

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ, ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ,  
ՄՇԱԿՈՒՅԹԻ ԵՎ ՍՊՈՐՏԻ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ

ԵՐԵՎԱՆԻ ՊԵՏԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

Համբարյան Դավիթ Սեդրակի

**ԳՐԱՖԻՏԵ ՄԻԿՐՈԺԱՊԱՎԵՆԻ ԵՎ ՄԻԿՐՈԳԼԱՆԻ ԱԼԻՔՅՈՒՆ  
ԱՐՁԱԳԱՆՔԻ ՄԵԾՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ՓՈՒԼԻ ԿԱՌԱՎԱՐՈՒՄԸ**

Ա. 04.03 – «Ռադիոֆիզիկա» մասնագիտությամբ  
Ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների թեկնածուի  
Գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ – 2024

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ, КУЛЬТУРЫ И СПОРТА  
РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ

ЕРЕВАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Амбарян Давид Седракович

**УПРАВЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНОЙ И ФАЗОЙ ВОЛНОВОГО ОТКЛИКА ОТ  
ГРАФИТОВОЙ МИКРОЛЕНТЫ И МИКРОЦИЛИНДРА**

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени кандидата  
Физико-математических наук по специальности  
01.04.03 – “Радиофизика”

ЕРЕВАН – 2024

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Երևանի պետական համալսարանում:

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

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ **Ֆ.-մ.գ.դ., պրոֆեսոր  
Ա. Ժ. Մուրադյան  
Ֆ.-մ.գ.դ.,  
Ժ. Ս. Գևորգյան**

Առաջատար կազմակերպություն՝ ՀՀ ԳԱԱ Ռադիոֆիզիկայի և էլեկտրոնիկայի  
ինստիտուտ

Պաշտպանությունը կայանալու է 2024թ հունիսի 24-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 2024 թ. մայիսի 20-ին:

Մասնագիտական խորհրդի  
գիտական քարտուղար



**Ֆ.-մ.գ.թ., դոցենտ  
Վ. Պ. Քալանթարյան**

---

Тема диссертации утверждена в Ереванском государственном университете.

Научный руководитель: **д.ф.-м.н., профессор  
Х. В. Неркарян**

Официальные оппоненты: **д.ф.-м.н., профессор  
А. Ж. Мурадян  
д.ф.-м.н.  
Ж. С. Геворгян**

Ведущая организация: **Институт радиофизики и электроники НАН РА**

Защита диссертации состоится 24 июня 2024г. в 14:30 часов, на заседании  
специализированного совета 049 по физике при Ереванском государственном  
университете по адресу: 0025, ул. А. Манукяна 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЕГУ.

Автореферат разослан 20 мая 2024г.

Ученый секретарь  
специализированного совета:



**к.ф.-м.н., доцент  
В.П. Калантарян**

## ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԸՆԴՀԱՆՈՒՐ ԲՆՈՒԹԱԳԻՐԸ

### Աշխատանքի արդիականությունը

Վերջին երեք տասնամյակների ընթացքում լայն հետաքրքրության են արժանացել մետանյութերի ստացումը, արտադրությունը, հատկությունների և կիրառությունների ուսումնասիրությունները: Մետանյութերը արժուրվում են իրենց բացառիկ հատկությունների շնորհիվ, որոնք պատճառահետևանքային կապ ունեն դրանց չափերի հետ և բացակայում են ավելի մեծ չափեր ունեցող համակարգերում: Մետանյութերի այս հատկությունները հեղափոխել են նյութերի կիրառությունը տարբեր հետազոտական ոլորտներում, նպաստել դրանց զարգացմանը և հանգեցրել նոր ոլորտների բացմանը: Օրինակ, մետանյութերի շնորհիվ հնարավոր է ստանալ մեծ մակերեսներ, որոնք ունեն նյութի բազմաթիվ անկանխատեսելի հատկություններ [1]:

Մետամակերևոյթների հիման վրա միկրոալիքային տիրույթում լայնաշերտ կլանիչների ստեղծումը վերջին տարիներին մեծ հետաքրքրություն է առաջ բերել [2]: Դրանց գործունեության ընթացքում էլեկտրամագնիսական էներգիան փոխակերպվում է օհմական ջերմության, կամ էներգիայի այլ տեսակների, այնպես որ կլանիչի հետ փոխազդեցության արդյունքում էլեկտրամագնիսական ալիքի անդրադարձումն ու անցումը գործնականում բացակայում են: Կլանիչը պետք է թեթև քաշ ունենա, փոքր հաստություն, պարզ արտադրման եղանակ և լինի հնարավորին անկախ ընկնող ալիքի անկման անկյունից և բևեռացումից:

Տարիների ընթացքում էլեկտրամագնիսական կլանիչները հայտնի են եղել իրենց կիրառությամբ սենսորների, արևային էներգիայի փոխակերպիչ սարքերի, քողարկող մակերևոյթների և այլ տեխնոլոգիաներում [3]: Բացի այդ, մետանյութերի կլանիչների օգնությամբ էլեկտրամագնիսական ալիքների կառավարումը լայնորեն կիրառվում է նաև հատուկ նշանակությամբ՝ «անտեսանելի» ինքնաթիռների ստեղծման, ցամաքային ռազմական սարքերը, ստորաբաժանումները ռադարային հսկողությունից քողարկելու և չարձագանքող սենյակներ կառուցելու նպատակով [4]. Այս առումով մեծ նշանակություն ունեն հաճախությունների սպեկտրում լայնաշերտ և էլեկտրամագնիսական դաշտի անկման անկյուններից անկախ մետանյութերի կլանիչները:

Առաջին անգամ միկրոալիքային տիրույթում մետանյութերի հիման վրա կլանիչ առաջարկվեց Լանդիի և համահեղինակների կողմից 2008 թ.-ին, հնարավորություն տալով նախագծել կլանիչներ՝ շատ փոքր հաստությամբ [5]: Դրանից հետո բազմաթիվ հետազոտողների ուշադրությունը կենտրոնացել է մետանյութերի, առավելապես մետամակերոյթների մշակմանը՝ միկրոալիքայինից մինչև

օպտիկական տիրույթներ [6]: Սակայն ռեզոնանսներով պայմանավորված մետամակերոյթների հիման վրա ստեղծված կլանիչները սովորաբար լայնաշերտ չեն:

Վերջին երկու տասնամյակի ընթացքում նանոտեխնոլոգիական նվաճումների շնորհիվ ընդլայնվել են մետաղական կոնֆիգուրացիաների ենթաալիքային փոխազդեցությունների ուսումնասիրությունները՝ էլեկտրամագնիսական ճառագայթամաք և նրանց ռեզոնանսային բնութագրիչներով: Մետաղական կոնֆիգուրացիաները ենթաալիքային չափերով՝ ինչպիսիք են գնդերը, միջուկները, սկավառակները, խորանարդերը և այլն, ցույց են տալիս ռեզոնանսային վարք՝ ընկնող էլեկտրամագնիսական ալիքների անկման ազդեցության տակ՝ այսպես կոչված լոկալիզացված մակերեսային պլազմոնային ռեզոնանսի հաշվին:

Գեզահեցային սպեկտրի մի շարք սարքեր, ինչպիսիք են սենսորները, ալեհավաքները, մետամակերոյթները և ցածր դիսպերսիոն միկրոշերտի հաղորդման գծերը հետազոտելիս, առաջարկվել է օգտագործել կեղծ պլազմոնների առանձնահատկությունները: Այսպիսով, կեղծ պլազմոնների դեպքում անհրաժեշտ է մետաղ-դիէլեկտրիկ միջերեսների նախագծման համեմատաբար բարդ համակարգեր, ինչպիսիք են մետաղների ծալքավոր շերտերը, ակոսները, անցքերը և ճեղքերը:

Մակերևութային ալիքների մեկ այլ տեսակ, որոնք կարող են գոյություն ունենալ ռադիո հաճախություններից մինչև SՀg, անվանում են Ջոմերֆելդի ալիքներ: Այս էլեկտրամագնիսական ալիքները տարածվում են, բաց ալիքատարային կառուցվածքների մակերևութի երկայնքով, հիմնականում հետազոտվել են ԳՀg և SՀg տիրույթներում ազդանշանների հաղորդման համար՝ համեմատաբար ցածր կորուստներով և ցրվածությամբ՝ մյուս փակ ալիքատարային կառուցվածքների համեմատ: Ջոմերֆելդի կանգուն ալիքները, վերջավոր չափերով հաղորդիչ գլանաձև կոնֆիգուրացիաներում, կարող են բացել այս ալիքների ռեզոնանսային հատկությունների օգտագործման նոր հեռանկարներ, որոնք ավելի մանրամասն վերլուծության կարիք ունեն:

### **Ատենախոսության նպատակը**

Մետամակերոյթների հիման վրա բացահայտել ալիքի կառավարման ու վերահսկման հնարավորությունները՝ օգտագործելով դրանց տարրերի ռեզոնանսային և փուլային առանձնահատկությունները ընկնող ալիքի երկարության կեսին մոտ չափերի և դիէլեկտրիկ թափանցելիության իրական և կեղծ մասերի արժեքների մոտ լինելու պայմաններում:

## **Գիտական նորույթը**

1. Մրրկային հոսանքների առաջացման հետևանքով, մետամակերևույթ հանդիսացող բարակ գրաֆիտապատ ժապավենների պարբերական համակարգում գրանցվում է արդյունավետ կլանում, երբ ընկնող միկրոալիքի մագնիսական դաշտը թափանցում է ժապավենի հարթությամբ, իսկ ժապավենի երկայնական չափը ալիքի երկարության կարգի է:
2. Քրոմից պատրաստված բարակ ենթաալիքային լայնակի չափերով թաղանթի արդյունավետ կլանումը սպեկտրի հեռու ինֆրակարմիր տիրույթում, պայմանավորված նրա դիէլեկտրիկ թափանցելիության իրական և կեղծ մասերի արժեքների մոտ լինելով, նպաստավոր պայմաններ է ապահովում դրանց հենքի վրա արդյունավետ մետամակերևույթային կլանիչներ ստեղծելու համար:
3. Մետամակերևույթի տարր հանդիսացող վերջավոր երկարությամբ բարակ հաղորդիչ ձողերի երկայնքով ձևավորվում են աքսիալ սիմետրիայով կանգուն մակերևութային ալիքներ, ձողի առանցքով բևեռացված ընկնող միկրոալիքի ազդեցության շնորհիվ:
4. Ընկնող ալիքի համար որպես բաց ռեզոնատոր ծառայող հաղորդիչ ձողից ստացվող արձագանքի հզորությունն ու փուլը կառավարվում են ձողի երկարության, տրամագծի և այն շրջապատող թաղանթի հաստության և դիէլեկտրիկ թափանցելիության փոփոխման միջոցով:
5. Հատված Գուբաուի հաղորդող գծի բացվածքում տեղադրված թաղանթապատ ձողը ռեզոնանսային հաճախությունների նեղ տիրույթում կտրուկ արգելում է ալիքի անցումը:

## **Գործնական արժեքը**

Ատենախոսությունում հետազոտվող երևույթները հաճախությունների միկրոալիքային և հեռու ինֆրակարմիր տիրույթներում հիմք են հանդիսանում ստեղծելու մրցունակ մետամակերևութային կլանիչներ, որոնք ունեն պարզ կառուցվածք, փոքր ծավալ և չափեր:

Հաղորդիչ ձողերից ստացվող ռեզոնանսային արձագանքը հնարավորություն է տալիս ձևավորել փուլահամաձայնեցված մետամակերևութային կառուցվածք՝ ընկնող ազդանշանը կառավարելու նպատակով:

Հատված Գուբաուի հաղորդող գծի բացվածքում տեղադրված թաղանթապատ ձողը ծառայում է որպես փակոցային ֆիլտր:

## **Պաշտպանության ներկայացվող հիմնական դրույթներ**

1. Մետաղական տակդիրից դիէլեկտրիկ շերտով բաժանված մետամակերևույթում, որը պարբերաբար դասավորված գրաֆիտե ժապավանների համակարգ է, գրանցվում է ընկնող միկրոալիքի հզորության 90%-ից ավել կլանում՝ հաճախությունների 8-12ԳՀց տիրույթում:
2. Ընկնող ալիքի մագնիսական դաշտին ուղղահայաց դասավորված, ալիքի երկարության կարգի լայնական չափերով գրաֆիտե ժապավեններից կազմված մետամակերևույթը, մրրկային հոսանքների առաջացման հետևանքով, կլանում է միկրոալիքային ճառագայթման 90%-ը՝ հաճախությունների 8-12ԳՀց տիրույթում:
3. Մետաղ-դիէլեկտրիկ-մետամակերևույթ կառուցվածքում, որտեղ մետամակերևույթը ենթաալիքային լայնական չափերով, պարբերաբար դասավորված, բարակ քրոմե թաղանթների համակարգ է, հնարավոր է ապահովել հեռու ինֆրակարմիր ճառագայթման 90%-ից բարձր կլանում՝ ալիքի երկարությունների 9-20մկմ տիրույթում:
4. Որպես միկրոալիքի կառավարման փուլահամաձայնեցված մետամակերևույթի տարր, առաջարկվում է օգտագործել ընկնող ալիքի երկարության կեսին մոտ բարակ հաղորդիչ ձողը, որի արձագանքը, ձևավորվող մակերևութային, արքսիալ, կանգուն ալիքների շնորհիվ, ռեզոնանսային բնույթ ունի:
5. Բաց ռեզոնատորի դերում հանդես եկող բարակ հաղորդիչ ձողը, որի ռեզոնանսային հաճախությունը կարելի է կառավարել, ձողի երկարության, շառավղի և այն շրջապատող թաղանթի հաստության և դիէլեկտրիկ թափանցիկության փոփոխման միջոցով, Գուբաուի գծի հատված տեղամասում, փակոցային ֆիլտրի դեր ունի:

## **Աշխատանքի ներկայացումը**

Առենախոսության հիմնական արդյունքները զեկուցվել են Երևանի պետական համալսարանի Ֆիզիկայի ինստիտուտի և Ռադիոֆիզիկայի և էլեկտրոնիկայի ամբիոնի և հեռահաղորդակցության ամբիոնի սեմինարներում, Future Materials 2022 (Rome, Italy 2022), IRPhE 2022 (Yerevan, Armenia 2022) և 1st Space Microwave Week (Noordwijk, The Netherlands 2023) գիտաժողովներում:

