

ԵՐԵՎԱՆԻ ՊԵՏԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

Մովսիսյան Արտյոմ Սամվելի

ԷԼԵԿՏՐԱՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ԱԼԻՔՆԵՐԻ ԵՎ ՄԵՏԱՏԱՐՐԻՑ ԲԱՂԿԱՑԱԾ ՄԻԿՐՈ ԵՎ
ՆԱՆՈԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔՆԵՐԻ ԲԱՐԵԼԱՎՎԱԾ ԿԱՐԳԱՎՈՐՎՈՂ ՀԱՄԱԿՑՈՒՄ ԵՎ
ՂԵԿԱՎԱՐՈՒՄ

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

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ – 2026

YEREVAN STATE UNIVERSITY

Artyom S. Movsisyan

TUNABLE INTEGRATION AND CONTROL OF MICRO AND NANOSTRUCTURES
BASED ON ELECTROMAGNETIC WAVES AND METAELEMENTS

ABSTRACT

of the dissertation for competition of scientific degree of Doctor of Philosophy (PhD) on
speciality 01.04.03 - "Radiophysics"

YEREVAN – 2026

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Երևանի պետական համալսարանում

Գիտական ղեկավար՝ ֆ.մ.գ.դ., պրոֆեսոր Ա. Ժ. Բաբաջանյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ տ.գ.դ., պրոֆեսոր Մ. Յ. Այվազյան
ֆ.մ.գ.թ., Պ. Հ. Մուժիկյան

Առաջատար կազմակերպություն՝ ՀՀ ԳԱԱ Ֆիզիկայի կիրառական
պրոբլեմների ինստիտուտ

Պաշտպանությունը կայանալու է 2026թ հունիսի 6-ին ժամը 12:00-ին Երևանի
պետական համալսարանում գործող 049 ֆիզիկայի մասնագիտական խորհրդի
նիստում:

Հասցեն՝ Ա. Մանուկյան 1,0025 Երևան:

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ԵՊՀ գրադարանում:

Սեղմագիրն առաքված է 2026 թ. ապրիլի 22-ին:

Մասնագիտական խորհրդի
գիտական քարտուղար



ֆ.մ.գ.թ., դոցենտ
Վ. Պ. Քալանթարյան

The theme of dissertation approved in the Yerevan State University.

Scientific advisor: Prof. Dr. of Sciences (Phys. and Math.), A. J. Babajanyan

Official opponents: Prof. Dr. of Sciences (Tech.) M. Ts. Aivazyan
PhD. of Sciences (Phys. and Math.) P. H. Muzhikyan

Leading organization: Institute of Applied Problems of Physics of NAS RA

The defense of the Dissertation should be held on the 6 June 2026 at 12:00 on the session of
the specialized council physics 049 of the Yerevan State University.

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

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

The abstract is dispatched at 22 April 2026.

Scientific secretary of the Specialized Council



Dr. V. P. Kalantaryan

ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԸՆԴՀԱՆՈՒՐ ԲՆՈՒԹԱԳԻՐԸ

Աշխատանքի արդիականությունը

Մետամակերևոյթների յուրահատուկ դերը, որպես ալիքի կառավարման արդյունավետ համակարգեր, այժմ ամբողջապես հիմնավորված է: Ժամանակակից մետամակերևոյթների կիրառությունները, որոնք ծառայում են որպես ավանդական միկրոալիքային և օպտիկական նյութերի համար այլընտրանքներ, ներառում են փոխանցված կամ անդրադարձած ալիքների հաճախարնտրողունակ վարքի ղեկավարումը, բևեռացման և ալիքային ճակատի մանիպուլյացիան, իդեալական կլանումը [1], կոդավորումը, ինչպես նաև մակերևութային ալիքների գեներացիան: Առանձնահատուկ հետաքրքրություն են ներկայացնում նաև Ֆանոյի մոլտիպլետ ռեզոնանսները: Դրանք կարող են լինել ինչպես ռադիոհաճախային տիրույթում [2], այնպես էլ տեսանելի տիրույթում: Բնականաբար, Ֆանոյի մոլտիպլետ ռեզոնանսները տարաբնույթ են: Որոշ դեպքերում երկու ռեզոնանսներից մեկը տեղի է ունենում դաշտի և տվյալ կազմաձևի փոխազդեցության հետևանքով, իսկ երկրորդը արդյունք է բաղադրիչների միջև ուժեղ փոխազդեցությունների: Ինչ վերաբերում է կիրառելիությանը, քանի որ չափումները կատարվում են ազատ տարածության մեջ, ապա այն կարող է օգտագործվել անլար կապի համակարգերում, ի տարբերություն շատ այլ դեպքերի, որտեղ կոաքսիալ պորտը գրգռում է ռեզոնանսային համակարգը կոնտակտային եղանակով: Մասնավորապես ԳՀg-ային տիրույթում այդպիսի կառուցվածքը կարող է օգտագործվել որպես շերտավոր զտիչ: Հայտնի է, որ այս տեսակի համակարգերը հեռանկարային են նաև օպտիկայում և կարող են աշխատել որպես փոքր հզորությամբ փոխանջատիչ, կամ սենսոր՝ ղեկավարելով ռադիոազդանշանի ուղացումը:

Վերջին տարիներին ոսկե նանոսկավառակների մշակումն ու արտադրությունը զգալիորեն առաջընթաց են գրանցել, ինչը լայն հնարավորություններ է բացել օպտիկայի տարբեր նանոչափային սարքերի նախագծման և փորձարկման համար: Առաջին հերթին կարելի է նշել բևեռացուցիչները, որոնց աշխատանքում նկարագրված մետամակերևոյթները հիպերբոլիկ են և ունեն անիզոտրոպիա: Դրա ռեզոնանսային բնույթը օգտագործվում է նաև ֆոտոլյումինեսցենտային կարգավորիչներում և օպտոմեխանիկական մանիպուլյատորներում: Ի հավելումն սրան՝ ոչ դիսիպատիվ հատկությունները կարելի է տարբերակել նաև անիզոտրոպիայով, որի շնորհիվ այն օգտագործվում է բարձր լուծաչափով նանոլիտոգրաֆիայում: Զուգահեռաբար փորձնականորեն ուսումնասիրվել են ոսկե նանոսկավառակների մի քանի հատկություններ, որոնք նույնպես կարևոր են նմանատիպ համակարգերի հետագա հետազոտությունների համար:

Մեծ հետաքրքրություն ներկայացնող երևույթներից է նաև օպտիկական բիստաբիլությունը (ՕԲ), ոչ գծային մի երևույթ, որով բնութագրվում են երկու տարբեր արձագանքմամբ վիճակներով համակարգեր՝ կախված մուտքային ազդանշանի ինտենսիվության փոփոխության ուղղությունից: Նույն մուտքային ազդանշանի երկու տարբեր արձագանքման վիճակների առաջացումը կապված է բեկման ցուցչի ոչ գծային մոդուլյացիայի հետ՝ մուտքային լույսի ինտենսիվության շնորհիվ [3]: Մի քանի

Ֆիզիկական մեխանիզմներ նպաստում են կոմպլեքս բեկման ցուցչի փոփոխությանը՝ կախված ինտենսիվությունից. օրինակ՝ Կեոի ոչ գծայնությունը, ջերմաստիճանային երևույթը և ազատ լիցքակիրների դիսպերսիան, որն առաջանում է երկֆոտոնային կլանման հետևանքով [4-5]: Լույսի կառավարման գաղափարը հենց լույսի միջոցով ընկած է օպտիկական սարքերի պատրաստման հիմքում. հետագայում գտնվել են լայն կիրառություններ օպտիկական անջատման, տրամաբանական գործառույթների, օպտիկական թվային սարքերի մեջ, տվյալների մշակման, տեղեկատվության պահպանման համար և այլն:

Ատենախոսության նպատակը

Միկրո և նանո չափային մետամակերևույթների միջոցով ստանալ էլեկտրամագնիսական դաշտի հետ փոխազդող բարելավված և կառավարելի համակարգեր և կազմաձևեր, որոնք չափսերով կլինեն կոմպակտ, պատրաստման տեսանկյունից մատչելի և պարզ, ինչպես նաև հնարավորություն կունենան ներդրվելու տարբեր սարքերում, որպես բաղադրիչ և բաղկացուցիչ մաս:

Գիտական նորույթը

- Վերջավոր երկարությամբ հաղորդիչ ձողի ռեզոնանսային կապը կտրված Գաբուի գծի (ԳԳ) հետ ապահովում է շրջակա միջավայրի նկատմամբ հաճախաընտրողունակության բարձր աստիճան և կառավարելիությունը վերջինիս թույլ է տալիս օգտագործել հաճախային լայն տիրույթում՝ ԳՀց-ից մինչև ՏՀց:
- Ենթաալիքային չափսերով վերջավոր երկարությամբ հաղորդիչ ձողերից բաղկացած համակարգը միկրոալիքային տիրույթում գործում է որպես բաց ռեզոնատոր: Ռեզոնանսային մոդերի քանակը համապատասխանում է կազմաձևում ձողերի քանակին: Այս մոդերը առաջանում են ձողերի ներսում լիցքերի կոհերենտ տատանումներից, որոնք ցույց են տալիս տարբեր ամպլիտուդներ ու փուլեր և բնութագրվում են ալիքի դաշտի զգալի տեղայնացմամբ:
- Ֆանո ռեզոնանսով օժտված զլանաձև մետաղական կազմաձևը կարող է աշխատել որպես ալեհավաք, սենսոր կամ փոխանցատիչ X-տիրույթում անլար կապի հիման վրա: Փորձնականորեն ցույց է տրվել, որ բարդ զլանաձև համակարգերը օժտված են ֆանո ռեզոնանսով, որը ցուցադրվել է նաև ԶՄՕԻՄ-ի միջոցով:
- Մեր կողմից նախագծված բարձր արդյունավետությամբ անդրադարձնող կես ալիքային թիթեղը կարող է հաջողությամբ փոխակերպել բևեռացումը օպտիկական տիրույթում (650-800 նմ): Գոյություն ունեն օպտիմալ երկրաչափական պարամետրեր էլիպսաձև հիմքով զլանի և դիէլեկտրական տակդիրի համար, որտեղ համակարգը գործում է առավել արդյունավետ:
- Մի քանի նանոմետր լայնությամբ ճեղքի միջոցով ստեղծված միջուկների միջև ունակային կապը լույսիլիզացված մագնիսական պլազմոնային ռեզոնանսում (ԼՄՊՆ) նպաստում է ուժեղ էլեկտրամագնիսական դաշտի կուտակման նանոճեղքի տեղամասում՝ ուժեղացնելով ոչ գծային արձագանքը, որը կապված է Կեոի ոչ գծայնության հետ:

Գործնական արժեքը

- Վերջավոր երկարությամբ հաղորդիչ ձողը Գաբուի գծի հետ աշխատում է որպես փակցոցային զտիչ, որը թույլ է տալիս կառավարել թողարկման շերտի լայնությունը, թեքությունը և բարորակությունը:
- Համակարգը, որը բաղկացած է ենթաալիքային չափսերով վերջավոր երկարությամբ հաղորդիչ ձողերից, ունի ներուժ այնպիսի կիրառությունների համար, որոնք պահանջում են դաշտի կտրուկ տեղայնացում և ուժեղ ռեզոնանսային վարք:
- Ֆանո ռեզոնանսով օժտված գլանաձև մետաղական կազմաձևը կարող է աշխատել որպես ալեհավաք, սենսոր կամ փոխանցատիչ X-տիրոյթում անլար կապի համակարգերում:
- Անկախ երկրաչափությունից էլիպսաձև հիմքով նանոչափային գլանից կազմված պարբերական համակարգը որպես կես ալիքի թիթեղ, ցույց է տալիս կայունություն և բարձր արդյունավետություն:
- Ոսկու նանոմասնիկներով և ոչ գծային միջավայրով միջուկ-պատյան կազմաձևերը կարող են օգտագործվել որպես տարրական մետամակերևութային բջիջներ օպտիկական լրիվ փոխանցատման, լույսի կառավարման և հաճախությունների միախառնման գործընթացների համար:

Պաշտպանության ներկայացվող հիմնական դրույթները

1. Գաբուի գծի հատվածում տեղակայված բարակ հաղորդիչ ձողը կատարում է փակցոցային ֆիլտրի (մինչև 400 բարորակությամբ) գործառույթ, որի ռեզոնանսային հաճախությունը հնարավոր է կարգավորել՝ փոփոխելով ձողը շրջապատող թաղանթի հաստությունը և դիէլեկտրիկ թափանցելիությունը:
2. Ենթաալիքային չափսերով վերջավոր երկարությամբ հաղորդիչ ձողերից բաղկացած համակարգը բազմամող ռեզոնատոր է՝ մոտ 400 բարորակությամբ, որում ճառագայթային կորուստները զգալիորեն նվազում են, երբ հարևան ձողերը տատանվում են հակափուլերում: Ալիքային դաշտի տեղայնացման ծավալը մոտ երկու կարգով պակաս է ռեզոնանսային ալիքի երկարության խորանարդային արժեքից, որն ուղեկցվում է էլեկտրական դաշտի շուրջ 30 անգամ ուժեղացմամբ:
3. Բարակ խողովակաձև մետաղական կառուցվածքում տեղադրված ձողերի համակարգում դիտվում են երկու ֆանո ռեզոնանս՝ ցուցաբերելով 300-ից ավել բարորակություն X (8-12 ԳՀց) տիրույթում:
4. Էլիպսաձև հիմքով գլանաձև մետաղական պարբերական համակարգը հանդիսանում է անդրադարձնող կես ալիքային թիթեղ օպտիկական տեսանելի տիրույթում՝ >20 դԲ բևեռացման մարման գործակցով և 99% բևեռացման փոխակերպման գործակցով:
5. 3 նմ ճեղքով առանձնացված ոչ գծային պատյանով շրջապատված պլազմոնային նանոսֆերային երկբաղադրիչում ստեղծված միջուկների միջև ունակային կապը նպաստում է նանոճեղքում էլեկտրամագնիսական դաշտի ուժեղացման ավելի քան $3 \cdot 10^4$ անգամ:

Աշխատանքի ներկայացումը

Ատենախոսության հիմնական արդյունքները զեկուցվել են Երևանի պետական համալսարանի Ֆիզիկայի ինստիտուտի և Ռադիոֆիզիկայի և հեռահաղորդակցության ամբիոնի սեմինարներում, IRPhE 2022 (Yerevan, Armenia 2022), 1st Space Microwave Week (Noordwijk, The Netherlands 2023), IRPhE-2024 (Yerevan, Armenia 2024) և Optics & Its Applications 12th International Symposium (Yerevan, Armenia 2024) գիտաժողովներում:

Հրատարակված աշխատանքերի ցանկը

1. 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 e24477. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24477>
2. Abrahamyan T, Ohanyan G, Hambaryan D, Movsisyan A, Parsamyan H, Haroyan H, Babajanyan A and Nerkararyan K 2025 Resonant enhancement and confinement of microwave field in coupled conductive rod systems *Phys. Scr.* 100 025515. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/ada501>
3. Movsisyan A 2025 Double Fano resonances of cylindrical metastructures in X-band based on intercomponent coupling and wave interaction *Journal of Electromagnetic Waves and Applications* 39 510–22. <https://doi.org/10.1080/09205071.2025.2456663>
4. Movsisyan A, Manukyan H, Minasyan B and Babajanyan A 2024 Reflective multi-layer metasurface based on half-wave plate structure for polarization control in the visible-near-infrared region *Phys. Scr.* 99 095545. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/ad6f5a>
5. Movsisyan A and Parsamyan H 2024 Gap-enhanced optical bistability in plasmonic core–nonlinear shell dimers *Nanoscale* 16 2030–8. <https://doi.org/10.1039/D3NR04237E>

Ատենախոսության կառուցվածքը

Ատենախոսությունը բաղկացած է ներածությունից, երեք գլուխներից, եզրակացությունից, երկու հավելվածից և 194 անուն գրականության ցանկից: Ատենախոսության ընդհանուր ծավալը 121 էջ է, որում առկա է 42 նկար:

ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ներածության մեջ հիմնավորված է ատենախոսության արդիականությունը, հստակ շարադրված են նպատակը, խնդիրներն ու պաշտպանության ներկայացվող հիմնական դրույթները: Ինչպես նաև ձևակերպված է ստացված արդյունքների գիտական նորույթը և գործնական արժեքը:

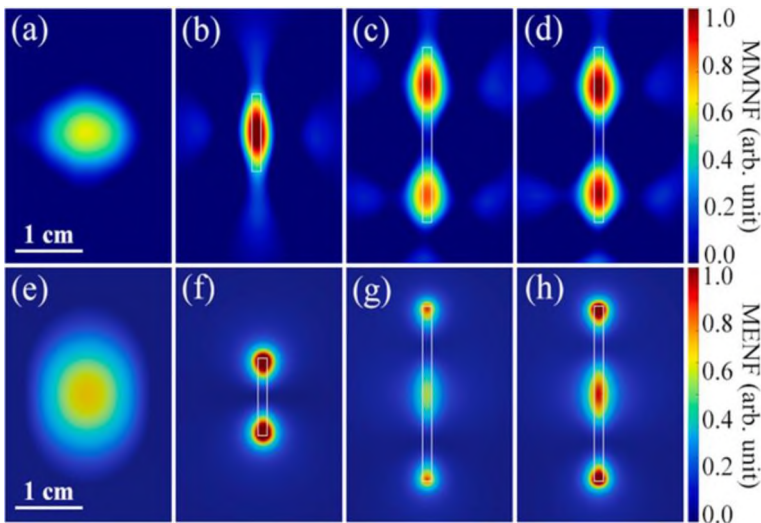
Գլուխ 1-ում ներկայացված է գերբարձր հաճախային տիրույթի համար նախատեսված մետատարրից բաղկացած կառուցվածքների փոխազդեցությունը էլեկտրամագնիսական դաշտի հետ:

Պարագրաֆ 1.1-ում ներածական բնույթի տեղեկություն է ներկայացվում գերբարձր հաճախությունների հիմնական կիրառությունների ոլորտների վերաբերյալ, ինչպես նաև տրված են հստակ ուղղություններ, թե ինչպես կարող են մեր կողմից նախագծված և փորձարկված համակարգերը նպաստել միկրոալիքային ինժեներության զարգացմանը և ինտեգրվել տարբեր սարքերին:

Պարագրաֆ 1.2-ում խոսվում է նյութերի ընտրության և մեթոդների կիրառության մասին: Մասնավորապես մենք օգտագործել ենք ԶԱՕԻՄ-ն որպես միկրոալիքային դաշտերի արտապատկերման մեթոդ դիֆրեկտրիկ շերտով պատված պղնձե ձողը ուսումնասիրելու նպատակով:

Դիֆրեկտրիկի շերտով ծածկված հաղորդիչ ձողը ապահովում է դաշտի բարելավված տեղայնացում և ճառագայթային ավելի քիչ կորուստներ, ինչը թույլ է տալիս այդպիսի տարրերը օգտագործել որպես կարգավորվող պարամետրերով ճառագայթային ալիքի ռեզոնատոր: Չնայած այդպիսի մակերևույթային ալիքները հեշտությամբ գրգռվում են ձողի առանցքի երկայնքով բևեռացված հարթ ալիքի օգնությամբ, ճառագայթման կորուստները մեծ են: Նախ, փորձնականորեն ուսումնասիրվել են դիֆրեկտրիկ շերտով պատված հաղորդիչ ձողի միկրոալիքային էլեկտրական մոտակա դաշտի (ՄՄՄԴ) արտապատկերումը հարթության մեջ 10 ԳՀց հաճախությամբ միկրոալիքային ճառագայթման ժամանակ: Արդյունքները պատկերված են Նկ. 1 (b) և (c) նույն 1.5 մմ տրամագծով և $h = 11$ մմ ու $h = 25$ մմ բարձրությամբ ձողերի համար: Կարելի է տեսնել, որ ՄՄՄԴ-ի բաշխումները երկու ձողերի երկայնքով ունեն որոշակի նմանություններ: Մասնավորապես՝ ձողերի մոտ առաջանում է միատեսակ դաշտ, որն ունի հակահանգույցի տեսք, սովյալ բարձրություն ունեցող ձողի համար մագնիսական դաշտի այդպիսի բաշխում տեղի է ունենում միայն որոշակի ռեզոնանսային հաճախություններ դեպքում, և ձողի շուրջ կենտրոնացած ալիքային դաշտը նկատելիորեն մեծանում է:

Նկ. 1 (d) ցույց է տալիս ՄՄՄԴ-ի բաշխումը պղնձի ձողի համար, որը ծածկված է բարակ միատարր պոլիմերային շերտով (դիֆրեկտրիկ թափանցելիությունը մոտ 4 է): Ձողը նույնն է ինչ Նկ. 1 (b)-ում, իսկ պոլիմերային շերտի հաստությունը 5 մմ է: Ձողի երկայնքով կանգուն ալիքի ռեզոնանսային գրգռման և դրա բնութագրերի ամբողջական ուսումնասիրության համար անհրաժեշտ է նաև ուսումնասիրել էլեկտրական դաշտի բաշխումը: Արտապատկերված դաշտերի փորձարարական արդյունքները հաստատելու համար COMSOL Multiphysics միջավայրում իրականացվել է եռաչափ (3D) լրիվ ալիքային թվային վերլուծություն, որը հիմնված է վերջավոր տարրերի մեթոդի (ՎՏՄ) վրա: Բոլոր երկրաչափական և ալիքային պարամետրերն ու բնութագրերը, ինչպիսիք են մուտքային հզորությունը և գրգռման ռեժիմը, լիովին կրկնօրինակում են փորձը: Մասնավորապես, համակարգչային նմանակման մոդելը ներառում է WR-90 բաց ծայրով ալիքատար՝ տարածվող հիմնական TE մոդով: Ալիքատարի բաց ծայրի և նմուշի միջև հեռավորությունը 5 մմ է: Ամբողջ մոդելը շրջապատված է գնդով, որի արտաքին շերտը ընտրվել է որպես իդեալական համաձայնեցված շերտ՝ դաշտերի հետադարձ ցրումը բացառելու համար:



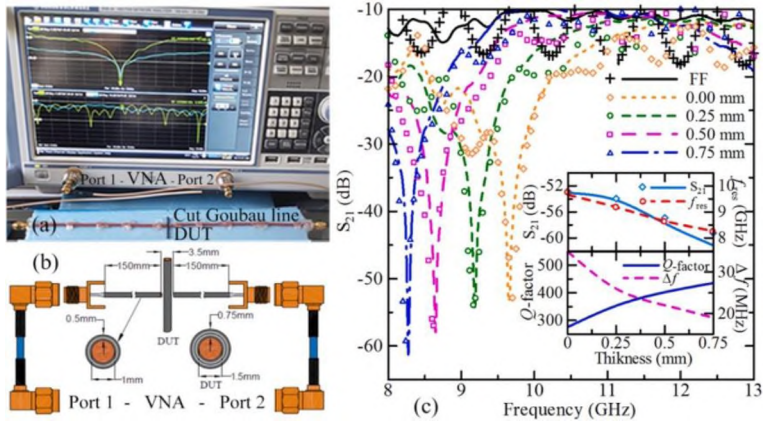
Նկ. 1: (a) Առանց նմուշ միկրոալիքային էլեկտրական մոտակա դաշտի (ՄՄՄԴ) բաշխվածությունը: 10 ԳՀց հաճախության դեպքում: ՄՄՄԴ-ի բաշխվածությունը (b) 11 մմ, (c) 25 մմ բարձրությամբ պղնձե ձողերի և (d) 0.5 մմ հաստությամբ դիէլեկտրիկ շերտով պատված 25 մմ բարձրությամբ պղնձե ձողի համար՝ ստացված ՋԱՕԻՄ-ի փորձարարական համակարգի միջոցով: (e-h) համապատասխանաբար՝ նմանակված միկրոալիքային էլեկտրական մոտակա դաշտի (ՄԷՄԴ) բաշխվածությունները նմուշից 1 մմ հեռավորության վրա: Բոլոր ձողերն ունեն 1.5 մմ տրամագիծ: Մոխրագույն ուղանկյուններով նշված են պղնձե ձողերի եզրագծերը:

Մոդելավորված ալիքատարի էլեկտրական դաշտի բաշխումները և դիէլեկտրիկով ծածկված ձողի դաշտերը ներկայացված են համապատասխանաբար Նկ. 1 (e)-ում և (f)-(h)-ում:

Մոդելավորված ՄՄՄԴ-ին համապատասխանող բաշխումները, որոնք վերաբերում են թեստավորվող փորձանմուշին ներկայացված են Նկ. 1 (e-h)-ում: Կարելի է տեսնել առանձնահատուկ տեղաշարժ մակերևութային կանգուն ալիքի էլեկտրական և մագնիսական բաղադրիչների հակահանգույցների միջև: Նկատելի է նաև էլեկտրական դաշտի կուտակումների առկայությունը ձողի եզրերի շուրջ:

Անդրադարձ է կատարվել այս էֆեկտների հնարավոր գործնական կիրառմանը: Այս ռեզոնանսային տարրի ինտեգրումը փոխանցման գծի հետ կարող է բացել մակերևութային ալիքների ռեզոնանսային հատկությունների օգտագործման նոր հնարավորություններ: Դա անելու համար մենք ընտրեցինք ԳԳ-ն, որն իրենից ներկայացնում է փոխանցման գիծ, որը հիմնված է հաղորդիչ գլանաձև միջուկի և դիէլեկտրական ծածկույթի վրա:

Որպես ԳԳ-եր փորձերի ժամանակ օգտագործվել են 0.5 մմ միջուկի շառավղով պղնձե լարեր, որոնք ծածկված են 0.25 մմ հաստությամբ պոլիէթիլենային շերտով:

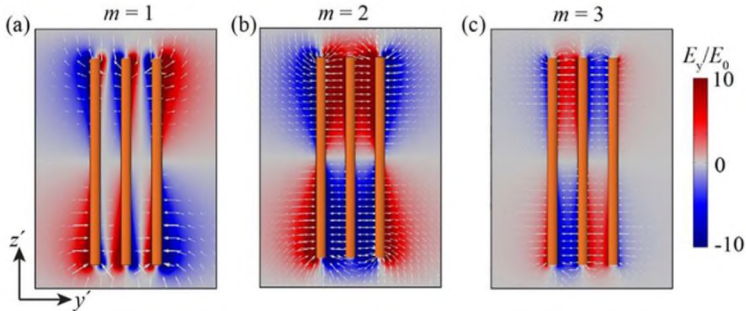


Նկ. 2: Ընդհատ ԳԳ-ին ինտեգրացված հետազոտվող ձողի և վեկտորական ցանցային վերլուծիչի (ՎՅՎ) թեստավորման կառուցվածքի (a) լուսանկարը և (b) սխեման: (c) Միկրոալիքային անցման S_{21} գործակցի արժեքները պղնձե ձողի համար (1.5 մ տրամագծով և 25 մ երկարությամբ) շրջապատող դիէլեկտրիկ շերտի տարբեր հաստությունների դեպքում: Սև հոծ գիծը ներկայացնում է համակարգն առանց պղնձե ձողի, այսինքն միայն ընդհատ ԳԳ-ն: Վերին ներդիրը ցույց է տալիս S_{21} նվազագույնի և ռեզոնանսային հաճախության կախվածությունը դիէլեկտրիկ շերտի հաստությունից: Մոդելավորման արդյունքները պատկերված են կետագծերով, իսկ փորձարարական արդյունքները՝ հոծ գծերով: Ստորին ներդիրը ցույց է տալիս համակարգի բարորակության և թողունակության կախվածությունը դիէլեկտրիկ շերտի հաստությունից:

ԳԳ-ում ստեղծվում է փոքր ճեղք և ռեզոնանսային տարրը տեղադրվում է գծին ուղղահայաց բացվածքում այնպես, որ ԳԳ-ի երկու հատվածների եզրերի և ռեզոնանսային տարրի կենտրոնի միջև նվազագույն հեռավորությունը պահպանվի (1.75մմ): ԳԳ-ի մուտքային և ելքային պորտերը միացված են Rohde & Schwarz ZNB20 ՎՅՎ-ին: Չափման արդյունքները և փորձի սարքի սխեմատիկ պատկերը պատկերված են Նկ. 2 (a), (b)-ում: Անցման S_{21} գործակցիցը, որը բաղկացած է ԳԳ-ից՝ միացված գլանաձև պղնձե միջուկով և պոլիմերային ծածկույթով ռեզոնանսային տարրին 25 մմ երկարությամբ, երբ դիէլեկտրիկ շերտի հաստությունը տատանվում է 0-ից (մաքուր պղինձ) մինչև 0.75 մմ, ցույց է տրված Նկ. 2 (c)-ում: Այստեղ համեմատված են փորձարարական արդյունքները և թվային սիմուլյացիաները:

Պարագրաֆ 1.3-ում քննարկվել է միկրոալիքային դաշտի ռեզոնանսային ուժեղացումն ու տեղայնացումը կապակցված հաղորդիչ ձողերով համակարգերում:

Նկար 3-ը ցույց է տալիս ռեզոնանսների էլեկտրական դաշտի ամպլիտուդը և ուղղության բաշխումները, երբ համակարգը բաղկացած է երեք ձողերից: Այս համակարգում ալիքային դաշտերի վարքագիծը հիմնականում համահունչ է տեսական



Նկ. 3: Գունավոր մակերևույթները և սլաքները ցույց են տալիս էլեկտրական դաշտի E_y բաղադրիչների բաշխումը երեք ձողերով համակարգի համար, որոնք համապատասխանում են (a) առաջին և (b) երկրորդ և (c) երրորդ կարգի ռեզոնանսային մոդերին համապատասխանաբար 6.37 ԳՀց, 7.50 ԳՀց և 8.03 ԳՀՑ հաճախություններին: Երկրաչափական պարամետրերը համապատասխանում են Նկ. 1.9-ում ցույց տրված պարամետրերին:

վերլուծության հիման վրա արված եզրակացությունների հետ: $m=1$ մոդի դեպքում բոլոր երեք ձողերը տատանվում են նույն փուլով, ինչը հանգեցնում է դիպոլային ճառագայթման, որը բնութագրվում է զգալի ճառագայթման կորստով և ռեզոնանսային գծի լայնացմամբ: $m=2$ մոդի համար, առաջին և երրորդ ձողերը տատանվում են տարբեր փուլերում, մինչդեռ երկրորդ ձողերը աննշան ներդրում են ունենում պրոցեսում: Սա հանգեցնում է ճառագայթման քվադրոպոլային ցրման, ռեզոնանսային գծի լայնության նվազման և ալիքային դաշտերի նկատելի աճի:

Պարագրաֆ 1.4-ում համառոտ ձևով ամփոփվել են միկրոալիքային դաշտի հետ փոխազդող հաղորդիչ ձողի վրա հիմնված մետամակերևույթների արդյունքները:

Գլուխ 2-ում ներկայացվել է գլանաձև մետաղական կառուցվածքում ֆանո ռեզոնանսների ուսումնասիրությունը: Մասնավորապես հետազոտվել են դրանց առաջացման բնույթը, մոդալ բաշխվածության տեսքը և ռեզոնանսների տեսքը:

Պարագրաֆ 2.1-ում համառոտ ձևով շարադրված է ֆանո ռեզոնանսների ընդհանուր բնույթը և տվյալ խնդրի դրվածքը: Ինչպես նաև հիմնավորված է խնդրի արդիականությունը և գիտական նորոգյալը:

Պարագրաֆ 2.2-ում ներկայացվել են ուսումնասիրվող մետակառուցվածքի տեսքը և հետազոտության մեթոդները: Գլանաձև մետաղական կառուցվածքի մեջ տեղադրվել են մետաղական ձողեր՝ մի դեպքում մեկ հատ կենտրոնում, իսկ մյուս դեպքում երկու ձողեր կենտրոնից հավասար հեռավորության վրա:

Փորձարարական չափումներն իրականացվել են ՋԱՕԻՄ-ի միջոցով, որը կարող է պատկերել մագնիսական դաշտը համասեռ ինդիում-անագ օքսիդից (ԻԱՕ) պատրաստված ինդիկատորով: Այնուամենայնիվ, ինչպես նշեցինք, փորձերը կատարվել են նաև երկու ձողերով գլանաձև կազմաձևում: Այս դեպքում մոդելավորման

