածությունների համար ստացվել են անալիտիկ արտահայտություններ, որոնք հնարավորություն են տալիս նախագծել օպտիմալ բնութագրերով միկրոռեզոնատորներ, գնահատել դաշտի ենթալիքային տեղայնացման աստիճանը և կանխորոշել դրանց կիրառման ոլորտները: Ցույց է տրվել որ տորոիդալ և V-տիպի ակոսաձև ռեզոնատորներում ի շնորհիվ նանոչափական տիրույթում մոդալ ծավալի խիստ տեղայնացմանը ($\sim \lambda^3/10$), էապես աճում է սպոնտան ճառագայթումը բնութագրող Պարսել գործոնը, որն համեմատական է բարորակության և մոդալ ծավալի հարաբերությանը: Այս հանգամանքը այսպիսի ռեզոնատորների բազմաթիվ կիրառությունների հնարավորություն է տալիս, ինչպիսիք են՝ լուսարձակող դիոդները, սենսորները, քվանտային տեղեկատվության մշակման և ֆոտովոլտային համակարգերը:
2. Առաջարկվել է մեծ բարորակությամբ կիսազլանային միկրոռեզոնատորի կառուցվածք, որի հիմքում սկին շերտի կարգի հաստությամբ տեղակայված հարթ մետաղական շերտը հնարավորություն է տալիս էվանեսցենտ կապի միջոցով ռեզոնատորի էֆեկտիվ գրգռում իրկանացնել՝ ընկնող հարթ

ալիքի կամ ալիքատարային մոդի հետ փոխազդեցության միջոցով: Կիսազլանային միկրոռեզոնատորում Ֆաբրի-Պերո ռեզոնանսային պայմանի իրականացումը շնչացող մոդերի ձևավորման գործընթացում ապահովում է համակարգի մեծ բարորակություն ($\approx 2.5 \cdot 10^4$), ինչպես նաև համակարգի կոր պարագծին մոտ ձևավորվող մոդերի ստացում, ինչը հնարավոր է դարձնում այն տարատեսակ սենսորային կիրառություններում (օրինակ՝ արտաքին միջավայրի բեկման ցուցիչի փոփոխման զգայունություն ստորակետից հետո չորրորդ նիշում): Ռեզոնանսային մոդերի բաշխվածությունը և ռեզոնանսային պայմանները հստակորեն լուսաբանվում են ստացված անալիտիկ արտահայտությունների և թվային հաշվարկների համադրման միջոցով:

3. Ներկայացվել է ԳԲՀ ճառագայթման հետ փոխազդող վերջավոր հաղորդականությամբ ժապավենի ամպլիտուդա-փուլային արձագանքի կառավարման հնարավորությունը: Համաձայն ստացված արդյունքների, ժապավենի մոտակա դաշտի տարածական բաշխումը մեծապես կախված է գրաֆիտային միկրոշերտի հաղորդականությունից և ընկնող միկրոալիքային ճառագայթման բևեռացումից: Այս երևույթը նոր հնարավորություն է ընձեռում ընդլայնելու մետանյութերի հատկությունները, մասնավորապես՝ մետանյութը կազմող կարգավորվող հաղորդականություն ունեցող տարրերի վրա հիմնված ճառագայթային ճակատի կառավարման փուլային մատրիցների ստեղծման գործում, և թույլ տալիս ուսումնասիրել ցածր հաղորդականությամբ կոմպոզիտային նյութերի էլեկտրամագնիսական բնութագրերը ոչ կոնտակտային մեթոդով:
4. Հաստատվել է, որ օգտագործելով աշխատանքային ալիքի երկարություններից էապես բարակ մետամակերևույթներ՝ կազմված գլանաձև կամ շերտավոր հաղորդիչ տարրերից, հաճախությունների միկրոալիքային, տերահերցային (S<g) և օպտիկական տիրույթներում հնարավոր է իրականացնել լայնաշերտ և արդյունավետ կլանում՝ ի շնորհիվ մետակառուցվածքի միավոր բջիջներում ի հայտ եկող կառուցվածքային ռեզոնանսի երևույթի:

Ցույց է տրվել, որ

- միկրոալիքային տիրույթում մետամակերևույթի տարր հանդիսացող գրաֆիտի խառնուրդով շերտերի, կլանման լայնական հատույթը մոտ 22 անգամ գերազանցում է նրա լայնական երկրաչափական հատույթը, ինչի արդյունքում հնարավոր է եղել հասնել 0.82 արժեքը գերազանցող համաչափ կլանմանը 8 ԳՀց-ից 12 ԳՀց հաճախային շերտում՝ 0.13 անդրադարձման և 0.05 անցման միջին գործակիցներով:
- VO_2 շերտերից կազմված մետամակերևույթի համադրումը անդրադարձնող ոսկյա շերտի հետ, առանձնացված բարակ դիէլեկտրիկ շերտով (35 մկմ հաստությամբ), ապահովում է 0.9 արժեքը գերազանցող կլանում 0.66 S<g-ից 1.84 S<g շերտում:

Միաժամանակ ներկայացվել է կլանման մակարդակի ղեկավարման հնարավորությունը VO_2 -ի՝ ջերմաստիճանից կախված հաղորդականության փոփոխության միջոցով:

- ինֆրակարմիր տիրույթում նիկելի ժապավեններից, տարանջատված անդրադրձնող նիկելի մետաղական հարթ մակերևույթից սիլիցիումի երկօքսիդի՝ SiO_2 բարակ մեկուսիչ մոտ 1.8 մկմ հաստությամբ շերտով կազմված մետամակերևույթը, դրսևորում է լայնաշերտ (8.2 մկմ-ից 18 մկմ)՝ 0.9-ից բարձր կլանում: Լայնաշերտությունը ասոցացվում է Ni շերտերում ցածր բարորակությամբ մոդերի գրգռման հետ:
5. Յուցադրվել է մագնիսադիէլեկտրիկ նյութերի կիրառմամբ անտենայի չափերի զգալի նվազեցման՝ մոտ 7 անգամ, և անտենայի թողարկման շերտի մոտ 6 անգամ լայնացման հնարավորությունը՝ ստանալով լայնաշերտ, էլեկտրականապես փոքր անտենա, այդպիսով լուծելով փոքր անտենաների նախագծման սահմանափակումը՝ կապված դրանց բնորոշ բարձր բարորակության հետ: Շնորհիվ միկրոշերտավոր անտենայի վրա տեղադրված կիսագնդաձև մագնիսա-դիէլեկտրիկ ռեզոնատորներում գրգռված ռեզոնանսային շնչացող մոդերի, անտենան սկսում է էֆեկտիվորեն ճառագայթել էապես փոքր հաճախություններում (նախնական համաձայնեցված 13 ԳՀց-ից մոտ հինգ անգամ փոքր՝ 2.5 ԳՀց-ում)՝ միևնույն ժամանակ պահպանելով ուժեղացման գործակցի ընդունելի բարձր արժեքներ:
6. Պարզվել է, որ ենթաալիքային չափերի հաղորդիչ ձողերում հնարավոր է գրգռել մակերևութային ալիքներ՝ ձևավորելով այսպես կոչված Գուբոյի գծեր, որոնք ապահովում են փոքր օհմական կորուստներ, տվյալների փոխանցման մեծ արագություն և տվյալների հաղորդման ցածր դիսպերսիա գիգահերցային և տերահերցային տիրույթներում: Այդ հանգամանքը հնարավոր է դարձնում դրանց կիրառությունը այդ տիրույթներում ԷՄ ալիքների մանիպուլյացիայի և ազդանշանների մշակման գործընթացներում: Պարբերականորեն դասավորված ենթաալիքային չափերի հաղորդիչ ձողերի համակարգը դրսևորում է բազմառեզոնանսային վարք, բարձ կարգերում առաջացնելով ոչ ճառագայթային ռեժիմներ ինչը նպաստում է ալիքի խիստ տեղայնացմանը և ուժեղ ռեզոնանսային բնութագրերի ձևավորմանը:
7. Բացայատվել է հաղորդիչ ձողերից կազմված երկշերտ մետամակերևույթներում խիստ դիսպերսիոն անցման երևույթը, և պարզաբանվել են դրան նպաստող հիմնական գործոնները: Միկրոալիքային դաշտը ձողերի վրա ձևավորում է մակերևութային կանգուն ալիքներ, որոնք հնարավոր են դարձնում մոտակա դաշտերի փոխազդեցությունը միջձողային գոտիներում: Երկրորդ կարևոր հանգամանքն այն է, որ հակադիր շերտերում գտնվող ձողերի միջև կապի գործակիցը կուպլեքս է, որտեղ կեղծ մասի առկայությունը հանգեցնում է

