ՀՀ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ, ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ, ՄՇԱԿՈՒՅԹԻ ԵՎ ՍՊՈՐՏԻ
ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ

ԵՐԵՎԱՆԻ ՊԵՏԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

ՕՀԱՆՅԱՆ ԳՈՌ ԱՇՈՏԻ

ՓՈՒԼԱՀԱՄԱՁԱՅՆԵՑՎԱԾ ՄԻԿՐՈԱԼԻՔԱՅԻՆ ՄԵՏԱՄԱԿԵՐԵՎՈՒՅԹՆԵՐ

Ա. 04.03 – «Ռադիոֆիզիկա» մասնագիտությամբ
ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների թեկնածուի
գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսություն

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ – 2025

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

OHANYAN GOR ASHOT

PHASE-MATCHED MICROWAVE METASURFACES

Thesis for the degree of Candidate of Physical and Mathematical Sciences
Specialty 01.04.03 – “Radiophysics”

ABSTRACT

YEREVAN - 2025

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Երևանի պետական համալսարանում:

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

Պաշտոնական ընդիմախոսներ՝ ֆ.-մ.գ.դ., պրոֆեսոր
Ա.Ժ. Մուրադյան
տ.գ.դ., պրոֆեսոր
Մ. Ց. Այվազյան

Առաջատար կազմակերպություն՝ ՀՀ ԳԱԱ ֆիզիկական հետազոտությունների ինստիտուտ

Պաշտպանությունը կայանալու է 2025թ. մայիսի 7-ին ժամը 14:30-ին Երևանի պետական համալսարանում գործող ԲՈԿ-ի 049 ֆիզիկայի մասնագիտական խորհրդի նիստում: Հասցե՝ 0025, Ա. Մանուկյան 1:

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ԵՊՀ գրադարանում:
Սեղմագիրն առաքված է 2025թ. ապրիլի 4-ին:

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

The thesis theme is approved at Yerevan State University.

Scientific supervisor: Doctor of Phys. Math. Sciences, Prof. Kh. V. Nerkararyan

Official opponents: Doctor of Phys. Math. Sciences, Prof. A. Zh. Muradyan
Doctor of Tech. Sciences, Prof. M. Ts. Ayvazyan

Leading organization: Institute of Physical Research of the National Academy of Sciences of the Republic of Armenia

The defense of the thesis will take place at 14:30 on May 7, 2025, during the session of the Specialized Council 049 of Physics at the Yerevan State University.
Address: 0025, A. Manukyan 1.
The dissertation is available at the YSU library.
The abstract was distributed on April 4, 2025.

Scientific secretary of the Specialized Council Candidate of Phys. Math. Sciences
V. P. Kalantaryan

ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԸՆԴՀԱՆՈՒՐ ԲՆՈՒԹԱԳԻՐԸ

Աշխատանքի արդիականությունը

Ներկայումս հետազոտողների ուշադրության կենտրոնում գտնվող մետանյութերը, ալիքի երկարությունից էապես փոքր տարրերից (մետաատոմներից) կազմված արհեստական կառուցվածքներ են, որոնք նոր հնարավորություններ են տալիս էլեկտրամագնիսական ազդանշանի վարքը կառավարելու համար:

Հետազոտողների հետաքրքրությունն այս կառուցվածքների նկատմամբ առավելապես պայմանավորված է նրանով, որ այստեղ առկա մի շարք բացառիկ ֆիզիկական երևույթներն անիրականանալի են բնական նյութերի օգտագործման պարագայում: Մասնավորապես, դրանց թվում են բեկման ցուցիչը, արտասովոր բարձր լուծունակությամբ պատկերների ստացումը, օբյեկտի թափանցելի և անթափանց քողարկումը և այլն: Հետևաբար, կանոնավոր դասավորված մետաատոմների անհատական և կոլեկտիվ հատկությունների համադրումը զգալիորեն ընդլայնում է էլեկտրամագնիսական ալիքի վերահսկման հնարավորությունը:

Այնուամենայնիվ, ոլորտի առաջխաղացումն ու զարգացումը փաստում է՝ մետանյութերի այդ բացառիկ հատկությունները չեն անհետանում եռաչափ կառուցվածքները նմանատիպ բարակ թաղանթներով փոխարինելու դեպքում: Հետեւաբար, եթե դիտարկենք կիրառման տեսանկյունից, պետք է նշենք, որ մետամակերևույթը առավել նպաստավոր պայմաններ է ապահովում: Որոշակի, նախապես մշակված հաջորդականությամբ և ցանկալի հատկություններով մետաատոմներով ստեղծված մետամակերևույթները տալիս են հնարավորություն կառավարել անցած և անդրադարձած ալիքների փուլը, իրականացնել անոմալ անդրադարձում կամ արդյունավետ կլանում, ինչպես նաև ստեղծել հարթ ոսպնյակներ:

Մետամակերևույթներում բազմատեսակ ֆիզիկական պրոցեսների հանդես գալը պայմանորված է ոչ միայն համակարգի կառուցվածքային առանձնահատկություններով, այլ նաև դրա տարրը հանդիսացող բջիջի բնութագրիչներով: Պետք է նաև հաշվի առնենք այն դիտարկմանը, որ այս կառուցվածքը ունենալով փուլի կառավարման լայն հնարավորություններ, ոչ մեծ դժվարությամբ ենթարկվում է տեսական և թվային վերլուծության:

Այս վերլուծությունների շնորհիվ մենք կարող ենք վերահսկելիորեն ապահովելով կապը մետանյութի տարրերի միջև՝ ստանալ ճառագայթի արդյունավետ կլանման, ֆոկուսացման և անհրաժեշտ ուղղությամբ տարածման օպտիմալ պայմաններ՝ ալիքի տվյալ հաճախային տիրույթում:

Թվային նախնական վերլուծության արդյունքում, պարզ է դառնում, որ էլեկտրամագնիսական ալիքի առկայության պայմաններում նույն կարգի իրական և կեղծ մասերով դիէլեկտրիկական հաստատուն ունեցող, ենթաալիքային լայնական չափերով հաղորդիչ ժապավենի արձագանքի փուլը կարող է էապես շեղվել ազդակի նկատմամբ: Միանշանակ սկզբունքային նշանակություն ունի նաեւ այն հանգամանքը, որ մետակառուցվածքից ստացված արձագանքի փուլային շեղումը վերահսկելի է: Այն հնարավոր է կառավարել տարրերի անհատական բնութագրիչների, ինչպես նաև դրանց փոխադարձ դասավորության միջոցով: Հետեւաբար՝ դա տալիս է ճառագայթի ուղղության շեղման և արդյունավետ ֆոկուսացման հնարավորություն:

Եթե դիտարկենք նաեւ փորձարարական հետազոտությունները, ապա նշենք, որ դրանք մեզ տալիս են հնարավորություն հետազոտել քննարկվող դասի մետամակերևույթների հատկությունները: Դրանց բացահայտման համար էլ իր հերթին մեծ նշանակություն ունի նրանց մերձակայքում ալիքային դաշտերի բաշխվածությունների հետազոտումը:

Այսպիսով, Զոմերֆելդի կանգուն ալիքները, որոնք ձևավորվում են վերջավոր չափերով ռեզոնատորներից կազմված կոնֆիգուրացիաներում, կարող են բացել այս ալիքների ռեզոնանսային հատկությունների օգտագործման նոր հեռանկարներ, որոնք պահանջում են ավելի մանրամասն վերլուծություն:

<u>Ատենախոսության նպատակը</u>

Բացահայտել, որպես բաց միկրոալիքային ռեզոնատոր ծառայող, հաղորդիչ ձողերի համակարգում ձևավորվող աքսիալ սիմետրիայով, կապված կանգուն ալիքների ռեզոնանսային հատկությունները և դրանց հիմման վրա ստեղծված մետամակերևույթների միջոցով ալիքային ազդանշանների կառավարման հնարավորությունները:

<u>Գիտական նորույթը</u>

1. Բացահայտվել է, որ հաղորդիչ, վերջավոր երկարությամբ ձողերում, ընկնող ալիքի ազդեցությամբ գեներացված կանգուն միկրոալիքները միմյանց հետ ուժեղ կապված են և ձևավորում են կոլեկտիվ մոդեր:
2. Ցույց է տրվել, որ որպես մետամակերևույթ ծառայող, պարբերաբար դասավորված հաղորդիչ ձողերի երկշերտ համակարգում հանդես եկող ռեզոնանսը, միկրոալիքային հաճախությունների նեղ տիրույթում, հանգեցնում է անցման գործակցի կտրուկ և էական անկման, ինչը կառավարվում է շերտերի միջև հեռավորության և միջշերտային միջավայրի դիէլեկտրիկ թափանցելիության փոփոխությամբ:
3. Ուղղանկյուն միկրոալիքային ալիքատարով տարածվող հիմնական մոդի անցումը հաղորդիչ ձողերից կազմված երկշերտ մետամակերևույթով,

կտրուկ արտահայտված դիսպերսիվ բնույթ ունի, ինչը պայմանավորված է ձողերի միջև ռեզոնանսային փոխազեսության գործակցի արժեքում կեղծ անդամի առկայությամբ:

4. Ենթաալիքային չափերում հավասարահեռ դասավորված, վերջավոր թվով և երկարությամբ հաղորդիչ ձողերի համակարգը հաճախությունների միկրոալիքային տիրույթում ծառայում է որպես ռեզոնատոր, որում մոդերի քանակը հավասար է ձողերի թվին: Մոդերի ձևավորումը պայմանավորված է ձողերում լիցքի տարբեր ամպլիտուդներով և փուլերով կոհերենտ տատանումով, ինչն ուղեկցվում է ալիքային դաշտերի ուժեղ տեղայինացմամբ:

<u>Գործնական արժեքը</u>

Մետամակերևույթի տարր հանդիսացող հաղորդիչ ձողերի համակարգում ձևավորվող կապված կանգուն միկրոալիքների ռեզոնանսային արձագանքը, կախված լինելով դրանց միջև հեռավորությունից և շրջապատող միջավայրի դիէլեկտրիկ թափանցելիությունից, հնարավորություն է տալիս կառավարել մետամակերևույթով անցնող ալիքային ազդանշանը՝ ծառայելով որպես զտիչ կամ փոխանջատիչ:

Ատենախոսությունում ներկայացված, ենթաալիքային չափերում դաշտերի տեղայինացումն ու արտասովոր ուժեղացումը, կարող է ապահովել նվազագույն դասական աղմուկով միկրոալիքայինից-օպտիկական արդյունավետ փոխակերպում, ինչը կարևոր է քվանտային ինֆորմատիկայում կիրառությունների համար:

<u>Պաշտպանության ներկայացվող դրույթները</u>

1. Բացահայտվել է ուժեղ կապի առկայությունը մետամակերևույթի տարրը հանդիսացող հաղորդիչ ձողերում ձևավորվող կանգուն միկրոալիքների միջև, որի վերահսկումը լրացուցիչ հնարավորություններ է տալիս կառավարելու մետամակերևույթով անցնող ալիքային ազդանշանը:
2. Փոխազդվող հաղորդիչ ձողերի հիմքով ստեղծված մետամակերևույթում հանդես եկող Ֆանոյի ռեզոնանսի պայմաններում, անցման գործակցի հաճախականային սպեկտրի կորը ունի սուր գագաթ, որի դիրքը կառավարվում է շերտերի միջև հեռավորության և միջշերտային միջավայրի դիէլեկտրիկ թափանցելիության փոփոխությամբ:
3. Ողղանկյուն ալիքատարում 1մմ տրամագծով և 17,5մմ երկարությամբ պարբերաբար դասավորված պղնձյա ձողերի երկշերտ համակարգի հիման վրա ստեղծված մետամակերևույթով միկրոալիքի անցման գործակցի արժեքի անկումը 0,8-ից մինչև 0 իրականանում է 8-8.5ԳՀց հաճախությունների տիրույթում:

4. Որպես ռեզոնատոր ծառայող, հաղորդիչ փոխազդվող ձողերում ձևավորվող մոդերում միկրոալիքային դաշտերի տեղայինացման ծավալը մոտ երկու կարգով փոքր է ռեզոնանսային ալիքի երկարության խորհանարդից, էլեկտրական դաշտի լարվածությունը աճում է 30 անգամ, իսկ բարորակությունը հասնում է 400-ի:

ԱՏԵՆԱԽՈՍՈՒԹՅԱՆ ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆԸ

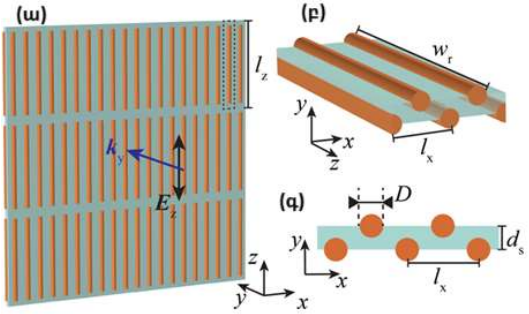
Ներածությունում ներկայացված է աշխատանքի արդիականությունը, ձևակերպված են նպատակներն ու խնդիրները, պաշտպանության ներկայացվող հիմնական դրույթները, աշխատանքի գիտական նորույթն ու գործնական արժեքները:

Ատենախոսության **առաջին գլուխը** ակնարկային է, ուր լուսաբանվում են հետազոտությունների հիմքում ընկած երկու կարևոր ոլորտներ: Դրանցից առաջինում վերլուծվում է մետամակերևույթների զարգացման արդի էտապը և զարգացման հեռանկարները: Երկրորդում հանգամանելիորեն ուսումնասիրվում են կապված մոդերի տեսությանը նվիրված մոդելները և դրանց առնչվող կոնկրետ իրավիճակները:

Երկրորդ գլխի առաջին պարագրաֆում ներկայացվել է առանձին վերցված մեկ վերջավոր երկարությամբ հաղորդիչ ձողի ռեզոնանսային արձագանքը նրա առանցքով բևեռացված ընկնող միկրոալիքից [1]: Պարզվում է, որ ձողի մերձմակերևութային տիրույթում կարող են ձևավորվել ռադիալ սիմետրիայով կանգուն ալիքներ, երբ ընկնող ալիքի երկարությունը մոտ է ձողի երկարության կեսին: Արդյունքում ստացվում է բաց ռեզոնատոր, որը ակտիվորեն կարող է փոխազդել հարևան նմանատիպ օբյեկտների հետ:

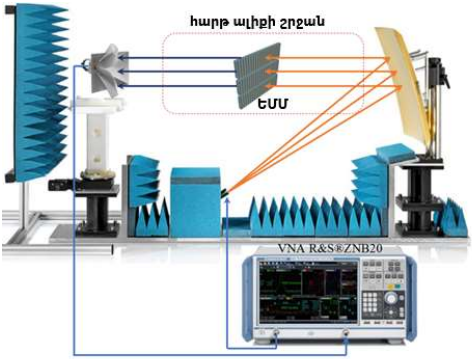
Երկրորդ գլխի երկրորդ պարագրաֆում մոդելավորվել և քննարկվել է պղնձե ձողերից կազմվաց փուլահամաձայնեցված երկշերտ մետամակերևույթներ [2]: Կատարվել են տեսական, փորձարարական և սիմուլացիոն հետազոտություններ՝ միկրոալիքի անցման ուժեղ և վերահսկելու դիսպերսիա ստանալու նպատակով: Նշված կառուցվածքում ռեզոնանսային կապը ծագում է գրեթե կես ալիքի երկարությամբ ձողերում առանցքային համաչափությամբ մակերևութային կանգուն ալիքներ ձևավորվելու շնորհիվ:

Երկշերտ մետամակերեսի եռաչափ (3D) սխեմատիկ պատկերը և տարրական բջիջը ներկայացված են Նկ. 1-ում:



Նկար 1: *ԵՄՄ սխեմա (ա) ԵՄՄ եռաչափ տեսք և (բ) 2×1 միավոր բջիջ: (գ) ԵՄՄ կողային հատույթ XY հարթությունում: Դաշտը բևեռացված է ձողի առանցքի երկայնքով (z-ուղղությամբ).*

Այս կառուցվածքի ռեզոնանսային հաճախականությունը կարող է փոփոխվել՝ փոխելով կապված ձողերի միջև հեռավորությունը կամ միջշերտային տարածությունը լցնող միջավայրի դիէլեկտրական հատկությունները՝ դրանով իսկ տրամադրելով էլեկտրամագնիսական ալիքների ինտենսիվության և փուլի մանիպուլյացիայի առավելությունները: Փորձարկման սխեման պատկերված է Նկ. 2-ում:



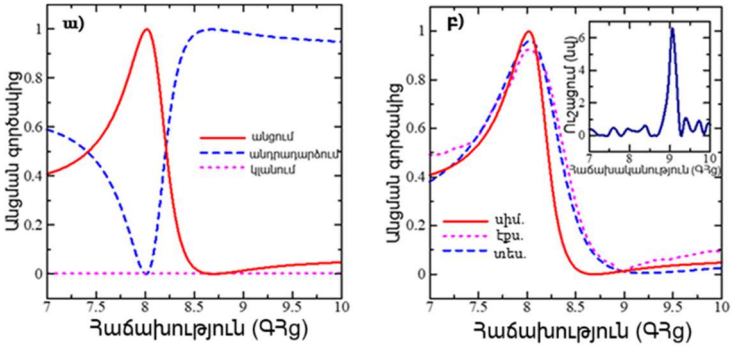
Նկար 2: *Փորձարարական կարգավորում, որն ունի մեկուսացված միկրոալիքային բաց-օդային համակարգ և VNA՝ ԵՄՄ-ով, որը տեղադրված է հարթ ալիքի ձևավորման գոտում:*

Առաջարկված ԵՄՄ-ի միկրոալիքային արձագանքը լրացուցիչ հետազոտվել է 3D լրիվ-ալիքային թվային մոդելավորման միջոցով, օգտագործելով վերջավոր տարրերի մեթոդով աշխատող COMSOL Multiphysics ծրագրային ապահովումը:

Համակարգի ճիշտ սիմուլյացիայի համար, միջերեսների վրա, որոնք զուգահեռ են ընկնող ալիքի տարածման ուղղությանը, կիրառվել են պարբերական պայմաններ: Որպես ձողերի նյութ ընտրվել է Cu-ն 5.8×10^7 Սմ/մ միկրոալիքային հաղորդականությամբ: Պարբերական համակարգը գրգռվել է հարթ ալիքով, որը բևեռացված է ձողերի առանցքներով:

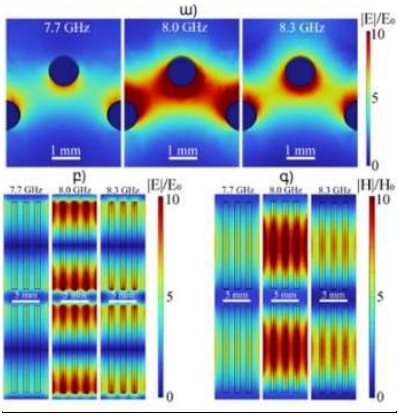
Երկշերտ կառուցվածքի անդրադարձման, անցման և կլանման միկրոալիքային արձագանքը, պատկերված է նկար 3(ա)-ում՝ համապատասխանաբար կապույտ, կարմիր և մանուշակագույն գծերով:

Նկար 3-ի (բ)-ում ներկայացված է ԵՄՄ-ի անցման սպեկտրների համեմատությունը, որոնք ստացվել են թվային մոդելավորմամբ, տեսական հաշվարկով և փորձարարական չափումներով, որոնք ցուցադրված են համապատասխանաբար կարմիր, կապույտ և մանուշակագույն գծերով:



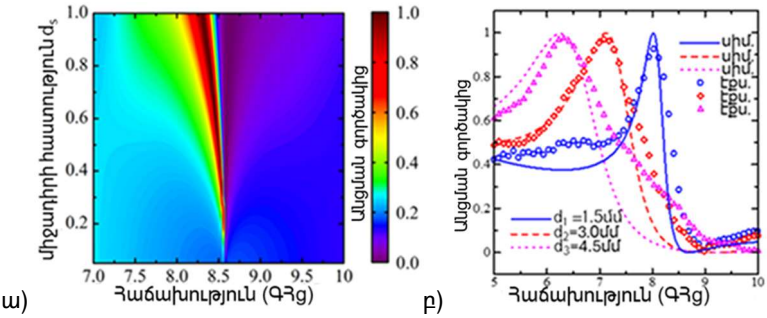
Նկար 3: *(ա) ԵՄՄ-ի 7-10 ԳՀց հաճախականային տիրույթում, մոդելավորված անցման (կարմիր լիարժեք գիծ), անդրադարձման (կապույտ կտրտված գիծ) և կլանման (շագանակագույն կետավոր գիծ) սպեկտրները: (բ) ԵՄՄ-ի անցման գործակցի համեմատությունը, որը ստացվել է թվային մոդելավորման միջոցով (կարմիր լիարժեք գիծ), տեսական հաշվարկի (կապույտ կտրտված գիծ) և փորձնական չափումների (շագանակագույն կետավոր գիծ) միջոցով: Բոլոր ձողերը ունեն 17 մմ երկարություն և 0.8 մմ տրամագիծ: Պարբերականությունները l_x=19 մմ և l_z=3.8 մմ են, իսկ միջշերտային հեռավորությունը՝ 1.5 մմ: Նկար բ-ում ներդրված գրաֆիկում պատկերված է ԵՄՄ-ի փորձնականորեն չափված խմբային ուշացումը:*

Հետազոտվել է էլեկտրական դաշտի բաղադրիչների բաշխման քարտեզները (նկար 4) տարբեր հաճախականություններում՝ լայնակի և երկայնակի հատույթների երկայնքով, որոնք տրամադրում են արժեքավոր տեղեկություններ գործընթացը վերլուծելու համար: Քանի որ համակարգի կլանումը աննշան է, հետագա վերլուծության մեջ մենք կցուցադրենք միայն անցումը՝ էլեկտրամագնիսական արձագանքը բնութագրելու համար:



Նկար 4: *Նորմալացված էլեկտրական դաշտի բաշխումը (ա) XY, (բ) XZ հարթություններում, և (գ) նորմալացված մագնիսական դաշտի բաշխումը XZ հարթությունում: Բաշխումները ներկայացված են ռեզոնանսային (8.0 ԳՀց) և ±300 ՄՀց տեղաշարժված հաճախականություններում: Բաժանարարի դիէլեկտրիկ թափանցելիությունը 1 է, իսկ երկրաչափական պարամետրերը նույնն են, ինչ Նկ. 3-ում: Սև եզրագծերը Cu-ի ծողերի սահմաններն են:*

