

ԵՐԵՎԱՆԻ ՊԵՏԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

Պարսամյան Հենրիկ Աշոտի

**ԻՆՖՐԱԿԱՐՄԻՐ ԾԱՌԱԳԱՅԹՄԱՆ ՄՈԴՈՒԼՈՒՄՆ ՈՒ ԿԼԱՆՈՒՄԸ ԳԼԱՆԱՅԻՆ  
ՀԱՄԱԶԱՓՈՒԹՅԱՄԲ ՄԻԿՐՈ և ՆԱՆՈՄԵՏՐԱԿԱՆ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔՆԵՐՈՒՄ**

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

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ – 2021

---

ЕРЕВАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Парсамян Генрих Ашотович

**МОДУЛЯЦИЯ И ПОГЛОЩЕНИЕ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В МИКРО И  
НАНОМЕТРИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ С ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ СИММЕТРИЕЙ**

АВТОРЕФЕРАТ

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

ЕРЕВАН – 2021

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 ֆիզիկական հետազոտությունների  
ինստիտուտ

Պաշտպանությունը կայանալու է 2021թ մայիսի 29-ին ժամը 12:00-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 2021 թ. ապրիլի 15-ին:

Մասնագիտական խորհրդի  
գիտական քարտուղար



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

---

Тема диссертации утверждена в Ереванском государственном университете.

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

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

Ведущая организация: **Институт физических исследований НАН РА**

Защита диссертации состоится 29 мая 2021г. в 12:00 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 15 апреля 2021г.

Ученый секретарь  
специализированного совета:



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

## ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԸՆԴՀԱՆՈՒՐ ԲՆՈՒԹԱԳԻՐԸ

### Աշխատանքի արդիականությունը

Վերջին երկու տասնամյակների ընթացքում ֆոտոնիկայում լայն ուսումնասիրության առարկա են դարձել շնչացող մոդերով (ՇՄ) օպտիկական միկրոռեզոնատորները, որոնք իրենցից ներկայացնում են գլանային կամ գնդային համաչափությամբ դիէլեկտրիկ կառուցվածքներ: Այս համակարգերը ավանդական ռեզոնատորներից առանձնանում են շատ մեծ բարորակություններով ( $10^7\sim 10^{10}$  կարգի) և օպտիկական այլ բաղադրիչների հետ ինտեգրման հնարավորությամբ, ինչը թույլ է տալիս դրանց հիման վրա նախագծել տարատեսակ օպտիկական սարքեր, ինչպես օրինակ սենսորներ, լազերներ, ֆիլտրեր, փոխանցատիչներ, ինչպես նաև մոդուլյատորներ՝ էլեկտրամագնիսական ալիքների արդյունավետ ղեկավարման համար [1,2]: Շնչացող մոդերով ռեզոնատորներին (ՇՄՌ) առնչվող գլխավոր հարցերից է դրանց գրգռումը, որի իրականացման ամենակիրառական եղանակներն են բարակեցված մանրաթելի և ինտեգրված ալիքատարի միջոցով գրգռումը [1], որոնց դեպքում ալիքատար-ռեզոնատոր կապը իրականանում է ալիքատարի էվանեսցենտ դաշտի միջոցով: Այլ մեթոդները, օրինակ՝ պրիզմայով կամ այսպես կոչված ազատ տարածությամբ կապը ավելի քիչ արդյունավետ են: Ընդհանուր դեպքում, արդյունավետ կապի իրականացման գլխավոր խնդիրը հանգում է կապի տիրույթի չափին, ինչպես նաև ռեզոնատորի և ալիքատարի մակերևութային անհարթություններին, որոնք ցրումների պատճառ են դառնում: Մյուս կողմից՝ ռեզոնատորների չափերի փոքրացումը, որով կապահովվեն ինտեգրման մեծ խտություններ, և միևնույն ժամանակ մեծ բարորակության պահպանումը պահանջում է մեծ բեկման ցուցիչով նյութերի օգտագործում, որը բարդացնում է դրանց հետ աշխատանքը: Այս համատեքստում բարակ մետաղական թաղանթների օգտագործումը ռեզոնատորի հետ կապի ապահովման համար կարող է էապես մեծացնել էլեկտրամագնիսական ալիքների կառավարման արդյունավետությունը: Առաջին գլխում դիտարկել ենք կիսագլանային միկրոռեզոնատորում շնչացող մոդերի գրգռումը հարթ էլեկտրամագնիսական ալիքով, որի կապը ռեզոնատորի հետ իրականանում է բարակ մետաղական թաղանթի միջոցով: Երկրորդ գլխում նույն կառուցվածքով ռեզոնատորի հատկությունները ուսումնասիրված են ալիքատարով գրգռման պարագայում, որը ռեզոնատորից բաժանված է բարակ մետաղական թաղանթով:

Ուսումնասիրության արդիական ոլորտ է նաև էլեկտրամագնիսական ալիքների կլանման ղեկավարումը: Սա կարելի է իրականացնել մետանյութային կլանիչների միջոցով, որոնք ունակ են կլանել որոշակի սպեկտրի գրեթե ամբողջ էներգիան [3]:

Ըստ կլանման բնութագրերի՝ կլանիչները բաժանվում են երեք տիպի . միաշերտ (ներշերտ), բազմաշերտ կամ լայնաշերտ, որոնք լայն կիրառություն են գտել արդի օպտիկական տեխնոլոգիաներում որպես սենսորներ, գրանցիչներ, օպտիկական բուֆերներ և քողարկման տարրեր [3,4]: Ինտեգրալային տեխնոլոգիաներում կլանիչների արդյունավետ ներդրումը պահանջում է դրանց չափերի փոքրացում, ինչը կբերի ինտեգրման մեծ խտությունների, ինչպես նաև պարզ կառուցվածքների օգտագործում: Հետևաբար, կոմպակտ չափերով կլանիչների նախագծումն ու դրանց հատկությունների բացահայտումը ունի առաջնային կարևորություն [5]:

Ավանդաբար մետանյութային կլանիչները մետաղ-դիէլեկտրիկ-մետաղ բաղադրիչներով մեծաչափ պարբերական համակարգեր են, որոնցում միավոր բջջի վերին մակերևույթի մետաղը ունի որոշակի կանոնավոր կառուցվածք [5]: Կլանիչների մի այլ դաս են որոշակի մակերևույթի վրա անկանոն բաշխված, մինչև մի քանի հարյուր նանոմետր չափերով մասնիկներից կազմված համակարգերը, որոնց պատրաստումը չի պահանջում էլեկտրոնային կամ կենտրոնացված իոնային փնջերով խաճատման կիրառություն[3]:

Հիմնվելով վերոնշյալ կլանիչների կարևորության վրա, երրորդ գլխի առաջին մասում դիտարկվել է լայնաշերտ կլանմամբ պարզ և միևնույն ժամանակ արդյունավետ մետանյութային կառուցվածք: Երկրորդ մասում տեսականորեն և համակարգչային մոդելավորման միջոցով հետազոտվել են բարակ մետաղական թաղանթով պատված գնդաձև և գլանաձև դիէլեկտրիկական կառուցվածքեր՝ որպես արդյունավետ կլանիչների հիմնարար տարրեր:

### **Ատենախոսության նպատակը**

Ատենախոսության հիմնական նպատակն է շնչացող մոդերի առկայությամբ բացահայտել լույսի արագընթաց կառավարման առավել բարենպաստ պայմանները հարթ ալիքատարին կապակցված կիսազլանային միկրոռեզոնատորում:

Պարզել ինֆրակարմիր տիրույթում քողարկող շերտերի տարրեր հանդիսացող բարակ հաղորդիչ թաղանթներով պատված գնդային, գլանային կամ հարթ դիէլեկտրիկներից կազմված կառուցվածքների կլանիչ հատկությունները:

### **Գիտական նորույթը**

1. Ցույց է տրվել, որ մետաղապատ հիմքով կիսազլանային դիէլեկտրիկական միկրոռեզոնատորը, համատեղելով Ֆաբրի-Պերոյի և շնչացող մոդերով միկրոռեզոնատորի հատկությունները, մեծ բարորակության և արտաքին ազդակների նկատմամբ խիստ զգայունության շնորհիվ, կարող է վերահսկելիորեն կառավարել լուսային ալիքը:

2. Առաջարկվել է ալիքատարի հետ ինտեգրված կիսազլանային միկրոռեզոնատորի նոր կառուցվածք, որում ալիքատարային մոդի և կիսազլանի շնչացող մոդերի միջև կապը իրականանում է ալիքատարը և կիսազլանը բաժանող բարակ մետաղական թաղանթի միջոցով: Հարթ ալիքատարի և կիսազլանային միկրոռեզոնատորի միջև կառավարելի կապի ստեղծումը հնարավորություն է տալիս կառուցվածքը ինտեգրալային օպտիկայի ոլորտում օգտագործել որպես մոդուլատոր:
3. Մոդելավորման միջոցով ցույց են տրվել նիկելից ուղղանկյունաձև նանոանտենաներից, սիլիկոնե մեկուսիչից և վոլֆրամե անդրադարձուցից կազմված մետանյութային կառուցվածքի արդյունավետ լայնաշերտ կլանման հատկությունները միջին և երկարալիքային ինֆրակարմիր սպեկտրներում:
4. Ցույց է տրվել, որ մետաղական բարակ թաղանթով պատված դիէլեկտրիկական գնդային և գլանային կառուցվածքներում հանդես է գալիս կոնֆլուրացիոն ռեզոնանսի երևույթը, երբ կառուցվածքի երկրաչափական չափերի և նյութերի դիէլեկտրիկական թափանցելիությունների որոշակի համադրումը ապահովում է ինֆրակարմիր ճառագայթման արդյունավետ կլանում:

### **Գործնական արժեքը**

Ատենախոսության առաջին և երկրորդ գլուխներում ներկայացված գրգռող դաշտի հետ բարակ մետաղական թաղանթի միջոցով կապված շնչացող մոդերով կիսազլանային միկրոռեզոնատորի հիման վրա կարելի է ստեղծել էլեկտրամագնիսական ալիքների ինտենսիվության արդյունավետ մոդուլատորներ, որոնք հանդիսանում են ինտեգրալային ֆոտոնիկայի կարևոր բաղադրամասերից, ինչպես նաև տակդիրի վրա ինտեգրված սենսորներ:

Մետանյութային կանոնավոր կառուցվածքով և միկրոմասնիկների վրա հիմնված կլանիչները ունեն կիրառությունների լայն շրջանակ: Կախված մետանյութային կառուցվածքի մակերևույթի մետաղի ընտրությունից, հնարավոր է ստանալ բազմաշերտ կամ լայնաշերտ կլանման բնութագրեր, որոնց շնորհիվ այդ համակարգերը կարող են օգտագործվել որպես սենսորներ, գրանցիչներ, օպտիկական բուֆերներ, կողավորման տարրեր և այլն: Մյուս կողմից, բարակ մետաղե շերտով պատված միկրոկառուցվածքների կլանման արդյունավետության, այն է՝ կլանման և երկրաչափական կտրվածքների հարաբերության, մեկից մեծ լինելը թույլ է տալիս ստեղծել ինֆրակարմիր սպեկտրի արդյունավետ կլանիչներ, որոնցում վերոնշյալ միկրոկառուցվածքները կունենան կամայական բաշխվածություն: Վերջին փաստը թույլ է տալիս կիրառել այս միկրոկառուցվածքները քողարկող

համակարգերում, ինչպես նաև որպես սենսորներ և էներգիայի արդյունավետ փոխակերպման տարրեր:

### **Պաշտպանության ներկայացվող հիմնական դրույթներ**

1. Բարակ մետաղապատ հիմքով 3 մկմ շառավղով կիսազլանային դիէլեկտրիկական ռեզոնատորում ձևավորվող շնչացող մոդերի բարորակությունը կարող է հասնել  $2 \cdot 10^4$ -ի՝ նրա հիմքից ճառագայթի մղման պայմաններում:
2. Ինտեգրալային օպտիկայի տարր հանդիսացող և հարթ ալիքատարի հետ վերահսկելիորեն կապված կիսազլանային միկրոռեզոնատորը ապահովում է ճառագայթման արագընթաց մոդուլումը նյութի բեկման ցուցիչի  $10^{-4}$  կարգի փոփոխության դեպքում:
3. Ուղղանկյուն նանոանտենաներից կազմված մետաղ-դիէլեկտրիկ-մետաղ կառուցվածքով մետանյութային կլանիչի միջոցով իրականացվում է 3.5 – 8.3 մկմ սպեկտրի արդյունավետ կլանում, որի կլանման հարաբերական շերտը ~81% է, իսկ միավոր բջջի չափերը էապես փոքր են կլանման սպեկտրի կենտրոնական ալիքի երկարությունից:
4. Ինֆրակարմիր ճառագայթման արդյունավետ, լայնաշերտ կլանումը կարող է իրականանալ ընկնող ալիքի երկարությունից զգալիորեն փոքր չափերով, համեմատաբար ցածր հաղորդականությամբ բարակ մետաղական թաղանթով պատված գնդաձև և գլանաձև դիէլեկտրական մասնիկների համակարգում:

### **Աշխատանքի ներկայացումը**

Ատենախոսության հիմնական արդյունքները զեկուցվել են Երևանի պետական համալսարանի Ռադիոֆիզիկայի և էլեկտրոնիկայի ամբիոնի, Հայ-Ռուսական համալսարանի սեմինարներում, Nanoplasmonics and Applications (Yerevan, Armenia 2018) և Molecular Plasmonics (Leibniz Institute of Photonics Technology, Jena, Germany 2019) գիտաժողովներում:

### **Հրապարակումները**

Ատենախոսության թեմայով տպագրվել է 5 գիտական աշխատանք, որոնցից 4 հոդված գրախոսվող ամսագրերում եւ 1 թեզիս, որոնք ներկայացված են սեղմագրի վերջում:

### **Ատենախոսության կառուցվածքը**

Ատենախոսությունը բաղկացած է ներածությունից, երեք գլխից, եզրակացությունից, 130 անուն գրականության ցանկից: Ատենախոսության ընդհանուր ծավալը 122 էջ է, որում առկա են 33 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** անդրադարձել ենք հարթ ալիքի միջոցով կիսազլանային կառուցվածքով շնչացող մոդերով միկրոռեզոնատորի գրգռման և մոդային բաշխվածության առանձնահատկություններին, բարորակության արժեքներին և դրա միջոցով էլեկտրամագնիսական ալիքի կառավարման հնարավորությանը:

**1.1 պարագրաֆում** ընդհանուր անդրադարձ է կատարվել շնչացող մոդերով օպտիկական միկրոռեզոնատորներին:

**1.2 պարագրաֆում** ներկայացրել ենք ռեզոնատորների բոլոր հիմնական բնութագրերը:

**1.3 պարագրաֆում** նկարագրված են շնչացող մոդերով միկրոռեզոնատորների հիմնական կառուցվածքները, դրանց բնութագրերը, մոդային բաշխվածության առանձնահատկությունները և կիրառության ոլորտները:

**1.4 պարագրաֆում** քննարկվել են շնչացող մոդերով միկրոռեզոնատորների գրգռման հիմնական մեթոդները:

**1.5 պարագրաֆում** ուսումնասիրվել են բարակ մետաղական թաղանթով պատված հիմքով և մեծ բեկման ցուցիչով կիսազլանային կառուցվածքով համակարգում շնչացող մոդերի առանձնահատկությունները:

Կիսազլանի ներսում և դրանից դուրս դաշտերը նկարագրվում են հետևյալ արտահայտությունների միջոցով [6].

$$E_z(\varphi, r, t) = A J_m(k_s r) \cdot \sin(m\varphi) \cdot \exp(i\omega t), \tag{1}$$

$$E_z(\varphi, r, t) = B H_m^{(1)}(k_e r) \cdot \sin(m\varphi) \cdot \exp(i\omega t). \tag{2}$$

Այստեղ  $J_m(k_s r)$  և  $H_m^{(1)}(k_e r)$ -ը համապատասխանաբար Բեսսելի և Հանկելի առաջին սերի և  $m$ -րդ կարգի ֆունկցիաներն են: Վերջինս որոշվում է տվյալ շնչացող մոդի ազիմուտալ քվանտային թվով:  $A$ -ն և  $B$ -ն հաստատուններ են,  $k_{s,e} = \sqrt{\varepsilon_{s,e}} \omega/c = 2\pi/\lambda_{s,e}$  ռեզոնատորի ներսում (դրանից դուրս) ալիքային թիվն է,  $\lambda_{s,e} = \lambda_0/\sqrt{\varepsilon_{s,e}}$  -ը՝ ալիքի երկարությունը: Ընդունելով, որ մետաղական շերտի

մակերևույթին էլեկտրական դաշտի տանգենցիալ բաղադրիչը հավասար է գրոյի, կիսազլանի և միջավայրի դիէլեկտրիկ թափանցելիությունների համար ունենալով  $\varepsilon_s \gg \varepsilon_e$  առնչությունը և Բեսսելի ու Հանկելի ֆունկցիաների համար օգտագործելով որոշակի մոտավորություններ, (1) և (2) հավասարումներից կիսազլանի ներսի A և դրսի B հաստատունների համար կունենանք հետևյալ առնչությունը.