նեզրնանսային գծի ասիմետրիայի և թափանցելիության կտրուկ փոփոխությունների: Հաստատվել է երկշերտ մետամակերևույթի կիրառման հնարավորությունը որպես կառավարելի լայնաշերտ փակցային գտիչ սնու ինֆրակարմիր տիրույթում:

Հղված գրականություն

1. Veselago, V. G. Soviet Physics Uspekhi. 10 (4): . (1968). 509–514.
2. Sun, Jingbo, and Ji Zhou. Engineering 44 (2025): 145-161.
3. Shelby, Richard A., David R. Smith, and Seldon Schultz science 292, no. 5514 (2001): 77-79.
4. Landy, N. I., Sajuyigbe, S., Mock, J. J., Smith, D. R., & Padilla, W. J. Physical review letters(2008): 100(20), 207402.
5. Pendry, John Brian. Physical review letters 85, no. 18 (2000): 3966.
6. Holloway, Christopher L., Edward F. Kuester, Joshua A. Gordon, John O'Hara, Jim Booth, and David R. Smith. IEEE antennas and propagation magazine 54, no. 2 (2012): 10-35.
7. Tekkozyan, Vahan, Arsen Babajanyan, and Khachatur Nerkararyan. Optics Communications 305 (2013): 190-193.
8. Vardanyan, Artashes, Hovhannes Haroyan, Arsen Babajanyan, Khachatur Nerkararyan, Kiejin Lee, and Barry Friedman. Journal of Applied Physics 111, no. 5 (2012).
9. Vardanyan, Artashes, Hovhannes Haroyan, Arsen Babajanyan, Khachatur Nerkararyan, and Barry Friedman. Plasmonics 7, no. 1 (2012): 1-5.
10. Koenderink, A. Femius. Optics letters 35, no. 24 (2010): 4208-4210.
11. Nerkararyan, Khachatur V., Sona K. Nerkararyan, and Sergey I. Bozhevolnyi. Optics letters 36, no. 22 (2011): 4311-4313.
12. Haroyan, Hovhannes, Henrik Parsamyan, Torgom Yezekyan, and Kh Nerkararyan. Applied Optics 57, no. 22 (2018): 6309-6313.
13. Arakelyan, Shant, Ogsen Galstyan, Hanju Lee, Arsen Babajanyan, Jung-Ha Lee, Barry Friedman, and Kiejin Lee. Sensors and Actuators A: Physical 238 (2016): 397-401.
14. Parsamyan, Henrik, Hovhannes Haroyan, and Khachatur Nerkararyan. Applied Physics A 126, no. 10 (2020): 773.
15. Parsamyan, Henrik, Hovhannes Haroyan, and Khachatur Nerkararyan. Materials Today Communications 31 (2022): 103692.
16. Stepanyan, Ararat, Hovhannes Haroyan, and Arsen Hakhoumian. Journal of Telecommunications and Information Technology (2022).
17. Gevorgyan, Lilit, Hovhannes Haroyan, Henrik Parsamyan, and Khachatur Nerkararyan. RSC advances 13, no. 18 (2023): 11948-11958.
18. Abrahamyan, Tigran, Gor Ohanyan, David Hambaryan, David Kalantar, Henrik Parsamyan, Hovhannes Haroyan, Arsen Babajanyan, Kiejin Lee, and Khachatur Nerkararyan. Journal of Physics D: Applied Physics 57, no. 35 (2024): 355108.