## **Շրայարակումները**

Առենախոսության հիմնական արդյունքները տպագրվել են 5 գիտական աշխատանքներում, որոնց ցուցակը ներկայացված է սեղմագրի վերջում:

## **Ատենախոսության կառուցվածքը**

Ատենախոսությունը բաղկացած է ներածությունից, երեք գլխից, եզրակացությունից, 135 անոն գրականության ցանկից: Ատենախոսության ընդհանուր ծավալը 104 էջ է, որում առկա են 28 նկար և մեկ աղյուսակ:

## **ԱՏԵՆԱԽՈՍՈՒԹՅԱՆ ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆԸ**

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

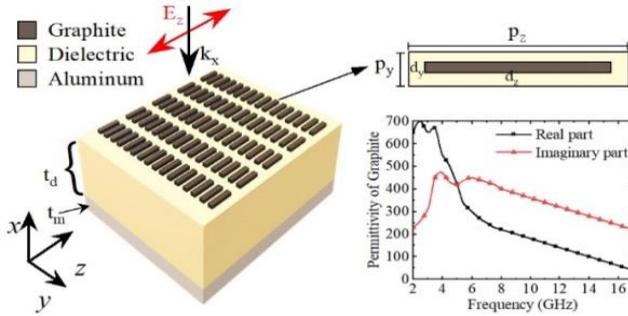
**Առաջին գլխում** անդրադարձ է կատարվել ԳԲՀ տիրույթի կլանիչներին, մասնավորապես պատրաստվել և հետազոտվել է մետամակերևութային կլանիչները և դրանց առանձնահատկությունները:

**1.1 պարագրաֆում** ընդհանուր անդրադարձ է կատարվել մետամակերևութի հիմքի վրա կառուցված միկրոալիքային կլանող համակարգերին:

**1.2 պարագրաֆում** ուսումնասիրվել է գրաֆիտ-դիէլեկտրիկ-մետաղ կառուցվածքով կլանիչը որը բաղկացած է բարակ ալյումինե շերտից, հավասարաչափ դասավորված ուղղանկյուն գրաֆիտի շերտերից բաղկացած թաղանթից և շերտերը իրարից բաժանող դիէլեկտրիկ թաղանթից (նկ. 1): Գրաֆիտի ընտրությունը պայմանավորված է դիտարկվող տիրույթում դրա էլեկտրադինամիկ բնութագրերով, մասնավորապես, դիէլեկտրիկ թափանցելիության կեղծ և իրական մասերից որոնք նույն կարգն ունեն, ինչը կարևոր է, ըստ էլիպտիդի բևեռացման հարաբերակցության, բարձր կլանման արդյունավետության և ցածր ցրման հասնելու համար: Մենք, գրաֆիտի դիէլեկտրիկ թափանցելիության կեղծ մասի համար, կիրառել ենք փորձնականորեն չափված տվյալները:

Սովորաբար, կլանման գործակիցը սահմանվում է հետևյալ կերպ՝  $A(f)=1-R(f)-T(f)$ , որտեղ  $R=|S_{11}|^2$  և  $T=|S_{21}|^2$  անդրադարձման և անցման գործակիցներն են՝ արտահայտված հաճախությունից կախված  $S$  պարամետրերով:

Քանի որ մետանյութի միջով անցումը կանխվում է ալյումինի առկայությամբ, որի հաստությունը հետազոտված սպեկտրում շատ ավելի մեծ է, քան սքին շերտը, այդ դեպքում կլանման գործակիցը կարող ենք հաշվարկել  $A(f) = 1 - R(f)$  արտահայտությամբ:



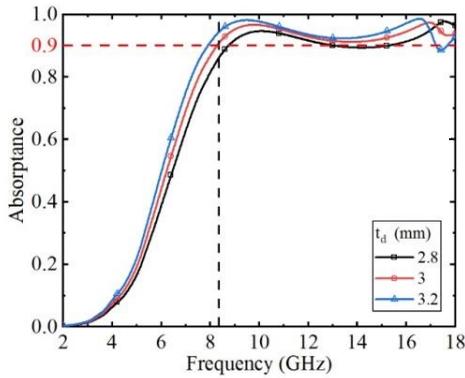
**Նկ. 1:** Պարբերական կառուցվածքի 3D տեսք, որը բաղկացած է այլումինե շերտից, դիելեկտրիկ շերտից և ուղղանկյուն գրաֆիտի ժապավեններից կազմված պարբերական կառուցվածքից, գրաֆիտի դիելեկտրիկ թափանցելիության իրական ( $\epsilon'$ ) ու կեղծ ( $\epsilon''$ ) մասերը կախված հաճախությունից

Մետանյութերի կլանման հաշվարկային սպեկտրը ներկայացված է նկար 2-ում դիելեկտրիկ շերտի հաստության  $t_d$  տարբեր արժեքների համար՝ 2,8 մմ (սև), 3 մմ (կարմիր) և 3,2 մմ (կապույտ):  $t_d = 3$  մմ ընտրված է որպես օպտիմալ ընդհանուր կլանման գործակցի և թողունակության տեսանկյունից:

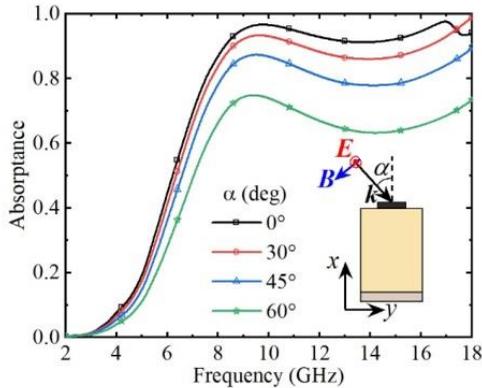
Մասնավորապես,  $A \geq 0,9$ -ին համապատասխան կլանման տիրույթը գտնվում է 8,36-ից մինչև 18 ԳՀց միջակայքում՝  $BW=9,64$  ԳՀց թողունակությամբ: Թողունակության և կլանման գոտու կենտրոնական  $f_c$  հաճախության հարաբերությունը սահմանվում է որպես  $RBW = BW/f_c \times 100\%$ , որը մոտավորապես կազմում է 73%: Օպտիմալացված կլանիչի ընդհանուր հաստությունը 3,7 մմ է, որը կազմում է մոտ  $0.16\lambda_c$  ( $\lambda_c = c/f_c$ , որտեղ  $c$ -ն լույսի արագությունն է վակուումում): Հարկ է նշել, որ սիմուլյացիաներն իրականացվում են միայն մինչև 18 ԳՀց:

TE-բևեռացված ալիքների տարբեր անկման անկյունների համար մետանյութի կլանման սպեկտրը ներկայացված է Նկար 1.5-ում:

Կարելի է տեսնել, որ անկման մինչև  $45^\circ$  անկյունների դեպքում մետանյութի կլանման գործակիցը մնում է 80%-ից բարձր և նկատելիորեն նվազում է ավելի մեծ անկյուններում (օրինակ՝  $\alpha \approx 60^\circ$ ), չունենալով կախվածություն անկման անկյունների լայն : Նման ժապավենների վրա հիմնված երկու համակարգերը, որոնք տեղադրված կլինեն միմյանց ուղղահայաց կունենան բևեռացումից անկախություն:



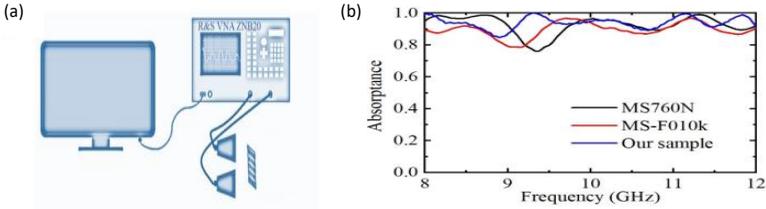
**Նկ. 2:** Կառուցվածքի կլանման սպեկտրը դիէլեկտրիկ թաղանթի հաստության տարբեր արժեքների դեպքում:



**Նկ. 3:** Կառուցվածքի կլանման սպեկտրը անկման տարբեր անկյունների դեպքում:

Տեսական արդյունքները հաստատելու համար նախագծվել և ստեղծվել է պարբերական կառուցվածք, որը բաղկացած է 600 մկմ հաստությամբ պլյումինե շերտից, պլաստիկ հիմքից և տեսական մոդելի չափսերին համապատասխան դասավորված գրաֆիտի շերտերից: Յուրաքանչյուր առանձին ժապավենի հաստությունը գնահատվել է մոտ 100 մկմ:

Բացի այդ, առաջարկվող կառուցվածքի կլանման բնութագրերը համեմատվել են միկրոալիքային MS760n և MS-F010k X-band կլանիչների հետ: Փորձարկվող նմուշները տեղադրվել են հաղորդիչ և ընդունիչ փողային անտենաների առջևում: Արդյունքները ստացվել են R&S VNA ZNB20 վեկտորային ցանցի վերլուծիչի միջոցով:

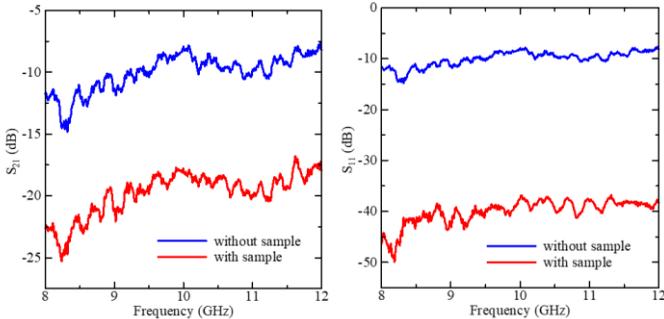


**Նկ. 4:** (a) Փորձարարական համակարգի սխեմատիկ պատկերը: (b) Առաջարկվող համակարգի կլանման գործակցի համեմատությունը միկրոալիքային X-տիրույթի կլանիչների հետ:

Փորձարարական սխեման ներկայացված է նկար 4(a)-ում: Առաջարկվող կառուցվածքի կլանման գործակցի համեմատությունը միկրոալիքային X-band կառուցվածքների հետ ներկայացված է նկ. 4(b)-ում: Նշենք, որ անկման դաշտի բևեռացումը զուգահեռ է գրաֆիտե ժապավենների երկար առանցքին:

**1.3 պարագրաֆում** հետազոտվել է միկրոալիքային կլանիչ, որի կլանումը պայմանավորված է մետամակերոյթի տարրերի մրրկային հոսանքներով: Որտեղ մետամակերոյթի տարրեր հանդիսացող գրաֆիտե ժապավենները դասավորված են մետամակերոյթի հարթությանն ուղղահայաց:

Ստորև ցույց է տրված ստացված փորձարարական արդյունքները



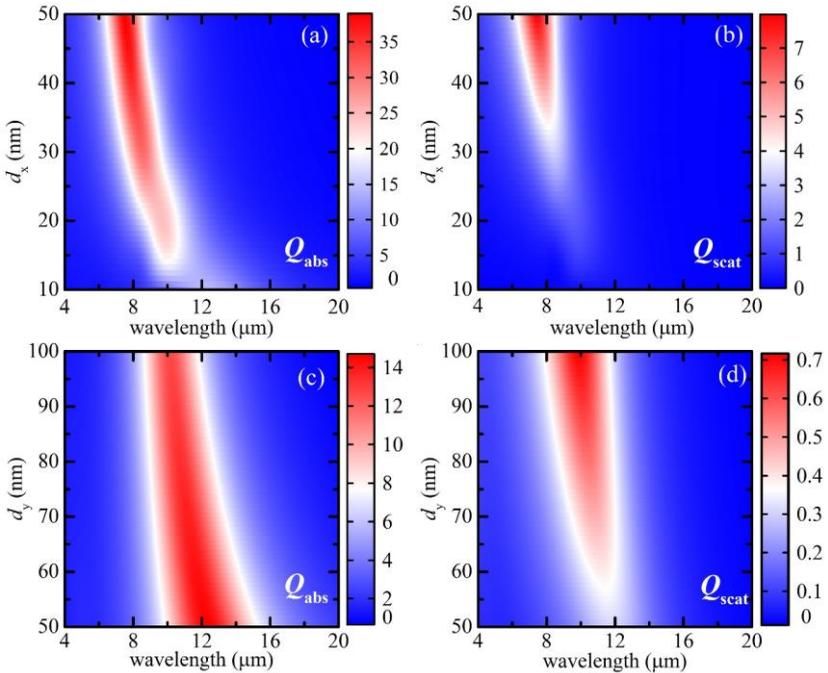
**Նկ. 5:** Անցման և անդրադարձման գործակիցների արժեքները առանց նմուշ (կապույտ) և նմուշի առկայությամբ (կարմիր) համակարգում:

**1.4 պարագրաֆում** ամփոփվել են առաջին գլխի հիմնական արդյունքները և կլանիչի առանձնահատկությունները:

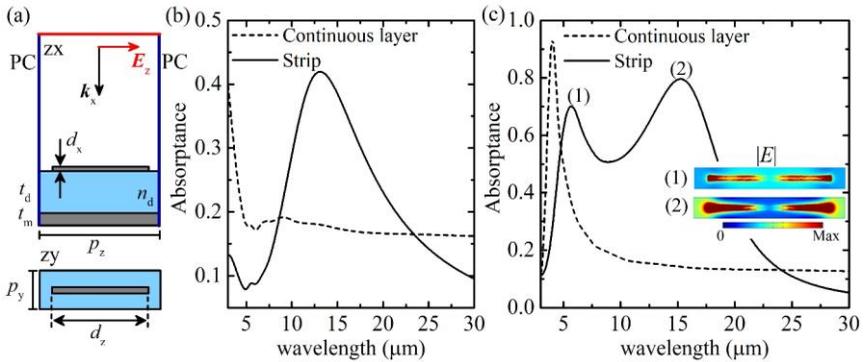
**Երկրորդ գլխում** ներկայացվել է ինֆրակարմիր տիրույթի կլանիչները, դրանց ստեղծման առանձնահատկությունները և օգտագործման ոլորտները մասնավորապես մոդելավորվել է մետամակերևութային կլանիչ և ընտրվել են վերջինիս ստեղծման առավել նպաստավոր պարամետրեր :

**2.1 պարագրաֆում** անդրադարձ է կատարվել ինֆրակարմիր տիրույթի կլանիչներին, դրանց կիրառման ոլորտներին և առանձնահատկություններին:

**2.2 պարագրաֆում** մոդելավորվել և քննարկվել է քրոմե ժապավեններից կազմված մետանյութային կլանիչը: Քրոմե տարրերի ավելի արդյունավետ չափերն ընտրվել են մոդելավորման արդյունքում:

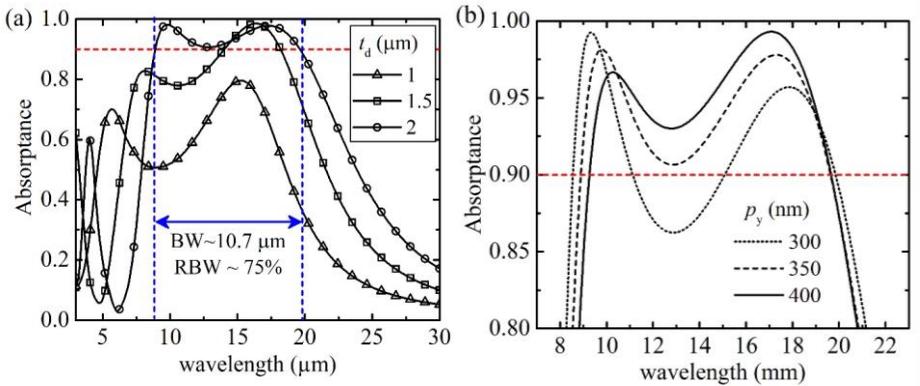


**Նկ. 6:** Կլանման (առաջին սյունակ) և ցրման (երկրորդ սյունակ) արդյունավետությունները՝ որպես ֆունկցիա այլընտրանքի երկարությունից և (a-b)  $d_x$  և (c-d)  $d_y$  չափերից:



**Նկ. 7:** Քրոմե ժապավեններից, դիէլեկտրիկից և քրոմե անդրադարձնող շերտերից կազմված պարբերական կառուցվածքի կլանման սպեկտրի ուսումնասիրությունը: (a) պարբերական կառուցվածքի միավոր բջիջի  $zx$  և  $zy$  հարթության տեսքը,  $p_x$ -ը և  $p_z$ -ը պարբերականություններ են,  $t_m$ -ը,  $t_d$ -ը և  $d_x$ -ը ստորին անդրադարձնող շերտի, դիէլեկտրիկ տակդիրի և ժապավենի հաստությունն են: (b) Կանոնավոր դասավորված ուղղանկյուն քրոմե ժապավեններով (հոծ գիծ) և նույն հաստությամբ, համասեռ քրոմե շերտով (կետագիծ) պատված դիէլեկտրիկ տակդիրի համակարգի (առանց ներքևի անդրադարձնող շերտի) կլանման գործակիցների համեմատությունը: (c) Նույնը, ինչ (b)-ում, սակայն ստորին քրոմե անդրադարձնող շերտով: Ներդրված պատկերները ցույց են տալիս էլեկտրական դաշտի մոդուլի բաշխումը (1) և (2) ռեզոնանսներում: Վերլուծության ընթացքում օգտագործվել են հետևյալ պարամետրերը՝  $t_d = 1$  մկմ,  $p_z = 2,5$  մկմ,  $p_y = 350$  նմ,  $d_x = 10$  նմ,  $d_z = 2$  մկմ,  $n_d = 1,5$ : Ե՛վ ժապավենը, և՛ համասեռ շերտը ունեն նույն հաստությունը՝  $d_x$ : Մետաղե հիմքի հաստության համար ամբողջ վերլուծության ընթացքում օգտագործվել է  $t_m = 200$  նմ:

Այնուհետև հետազոտվել է կլանումը դիէլեկտրիկ շերտի տարբեր հաստությունների և տարրերի տարբեր պարբերականությունների դեպքում:



**Նկ. 8:** (a) Կլանման սպեկտրը դիելեկտրիկ շերտի հաստության 1 մկմ (եռանկյուններ), 1,5 մկմ (քառակուսիներ) և 2 մկմ (օղակներ) արժեքների դեպքում: (b) Կլանման սպեկտրը  $p_y$  պարբերականության 300 նմ (կետեր), 350 նմ տարբեր արժեքներով (կետագիծ) և 400 նմ (հոծ գիծ) արժեքների դեպքում: Մյուս պարամետրերի համար օգտագործվել են հետևյալ երկրաչափական պարամետրերը.  $p_z = 2,5$  մկմ,  $p_y = 350$  նմ,  $t_d = 2$  մկմ,  $d_z = 2$  մկմ,  $d_y = 50$  նմ և  $d_x = 10$  նմ:

**2.3 պարագրաֆում** պարագրաֆում ամփոփվում են 2-րդ գլխում ներկայացված հետազոտությունների արդյունքները:

**Երրորդ գլխում** հետազոտվել են վերջավոր երկարությամբ պղնձե և գրաֆիտե ձողերի մակերևույթներին առաջացող ալիքները:

**3.1 պարագրաֆում** ընդհանուր անդրադարձ է կատարվել մակերևութային ալիքներին՝ Ջոնսոնի ալիքներին և Գուբաուի հաղորդման գծին:

**3.2 պարագրաֆում** հետազոտվել է վերջավոր երկարությամբ ձողերի շուրջ ձևավորված մագնիսական մերձակա դաշտը ջերմատառձակական օպտիկական ինդիկատորով մանրադիտակի (ՋԱՕԻՄ) միջոցով և նույն համակարգը մոդելավորվել է համակարգչի օգնությամբ որի արդյունքում ստացվել են նմանատիպ արդյունքներ:

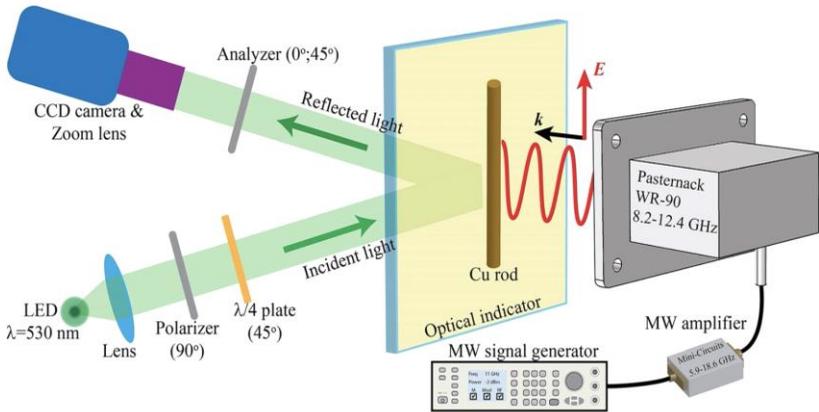
Ստացված արդյունքներից երևում է երեք առանփնահատկություն.