$$B \approx iA \sqrt{\frac{\pi m^{1/3}}{2^{1/3}}} \frac{1}{3^{2/3} \Gamma(2/3)} \left( \frac{e}{2} \sqrt{\frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_s}} \right)^m, \quad (3)$$

որտեղ  $m \approx 2\pi R/\lambda_s$ :

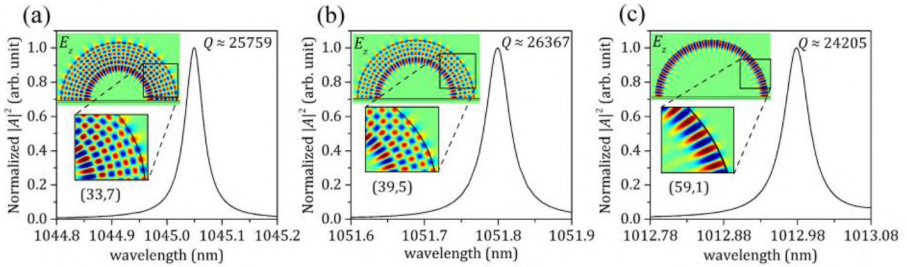
(3) հավասարումից հետևում է, որ  $|B|/|A|$  հարաբերության կախումը կիսազլանի R շառավղից էքսպոնենցիալ մարող ֆունկցիա է: Քանի որ ռեզոնատորի ճառագայթային բարորակությունը համեմատական է  $|A|^2/|B|^2$  հարաբերությանը, ապա (3) հավասարումից հնարավոր է որոշել ռեզոնանսային այնպիսի պայմաններ, որոնց դեպքում կիսազլանի կոր մակերևույթից ճառագայթային կորուստները արհամարհելի են և ռեզոնատորի բարորակությունը պայմանավորված է հիմքից ճառագայթմամբ և Ag-ում ջողւյան կորուստներով:

Կիսազլանի հիմքի մետաղական շերտի վրա ընկնող հարթ ալիքի միջոցով ՇՄ-երի գրգռման հնարավորությունը ցույց տալու համար իրականացվել են թվային հաշվարկներ՝ հիմնված ՎՏՄ-ի վրա: Որպես տակդիր՝ ընտրվել է  $\varepsilon_d = 2.25$  նյութ: Մետաղական շերտի, կիսազլանի և շրջապատի համար ընտրվել են համապատասխանաբար արծաթ (Ag), գալիումի արսենիդ (GaAs) և օդ ( $\varepsilon_e = 1$ ): Կիսազլանի շառավղի՝  $R = 3$  մկմ, մետաղի հաստությունը՝  $h = 80$  նմ:

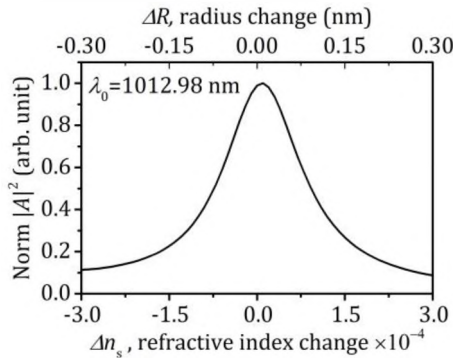
Ռեզոնատորում մեծ բարորակություններով  $\lambda_0 \approx 1045.05$  նմ – TM(33,7),  $\lambda_0 \approx 1051.8$  նմ – TM(39,5) և  $\lambda_0 \approx 1012.98$  նմ – TM(59,1) մոդերի ռեզոնանսային կորերը, բարորակությունները և  $E_z$ -բաղադրիչների բաշխվածությունները պատկերված են նկ. 1 (a-c)-ում: Ռեզոնատորի բարորակությունը գնահատվել է  $Q \sim \lambda_0/\delta\lambda$  արտահայտության միջոցով, որտեղ  $\lambda_0$ -ն ռեզոնանսային ալիքի երկարությունն է, իսկ  $\delta\lambda$ -ն՝ ռեզոնանսային կորի լայնությունը: Ըստ այդմ, TM(33,7), TM(39,5) և TM(59,1) մոդերի բարորակությունները գնահատվել են համապատասխանաբար 25759, 26367 և 24205: III-V խմբի կիսահաղորդիչները (որոնցից է GaAs-ը) առանձնանում են լավ արտահայտված էլեկտրաօպտիկական հատկություններով, որոնք թույլ են տալիս իրականացնել լույսի արդյունավետ կառավարում: Մյուս կողմից՝ ՇՄՌ-ները լայն կիրառություն են գտել որպես կենսաչափումների սարքեր, որոնց միջոցով իրականացվում է տարբեր նյութերի և չափերի նանոմասնիկների դետեկտում: Համակարգի այսպիսի հատկությունները ուսումնասիրելու համար նկ. 2-ում



պատկերված են կիսագլանի ներսում դաշտի նորմավորված ամպլիտուդի մոդուլի քառակուսու կախումը կիսագլանի բեկման ցուցիչի (ներքևի առանցք) և շառավղի (վերևի առանցք) փոփոխությունից ֆունդամենտալ TM(59,1) մոդի դեպքում:



**Նկ. 1:** Մեծ բարորակություններով որոշ մոդերի ռեզոնանսային կորերը, մոդալ թվերը, բարորակությունները և  $E_z$ -բաղադրիչի բաշխվածությունները. (a) TM(33,7),  $\lambda_0 \approx 1045.05$  նմ,  $Q \approx 25759$ . (b) TM(39,5),  $\lambda_0 \approx 1051.8$  նմ,  $Q \approx 26367$  և (c) TM(59,1),  $\lambda_0 \approx 1012.98$  նմ,  $Q \approx 24205$ .



**Նկ. 2:** Ռեզոնատորի ներսում դաշտի էներգիայի կախումը կիսագլանի բեկման ցուցիչի (ներքևի առանցք) և շառավղի (վերևի առանցք) փոփոխությունից ֆունդամենտալ TM(59,1) մոդի դեպքում: Ռեզոնատորի շառավիղը՝  $R=3$  մկմ,  $n_{\text{GaAs}}(\lambda_0=1012.98 \text{ նմ}) = 3.4992$ :

Արդյունքները ցույց են տալիս, որ ռեզոնատորի ներսում կուտակված էներգիան էապես կախված է ինչպես կիսագլանի բեկման ցուցիչից, այնպես էլ դրա շառավղից: Այսպես, կիսագլանի բեկման ցուցիչի նույնիսկ  $10^{-4}$  կարգի փոփոխությունը բերում է ռեզոնատորում կուտակված էներգիայի՝ մոտ կիսով չափ նվազման: Այս փաստը բացում է լայն հնարավորություններ՝ օգտագործելու ռեզոնատորը լույսի կառավարման համար ոչգծային և էլեկտրասօպտիկական երևույթների միջոցով: Համանման խիստ կախում առկա է նաև կիսագլանի շառավղի փոփոխությունից: Այս

դեպքում ռեզոնատորի ներսում էներգիան կիսով չափ նվազում է նույնիսկ շառավղի 0.1 նմ փոփոխությունից, ինչը պայմանավորված է ռեզոնանսային հաճախության շեղմամբ:

**1.6 պարագրաֆում** ամփոփվել են առաջին գլխի հիմնական արդյունքները, ռեզոնատորի առանցքային բնութագրերը, կիրառման ոլորտները:

**Երկրորդ գլխում** ուսումնասիրվել են ալիքատարի հետ ինտեգրված շնչացող մոդերով կիսազլանային միկրոռեզոնատորի հատկությունները:

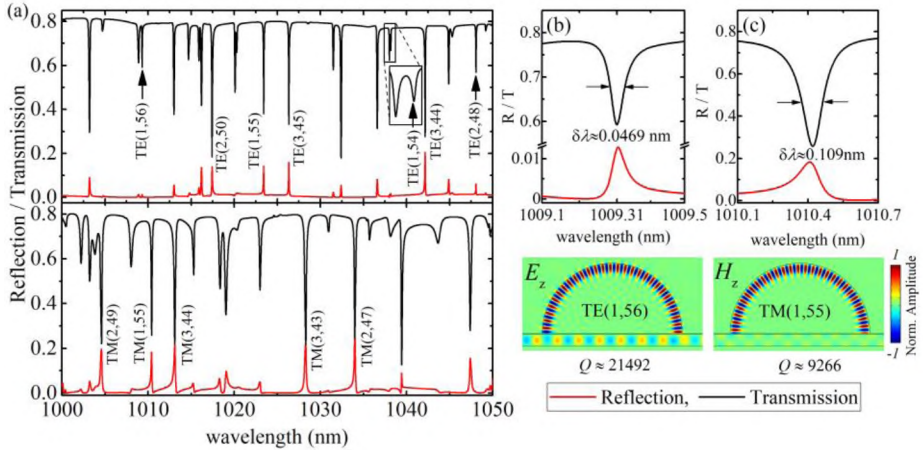
**2.1 պարագրաֆում** անդրադարձ է կատարվել ինտեգրալային ֆոտոնիկային, դրա հիմնական ֆիզիկական բաղադրիչներին, ինչպես նաև այս ոլորտում շնչացող մոդերով միկրոռեզոնատորների կիրառություններին:

**2.2 պարագրաֆում** քննարկվել է ինտեգրված համակարգերում կապի ռեժիմները, ալիքատար-ռեզոնատոր կապի տեսակները և դրանց բնութագրերը:

**2.3 պարագրաֆում** ուսումնասիրվել է հարթ թիթեղներով ալիքատար – կիսազլանային միկրոռեզոնատոր ինտեգրված համակարգ: Ալիքատարի համեմատ մեծ բեկման ցուցիչ ունեցող նյութը որպես կիսազլան օգտագործելով՝ ռեզոնատորի չափերը փոքրացվել են մինչև վակուումում աշխատանքային ալիքի երկարությունների կարգը, ինչը կարող է ապահովել մեծ ինտեգրման խտություններ: Համակարգը բաղկացած է դիէլեկտրիկ ուղղանկյուն ալիքատարից, որը վերևից և ներքևից սահմանափակված է մի քանի տասնյակ նանոմետր հաստությամբ մետաղական շերտերով: Վերևի մետաղական թաղանթի վրա կառուցված է ալիքատարի համեմատ ավելի մեծ բեկման ցուցիչով կիսազլանային տեսքով ռեզոնատորը:

Մոտ-ինֆրակարմիր սպեկտրում 500 նմ լայնությամբ  $\text{SiO}_2$ -ից միամող ուղղանկյուն ալիքատարից, 50 նմ Ag-ի շերտից, 3 մկմ շառավղով InP-ից կիսազլանից բաղկացած և օդով շրջապատված ( $n_e = 1$ ) համակարգի անցման (սև գծեր) և անդարադարձման (կարմիր գծեր) գործակիցները TE և TM ալիքների դեպքում ցույց են տրված նկ. 3 (a)-ի համապատասխանաբար վերևի և ներքևի գրաֆիկներում: Անցման սպեկտրում անկումները (մինիմումները), ինչպես նաև անդարադարձման սպեկտրում պիկերը (մաքսիմումները), որոնք առաջացել են ալիքատարային մոդի՝ ռեզոնատորի հետ կապի հետևանքով, համապատասխանում են InP-ից կիսազլանի ռեզոնանսներին: Գրաֆիկներում TE և TM մոդերի ( $\ell, m$ ) ինդեքսները ներկայացնում են կիսազլանում ձևավորվող շնչացող մոդերի շառավղային  $\ell$  և ազիմուտալ  $m$  քվանտային թվերը:

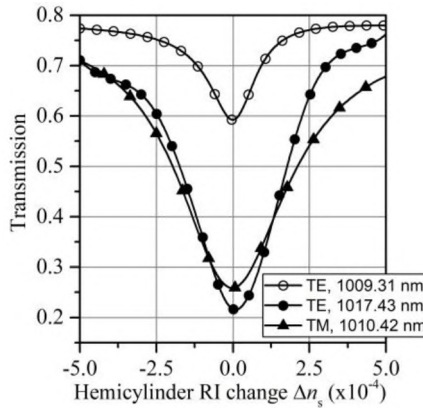
Նկ. 3 (a)-ում ցույց են տրված երեք տիպի TE և TM մոդեր՝  $\ell = 1, 2$  և 3 շառավղային մոդային կարգերով: Ֆունդամենտալ TE(1,56) և TM(1,55) մոդերի անցման և անդրադարձման սպեկտրները, դաշտերի բաշխվածությունները և բարորակությունները պատկերված են նկ. 3-ի համապատասխանաբար (b) և (c) մասերում: TE(1,56) մոդի անցման կորի լայնությունը՝  $\delta\lambda = 0.0467$  նմ, իսկ TM(1,55) մոդինը՝  $\delta\lambda = 0.109$  նմ: Ռեզոնատորի բարորակությունը գնահատվել է՝ համաձայն



**Նկ. 3:** (a) Ուսումնասիրվող համակարգի անցման (սև գծեր) և անդրադարձման (կարմիր գծեր) սպեկտրները 3 մկմ շառավղով InP-ից միկրոռեզոնատորի համար TE (վերևի գրաֆիկ) և TM (ներքևի գրաֆիկ) այիքների դեպքում: Նույնը (b) TE(1,56) և (c) TM(1,55) մոդերի համար համապատասխան մոդային բաշխվածություններով և բարորակություններով: (b) և (c)-ում սլաքներով նշված են ռեզոնանսային կորի լայնությունը և  $\delta\lambda$ -ի համապատասխան արժեքները:

$Q \sim \lambda_0 / \delta\lambda$  բանաձևի՝ ռեզոնանսային ալիքի երկարության և կորի լայնության միջոցով: Այսպիսով, 3 մկմ շառավղով InP-ից կիսազլանային միկրոռեզոնատորի TE(1,56) և TM(1,55) ֆունդամենտալ շնչացող մոդերի բարորակությունները գնահատվել են համապատասխանաբար  $\sim 2.14 \cdot 10^4$  և  $\sim 9.27 \cdot 10^3$ : Այսպիսի կառուցվածքով միկրոռեզոնատորի՝ որպես ինտենսիվության մոդուլյատոր օգտագործելու հնարավորությունը ցույց տալու համար նկ. 4-ում ցույց է տրված ալիքատարի ելքում TE(1,56), TE(2,50) TM(1,55) մոդերի անցման ինտենսիվությունների կախումը կիսազլանի բեկման ցուցիչի փոփոխությունից համապատասխանաբար 1009.31 նմ, 1017.43 նմ և 1010.42 նմ ռեզոնանսային ալիքի

երկարությունների դեպքում: Նշենք, որ InP-ի բեկման ցուցիչը 1010 նմ ալիքի երկարության շրջակայքում մոտավորապես 3.31 է: Երևում է, որ անցած ալիքի ինտենսիվությունը հնարավոր է կառավարել՝ փոխելով կիսազանի նյութի բեկման ցուցիչը  $10^{-4}$  կարգով, ինչը իրականանալի է էլեկտրաստատիկական արտահայտված հատկություններով նյութերի՝ օրինակ III-V խմբի կիսահաղորդիչների միջոցով:



**Նկ. 4:** Ալիքատարի ելքում TE(1,56), TE(2,50) TM(1,55) մոդերի անցման ինտենսիվությունների կախումը կիսազանի բեկման ցուցիչի փոփոխությունից համապատասխանաբար 1009.31 նմ, 1017.43 նմ և 1010.42 նմ ռեզոնանսային ալիքի երկարությունների դեպքում:

Մոդուլատորը կարող է պատրաստվել՝ այսպես կոչված կիսահաղորդչային միկրոուսայնակների պատրաստման տեխնոլոգիայի միջոցով կամ կիսահաղորդչային աստիճանածև բուրգի՝ քիմիական անիզոտրոպ խստածման եղանակով ցանկալի կիսազանային տեսքը ստանալով:

**2.5 պարագրաֆում** ամփոփվել են այս գլխում ստացված արդյունքները և կիսազան-ալիքատար համակարգի առանցքային հատկությունները:

**Երրորդ գլուխը** նվիրված է ինֆրակարմիր սպեկտրի էլեկտրամագնիսական ալիքների կլանիչների երկու տարատեսակի, որոնցից առաջինը հիմնված է մետանյութային, իսկ երկրորդը՝ միջուկ-կաղապար կառուցվածքով միկրոշափական մասնիկների վրա:

**3.1 պարագրաֆում**, որպես ներածություն, ներկայացված են ինֆրակարմիր սպեկտրի կլանիչներ, որոնք պայմանականորեն բաժանել ենք երկու մասի: Առաջին խմբում ներառված են մետանյութային կլանիչները, որոնք կազմված են

կանոնավոր կառուցվածքով միավոր բջիջներից: Երկրորդ խմբում ներկայացված են որոշակի մակերևույթի վրա անկանոն բաշխված նանոմասնիկներից կազմված կլանիչները:

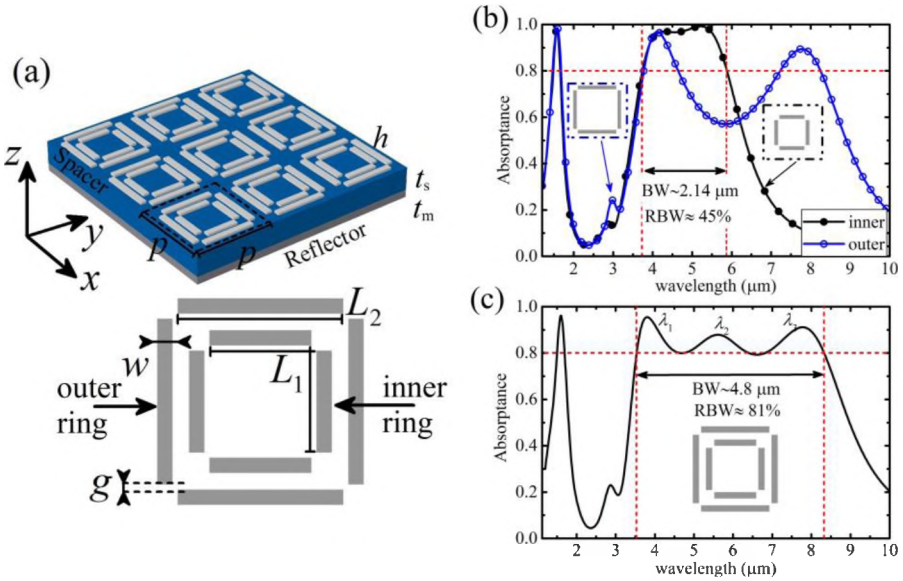
**3.2 պարագրաֆում** նկարագրված են նիկելի վրա հիմնված լայնաշերտ մետանյութային կառուցվածքի կլանող հատկությունները միջին և երկարալիքային ինֆրակարմիր տիրույթում: Ուսումնասիրվող կլանիչը հիմնված է մետաղ-դիէլեկտրիկ-մետաղ կառուցվածքի վրա, որի եռաչափ սխեմատիկ տեսքը և մակերևույթի կառուցվածքը պատկերված են նկ. 5 (a)-ում:  $p$ -ն պարբերականությունն է,  $L_1$ -ը և  $L_2$ -ը համապատասխանաբար ներքին և արտաքին օղակների կողերի երկարություններն են,  $w$ -ն՝ կողի լայնությունը, իսկ  $g$ -ն՝ երկու հարևան կողերի միջև հեռավորությունը: Տակդիրի հաստությունը  $t_m$  է, դիէլեկտրիկինը՝  $\epsilon_s$  և մետաղական կառուցվածքինը՝  $h$ : Կառուցվածքի ուսումնասիրության համար օգտագործվել է վերջավոր տարրերի մեթոդը: Քանի որ մետաղական տակդիրի հաստությունը բավական մեծ է ուսումնասիրվող սպեկտրում դրա սկիւն շերտից, անցումը գործնականում բացակայում է, և կառուցվածքի կլանումը կարելի է հաշվել

$$A(\lambda) = 1 - R(\lambda) \quad (4)$$

բանաձևով, որտեղ  $R(\lambda) = |S_{11}|^2$  -ը ալիքի երկարությունից կախված անդրադարձման գործակիցն է՝ արտահայտված ցրման  $S$ -պարամետրի միջոցով:

Ամբողջ վերլուծության ընթացքում կլանումը կհամարենք արդյունավետ, եթե այն մեծ է կամ հավասար 0.8-ի: Կառուցվածքի կլանման շերտի հարաբերական լայնությունը սահմանվում է  $RBW = 2 \cdot (\lambda_g - \lambda_s) / (\lambda_g + \lambda_s) = BW / \lambda_c$ , որտեղ  $\lambda_g$ -ը և  $\lambda_s$ -ը 80%-ից մեծ կլանման շերտի վերին և ստորին սահմաններն են,  $BW = \lambda_g - \lambda_s$  -ն՝ կլանման շերտի բացարձակ լայնությունը, իսկ  $\lambda_c$  -ն՝ դրա կենտրոնական ալիքի երկարությունը: Մոդելավորման ընթացքում օգտագործված երկրաչափական պարամետրերն են.  $t_m = 100$  նմ,  $\epsilon_s = 300$  նմ,  $p = 1$  մկմ,  $L_1 = 400$  նմ,  $L_2 = 650$  նմ,  $w = 75$  նմ,  $g = 20$  նմ և  $h = 30$  նմ: Որպես տակդիր, դիէլեկտրիկ և նանոանտենաների մետաղ օգտագործվել են վոլֆրամ, սիլիցիում և նիկել: Այս պարամետրերի դեպքում միայն արտաքին և միայն ներքին քառակուսաձև օղակներ պարունակող համակարգերի՝ մակերևույթին ուղղահայաց ընկնող էլեկտրամագնիսական դաշտի կլանման սպեկտրները ցույց են տրված նկ. 5 (b)-ում՝ համապատասխանաբար օղակաձև և շրջանաձև սիմվոլներով: Այն դեպքում, երբ 3 – 10 մկմ սպեկտրում փոքր օղակը պարունակող կառուցվածքը ցույց է տալիս հարաբերականորեն լայնաշերտ կլանում՝  $BW \sim 2.14$  մկմ կլանման շերտով 3.73 մկմ- 5.87 մկմ տիրույթում, ինչը համապատասխանում է  $RBW \sim 45\%$  հարաբերական կլանման շերտին, մեծ օղակով

կլանիչը ունի կլանման երկու ռեզոնանսներ՝ 4.11 մկմ և 7.78 մկմ ալիքի երկարություններով և կլանման 0.97 և 0.89 բացարձակ արժեքներով:



**Նկ. 5:** (a) Մետանյութային կլանիչի եռաչափ պատկերը և վերին մակերևույթի կառուցվածքը: (b-c) Համակարգի կլանման սպեկտրը մակերևույթի միայն ներքին (շրջաններ) և միայն արտաքին (օղակներ) քառակուսաձև օղակներով և երկու քառակուսաձև օղակներով կառուցվածքի դեպքում:

Քննարկված երկու քառակուսաձև օղակներով համակարգի կլանման սպեկտրը պատկերված է նկ. 5 (c)-ում: Այստեղ էֆեկտիվ կլանումը (80 % և ավելի) տեղի ունի 3.52– 8.32 մկմ ալիքի երկարությունների տիրույթում՝  $\sim 4.8$  մկմ կլանման շերտի լայնությամբ, ինչը համապատասխանում է  $\text{RBW} \sim 81\%$  հարաբերական կլանման շերտի լայնությանը (սպեկտրի կենտրոնական ալիքի երկարությունը  $\lambda_c \sim 5.92$  մկմ է): Կլանման շերտում երեք ռեզոնանսներ են նկատելի՝  $\lambda_1 = 3.8$  մկմ,  $\lambda_2 = 5.6$  մկմ և  $\lambda_3 = 7.78$  մկմ ալիքի երկարություններով և կլանման համապատասխանաբար  $\sim 0.95$ ,  $0.88$  և  $0.91$  արժեքներով: Այստեղ լայնաշերտ կլանումը պայմանավորված է նանոանտենաների՝ փոքր բարորակություններով դիպոլային մոդերի գրգռմամբ, որոնք Ni-ի՝ մեծ կորուստներով օպտիկական հատկությունների արդյունք են: Համակարգի կլանման հատկությունները անկախ են ընկնող ալիքի անկման անկյունից՝ մինչև  $65^\circ$  TM-բևեռացած ալիքների դեպքում և մինչև  $40^\circ$  TE-բևեռացած ալիքների դեպքում: Աղյուսակ 1.1-ում ներկայացված է առաջարկվող կլանիչի

երկարաչափական և կլանման բնութագրերի համեմատությունը միջին և երկարալիքային ինֆրակարմիր տիրույթների այլ կլանիչների հետ [7–10]:

**Աղ. 1:** Առաջարկվող կլանիչի կառուցվածքային և կլանման բնութագրերի համեմատությունը որոշ այլ միջին և երկարալիքային ինֆրակարմիր տիրույթի կլանիչների հետ:

Հորմ	≥ 80% կլանման տիրույթ (մկմ)	Կլանման շերտ		Միավոր քջջի չափեր		Շերտեր
		BW (մկմ)	RBW (%)	Բացարձակ (մկմ <sup>3</sup> )	λ <sub>c</sub> -ին հարաբերական	
[7]	3.2 – 4.4	1.2	31.6	0.35 × 2 × 2	0.09 × 0.53 × 0.53	3
[8]	8 – 12	4	40	1.44 × 2 (2D)	0.14 × 0.25	3
[9]	4 – 6.6	2.6	49	0.68 × 8 × 8	0.12 × 1.5 × 1.5	3
[10]	7.7 – 12.2	4.5	45	0.79 × 6.76 × 6.76	0.08 × 0.68 × 0.68	3
	5.2 – 13.7	8.5	90	1.56 × 9.2 × 9.2	0.16 × 0.92 × 0.92	5
Առաջարկվող կլանիչը	3.52 – 8.32	4.8	81	0.43 × 1 × 1	0.07 × 0.17 × 0.17	3