1. Parsamyan H., Gabrielyan R., Arabajyan G., Haroyan H., and Nerkararyan Kh. “Nanometer-scale confinement of whispering gallery plasmonic modes upon slit excitation.” *Nanoscale Advances* (2026).
2. Haroyan, H., Gevorgyan L., and Nerkararyan Kh. “Tunable optical bandstop filter enabled by bilayer metasurface.” *Optics Express* 34, no. 2 (2026): 3070-3086.
3. Abrahamyan T., Ohanyan G., Hambaryan D., Movsisyan A., Parsamyan H., Haroyan H., Babajanyan A., and Nerkararyan Kh. “Resonant enhancement and confinement of microwave field in coupled conductive rod systems.” *Physica Scripta* 100, no. 2 (2025): 025515.
4. Abrahamyan T., Ohanyan G., Haroyan H., Babajanyan A., Nerkararyan Kh. “Resonant detection of surface microwaves using dielectric-coated conductive rods coupled with a cut Goubau line.” *IET Conference Proceedings CP914 2024*, (36) 2024: 11-14.
5. Haroyan, H., Stepanyan A., and Hakhoumian A.. “Beam scanning realization by a single electrically small antenna covered by magnetodielectric resonator.” *IET Conference Proceedings CP914 2024*, (36) 2024: pp. 53-56.
6. Abrahamyan T., Ohanyan G., Hambaryan D., Kalantar D., Parsamyan H., Haroyan H., Babajanyan A., Lee K., and Nerkararyan Kh. “Highly dispersive transmission conditions for a conductive rods-based ultrathin bilayer metastructure.” *Journal of Physics D: Applied Physics* 57, no. 35 (2024): 355108.
7. Hambaryan D., Abrahamyan T., Parsamyan H., Movsisyan A., Minasyan B., Haroyan H., Babajanyan A., Lee K., Friedman B., and Nerkararyan Kh. “Dielectric coated conductive rod resonantly coupled with a cut transmission line as a tunable microwave bandstop filter and sensor.” *Heliyon* 10, no. 2 (2024).
8. Stepanyan, A., Haroyan H., and Hakhoumian A.. “Miniaturized microstrip patch antenna on YIG material under external magnetic field.” *Armenian Journal of Physics*, vol. 16, issue 4, (2023): pp. 126-131.
9. Gevorgyan L., Haroyan H., Parsamyan H., and Nerkararyan Kh. “Tunable ultra-broadband terahertz metamaterial absorber based on vanadium dioxide strips.” *RSC advances* 13, no. 18 (2023): 11948-11958.
10. Parsamyan, H., Hambaryan D., and Haroyan H.. “Broadband Infrared Absorption Due to Low Q-factor Dipole Modes of Cr Strips.” *Proceedings of the 9th International Symposium OPTICS-2022*, pp. 59-68. Cham: Springer International Publishing, 2022.
11. Gevorgyan L., Parsamyan H., and Haroyan H. “Broadband Absorption of Microwaves in Periodic Cylindrical Structures.” *Proceedings of the 9th*

International Symposium OPTICS-2022, pp. 39-46. Cham: Springer International Publishing, 2022.