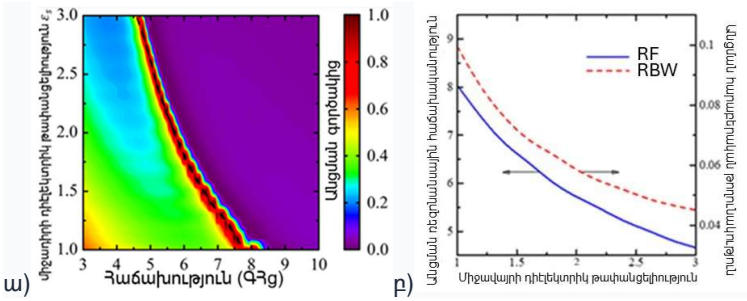
Նկար 5-ում ներկայացված են մետամակերեսի անցման գործակիցները, որոնք ստացվել են փորձի և մոդելավորման միջոցով՝ միջադիրի հաստության (d_s) տարբեր արժեքների համար:



Նկար 5: *ա) Փոխանցման ուրվագծային քարտեզը, որը ցույց է տալիս անցանելիությունը՝ կախված հաճախականությունից և միջադիրի հաստությունից, որն փոփոխվում է 0.05 մմ-ից մինչև 1 մմ: բ) Փորձարարական (նշաններով) և մոդելավորված (գծերով) անցանելիության սպեկտրները՝ տարբեր BMS միջադիրի հաստությունների համար: Մնացած բոլոր գեոմետրիկ պարամետրերը նույնն են, ինչ նկար 3-ում:*

Նկար 5(ա)-ում պատկերված է թափանցելիության կոնտուրային քարտեզը՝ որպես հաճախության և միջադիրի հաստության ֆունկցիա, իսկ նկար 5(բ)-ում համեմատվում են 1.5, 3 և 4.5 մմ միջշերտային հեռավորությունների դեպքում թվային մոդելավորումների (հոծ գծեր) և փորձերի (նշաններ) միջոցով ստացված թափանցելիության սպեկտրները:

6-րդ նկարում ցույց են տրված տարբեր արժեքների համար անցման գործակցի դիսպերսիոն կորերը՝ տարանջատող միջավայրի դիէլեկտրական թափանցելիության:



Նկար 6: *(ա) Թափանցելիության ուրվագծային քարտեզը՝ որպես հաճախության և միջավայրի դիէլեկտրիկ թափանցելիության ֆունկցիա, որը տատանվում է 1-ից 3: (բ) ԵՄՄ ռեզոնանսային հաճախության (ՌՀ ձախ առանցք) և հարաբերական թողունակության շերտի (ՀԹՇ աջ առանցք) կախվածությունը միջավայրի դիէլեկտրիկ թափանցելիությունից: Բոլոր երկրաչափական պարամետրերը նույնն են, ինչ Նկ. 3-ում:*

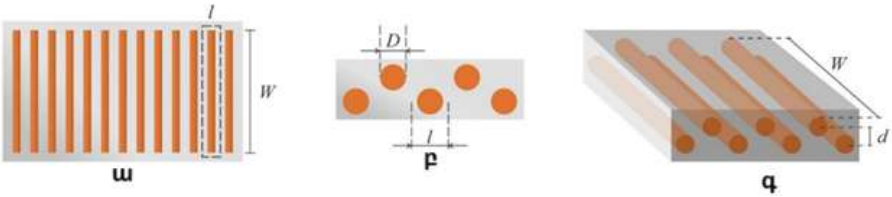
Նկար 6(ա)-ում կոնտուրային քարտեզի վրա պատկերված է թափանցելիության սպեկտրների կախվածությունը տարանջատողի դիէլեկտրական թափանցելիությունից: 6(բ) նկարում ցույց են տրված փոխանցման ռեզոնանսային հաճախականությունը և դրանց նորմալացված թողունակությունը՝ կապված համապատասխանաբար ձախ և աջ առանցքների հետ:

Այսպիսով փոխազդվող հաղորդիչ ձողերի հիմքով ստեղծված երկշերտ մետամակերևույթում հանդես եկող Ֆանոի ռեզոնանսի պայմաններում, անցման գործակցի հաճախականային սպեկտրի կորը ունի սուր գագաթ, որի դիրքը կառավարվում է շերտերի միջև հեռավորության և միջշերտային միջավայրի դիէլեկտրիկ թափանցելիության փոփոխությամբ:

Երրորդ գլխում հետազոտվել է միկրոալիքային ռեզոնանսները ուժեղ փոխազդվող հաղորդիչ ձողերի համակարգում, փորձերը կատարվել է ուղղանկյուն ալիքատարում:

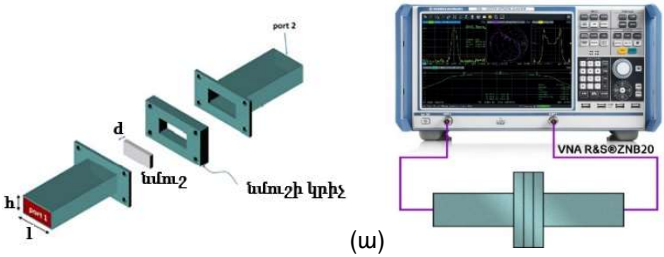
Երրորդ գլխի առաջին պարագրաֆում ուսումնասիրվել են պղնձե ձողերից պատրաստված մետամակերևույթների յուրահատուկ հատկությունները որոնք պայմանավորված են կառուցվածքային գործոնների համադրությամբ [3,4]:

Փորձի ընթացքում որպես նմուշ օգտագործվել է պարբերաբար տեղակայված ձողերից կազմված երկշերտ համակարգ որը պատկերված է նկար 7-ում:



Նկար 7: *Նմուշի՝ երկայնական (ա), լայնակի (բ) և տարածական (գ) տեսքերը:*

Կառուցվածքը պատրաստված է W=15, 17.5, 20 մմ երկարությամբ և D=0.6, 0.9, 1.1 մմ տրամագծերով պղնձե ձողերից, որոնցից յուրաքանչյուրը տվյալ թաղանթի վրա իր ամենամոտ հարևաններից առանցքին ուղղահայաց ուղղությամբ հեռու է l=3 մմ-ով, իսկ շերտերի միջև հեռավորությունը d=1, 2, 3 մմ է: Ձողերը գտնվում են ε=2 դիէլեկտրիկ թափանցելիությամբ միջավայրում (տեֆլոն): Այսպիսով, մի շերտի յուրաքանչյուր ձող ակտիվորեն փոխազդում է մյուս շերտի երկու հարևան ձողերի հետ: Փորձարարական նմուշը գտնվում է երկպորտանի միկրոալիքային ալիքատարի ներսում (նկար 8ա): Փոխանցման սպեկտրը չափվել է Rohde and Schwarz ZNB20 վեկտորային անալիզատորի միջոցով (նկար 8բ):

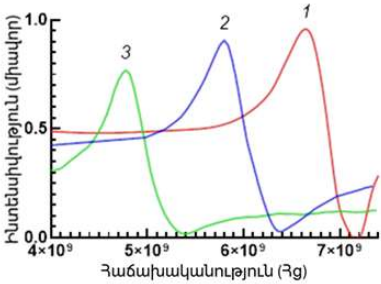


Նկար 8: Միկրոալիքի անցման անցումը մետանյութով: Երկպորտանի միկրոալիքային ալիքատար (ա), վեկտորական անալիզատոր Rohde and Schwarz ZNB20 (բ).