Ինչպես հետևում է համեմատությունից, Ni-ի վրա հիմնված կլանիչի բնութագրերը մրցունակ են գրականության մեջ հանդիպող այլ կլանիչների բնութագրերի հետ: Ավելին՝ ~ 4.8 մկմ լայնությամբ կլանման շերտ հնարավոր է եղել ապահովել միավոր քջջի շատ փոքր չափերի միջոցով  $0.07\lambda_c \times 0.17\lambda_c \times 0.17\lambda_c$ :

**3.3 պարագրաֆում** ուսումնասիրվել են երկարալիքային ինֆրակարմիր սպեկտրում ( $\lambda \sim 4 - 12$  մկմ) նանոմետրական չափերի գնդաձև և գլանային միջուկ-կաղապար կառուցվածքների կլանման հատկությունները էլեկտրաստատիկ մոտավորության սահմաններում: Միջուկի, կաղապարի և շրջակա միջավայրի դիէլեկտրիկ թափանցելիությունները նշանակվել են համապատասխանաբար  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$  և  $\epsilon_3$ -ով: Միջուկի շառավիղը  $R_1$  է, իսկ թաղանթի հաստությունը՝  $h = R_2 - R_1$ , որտեղ  $R_2$ -ը ամբողջ համակարգի շառավիղն է: Էլեկտրաստատիկ մոտավորության սահմաններում ընդունվել է, որ  $R_2 \ll \lambda$ , որտեղ  $\lambda$ -ն համակարգը շրջապատող միջավայրում ալիքի երկարությունն է: Անալիտիկ վերլուծության արդյունքում գնդաձև և գլանաձև միջուկ-կաղապար կառուցվածքների կլանման կտրվածքների համար ստացվել են հետևյալ բանաձևերը [11].

$$\sigma_{\text{abs}}^{\text{sph}} = \frac{8\pi^2}{\lambda} R_2^3 \frac{18(1-\eta)\epsilon_3\epsilon_{2i}}{\left[3(\epsilon_1 + 2\epsilon_3) + 2(1-\eta)\epsilon_{2r}\right]^2 + 4(1-\eta)^2 \epsilon_{2i}^2}, \quad (5)$$

$$\sigma_{\text{abs}}^{\text{cyl}} = \frac{8\pi^2 L}{\lambda} R_2^2 \frac{4(1-\zeta)\varepsilon_3\varepsilon_{2j}}{\left[2(\varepsilon_1 + \varepsilon_3) + (1-\zeta)\varepsilon_{2r}\right]^2 + (1-\zeta)^2 \varepsilon_{2i}^2}, \quad (6)$$

որտեղ  $\eta = R_1^3/R_2^3$  և  $\zeta = R_1^2/R_2^2$ ,  $\varepsilon_{2j} \sim |\varepsilon_{2r}| \gg \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3$ : Այս արտահայտությունները իրենց առավելագույն արժեքին են հասնում համապատասխանաբար

$$(1-\eta) = \frac{3(\varepsilon_1 + 2\varepsilon_3)}{2|\varepsilon_2|} \ll 1 \text{ և } (1-\zeta) = \frac{2(\varepsilon_1 + \varepsilon_3)}{|\varepsilon_2|} \ll 1. \quad (7)$$

այսմանների դեպքում:

Կլանման հակտությունները հարաբերականորեն բնութագրելու համար ներմուծել ենք, այսպես կոչված, կլանման և ցրման արդյունավետությունները հետևյալ կերպ.

$$Q_{\text{abs}} = \frac{\sigma_{\text{abs}}}{S} \text{ և } Q_{\text{scat}} = \frac{\sigma_{\text{scat}}}{S}. \quad (8)$$

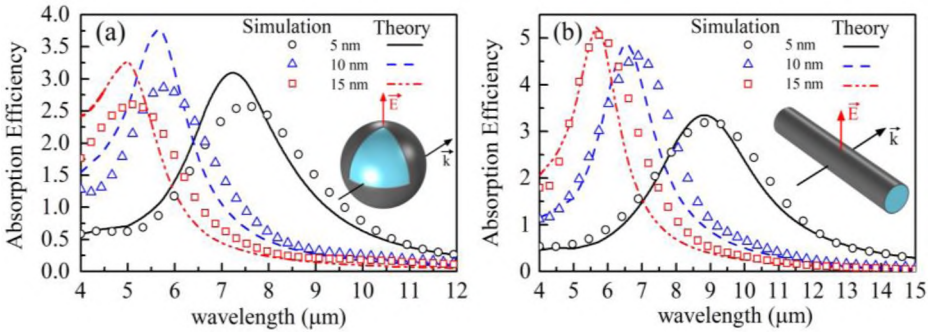
որտեղ  $S$ -ը համապատասխան կառուցվածքի լայնական կտրվածքի մակերեսն է՝

$$S_{\text{sph}} = \pi R^2 \text{ գնդի և } S_{\text{cyl}} = 2R_2 L \text{ գլանի համար:}$$

Բարակ մետաղական թաղանթով պատված գնդաձև և գլանաձև դիելեկտրիկ կառուցվածքների եռաչափ մոդելավորումը իրականացվել է ՎՏՄ-ի վրա հիմնված COMSOL Multiphysics ծրագրի միջոցով: 5 նմ (սև, օդեր), 10 նմ (կապույտ, եռանկյուններ) և 15 նմ (կարմիր, քառակուսիներ) հաստություններով տիտանե թաղանթով պատված դիելեկտրիկ միջուկով գնդաձև և գլանաձև կառուցվածքների կլանման էֆեկտիվության կախումը վակուումում ընկնող դաշտի ալիքի երկարությունից ցույց է տրված համապատասխանաբար նկ. 3.11-ի (a) և (b)-ում: Գծերը ներկայացնում են տեսական, իսկ սիմվոլները՝ մոդելավորման միջոցով ստացված արդյունքները: Կարելի է նկատել, որ երկու կառուցվածքների դեպքում տեսական և մոդելավորման արդյունքները մեծապես համընկնում են:

Օդում գտնվող ենթաալիքային չափերի համասեռ մասնիկների (դրանք բնութագրվում են  $\varepsilon$  դիելեկտրիկ թափանցելիությամբ) կլանման հատկությունների ուսումնասիրությունը ցույց է տալիս, որ արդյունավետ կլանումը տեղի է ունենում այն դեպքում, երբ դրա դիելեկտրիկ թափանցելիությունը մոտ է մեկին [11]: Խնդիրը առավել հանգամանորեն քննարկելու համար փոխարինենք մետաղական թաղանթով պատված դիելեկտրիկ գունդը, որի միջուկի և թաղանթի դիելեկտրիկ թափանցելիություններն են  $\varepsilon_1$  և  $\varepsilon_2$ , համարժեք համասեռ գնդով այնպես, որ դրա շառավիղը հավասար լինի միջուկ-կաղապար կառուցվածքի ընդհանուր  $R_2$  շառավիղին: Նշանակենք համասեռ գնդի արդյունավետ դիելեկտրիկ թափանցելիությունը  $\varepsilon_{\text{eff}}^{\text{sph}}$ -ով:





**Նկ. 6:** Տիտանե թաղանթով պատված (a) գնդաձև և (b) գլանաձև դիէլեկտրիկ միջուկով կառուցվածքների կլանման էֆեկտիվության տեսական (գծեր) և մոդելավորման միջոցով ստացված (սիմվոլներ) սպեկտրները թաղանթի 5 նմ (սև, օղեր), 10 նմ (կապույտ, եռանկյուններ) և 15 նմ (կարմիր, քառակուսիներ) հաստությունների համար: Երկու կառուցվածքների դեպքում  $R_1 = 500$  նմ,  $\epsilon_1 = 2.25$ ,  $\epsilon_3 = 1$ : Ներդիրները ցույց են տալիս կառուցվածքները և ընկնող հարթ ալիքի բնութագրերը:

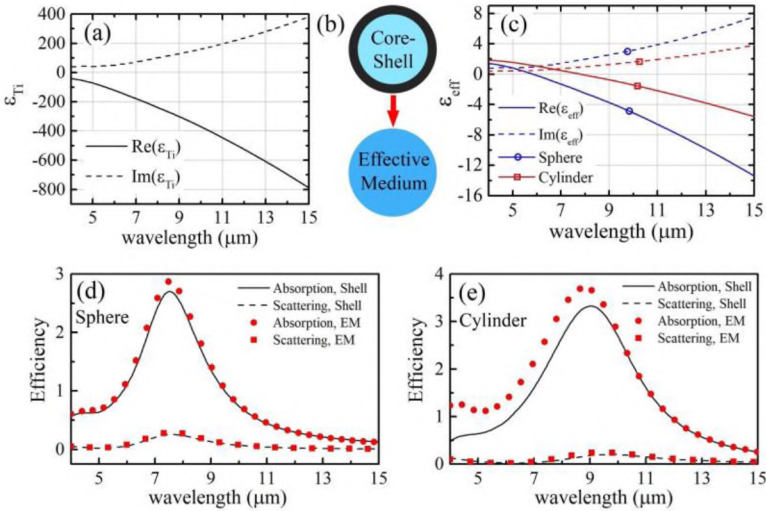
Քվազիստատիկ մոտավորության սահմաններում՝ գնդաձև և գլանաձև միջուկ-կաղապար կառուցվածքին համարժեք գնդի արդյունավետ դիէլեկտրիկ թափանցելիությունները կարելի է ստանալ խառնուրդների համար Մաքսվել-Գարնետի տեսության հիման վրա հետևյալ կերպ [12].

$$\epsilon_{\text{eff}}^{\text{sph}} = \epsilon_2 \frac{(\epsilon_1 + 2\epsilon_2) + 2\eta(\epsilon_1 - \epsilon_2)}{(\epsilon_1 + 2\epsilon_2) - \eta(\epsilon_1 - \epsilon_2)}, \quad (9)$$

$$\epsilon_{\text{eff}}^{\text{cyl}} = \epsilon_2 \frac{(\epsilon_1 + \epsilon_2) + \zeta(\epsilon_1 - \epsilon_2)}{(\epsilon_1 + \epsilon_2) - \zeta(\epsilon_1 - \epsilon_2)}, \quad (10)$$

որտեղ  $\eta = R_1^3/R_2^3$  և  $\zeta = R_1^2/R_2^2$ : Կաղապարը 5 նմ հաստությամբ Ti է, մյուս պարամետրերը նույնն են, ինչ նկ. 6-ում: Ti-ի դիէլեկտրիկ թափանցելիության իրական և կեղծ մասերը ցույց են տրված նկ. 7 (a)-ում. Միջուկ-կաղապար համակարգի և համարժեք արդյունավետ գնդի սխեմատիկ պատկերը ցույց է տրված նկ. 7 (b)-ում: Միջուկ-կաղապար կառուցվածքներին համարժեք գնդի և գլանի արդյունավետ դիէլեկտրիկ թափանցելիությունները, հաշվարկված համապատասխանաբար (9) և (10) բանաձևերով, պատկերված են նկ. 7 (c)-ում կապույտ և կարմիր գծերով: Ցույց տալու համար միջուկ-կաղապար կառուցվածքների և դրանց համարժեք արդյունավետ մասնիկների կլանման և ցրման հատկությունների համապատասխանությունը, իրականացվել են թվային

հաշվարկներ  $R = 505$  նմ շառավղով գնդաձև և գլանաձև համասեռ մասնիկների համար՝ որպես դիէլեկտրիկ թափանցելիության տվյալներ օգտագործելով նկ. 7 (c)-ում բերված արժեքները: Արդյունքները ներկայացված են նկ. 7 (d) և (e)-ում:



**Նկ. 7:** (a) Ti-ի դիէլեկտրիկ փաթանցելիությունը (Ordal et al. 1998): (b) Միջուկ-կաղապար համակարգի և համարժեք արդյունավետ գնդի սխեմատիկ պատկերը: (c) Ti-ից թաղանթով միջուկ-կաղապար կառուցվածքների արդյունավետ դիէլեկտրիկ թափանցելիությունների իրական (հոժ գծեր) և կեղծ (կետագծեր) մասերը: Կառուցվածքների պարամետրերն են.  $\epsilon_1 = 2.25$ ,  $R_1 = 500$  նմ և  $R_2 = 505$  նմ: (d, e) Միջուկ-կաղապար գնդաձև և գլանաձև կառուցվածքների (գծեր) և դրանց համարժեք արդյունավետ համասեռ կառուցվածքների (սիմվոլներ) կլանման և ցրման արդյունավետությունները:

Շնորհիվ հանաչափության մեծ կարգերի, կլանումը ամբողջական (գունդ) կամ մասնակի (գլան) անկախ է անկման անկյունից կամ բևեռացումից: Կառուցվածքները կարելի է օգտագործել խառնուրդներում որպես կառուցվածքային տարրեր, ըստ որում չկա դրանց կանոնավոր դասավորության անհրաժեշտություն:

## ԵԶՐԱԿԱՑՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐ

Մետաղապատ հիմքով կիսազլանային դիէլեկտրիկական միկրոռեզոնատորը, համատեղելով Ֆաբրի-Պերոյի և շնչացող մոդերով միկրոռեզոնատորի հատկությունները, մեծ բարորակության և արտաքին ազդակների նկատմամբ խիստ զգայունության շնորհիվ, կարող է վերահսկելիորեն կառավարել լուսային ալիքը: Որոշվել են կիսազլանի կոր մակերևույթից ճառագայթային նվազագույն կուրստները ապահովող նյութական ու երկարաչափական պարամետրերի արժեքները:

Ալիքատարի հետ համատեղված կիսազլանային միկրոռեզոնատորում, ուր ալիքատարային մոդի և կիսազլանի շնչացող մոդերի միջև վերահսկելի կապը իրականանում է ալիքատարը և կիսազլանը բաժանող բարակ մետաղական թաղանթի միջոցով, ելքային լուսային հզորությունը կարող է կտրուկ փոփոխվել՝ կիսազլանի բեկման ցուցչի փոքր փոփոխությամբ ( $10^{-4}$ ): Առաջարկված կառուցվածքի հիման վրա կարելի է նախագծել արագագործ մոդուլատորներ:

Հարթ W-Si տակդիրի և մակերևույթի՝ Ni-ից ուղղանկյունաձև նանոանոտեններով մետանյութային կառուցվածքը կարող է ծառայել որպես արդյունավետ լայնաշերտ կլանիչ միջին և երկարալիքային ինֆրակարմիր սպեկտրներում: Կառուցվածքի կլանման գործակիցը անկախ է ընկնող դաշտի բևեռացումից և անկման անկյունից:

Մետաղական բարակ թաղանթով պատված ենթաալիքային չափերի դիէլեկտրիկական գնդային և գլանային կառուցվածքներում հանդես է գալիս կոնֆիգուրացիոն ռեզոնանսի երևույթը, երբ կառուցվածքի երկարաչափական չափերի և նյութերի դիէլեկտրիկական թափանցելիությունների որոշակի համադրումը ապահովում է ինֆրակարմիր ճառագայթման արդյունավետ կլանում: Ի տարբերություն ավանդական մետանյութային կլանիչների, այս կառուցվածքների վրա հիմնված կլանիչի պարագայում չկա դրանց կանոնավոր բաշխման անհրաժեշտություն:

## Հղված գրականություն

- [1] Matsko, A.B. and Ilchenko, V.S. (2006) Optical resonators with whispering-gallery modes-part I: basics. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 12 (1), 3–14.
- [2] Ilchenko, V.S. and Matsko, A.B. (2006) Optical resonators with whispering-gallery modes-part II: applications. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 12 (1), 15–32.
- [3] Yu, P., Besteiro, L. V., Huang, Y., Wu, J., Fu, L., Tan, H.H., et al. (2019) Broadband Metamaterial Absorbers. *Advanced Optical Materials*. 7 (3), 1800995.
- [4] Cui, Y., He, Y., Jin, Y., Ding, F., Yang, L., Ye, Y., et al. (2014) Plasmonic and metamaterial structures as electromagnetic absorbers. *Laser & Photonics Reviews*. 8 (4), 495–520.