12. Stepanyan A., Haroyan H., and Hakhoumian A. "Electrically Small Microstrip Antenna Based on Magnetodielectric Materials." *Journal of Telecommunications and Information Technology* (2022): 98-102.
13. Stepanyan A., Haroyan H., and Hakhoumian A.. "Electrically small patch antenna based on magnetodielectric resonator." *In IET Conference Proceedings CP810*, vol. 2022, no. 15, pp. 11-14. Stevenage, UK: The Institution of Engineering and Technology, 2022.
14. Stepanyan A., and Haroyan H. "Miniaturized antipodal vivaldi antenna based on magnetodielectric materials." *Proceedings of the YSU A: Physical and Mathematical Sciences* 56, no. 2 (258) (2022): 74-84.
15. Hambaryan, D., Gevorgyan L., Parsamyan H., Yesayan A., Haroyan H., and Nerkararyan Kh. "Graphite-insulator-metal based metamaterial absorber at X-band." *In IET Conference Proceedings CP810*, vol. 2022, no. 15, pp. 15-17. Stevenage, UK: The Institution of Engineering and Technology, 2022.
16. Abrahamyan T., Haroyan H., Hambaryan D., Parsamyan H., Babajanyan A., Lee K., Friedman B., and Nerkararyan Kh. "Surface-standing-wave formation via resonance interaction of a finite-length conductive rod with microwaves." *Journal of Physics D: Applied Physics* 55, no. 44 (2022): 445001.
17. Babajanyan A., Abrahamyan T., Haroyan H., Minasyan B., Yezekyan T., Lee K., Barry Friedman, and Khachatur Nerkararyan. "Microwave response phase control of a graphite microstrip." *Carbon* 193 (2022): 151-156.
18. Parsamyan H., Haroyan H., and Nerkararyan Kh. "Broadband tunable mid-infrared absorber based on conductive strip-like meta-atom elements." *Materials Today Communications* 31 (2022): 103692.
19. Parsamyan H., Haroyan H., and Nerkararyan Kh. "Light control in a hemicylindrical whispering gallery microcavity-parallel plate waveguide system." *Optics Communications* 474 (2020): 126122.
20. Parsamyan H., Haroyan H., and Nerkararyan Kh. "Broadband microwave absorption based on the configuration resonance of wires." *Applied Physics A* 126, no. 10 (2020): 773.
21. Haroyan H., Yezekyan T., Parsamyan H., and Ninoyan A. "Fano Resonance in Coupled Semicylindrical Microresonators." *Armenian Journal of Physics*, vol. 11, issue 4, 2018: pp. 252-256.
22. Parsamyan H., Yezekyan T., and Haroyan H. "Plasmonic Nanoparticles Arrangements for Biosensing." *Armenian Journal of Physics*, vol. 11, issue 4, 2018: 241-245.
23. Haroyan, Hovhannes, Henrik Parsamyan, Torgom Yezekyan, and Kh Nerkararyan. "Semicylindrical microresonator: excitation, modal structure, and Q-factor." *Applied Optics* 57, no. 22 (2018): 6309-6313.

24. Sahakyan, Kh, Haroyan H., and Nerkararyan Kh. "Waveguide resonator with high quality factor excited through the subwavelength slit." *Journal of Contemporary Physics* (Armenian Academy of Sciences) 52, no. 1 (2017): 32-37.
25. Parsamyan H., Haroyan H., and Nerkararyan Kh. "Whispering-gallery microresonator with a new easy and controllable excitation method." Вестник Российско-Армянского (Славянского) Университета: Физико-Математические и Естественные Науки, no 1, (2017): 60-67.
26. Haroyan, H., and Tadevosyan V., "High Gain Broadband Plasmonic Slot Nano-Antenna." *Int. J. Phys. Math. Sci* 9 (2015): 1104-1107.
27. Ароян, О., and Неркарарян Х. "Аналитическое описание различных кольцевых поверхностно-плазмонных микрорезонаторов." Физические основы приборостроения 5, no. 1 (2016): 50-63.
28. Haroyan H. "Cylindrical plasmonic microcavity and its excitation." In *Optical Systems Design 2015: Computational Optics*, vol. 9630, pp. 248-254. SPIE, 2015.
29. Haroyan, H. "Experimental investigation of "Plasmonic black hole" phenomena" In of the *International Conference on "Microwave and THz Technologies and Applications"*, (2014):72-75.
30. Vardanyan A., Haroyan H., Babajanyan A., Nerkararyan Kh., and Friedman B. "A surface plasmon microcavity between the toroidal and flat metallic surfaces." *Plasmonics* 7, no. 1 (2012): 1-5.
31. Vardanyan A., Haroyan H., Babajanyan A., Nerkararyan Kh., Lee K, and Friedman B. "Ring-type V-groove surface plasmon microresonator: The modal structure and Q-factor." *Journal of Applied Physics* 111, no. 5 (2012).
32. Vardanyan A., Haroyan H. , Arsen Babajanyan, Khachatur Nerkararyan, and Kiejin Lee. "Activity of surface plasmon in the ring-like microcavities" In *Photonics and Micro-and Nano-structured Materials* 2011, vol. 8414, pp. 171-181. SPIE, 2012.