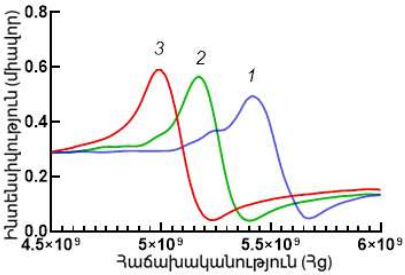
Փորձի ընթացքում որոշվել են անցման գործակիցների սպեկտրալ կախվածությունները խնդրի պարամետրերի տարբեր արժեքների համար: Դրա հետ

մեկտեղ, բոլոր ներկայացված կորերի համար բնորոշ է հաճախականությունից կախվածության ընդհանուր վարքագիծը: Ներկայացված պատկերներից հեշտ է նկատել, որ հաճախականության աճի հետ մեկտեղ անցման գործակիցը աճում է, հասնելով մոտ միավոր առավելագույն արժեքի, ապա կտրուկ ընկնում է զրոյի: Այս վարքագիծը բնորոշ է դասական Ֆանո ռեզոնանսին, որը իրականացվում է փոխկապակցված օսցիլյատորների համակարգում:

S12 անցման գործակիցների կախվածության կորերը հաճախականությունից տարբեր ձողերի երկարության դեպքում ներկայացված են նկար 9-ում:Ինչպես սպասվում էր, ձողերի երկարության ավելացման հետ մեկտեղ ռեզոնանսային փոխազդեցության սպեկտրալ տիրույթը միկրոալիքի հետ տեղափոխվում է ցածր հաճախականությունների տիրույթ: Դա պայմանավորված է նրանով, որ ակսիալ սիմետրիայով կանգուն ալիքի ձևավորումը տեղի է ունենում ձողերի երկարության վրա, որոնք մոտ են ընկնող ալիքի կես երկարությանը:



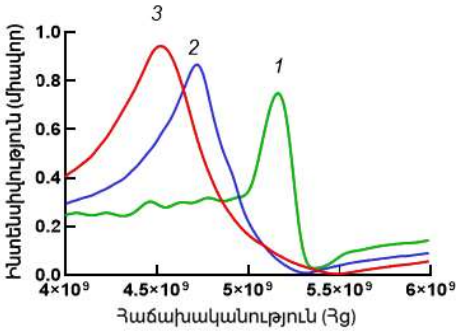
Նկար 9: *Փոխանցման գործակիցների սպեկտրը S12 տարբեր երկարություններով ձողերի համար W=15; 17,5; 20 մմ, որոնք համապատասխանում են համապատասխանաբար 1,2,3 գրաֆիկներին: Այստեղ D=0.9mm, l=3mm, d=2mm:*



Նկար 10: *S_{12} անցման գործակցի սպեկտրները ձողի տրամագծերի փոփոխության դեպքում՝ D=0.6; 0.9; 1.1 մմ, որոնք համապատասխանում են համապատասխանաբար 1, 2, 3 գրաֆիկներին: Այստեղ W=20մմ, l=3մմ, d=2մմ:*

Նկար 10-ից երևում է, որ ռեզոնանսային հաճախականությունը տեղափոխվում է դեպի ցածր հաճախությունների տիրույթ ծողիկի տրամագծի մեծացման դեպքում:

Հատուկ հետաքրքրություն է ներկայացնում անցման գործակցի վարքագիծը շերտերի միջև հեռավորության (d) նվազման դեպքում (նկ. 11): Երբ d = 1 մմ, անցման գործակցի դիսպերսիայի թեքության մեծությունը հասնում է առավելագույն արժեքի՝ $\Delta T/_{\Delta\nu} \approx 10/$ԳՀց: ΔT-ը անցման գործակցի փոփոխությունն է, իսկ $\Delta\nu$-ը՝ հաճախության տեղաշարժը:



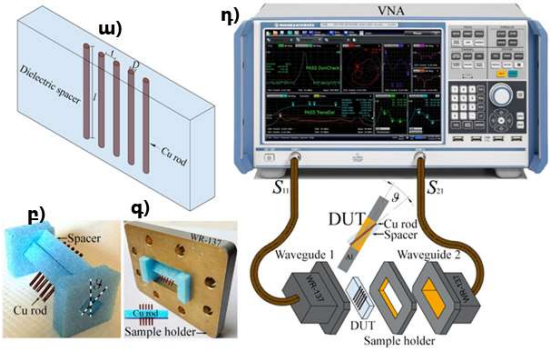
Նկար 11: *S_{i2} անցման գործակիցների սպեկտրն այն դեպքում, երբ ծողի տրամագիծը d=1; 2; 3 մմ է, որոնք համապատասխանաբար համապատասխանում են 1, 2, 3 գծագրերին: Այստեղ W=17.5 մմ, D=0.9 մմ, l=3 մմ:*

Ուսումնասիրվող պրոցեսը պայմանավորված է հարևան շերտերի ծողերի փոխազդեցությամբ: Բանն այն է, որ միկրոալիքի հետ ռեզոնանսային փոխազդեցության արդյունքում առաջացող կանգուն համաչափ ալիքը ուժեղ ռադիալ էլեկտրական բաղադրիչ ունի: Որոշ իմաստով յուրաքանչյուր ծող հանդես է գալիս որպես դիպոլ և նրանց միջև փոխազդեցությունը իրականացվում է էլեկտրական դաշտերի միջոցով: Այդ ժամանակ հասկանալի է դառնում այդ տիպի միաշերտ կառուցվածքներում ազդեցությունը դիտելու անհնարինության պատճառը, քանի որ ծողի երկու հարևանների դաշտերը կոմպեսացնում են միմյանց:

Այսպիսով, երկշերտ մետամակերևույթի հետ միկրոալիքների ռեզոնանսային փոխազդեցության արդյունքում դիտվում է անցման գործակցի ուժեղ դիսպերսիա: Ընկնող միկրոալիքի հաճախականության սպեկտրի նեղ տիրույթում անցման գործակցի կորը ունի սուր գագաթ, ինչը հնարավորություն է տալիս օգտագործել կառուցվածքը որպես շերտային ֆիլտր: Ռեզոնանսային հաճախականությունը տեղափոխվում է ցածր հաճախականությունների ոլորտ, երբ ավելանում է ծողերի երկարությունը, դրանց տրամագիծը, ինչպես նաև շերտերի

միջև հեռավորությունը, ինչը բացում է հնարավորություններ միկրոալիքների կառավարման և վերահսկման համար:

Երրորդ գլխի երկրորդ պարագրաֆում հետազոտվող ռեզոնատորը կազմված է հաղորդիչ ձողերի համակարգից, որոնցից յուրաքանչյուրի երկարությունը մոտավորապես հավասար է ընկնող ալիքի կես երկարությանը և ծառայում է որպես մետամակերևույթի տարր: Ռեզոնանսային փոխազդեցության պատճառով, յուրաքանչյուր ձողում ձևավորվում է Զոմմերֆելդի կանգուն ալիք, որի դաշտերը ունեն ռադիալ համաչափություն [1]: Այս ալիքներում էլեկտրական դաշտի լայնակի բաղադրիչը զգալիորեն մեծ է երկայնակի բաղադրիչից, ապահովելով ուժեղ կապ զուգահեռ ձողերի միջև: Ալիքային դաշտերը սրընթաց մեծանում են տեղայինացման տիրույթում, երբ ձողերում դաշտերը տատանվում են հակափուլով, միմյանցից բաժանված լինելով ալիքի երկարությունից շատ փոքր հեռավորությամբ: Դաշտերի տեղայինացման բարելավմանը նպաստող մեկ այլ կարևոր գործոն է ձողերի համակարգի տեղադրումը ուղղանկյուն ալիքատքրում, ինչը միայն թույլ է տալիս հիմնական մոդի գոյությունը [5-7]: Այս կառուցվածքը սահմանափակում է անհամասեռ դաշտերի տարածումը համակարգում, ավելի մեծացնելով լոկալիզացված ալիքային դաշտերը:

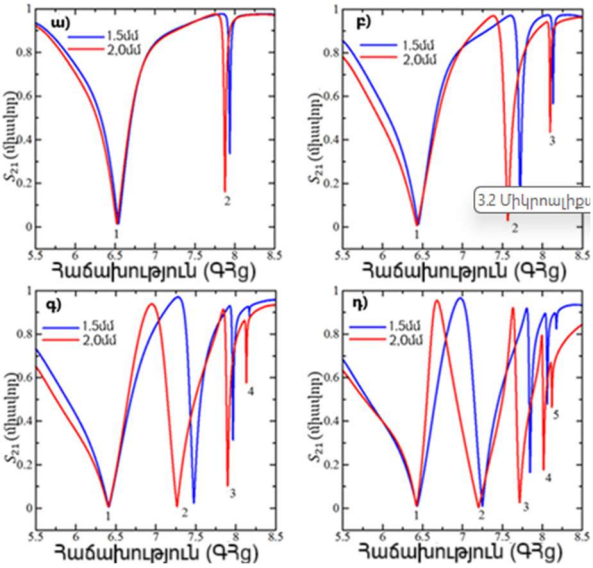


Նկար 12: *Փորձարկվող նմուշի կոնֆիգուրացիա: (ա) սխեմատիկ պատկեր, (բ) լուսանկար և (գ) տեղադրում ալիքատարային համակարգում: (դ) Ընդհանուր փորձարարական սխեման և փորձարկվող նմուշի կողմնորոշումը ալիքատարով չափումների ընթացքում:*

Փորձերի համար ընտրվել են նույնանման պղնձե ձողեր, որոնց տրամագիծը 1 մմ է, իսկ երկարությունը 17 մմ, որպես փորձարկվող նմուշ, ինչպես ցույց է տրված 12 (ա) և (բ) նկարներում: 2 կամ 3 ձողերից կազմված համակարգերը տեղադրվել են WR-137 (Pasternak UDR70) ուղղանկյուն ալիքատարում: Զուգահեռ տեղադրված պղնձե ձողերի և ալիքատարի ուղղահայաց առանցքի միջև անկյունը (այսինքն՝ միկրոալիքների գծային բևեռացման ուղղությունը) = 45° ինչը զգալիորեն

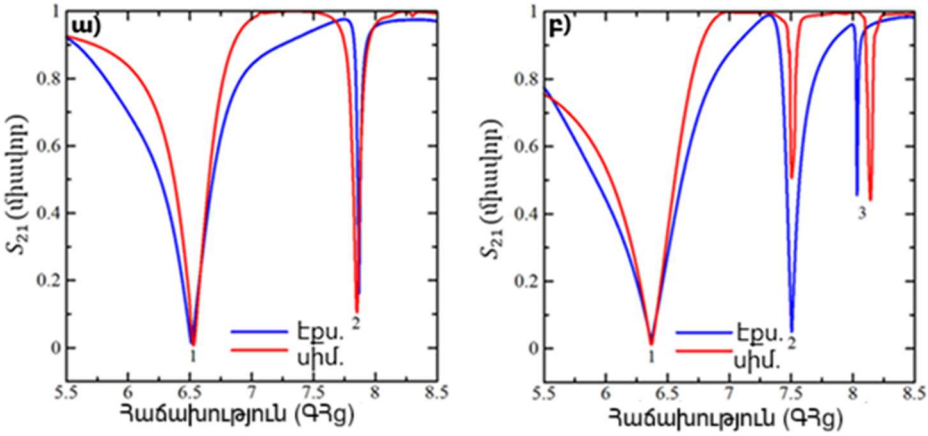
նվազեցնում է նրանց փոխազդեցությունը ալիքատարի պատերի հետ՝ միաժամանակ ապահովելով դրանց ներսում կանգուն ալիքների ձևավորումը: WR-137 ալիքատարի հիմնական մոդը գործում է 4.3–8.6 ԳՀց հաճախականության միջակայքում: 12 (գ) և (դ) նկարներում ներկայացված են ուսումնասիրվող ծողերի համակարգի և փորձի սխեմատիկ նկարները: Հաղորդման պարամետրերը չափվել են վեկտորային ցանցային վերլուծիչով (VNA)՝ Rohde & Schwarz ZNB20: Սյուների ճիշտ դիրքի ապահովումը ալիքային ուղեցույցի ներսում իրականացվել է լազերային նշման միջոցով պոլիմերային միջադիրների մեջ ճշգրիտ դիրքերը նախապես սահմանելով: Նշում ենք, որ պոլիմերը լիովին թափանցիկ է միկրոալիքային սպեկտրում:

Փորձարկվող նմուշի չափված միկրոալիքային արձագանքը ներկայացված է 13 նկարում: Տեսական վերլուծությունը կանխատեսում է, որ կապակցված ռեզոնատորների համակարգում (ծողերում) ռեզոնանսների թիվը համապատասխանում է ծողերի թվին, եզրակացություն, որի հավաստիությունը հաստատվում է 13-րդ նկարի փորձարարական տվյալներով: Ձողերի քանակի ավելացման հետ ռեզոնանսների թվի աճը պայմանավորված է հարակից ծողերի միջև առկա կապով:



Նկար 13: *TE10 ուղղանկյուն ալիքատարի ռեժիմի չափված փոխանցման սպեկտրները, որոնք փոխազդում են փորձարկվող նմուշի հետ, որը բաղկացած է (ա) 2, (բ) 3, (գ) 4 և (դ) 5 պղնձե ծողերից բաղկացած գծային զանգվածից: Կապույտ գծերը համապատասխանում են ծողերի միջև 1.5 մմ հեռավորությանը, իսկ կարմիր գծերը՝ 2 մմ հեռավորությանը:*

Մոդելավորված անցումային սպեկտրները ցույց են տալիս բարձր ճշգրտությամբ համընկնում փորձարարական արդյունքների հետ, ինչպես պատկերված է նկար 14-ում:

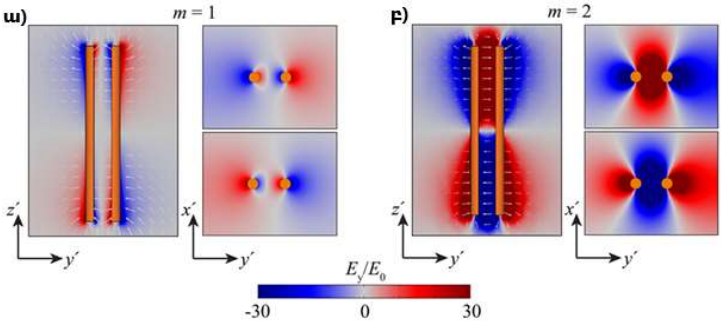


Նկար 14: *Փորձարարական (կապույտ գծեր) և թվային (կարմիր գծեր) անցման սպեկտորները փորձարկվող նմուշի համար, որտեղ (ա) 2 ձող, (բ) 3 ձող, և միջձողային հեռավորությունը 2 մմ է:*