- [5] Ogawa, S. and Kimata, M. (2018) Metal-Insulator-Metal-Based Plasmonic Metamaterial Absorbers at Visible and Infrared Wavelengths: A Review. *Materials*. 11 (3), 458.
- [6] Chiasera, A., Dumeige, Y., Féron, P., Ferrari, M., Jestin, Y., Nunzi Conti, G., et al. (2010) Spherical whispering-gallery-mode microresonators. *Laser & Photonics Reviews*. 4 (3), 457–482.
- [7] Ma, W., Wen, Y., and Yu, X. (2013) Broadband metamaterial absorber at mid-infrared using multiplexed cross resonators. *Optics Express*. 21 (25), 30724.
- [8] Wang, S., Wang, Y., Zhang, S., and Zheng, W. (2017) Mid-infrared broadband absorber of full semiconductor epi-layers. *Physics Letters A*. 381 (16), 1439–1444.
- [9] Dayal, G. and Ramakrishna, S.A. (2014) Broadband infrared metamaterial absorber with visible transparency using ITO as ground plane. *Optics Express*. 22 (12), 15104.
- [10] Guo, W., Liu, Y., and Han, T. (2016) Ultra-broadband infrared metasurface absorber. *Optics Express*. 24 (18), 20586.
- [11] Landau, L.D., Pitaevskii, L.P., and Lifshitz, E.M. (1984) *Electrodynamics of Continuous Media*. 2nd ed. ELSEVIER SCIENCE & TECHNOLOGY, Oxford, United Kingdom.
- [12] Chettiar, U.K. and Engheta, N. (2012) Internal homogenization: Effective permittivity of a coated sphere. *Optics Express*. 20 (21), 22976.

## **Հրատարակված աշխատանքների ցուցակ**

### Հոդվածներ

- [1] Haroyan, H., Parsamyan, H., Yezekyan, T., and Nerkararyan, K., (2018), Semicylindrical microresonator: excitation, modal structure, and Q-factor. *Applied Optics*. 57 (22), 6309.
- [2] Parsamyan, H.A., Nerkararyan, K.V., and Bozhevolnyi, S.I., (2019), Efficient broadband infrared absorbers based on core-shell nanostructures. *Journal of the Optical Society of America B*. 36 (10), 2643.
- [3] Parsamyan, H., Haroyan, H., and Nerkararyan, K., (2020), Light control in a hemicylindrical whispering gallery microcavity-parallel plate waveguide system. *Optics Communications*. 474 126122.
- [4] Parsamyan, H., (2020), Near-perfect broadband infrared metamaterial absorber utilizing nickel. *Applied Optics*. 59 (25), 7504.

### Թեզիսներ

- [5] Parsamyan, H., Haroyan, H., Yezekyan T. and Nerkararyan, K., *Semicylindrical Whispering Gallery Mode Microresonator for Biosensing*, Book of Abstract, Molecular Plasmonics-2019 Conference, Jena, Germany, 2019: p. 45.

МОДУЛЯЦИЯ И ПОГЛОЩЕНИЕ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В МИКРО И  
НАНОМЕТРИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ С ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ СИММЕТРИЕЙ

АННОТАЦИЯ

Микрорезонаторы со сферической или цилиндрической симметрией, где формируются моды шепчущей галереи, отличаются от обычных резонаторов чрезвычайно высокой добротностью и возможностью интегрирования с другими оптическими компонентами. Это позволяет разрабатывать различные оптические устройства, такие как датчики, лазеры, фильтры, переключатели, а также модуляторы для эффективного управления светом.

Поглотители электромагнитных волн характеризуются эффективным поглощением излучения, когда волновая энергия преобразуется в омические потери или другие формы энергии, так что в результате взаимодействия волны с поглотителем не происходит значительного пропускания или отражения. Наиболее распространенные поглотители основаны на метаматериалах, представляющих собой специально разработанные структуры сконструированные из субволновых элементарных ячеек.

Основной целью диссертации является выявление наиболее благоприятных условий управления светом в полуцилиндрическом микрорезонаторе, связанным с плоским волноводом, в условиях формирования мод шепчущей галереи. Изучение поглощающих свойств покрытых тонким проводящим слоем диэлектрических структур сферической или цилиндрической формы, в инфракрасной области спектра.

Было показано, что система, состоящая из полуцилиндрического диэлектрического микрорезонатора, плоская поверхность которой покрыта тонким металлическим слоем, благодаря высокой добротности и крайней чувствительности к внешним воздействиям позволяет эффективно контролировать свет. Такая структура сочетает в себе свойства как резонаторов Фабри-Перо, так и резонаторов моды шепчущей галереи. Добротность мод шепчущей галереи, формируемых в диэлектрическом резонаторе радиусом 3 мкм, может достигать  $2 \cdot 10^4$ , при накачке с основания системы плоской электромагнитной волной.

Предложена новая структура полуцилиндрического микрорезонатора, связанного с прямоугольным волноводом, где связь между волноводными модами и модами шепчущей галереи полуцилиндра осуществляется через тонкий металлический слой между ними. Управляемая связь между волноводом и полуцилиндром открывает возможности использования структуры в качестве модулятора в интегральной оптике, где возможна быстрая модуляция света за счет изменений порядка  $10^{-4}$  показателя преломления полуцилиндра.

Исследована метаповерхностная структура для широкополосного поглощения инфракрасного излучения. Метаматериал состоит из вольфрамового отражателя, кремниевой подложки и прямоугольных никелевых нанополос в качестве верхней

структуры. Оценки показывают, что при использовании такой метаповерхности может быть достигнуто примерно идеальное поглощение в диапазоне 3.52-8.32 мкм электромагнитного спектра, когда размеры элементарной ячейки намного меньше рабочих длин волн.

Показано, что в покрытым тонким слабо проводящим металлическим слоем сферических и цилиндрических диэлектрических структурах, возникает эффект конфигурационного резонанса, когда в результате определенного сочетания геометрических параметров и диэлектрических проницаемостей структурных элементов, обеспечивается условие эффективного поглощения инфракрасного излучения. Для достижения эффективного поглощения в качестве слабо проводящих металлов можно использовать никель, титан или хром. Сечения поглощения таких конфигураций превышают значения геометрических сечений, в то же время имеют пренебрежимо малое рассеяние. Из-за высоких степеней симметрии структур поглощение нечувствительно к поляризации и угла падения волны. На основе предложенных структур можно создать достаточно тонкие маскирующие слои.

MODULATION AND ABSORPTION OF THE INFRARED RADIATION IN  
MICRO AND NANOSTRUCTURES WITH CYLINDRICAL SYMMETRY

ANNOTATION

Whispering gallery microcavities, which are dielectric structures with spherical or cylindrical symmetry, differ from conventional resonators in their extremely high Q-factor and the ability to be integrated with other optical components. This allows one to design various optical devices, such as sensors, lasers, filters, switches, as well as modulators for efficient light control.

Electromagnetic wave absorbers are structures characterized by efficient radiation absorption at operating wavelengths, with the electromagnetic energy being transformed into ohmic heat or other forms of energy, so that no sizeable transmission or reflection is produced as a result of wave interaction with an absorber. The most common absorbers are based on metamaterials representing specially designed arrays of subwavelength unit cells.

The main purpose of the thesis is to reveal the most favourable conditions of the light control in the presence of the whispering gallery modes in the semicylindrical microresonator coupled with a flat waveguide. To explore the infrared absorption properties of the spherical, cylindrical and flat dielectric structures covered by thin conducting layers, which can serve as basic elements for cloaking.

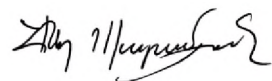
It was shown that due to high Q-factor and extreme sensitivity from the external stimuli a system composed of a semicylindrical dielectric microresonator with a flat surface covered by a thin metal layer allows for superintending control of the light. Such a system combines the properties of both Fabry-Perot and whispering gallery mode resonators. The Q-factor of the whispering gallery modes of the 3- $\mu\text{m}$ -radius dielectric resonator can reach up to  $2 \cdot 10^4$  in case of the pumping from the base of the system by a plane wave.

A new structure of a semicylindrical microresonator integrated with a rectangular waveguide was suggested. The coupling between waveguide modes and whispering gallery modes of the semicylinder is performed via a thin metal layer between them. The controllable coupling between the waveguide and semicylinder opens up possibilities of using the structure as a modulator in integrated optics. Here the fast modulation of the light is possible by changing the semicylinder refractive index in the order of  $10^{-4}$ .

Efficient broadband infrared absorption properties of a metamaterial structure composed of tungsten reflector, silicon spacer and rectangular nickel nanoantennas as a top pattern were explored by using numerical simulations. Evaluations show that by using a metasurface consisting of such unit cells high absorption in the 3.52-8.32  $\mu\text{m}$  range of the electromagnetic spectrum can be achieved when the unit cell dimensions are much smaller than the operating wavelengths.

It was demonstrated that the effect of the configuration resonance in spherical and cylindrical dielectric configurations covered by thin layers of poorly conducting metals appears.

Here the configuration resonance resulting in efficient absorption of the infrared radiation is conditioned by a special combination of the geometrical parameters and dielectric permittivities of the structural components. As poorly conducting metals, nickel, titanium and chromium can be used. The absorption cross-sections of such configurations exceed the geometrical ones and at the same time, proceeding a negligible scattering. Due to high degrees of symmetry, the absorption of configurations is highly insensitive to the incident field polarization and angle. The latter allows one to design very thin cloaking layers composed of such structures.

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Aliy H. Huseynov".