MANIPULATION OF ELECTROMAGNETIC WAVES BY RESONANT, SUBWAVELENGTH ELEMENTS STRUCTURES

Annotation

This dissertation is devoted to elucidating the physical mechanisms underlying the subwavelength control of electromagnetic (EM) waves using plasmonic and metastructured systems. The ability to manipulate EM waves at scales smaller than the wavelength is of considerable interest due to its importance for both fundamental research and a wide range of applied technologies. Periodic structures composed of subwavelength elements—metamaterials and metasurfaces—enable unprecedented control over EM fields through resonant phenomena supported by their constituent meta-atoms, giving rise to effective electromagnetic properties not available in natural materials.

From an applied perspective, subwavelength EM-wave control plays a key role in the development of next-generation technologies in telecommunications, sensing, and energy conversion. In the microwave domain, such structures enable the realization of ultrathin broadband absorbers and electrically small antennas (ESAs). In the optical and terahertz regimes, plasmonic resonances provide strong light–matter interaction and enhanced nonlinear effects, enabling ultrafast and energy-efficient modulation of optical signals, which is crucial for advanced photonic communication and computing systems. In this context, the design and investigation of resonant structures exhibiting high quality factors and strongly confined modal volumes remains a central research challenge.

Within this framework, a comprehensive theoretical and experimental study of resonant plasmonic and metastructured systems has been carried out. Analytical expressions for dispersion relations, resonance conditions, and electromagnetic field distributions were derived for a variety of cylindrically symmetric microresonators. These results enable the rational optimization of resonator characteristics, quantitative evaluation of subwavelength field localization, and prediction of potential application areas. It is shown that toroidal and V-groove resonators provide deep-subwavelength confinement of electromagnetic energy (down to $\sim\lambda/10$), resulting in a strong enhancement of the Purcell factor due to the combined effect of relatively high quality factors and small modal volumes. This property makes such resonators promising for applications in light-emitting devices, ultrasensitive sensing, quantum photonics, and energy-harvesting systems.

A high-quality semi-cylindrical microresonator configuration is proposed and investigated. The presence of a flat metallic layer with a thickness comparable to the skin depth enables efficient evanescent excitation of whispering-gallery modes by an incident plane wave or guided modes. The realization of the Fabry–Pérot resonance condition in the semi-cylindrical geometry ensures quality factors on the order of

2.5×10^4 , while the strong localization of resonant modes near the curved boundary provides high sensitivity to environmental changes. In particular, refractive-index variations in the surrounding medium can be detected with sensitivity reaching the fourth decimal place.

The possibility of controlling the amplitude–phase response of microwave radiation interacting with finite-conductivity strips is also demonstrated. It is shown that the near-field spatial distribution strongly depends on both the conductivity of graphite-based microstrips and the polarization of the incident wave. This effect opens new opportunities for the development of phase-gradient and beam-steering metasurfaces composed of elements with tunable conductivity, and enables non-contact characterization of low-conductivity composite materials.