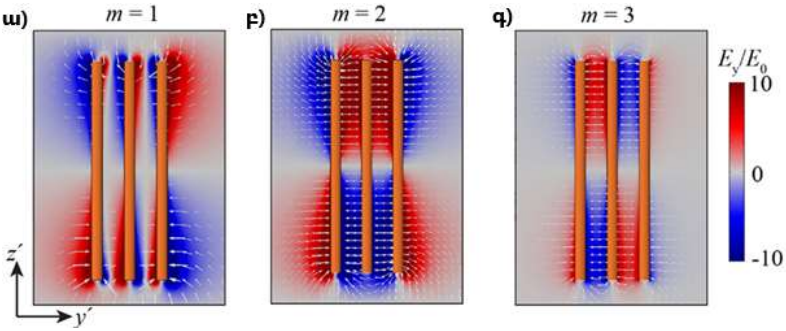
Բացի այդ, մոդելավորումից ստացված էլեկտրական դաշտի բաղադրիչների բաշխումը տրամադրում է արժեքավոր տեղեկություններ գործընթացը վերլուծելու համար, ինչպես պատկերված է նկար 15-ում և 16-ում:

Մոդերից առաջինը ձևավորվում է երկու ձողերում միանուն լիցքերի համափուլ տատանման ընթացքում (Նկար 15ա): Ըստ որում հանդես եկող վանողությունը չի նպաստում լիցքի մակերևույթային խտության աճին և ձողերի միջև կապի գործակիցը փոքր է: Բացի այդ համակարգում դիպոլայի ճառագայթման համար ստեղծվում են նպաստավոր պայմաններ, ինչը բերում է ռեզոնատորներում կորուստների աճին:

Սկզբունքորեն այլ է իրավիճակը երկրորդ մոդի դեպքում, երբ միանուն լիցքերի տատանումը ձողերում հակափուլ է (նկար 15բ): Այստեղ տարանուն լիցքերի ձգողության հետևանքով աճում է դրանց մակերևույթային խտությունը (էլեկտրաունակային էֆֆեկտ): Դրա հետևանքով աճում է նաև փոխազդեցության գործակիցը: Բացի այդ էապես մարում է, միմյանց շատ մոտ գտնվող, հակափուլով տատանվող դիպոլների ճառագայթումը, ինչի հետևանքով փոքր են կորուստները ռեզոնատորում:



Նկար 15: *Գունային քարտեզներ և սլաքներ, որոնք ցույց են տալիս երկու ձողերի համար էլեկտրական դաշտի E_y բաղադրիչի բաշխումը, համապատասխանաբար (ա) առաջին և (բ) երկրորդ կարգի ռեզոնանսային ռեժիմներին 6,51 ԳՀց և 7,87 ԳՀց հաճախականություններով: Բաշխումները ցուցադրվում են ձողերի հետ կապված երկայնական (y'z') և լայնական (x'y') հարթություններում: x'y' հարթությունները գտնվում են ձողերի ստորին և վերին եզրերից 2 մմ վերև և ներքև: Երկրաչափական պարամետրերը համընկնում են Նկ. 14-ում ներկայացվածների հետ:*



Նկար 16: *Գունային քարտեզները և սլաքները, որոնք արտացոլում են երեք ձողերի համակարգի էլեկտրական դաշտի Ey բաղադրիչի տարածական բաշխումը՝ համապատասխանեցված (ա) առաջին, (բ) երկրորդ և (գ) երրորդ կարգի ռեզոնանսային մոդերին՝ 6.37 ԳՀց, 7.50 ԳՀց և 8.03 ԳՀց հաճախականություններում: Երկրաչափական պարամետրերը համապատասխանեցված են Նկար 14-ում բերված տվյալներին:*

Այս համակարգում ալիքային դաշտերի վարքագիծը համահունչ է տեսական վերլուծությունից արտահանված եզրակացություններին: m=1 մոդի դեպքում (Նկ. 16 ա)), երեք ձողերն էլ տատանվում են համափուլ, որը հանգեցնում է դիպոլային ճառագայթման, որը բնորոշվում է ճառագայթման նշանակալի կորուստներով և

ռեզոնանսային գծի լայնության մեծացմամբ: m=2 մոդի դեպքում (Նկ. 16 բ)), առաջին և երրորդ ծողերը տատանվում են հակափուլ, մինչդեռ երկրորդ ծողը աննշան ներդրում ունի գործընթացում: Սա հանգեցնում է քառաբևեռ ցրված ճառագայթման, ռեզոնանսային գծի լայնության նվազեցման և ալիքային դաշտերի էական աճի: Նմանատիպ իրավիճակ է դիտվում m=3 մոդի համար (Նկ. 16 գ)), որտեղ առաջին և երրորդ ծողերը տատանվում են համափուլ, իսկ երկրորդ ծողը տատանվում է հակափուլ, սակայն ավելի մեծ ամպլիտուդով:

Այսպիսով, ենթաալիքային չափերում հավասարահեռ դասավորված, վերջավոր թվով և երկարությամբ հաղորդիչ ծողերի համակարգը հաճախությունների միկրոալիքային տիրույթում ծառայում է որպես բաց ռեզոնատոր, որում մոդերի քանակը հավասար է ծողերի թվին: Մոդերի ձևավորումը պայմանավորված է ծողերոում լիցքի տարբեր ամպլիտուդներով և փուլերով կոհերենտ տատանումով, ինչն ուղեկցվում է ալիքային դաշտերի տեղայինացմամբ: Մասնավորապես, հարևան ծողերում լիցքի հակադարձ փուլով տատանման պայմաններում կտրուկ նվազում են ճառագայթային կորուստները և ռեզոնատորի բարորակությունը հասնում է 400-ի: Հատկանշական է, որ անկախ ծողերի քանակից, անցման սպեկտրում հանդես եկող առաջին ռեզոնանսի դիրքը էապես չի փոխվում, մնալով 6.5ԳՀց-ի մերձակայքում (նկ. 13): Այս դեպքում ալիքային դաշտերի տեղայինացման ծավալը մոտ երկու կարգով փոքր է ռեզոնանսային ալիքի երկարության խորհանարդից, իսկ էլեկտրական դաշտի լարվածությունը աճում է 30 անգամ:

ԵԶՐԱԿԱՑՈՒԹՅՈՒՆ

Ատենախոսությունում հետազոտվել են, որպես բաց միկրոալիքային ռեզոնատոր ծառայող, հաղորդիչ ձողերի համակարգում ձևավորվող ռադիալ սիմետրիայով, կապված կանգուն ալիքների ռեզոնանսային հատկությունները և դրանց հիման վրա ստեղծված մետամակերևույթների միջոցով ալիքային ազդանշանների կառավարման հնարավորությունները: Ստացվել են հետևյան հիմնական արդյունքները:

1. Հաղորդիչ, վերջավոր երկարությամբ ձողերում, ընկնող ալիքի ազդեսությամբ գեներացված կանգուն միկրոալիքները միմյանց հետ ուժեղ կապված են և ձևավորում են կոլեկտիվ մոդեր, որոնց վերահսկումը լրացուցիչ հնարավորություններ է տալիս կառավարելու մետամակերևույթով անցնող ալիքային ազդանշանը:

2. Որպես մետամակերևույթ ծառայող, պարբերաբար դասավորված հաղորդիչ ձողերի երկշերտ համակարգում հանդես եկող Ֆանոյի ռեզոնանսը, միկրոալիքային հաճախությունների նեղ տիրույթում, հանգեցնում է անցման գործակցի կտրուկ և էական անկման, ինչը կառավարվում է շերտերի միջև հեռավորության և միջշերտային միջավայրի դիէլեկտրիկ թափանցելիության փոփոխությամբ:

3. Ուղղանկյուն միկրոալիքային ալիքատարով տարածվող հիմնական մոդի անցումը հաղորդիչ ձողերից կազմված երկշերտ մետամակերևույթով, կտրուկ արտահայտված դիսպերսիվ բնույթ ունի, ինչը պայմանավորված է ձողերի միջև ռեզոնանսային փոխազեսության գործակցի արժեքում կեղծ անդամի առկայությամբ: Մասնավորապես, 1մմ տրամագծով և 17,5մմ երկարությամբ պարբերաբար դասավորված պղնձյա ձողերի երկշերտ համակարգի հիման վրա ստեղծված մետամակերևույթով միկրոալիքի անցման գործակցի արժեքի անկումը 0,8-ից մինչև 0 իրականանում է 8-8.5ԳՀց հաճախությունների տիրույթում:

4. Ենթաալիքային չափերում հավասարահեռ դասավորված, վերջավոր թվով և երկարությամբ հաղորդիչ ձողերի համակարգը հաճախությունների միկրոալիքային տիրույթում ծառայում է որպես ռեզոնատոր, որում մոդերի քանակը հավասար է ձողերի թվին: Համակարգում միկրոալիքային դաշտերի տեղայինացման ծավալը մոտ երկու կարգով փոքր է ռեզոնանսային ալիքի երկարության խորհանարդից, էլեկտրական դաշտի լարվածությունը աճում է 30 անգամ, իսկ բարորակությունը հասնում է 400-ի:

Հղված գրականություն

1. Abrahamyan, T., Haroyan, H., Hambaryan, D., Parsamyan, H., Babajanyan, A., Lee, K., ... & Nerkararyan, K. (2022). Surface-standing-wave formation via

resonance interaction of a finite-length conductive rod with microwaves. *Journal of Physics D: Applied Physics*, *55*(44), 445001.
2. Pfeiffer, C., & Grbic, A. (2014). Bianisotropic metasurfaces for optimal polarization control: Analysis and synthesis. *Physical Review Applied*, *2*(4), 044011.
3. Ebel, S., Deng, Y., Hentschel, M., Meng, C., Sande, S. I., Giessen, H., ... & Bozhevolnyi, S. I. (2023). Optical reflective metasurfaces based on mirror-coupled slot antennas. *Advanced Photonics Nexus*, *2*(1), 016005-016005.
4. Glybovski, S. B., Tretyakov, S. A., Belov, P. A., Kivshar, Y. S., & Simovski, C. R. (2016). Metasurfaces: From microwaves to visible. *Physics reports*, *634*, 1-72.
5. Papantonis, S., Ridler, N. M., & Lucyszyn, S. (2014). Rectangular waveguide enabling technology using holey surfaces and wire media metamaterials. *Sensors and Actuators A: Physical*, *209*, 1-8.
6. Teberio, F., Percaz, J. M., Arregui, I., Martin-Iglesias, P., Lopetegi, T., Laso, M. A., & Arnedo, I. (2018). Rectangular waveguide filters with meandered topology. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, *66*(8), 3632-3643.
7. García-Martínez, H., Torregrosa-Penalva, G., Àvila-Navarro, E., Delmonte, N., Silvestri, L., & Bozzi, M. (2022). 3D-printed electromagnetic band-gap band-pass filter based on empty single-ridge waveguide. *IEEE Access*, *10*, 53954-53962.

Հրատարակված աշխատանքների ցուցակ

1. Abrahamyan, T., Ohanyan, G., Hambaryan, D., Kalantar, D., Parsamyan, H., Haroyan, H., ... & Nerkararyan, K. (2024). Highly dispersive transmission conditions for a conductive rods-based ultrathin bilayer metastructure. *Journal of Physics D: Applied Physics*, *57*(35), 355108.
2. ОГАНЯН, Г. (2024) Особенности прохождения микроволны через двухслойную метаповерхность из проводящих стержней. *Proceedings of the NAS RA\: Physics, 59(1),* 0002-3035.
3. Abrahamyan, T., Ohanyan, G., Hambaryan, D., Movsisyan, A., Parsamyan, H., Haroyan, H., ... & Nerkararyan, K. (2025). Resonant enhancement and confinement of microwave field in coupled conductive rod systems. *Physica Scripta*, *100*(2), 025515.

ГОР ОГАНЯН

ФАЗОСОГЛАСОВАННЫЕ МИКРОВОЛНОВЫЕ МЕТАПОВЕРХНОСТИ

ВЫВОДЫ

В диссертации исследованы резонансные свойства связанных стоячих волн с радиальной симметрией, формирующихся в системе проводящих стержней, которые служат открытым микроволновым резонатором, и возможности управления волновыми сигналами с помощью метаповерхностей, созданных на их основе. Получены следующие основные результаты.

1. Стоячие микроволны, генерируемые в проводящих стержнях конечной длины под воздействием падающей волны, сильно связаны между собой и формируют коллективные моды, управление которыми предоставляет дополнительные возможности для контроля волнового сигнала, проходящего через метаповерхность.
2. Фано-резонанс, возникающий в двухслойной системе периодически расположенных проводящих стержней, служащих метаповерхностью, в узком диапазоне микроволновых частот приводит к резкому и значительному снижению коэффициента пропускания, что регулируется изменением расстояния между слоями и диэлектрической проницаемости межслойной среды.
3. Переход основной моды, распространяющейся в прямоугольном микроволновом волноводе, через двухслойную метаповерхность, состоящую из проводящих стержней, имеет резко выраженный дисперсионный характер, что обусловлено наличием мнимого члена в значении коэффициента резонансного взаимодействия между стержнями. В частности, снижение значения коэффициента пропускания микроволны через метаповерхность, созданную на основе двухслойной системы периодически расположенных медных стержней диаметром 1 мм и длиной 17,5 мм, происходит в диапазоне частот 8-8,5 ГГц от 0,8 до 0.
4. Система проводящих стержней конечной длины и числа, равномерно расположенных в субволновых размерах, служит резонатором в микроволновом диапазоне частот, в котором количество мод равно числу стержней. Объем локализации микроволновых полей в системе примерно на два порядка меньше куба длины резонансной волны, напряженность электрического поля увеличивается в 30 раз, а добротность достигает 400.

GOR OHANYAN

PHASE-MATCHED MICROWAVE METASURFACES

CONCLUSIONS

The dissertation investigates the resonance properties of coupled standing waves with radial symmetry, formed in a system of conducting rods serving as an open microwave resonator, and the possibilities of controlling wave signals using meta surfaces created based on them. The following main results were obtained:

1. Standing microwaves generated in conducting rods of finite length under the influence of an incident wave are strongly coupled with each other and form collective modes, the control of which provides additional opportunities for controlling the wave signal passing through the meta surface.
2. The Fano resonance arising in a two-layer system of periodically arranged conducting rods serving as a meta surface in a narrow range of microwave frequencies leads to a sharp and significant decrease in the transmission coefficient, which is regulated by changing the distance between the layers and the dielectric permittivity of the interlayer medium.
3. The transition of the fundamental mode propagating in a rectangular microwave waveguide through a two-layer meta surface consisting of conducting rods has a sharply expressed dispersive nature, which is due to the presence of an imaginary term in the value of the resonance interaction coefficient between the rods. In particular, the decrease in the transmission coefficient of the microwave through the meta surface, created based on a two-layer system of periodically arranged copper rods with a diameter of 1 mm and a length of 17.5 mm, occurs in the frequency range of 8-8.5 GHz from 0.8 to 0.
4. A system of conducting rods of finite length and number, uniformly arranged in subwavelength dimensions, serves as a resonator in the microwave frequency range, in which the number of modes is equal to the number of rods. The volume of localization of microwave fields in the system is approximately two orders of magnitude smaller than the cube of the resonance wavelength, the electric field strength increases by 30 times, and the quality factor reaches 400.