ա) երևում է, որ ձողի շրջակայքում դաշտի անհամասեռությունը ձևավորվում է հակահանգույցների տեսքով,

բ) դաշտերի այս բաշխումները ձևավորվում են ձողերի որոշակի երկարություններով և ռեզոնանսային հաճախություններով,

գ) երևում է ձողի մոտ կենտրոնացած ալիքային դաշտի աճ:

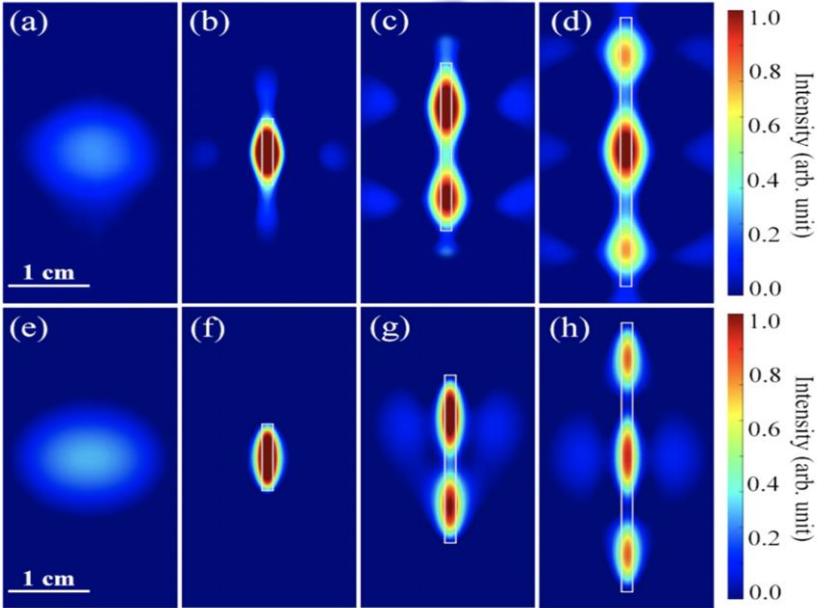
Այս հատկանիշների համադրությունը թույլ է տալիս եզրակացնել, որ դրանք կանգուն ալիքներ են, որոնք ձևավորվել են ձողերի մոտ:



**Նկ. 9:** ԶԱՕԻՄ-ի փորձարարական մասի սխեմատիկ տեսքը: Օպտիկական ինդիկատորի (ՕԻ) մակերեսը լուսավորող  $\lambda = 530$  նմ Լեդ աղբյուրի լույսը շրջանաձև բևեռացվում է գծային բևեռացուցիչով և քառորդ ալիքաի թիթեղով: Անալիզատորի միջով անցնող անդրադարձած լույսը գրանցվում է CCD տեսախցիկի և խոշորացման ոսպնյակների համակարգի միջոցով: Նմուշը տեղադրվում է ՕԻ-ի հակառակ կողմում՝ ալիքատարի կողմից ճառագայթվող գծային բևեռացված էլեկտրական դաշտին զուգահեռ: Նմուշի և ՕԻ-ի միջև հեռավորությունը 1 մմ է: Չափումների ընթացքում անալիզատորը պտտվել է  $0^\circ$  կամ  $45^\circ$  թույլ տալով տեսախցիկին գրանցելու երկու մեխանիկական դեֆորմացիայի բաշխվածության պատկերը: Զերմաստիճանի բաշխվածության հաշվարկի համար մենք լուծեցինք միկրոալիքային ճառագայթման հետևանքով ՕԻ թաղանթում ջերմության հետևանքով առաջացած մեխանիկական դեֆորմացիայի առաջացման հակադարձ խնդիրը:

Հատկանշական է, որ թեև հետազոտված դեպքերում ձողերի առանցքի երկայնքով տարածվող  $\lambda$  ալիքի երկարության մոդերը փոքր-ինչ տարբերվում է ազատ տարածության ալիքի երկարությունից, ձողերի երկարությունները զգալիորեն

տարբերվում են մեկուկես ավիքի երկարության բազմապատիկներից ( $l_n < n\frac{\lambda}{2}$ ): Նման վարքագծի ֆիզիկական ծագումը բացահայտելու համար պետք է ուսումնասիրել մակերևութային ավիքների  $\varphi$  փուլային տեղաշարժը ձողի եզրերից անդրադառնալիս:



**Նկ. 10:** Ընկած գծային բևեռացված միկրոավիքային էլեկտրամագնիսական դաշտի բաշխվածությունը 10 ԳՀց հաճախությամբ (a) գրանցված և (e) մոդելավորված: (b)–(d) գրանցված և (f)–(h) մոդելավորված ՄՄՄԴ-ի բաշխվածությունները պղնձե ձողի շուրջ 1,5 մմ տրամագծով և համապատասխան երկարություններով (b), (f) 10 մմ, (c), (g) 25: մմ, (d), (h) 40 մմ նմուշից 1 մմ հեռավորության վրա: Մոխրագույն ուղղանկյունները նկարագրում են պղնձե ձողերի եզրերը:

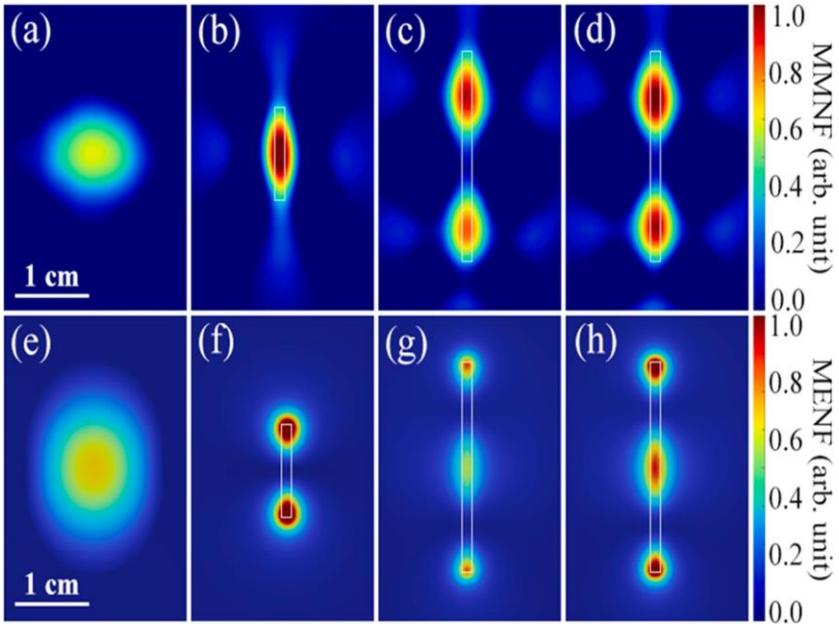
Դրական հետադարձ կապը, որը սահմանում է  $l_n$  երկարությամբ ձողի հատկությունները որպես ռեզոնատոր, հետևյալն է:

$$\frac{2\pi}{\lambda} 2l_n + 2\varphi = 2\pi n, \quad n = 1; 2; 3. \quad (1)$$

Հաշվի առնելով ձողերի երկրաչափական չափերը և հաճախությունը, ձողերի եզրերից անդրադարձման արդյունքում առաջացած փուլային տեղաշարժը

հաշվարկվում է  $\varphi = \pi/3$ : Ձողի ռեզոնանսային մակերևութային կանգուն ալիքների ձևավորումն այս դեպքում որոշակի նմանություններ ունի Ֆաբրի-Պերոյի ռեզոնատորի ռեժիմների հետ:

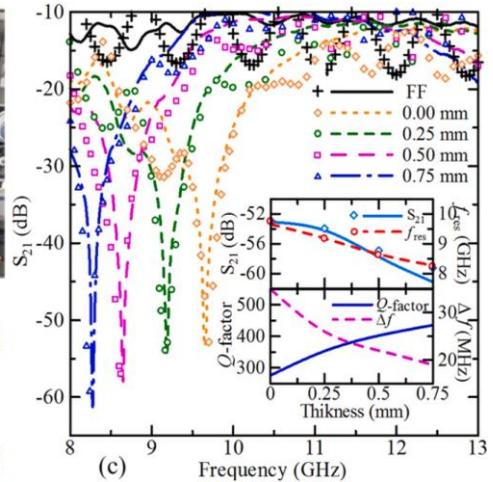
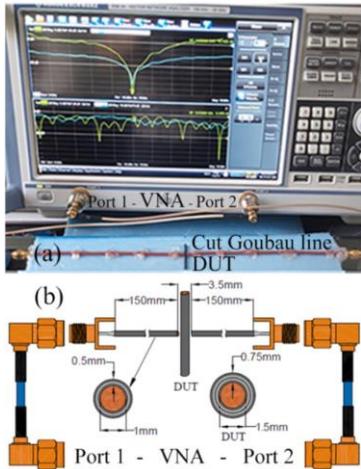
**3.3 պարագրաֆում** հետազոտվել է դիէլեկտրիկ շերտով պատված վերջավոր երկարությամբ ձողերի շուրջ ձևավորված մագնիսական մերձակա դաշտը ԶԱՕԻՄ-ի միջոցով իսկ մերձակա էլեկտրական դաշտի տեսքը վիզուալիզացվել է համակարգչային մոդելավորման արդյունքում:



**Նկ. 11:** Էլեկտրանագնիսական դաշտի բաղադրիչների (ազատ դաշտ՝ FF) լարման բաշխվածությունը փորձանմուշների մոտ՝ 10 ԳՀց հաճախականությամբ: Մագնիսական դաշտում ընկնող ալիքի (a), (b – c) 11մմ և 25մմ բարձրությամբ պղնձե ձողերի և 0.5մմ հաստությամբ մեկուսիչ շերտով պատված 25մմ բարձրությամբ պղնձե ձողի բաշխվածությունները, բոլորը ստացված ԶԱՕԻՄ-ի միջոցով: (e-h) Համապատասխանաբար՝ մոդելավորված էլեկտրական դաշտի բաշխվածությունը ձողից 1մմ հեռավորության վրա: Բոլոր ձողերն ունեն 1,5մմ տրամագիծ: Մոխրագույն քառանկյուններով մշված են պղնձե ձողերի եզրագծերը:

Նկատելի է առանձնահատուկ տեղաշարժ մակերևութային կանգուն ալիքի էլեկտրական և մագնիսական բաղադրիչների հակահանգույցների միջև: Հատկանշական է նաև ձողի եզրերի շուրջ էլեկտրական դաշտի կոնցենտրացիաների առկայությունը:

Ընդհանուր առմամբ առանց դիէլեկտրիկ շերտի պղնձե ձողի մակերեսին առաջացող ռեզոնանսային Ջոմերֆելդյան ալիքները ենթարկվում են մեծ ճառագայթային կորուստների:



**Նկ. 12:** Ընդհատված Գուբաուի գծի (ԳԳ) հետ ինտեգրացված վեկտորային ցանցային անալիզատորի թեստավորման կառուցվածքի և հետազոտվող ձողի (a) լուսանկարը և (b) սխեման: (c) Միկրոալիքային անցման  $S_{21}$  գործակցի արժեքները պղնձե ձողի համար (1.5մմ տրամագծով և 25մմ երկարությամբ) շրջապատող դիէլեկտրիկ շերտի տարբեր հաստություններով: Սև գիծը ներկայացնում է համակարգն առանց պղնձե ձողի, այսինքն միայն ընդհատված ԳԳ-ն: Վերին ներդիրը ցույց է տալիս  $S_{21}$  նվազագույնի և ռեզոնանսային հաճախության կախվածությունը դիէլեկտրիկ շերտի հաստությունից: Մոդելավորման տվյալները պատկերված են կետային նշանների միջոցով, իսկ փորձարարական տվյալները նշված են գծերով: Ստորին ներդիրը ցույց է տալիս համակարգի բարորակության և թողունակության կախվածությունը դիէլեկտրիկ շերտի հաստությունից:

Այնուամենայնիվ, մեկուսիչ շերտի առկայությունը բարելավում է օդում ընկնող ալիքի և ձողի միջև դիմադրության համընկնումը, և այդպիսով մեծացնում է միացման էֆեկտիվությունը, հանգեցնելով ալիքային դաշտի ընդարձակման:

Այս ռեզոնանսային տարրի ինտեգրումը հաղորդման գծի հետ կարող է մակերեսային ալիքների ռեզոնանսային հատկությունների օգտագործման նոր հնարավորություններ ընձեռել: Այդ նպատակով ընտրվել է ԳԳ-ը, որը ներկայանում է որպես հաղորդման գիծ՝ հիմնված գլանաձև հաղորդիչ միջուկի և դիէլեկտրիկ ծածկույթի վրա: Փորձարկումներում որպես ԳԳ օգտագործվել են պղնձե ձողեր՝ 0.5մմ շառավղով, պատված 0.25մմ հաստությամբ պոլիէթիլենային շերտով:

Ընդհանուր առմամբ, կապը ձող-ռեզոնատորի և ընդհատված ԳԳ-ի միջև որոշակի առանձնահատկություններով է դրսևորվում: Առաջին հերթին, այսպիսի կապի բարորակությունը ( $Q = f_{res}/\Delta f$ ) նշանակալիորեն աճում է ի տարբերություն ալիքատարով ակտիվացած առանձին ձող-ռեզոնատորի: Երկրորդ հերթին՝ համակարգն ունի 20ՄՀց-ից փոքր նեղշերտ հաճախային ընտրողականություն: Մասնավորապես, ԳԳ-ի հետ կապված 25մմ երկարությամբ ձողի  $S_{21}$  անցման գործակցի միջոցով բարորակության գնահատումը ցույց է տալիս, որ բարորակությունը աճում է 275-ից՝ առանց դիէլեկտրիկ շերտի ձողի համակարգի համար, մինչև 435՝ 0.75մմ հաստությամբ դիէլեկտրիկ շերտով պատված ձողի համար: Դիէլեկտրիկ շերտի հաստության ազդեցությունը բարորակության,  $S_{21}$  անցման գործակցի, ռեզոնանսային հաճախության և թողունակության վրա ամփոփված է նկար 12(c)-ում ներդրված վերին և ստորին բաժիններում:

## ԵԶՐԱԿԱՑՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐ

Օգտագործելով մետամակերևույթի տարրերի ռեզոնանսային և փուլային բնութագրերը, բացահայտվել են ալիքը կառավարելու և վերահսկելու հնարավորությունները, երբ տարրերի երկայնական չափը մոտ է անկման ալիքի երկարության կեսին, իսկ դրանց դիէլեկտրական թափանցելիության իրական և կեղծ մասերը մոտ են միմյանց:

Մետադ-դիէլեկտրիկ-գրաֆիտային մետամակերևույթ կառուցվածքում, որտեղ մետամակերևույթը ենթաալիքային չափերով և 100 մկմ հաստությամբ պարբերաբար դասավորված գրաֆիտային ժապավենների համակարգ է, գրանցվել է ընկնող միկրոալիքային ճառագայթման 90%-ից ավելի կլանում՝ հաճախականությունների 8-12 ԳՀց տիրույթում: Ինֆրակարմիր ճառագայթման 9-20 մկմ միջակայքում կարելի է ստանալ 90%-ը գերազանցող կլանում՝ հիմնվելով քրոմի շերտերով մետամակերևույթի նմանատիպ կառուցվածքի վրա:

Մրրկային հոսանքների առաջացման հետևանքով, մետամակերևույթ հանդիսացող բարակ գրաֆիտապատ ժապավենների պարբերական համակարգում գրանցվում է 90%-ը գերազանցող կլանում, երբ ընկնող միկրոալիքի մագնիսական դաշտը թափանցում է ժապավենի հարթությամբ, իսկ ժապավենի երկայնական չափը ալիքի երկարության կարգի է:

Որպես փուլահամաձայնեցված մետամակերևույթի տարր, առաջարկվում է օգտագործել անկման ալիքի երկարության կեսին մոտ երկարությամբ բարակ հաղորդիչ ձողը, որում ձևավորվող մակերևույթային, արսիալ, կանգուն ալիքների շնորհիվ, միկրոալիքային արձագանքը ռեզոնանսային բնույթ ունի:

Բաց ռեզոնատորի դերում հանդես եկող բարակ հաղորդիչ ձողը, որի ռեզոնանսային հաճախությունը կարելի է կառավարել, ձողի երկարության, շառավղի և այն շրջապատող թաղանթի հաստության և դիէլեկտրիկ թափանցելիության փոփոխման միջոցով, Գուբաուի գծի հատված տեղամասում, փակոցային ֆիլտրի դեր ունի:

## Հղված գրականություն

1. Green M. and Chen X., 2019. Recent progress of nanomaterials for microwave absorption. *Journal of Materiomics*, 5(4), pp.503-541.
2. Glybovski S.B., Tretyakov S.A., Belov P.A., Kivshar Y.S. and Simovski C.R., 2016. Metasurfaces: From microwaves to visible. *Physics reports*, 634, pp.1-72.

3. Raman A.P., Anoma M.A., Zhu L., Rephaeli E. and Fan S., 2014. Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight. *Nature*, 515(7528), pp.540-544.
4. Munk B.A., 2000. *Frequency selective surfaces: theory and design*. John Wiley & Sons. pp. 315–336.
5. Landy N.I., Sajuyigbe S., Mock J.J., Smith D.R. and Padilla W.J., 2008. Perfect metamaterial absorber. *Physical review letters*, 100(20), p.207402.
6. Sun S., He Q., Hao J., Xiao S. and Zhou L., 2019. Electromagnetic metasurfaces: physics and applications. *Advances in Optics and Photonics*, 11(2), pp.380-479.

### **Հրատարակված աշխատանքների ցուցակ**

1. Hambaryan D., Gevorgyan L., Parsamyan H., Yesayan A., Haroyan H. and Nerkararyan K., 2022. Graphite-insulator-metal based metamaterial absorber at X-band. *International Conference on Microwave & THz Technologies, Wireless Communications and OptoElectronics (IRPhE 2022)*, pp.15–17
2. Parsamyan H.A., Hambaryan D.S. and Haroyan H.S., 2022, October. Broadband Infrared Absorption Due to Low Q-factor Dipole Modes of Cr Strips. In *Optics and Its Applications*, pp. 59-68
3. Abrahamyan T., Haroyan H., Hambaryan D., Parsamyan H., Babajanyan A., Lee K., Friedman B. and 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), p.445001.
4. Hambaryan D.S., 2024. Microwave absorption in metasurfaces induced by eddy currents. *Proceedings of the YSU A: Physical and Mathematical Sciences*, 58(1 (263)), pp.35-41.
5. Hambaryan D., Abrahamyan T., Parsamyan H., Movsisyan A., Minasyan B., Haroyan H., Babajanyan A., Lee K., Friedman B. and Nerkararyan K., 2024. Dielectric coated conductive rod resonantly coupled with a cut transmission line as a tunable microwave bandstop filter and sensor. *Heliyon*, 10(2), e24477.

АМБАРЯН ДАВИД

УПРАВЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНОЙ И ФАЗОЙ ВОЛНОВОГО ОТКЛИКА ОТ  
ГРАФИТОВОЙ МИКРОЛЕНТЫ И МИКРОЦИЛИНДРА

АННОТАЦИЯ

Используя резонансные и фазовые характеристик элементов метаповерхности, выявлены возможности управления и контроля волны, в условиях близости размеров элементов к половине длины падающей волны, а также близости реальных и мнимых частей их диэлектрической проницаемости. Исследованные в диссертации явления служат основой для создания конкурентоспособных метаповерхностных поглотителей, в микроволновом и дальнем инфракрасном диапазонах спектра, имеющих простую структуру, малый объем и размеры.

В структуре металл-диэлектрик-графитовая метаповерхность, где метаповерхностью является система периодически расположенных графитовых лент, с субдлинноволновыми поперечными размерами и толщиной 100 мкм, зафиксировано поглощение падающей микроволновой мощности более 90% в диапазоне частот 8-12 ГГц. В инфракрасной области спектра также можно получить поглощение, превышающее 90%, в диапазоне 9-20 мкм на основе аналогичной структуры метаповерхности с полосками хрома.

Для управления микроволнового излучения, в качестве элемента фазовосогласованной метаповерхности, предлагается использовать тонкий проводящий стержень, с длиной, близкой половине длины падающей волны, отклик которого из-за образования поверхностных, аксиальных, стоячих волн имеет резонансный характер.

Тонкий проводящий стержень, выполняющий роль открытого резонатора, действует как затворный фильтр на прерывистом участке линии Губо, резонансной частотой которого можно управлять, изменяя длину, радиус и диэлектрическую проницаемость покрывающей стержень пленки.

HAMBARYAN DAVID

MAGNITUDE AND PHASE CONTROL OF THE WAVE RESPONSE OF  
GRAPHITE MICROSTRIP AND MICROCYLINDER

ANNOTATION

Using resonance and phase characteristics of metasurface elements, the possibilities of wave control and guidance are revealed, in conditions of proximity of element sizes to half the length of the incident wave, as well as the proximity of their real and imaginary parts of dielectric permittivity.

The phenomena studied in the dissertation are the basis for the creation of competitive metasurface absorbers, in the microwave and far infrared ranges of the spectrum, having a simple structure, small volume and size.

In the structure of metal-dielectric-graphite metasurface, where the metasurface is a system of periodically arranged graphite tapes, with a thickness of 100  $\mu\text{m}$ , Over 90% absorption of the incident microwave power in the frequency range of 8-12 GHz was recorded. In the infrared region of the spectrum, an absorption greater than 90% can also be obtained in the range of 9-20 $\mu\text{m}$  based on a similar structure of a metasurface with chrome stripes.

To control microwave radiation, as an element of a phase-coordinated metasurface, it is proposed to use a thin conductive rod, with a length close to half the length of the incident wave, the response of which have a resonant character due to the formation of surface, axial, standing waves.

The thin conductive rod, which acts as an open resonator, acts as a band-stop filter on a cut section of the Goubau line, the resonance frequency of which can be controlled by changing the length, radius and dielectric permittivity of the shell covering the rod.