Broadband and highly efficient absorption is demonstrated in metasurfaces significantly thinner than the operating wavelength across the microwave, terahertz, and optical frequency ranges. In the microwave regime, graphite-based composite strips exhibit absorption cross sections exceeding their geometric cross sections by a factor of approximately 22, resulting in uniform absorption above 0.82 over the 8–12 GHz band. In the terahertz range, hybrid metasurfaces composed of VO₂ strips and a reflective metallic backing achieve absorption exceeding 0.9 over the 0.66–1.84 THz range, with active tunability enabled by the temperature-dependent conductivity of VO₂. In the infrared region, nickel-strip metasurfaces separated from a reflective ground plane by a thin SiO₂ layer demonstrate broadband absorption exceeding 0.9 over the 8.2–18 μm wavelength range due to the excitation of low-order resonant modes.

The dissertation also addresses the problem of antenna miniaturization. It is shown that the use of magnetodielectric resonators allows the antenna size to be reduced by approximately seven times while simultaneously increasing the operational bandwidth by a factor of six. Efficient radiation at frequencies nearly five times lower than the initial design frequency is achieved through the excitation of resonant modes in hemispherical magnetodielectric resonators coupled with microstrip patch antennas, while maintaining acceptable gain levels.

In addition, the excitation of surface electromagnetic waves in subwavelength conductive rods forming Goubau lines is investigated. These structures exhibit low ohmic losses, low dispersion and high data-transfer rates in the gigahertz and terahertz ranges, making them promising for advanced signal-processing and wave-guiding applications. Finally, a strong dispersion transition is revealed in bilayer metasurfaces composed of conductive nanorods. This effect is attributed to resonant interlayer coupling and plasmonic mode hybridization, enabling controllable broadband notch filtering in the near-infrared range.

Overall, the results obtained provide new insights into the physics of resonant subwavelength structures and demonstrate their high potential for practical implementation in modern electromagnetic and photonic devices.

УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ВОЛНАМИ С ПОМОЩЬЮ РЕЗОНАНСНЫХ, СУБВОЛНОВЫХ СТРУКТУР

Аннотация

Данная диссертация посвящена изучению физических механизмов, лежащих в основе субволнового управления электромагнитными (ЭМ) волнами с использованием плазмонных и метаструктурных систем. Возможность манипулировать ЭМ волнами в масштабах, меньших длины волны, представляет значительный интерес как для фундаментальных исследований, так и для широкого спектра прикладных технологий. Периодические структуры, состоящие из субволновых элементов — метаматериалов и метаповерхностей — обеспечивают беспрецедентный контроль над ЭМ-полями посредством резонансных явлений, поддерживаемых составляющими их метаатомами, что приводит к эффективным электромагнитным свойствам, недоступным в природных материалах.

С прикладной точки зрения, управление ЭМ волнами в субволновом диапазоне играет ключевую роль в разработке технологий следующего поколения в телекоммуникациях, сенсорике и преобразовании энергии. В микроволновом диапазоне такие структуры позволяют создавать сверхтонкие широкополосные поглотители и электрически малые антенны (ЭМА). В оптическом и терагерцовом диапазонах плазмонные резонансы обеспечивают сильное взаимодействие света с веществом и усиленные нелинейные эффекты, что позволяет осуществлять сверхбыструю и энергоэффективную модуляцию оптических сигналов, что имеет решающее значение для передовых фотонных систем связи и вычислительных систем. В этом контексте проектирование и исследование резонансных структур, обладающих высокими добротностями и сильно ограниченными модальными объемами, остается центральной исследовательской задачей.

В рамках этого исследования было проведено всестороннее теоретическое и экспериментальное изучение резонансных плазмонных и метаструктурных систем. Были выведены аналитические выражения для дисперсионных соотношений, условий резонанса и распределения электромагнитного поля для различных цилиндрически симметричных микрорезонаторов. Эти результаты позволяют рационально оптимизировать характеристики резонаторов, количественно оценить локализацию поля на субволновом уровне и предсказать потенциальные области применения. Показано, что тороидальные и V-образные резонаторы обеспечивают глубоко субволновое ограничение электромагнитной энергии (до $\sim \lambda/10$), что приводит к значительному увеличению фактора Парселла благодаря комбинированному эффекту высоких добротностей и малых модальных объемов. Это свойство делает такие резонаторы

перспективными для применения в светоизлучающих устройствах, сверхчувствительных датчиках, квантовой фотонике и системах сбора энергии. Предложена и исследована высококачественная полуцилиндрическая конфигурация микрорезонатора. Наличие плоского металлического слоя толщиной, сопоставимой с глубиной проникновения излучения, позволяет эффективно возбуждать эванесцентные моды шепчущей галереи падающей плоской волной или волноводной модой. Реализация условия резонанса Фабри-Перо в полуцилиндрической геометрии обеспечивает добротность порядка $2,5 \times 10^4$, а сильная локализация резонансных мод вблизи изогнутой границы обеспечивает высокую чувствительность к изменениям окружающей среды. В частности, изменения показателя преломления в окружающей среде могут быть обнаружены с чувствительностью, достигающей четвертого знака после запятой. Условия резонанса и распределение мод подтверждены с помощью сочетания аналитического моделирования и численных симуляций.

Также продемонстрирована возможность управления амплитудно-фазовой характеристикой микроволнового излучения, взаимодействующего с полосами конечной проводимости. Показано, что пространственное распределение ближнего поля сильно зависит как от проводимости микрополосок на основе графита, так и от поляризации падающей волны. Этот эффект открывает новые возможности для разработки метаповерхностей с фазовым градиентом и управлением лучом, состоящих из элементов с регулируемой проводимостью, и позволяет проводить бесконтактную характеризацию композитных материалов с низкой проводимостью.

Широкополосное и высокоэффективное поглощение продемонстрировано в метаповерхностях, значительно тоньше рабочей длины волны, в микроволновом, терагерцовом и оптическом диапазонах частот. В микроволновом диапазоне композитные полоски на основе графита демонстрируют сечения поглощения, превышающие их геометрические сечения примерно в 22 раза, что приводит к равномерному поглощению выше 0,82 в диапазоне 8–12 ГГц. В терагерцовом диапазоне гибридные метаповерхности, состоящие из полосок VO_2 и отражающей металлической подложки, достигают поглощения, превышающего 0,9 в диапазоне 0,66–1,84 ТГц, с активной регулируемостью, обеспечиваемой температурно-зависимой проводимостью VO_2 . В инфракрасном диапазоне никелевые полосковые метаповерхности, отделенные от отражающей заземляющей плоскости тонким слоем SiO_2 , демонстрируют широкополосное поглощение, превышающее 0,9 в диапазоне длин волн 8,2–18 мкм, за счет возбуждения резонансных мод низкого порядка.

В диссертации также рассматривается проблема миниатюризации антенн. Показано, что использование магнитодиэлектрических резонаторов позволяет уменьшить размер антенны примерно в семь раз, одновременно увеличивая

рабочую полосу пропускания в шесть раз. Эффективное излучение на частотах почти в пять раз ниже исходной проектной частоты достигается за счет возбуждения резонансных мод в полусферических магнитоэлектрических элементах, интегрированных с микрополосковыми антеннами, при сохранении приемлемых уровней усиления.

Кроме того, исследуется возбуждение поверхностных электромагнитных волн в субволновых проводящих стержнях, образующих линии Губо. Эти структуры демонстрируют низкие омические потери, высокие скорости передачи данных и низкую дисперсию в гигагерцовом и терагерцовом диапазонах, что делает их перспективными для передовых приложений обработки сигналов и волноводного распространения. Наконец, выявлен сильный дисперсионный переход в двухслойных метаповерхностях, состоящих из проводящих наностержней. Этот эффект объясняется резонансной межслойной связью и гибридизацией плазмонных мод, что позволяет осуществлять управляемую широкополосную режекторную фильтрацию в ближнем инфракрасном диапазоне.

В целом, полученные результаты дают новое понимание физики резонансных субволновых структур и демонстрируют их высокий потенциал для практического применения в современных электромагнитных и фотонных устройствах.