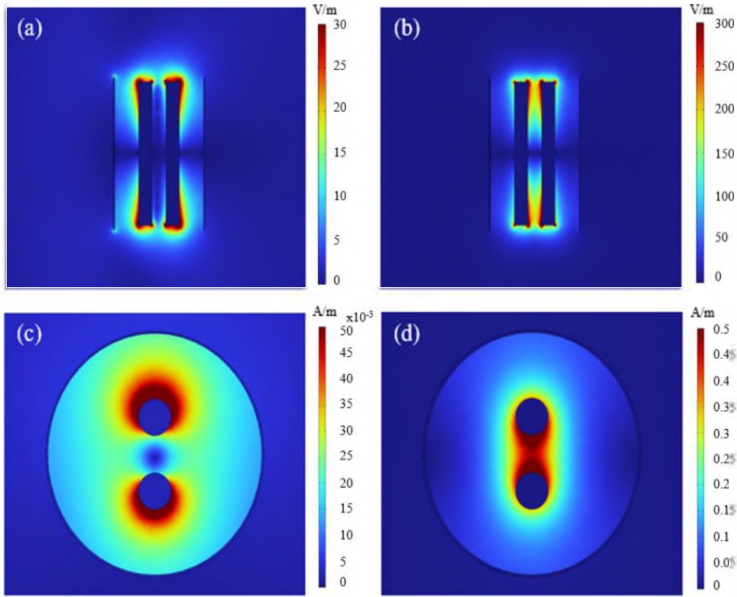
արդյունքում նկատվում է երկու ռեզոնանս, որոնք գտնվում էին միմյանցից բավականին հեռու, ինչը դարձնում է երևույթը ավելի հետաքրքիր և արժեքավոր:

Պարագրաֆ 2.3-ում ներկայացվել է արդյունքների քննարկումը և ցուցադրվել են տարբեր ֆիզիկական մեխանիզմներին բնորոշ մոդալ բաշխվածությունները:

Ինչպես արդեն նշվեց, այս գլխում ուսումնասիրված կազմաձևը ունի պարզ տեսք: Այն իրենից ներկայացնում է գլանաձև մետաղական գլան՝ կենտրոնում տեղադրված մետաղական ձողով: Երկու բաղադրիչներն էլ պատրաստված են 99%-անոց մաքուր պղնձից: Գլանի հաստությունը $t=100$ մկմ է, արտաքին շառավիղը՝ $R_1=5$ մմ է, իսկ բարձրությունը՝ $H_1 = 15$ մմ: Ձողի շառավիղը $R_0=0,75$ մմ է, իսկ բարձրությունը՝ $H_0=14$ մմ: Երկու ձողերով կառուցվածքում նրանց միջև եղած g հեռավորությունը կազմում է 1.5 մմ: Դրանց չափերը փոխվել են փորձերի և թվային մոդելավորման ժամանակ, ինչպես նաև ուսումնասիրվել են ռեզոնանսի դիրքի և ամպլիտուդի փոփոխությունները: Մոդելավորումը կատարվել է COMSOL Multiphysics ռադիոհաճախության միջավայրի մոդուլի (RF module) օգնությամբ ՎՏՄ-ի հիման վրա, որտեղ հնարավոր է ուսումնասիրել այս համակարգը $\text{F}\<g$ ալիքների միջոցով: Թվային մոդելավորման մեջ պղնձի հաղորդունակության համար ընդունվել է $\sigma=5.9 \times 10^7$ Ս/մ արժեքը: Դաշտը, որը ընկնում է հարթ էլեկտրամագնիսական ալիքի տեսքով, ներկայացվել է որպես ցրված դաշտ, որի մեջ առկա են էլեկտրական և մագնիսական դաշտերի բաղադրիչներ: Դիտարկվել է նաև էլեկտրական և մագնիսական դաշտերի ուժեղացման և ցրման կտրվածքի թվային արժեքները (scattering cross section): Քանի որ ցույց է տրված, որ համակարգը գործում է ալիքատարի անցումային գոտում (transition zone), դրանից հետևում է, որ ընկնող ալիքը կարող է մոտարկվել որպես հարթ ալիք: Հետևաբար, մոդելավորման տեսանկյունից այն կարելի է համարել որպես ազատ տարածք և հարթ ալիքի միջոցով ուսումնասիրել տվյալ կազմաձևը: Եվ նման դիտարկումը հաստատվել է օդում՝ ազատ տարածությունում կատարված սիմուլյացիաներով, որոնց արդյունքներն ամբողջությամբ համընկել են փորձարարական արդյունքների հետ:

ՋԱՕԻՄ-ով փորձում երևում է այս ռեզոնանսներից միայն մեկը, քանի որ երկրորդը տեղայնացվում է ձողերի միջև: Այն բավականին հեռավորության վրա է գտնվում ինդիկատորից (3 մմ), և ձողերի միջև եղած հատվածում խիստ լոկալիզացված է, ինչը կանխում է դրա արտապատկերումը, քանի որ մետաղական գլանը էկրանի դեր է տանում այդ մոդի զրգոման ժամանակ: Այդ իսկ պատճառով համակարգը տեղադրվել է ալիքատարում և ստացվել է առավել ճշգրիտ սպեկտրը. չափումները իրականացվել է օգտագործելով Rohde & Schwartz ZNB20 ՎՅՎ-ն: Այս դեպքում երևում են այն երկու ռեզոնանսները, որոնք դիտվել են մոդելավորման ժամանակ: Դիտարկված թեստավորվող փորձանմուշի բարձրությունը ավելին է, քան ալիքատարի փոքր կողմը, այդ իսկ պատճառով էլ օգտագործել ենք փողային անտենա, որպեսզի ալիքատարային մոդերը հավասարաչափ տարածվեն ալիքատարի ամբողջ անցումային գոտում:

Նկար 4-ը ցույց է տալիս թվային մոդելավորմամբ ստացված էլեկտրամագնիսական (էՄ) դաշտի բաշխվածության արդյունքները: Էլեկտրական դաշտի բաշխումը հետաքրքիր է նաև այն պատճառով, որ առաջին ռեզոնանսի դեպքում դաշտի



Նկ. 4: Էլեկտրական դաշտի բաշծվածությունը YZ հարթությունում (a), (b), մագնիսական դաշտի բաշխվածությունը XY հարթությունում (c), (d) , 8.92 ԳՀց (a), (c) և 9.56 ԳՀց (b), (d) հաճախությունների համար:

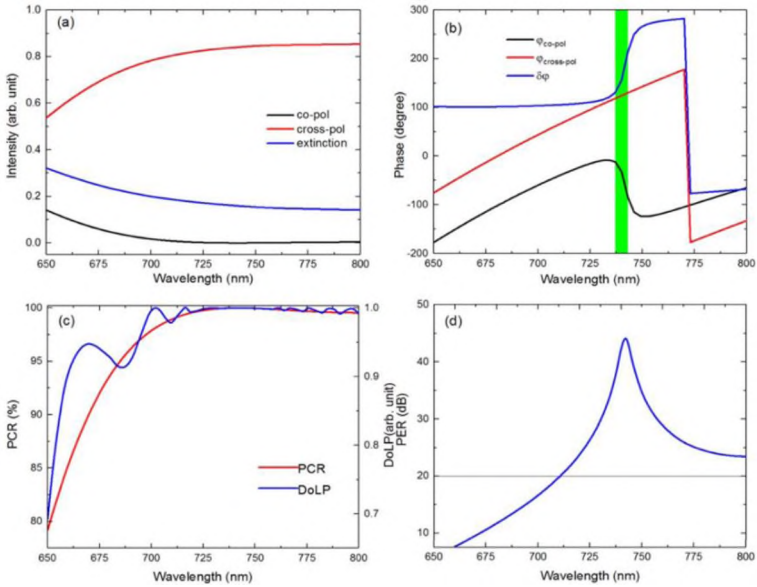
ուժեղացումը դիտվել է սիմետրիկ ձողերի արտաքին կողմի վրա (Նկ. 4 (a)), իսկ երկրորդ դեպքում՝ ձողերի միջև (Նկ. 4 (b)):

Պարագրաֆ 2.4-ում համառոտ ձևով ամփոփվել են գլանաձև մետաղական մետակառուցվածքում միկրոալիքային դաշտի գրգռման միջոցով առաջացող ֆանոնոեզոնասների բնույթը և մեխանիզմները:

Գլուխ 3-ում ուսումնասիրվել են տեսանելի տիրույթում նանոչափային մետատարրերից բաղկացած կառուցվածքների բարելավված կարգավորվող համակցումն ու ղեկավարումը:

Պարագրաֆ 3.1-ում ներածական բնույթի տեղեկատվություն է տրվում օպտիկական տիրույթի մետամակերևույթների մասին: Համառոտ շարադրվել է խնդրի դրվածքը և հիմնավորվել է դրա արդիականությունը, ինչպես նաև նախանշվել են գլխում կատարված հետազոտության հիմնական ուղղությունները:

Պարագրաֆ 3.2-ում մանրամասն ներկայացված է տեսանելի տիրույթի պարբերական համակարգ, որը հիմնված է մետամակերևույթների վրա և հանդիսանում է կես ալիքի թիթեղ:



Նկ. 5: (a) x և y ուղղություններով անդրադարձած ալիքային բաղադրիչների ինտենսիվությունները և կորուստները, (b) փոխակերպված և անփոփոխ բևեռացումով անդրադարձված ալիքների փուլերը և դրանց տարբերությունը (կանաչով ներկված գոտին սպեկտրի այն հատվածն է, որտեղ փուլերի տարբերությունը π է), (c) ԲՓԳ-ի և ԳԲԱ-ի սպեկտրալ վարքը, (d) ԲՄԳ-ի սպեկտրալ վարքը:

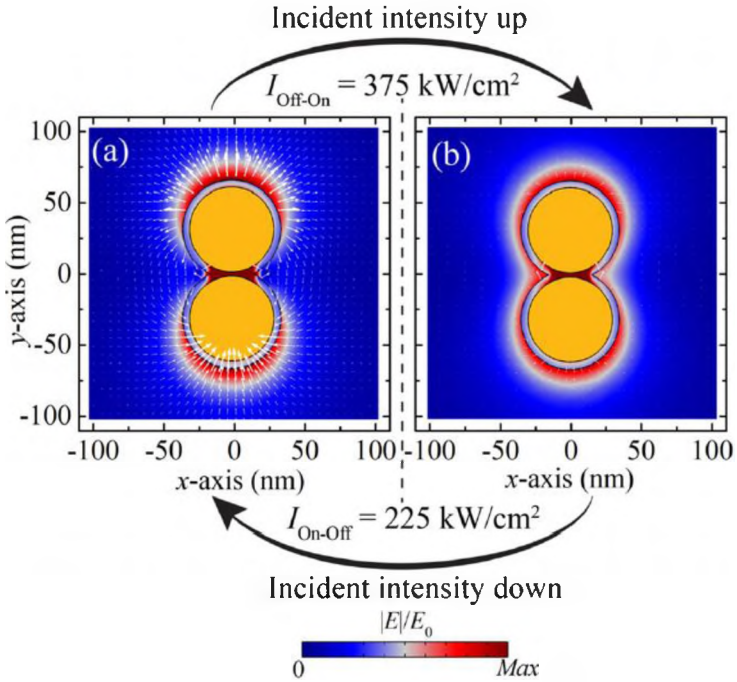
Նկար 5-ը ցույց է տալիս օպտիմալ երկրաչափական չափսերով մոդելի արդյունքները: Նկար 5 (a)-ն ցույց է տալիս x և y ուղղություններով անդրադարձած ալիքների ինտենսիվությունը և անդրադարձման ժամանակ մարումը: Կողմնակի ցրում չի դիտվել և հետևաբար այս երեք բաղադրիչների գումարը միշտ պետք է հավասար լինի 1-ի: Նկար 5 (b)-ն ցույց է տալիս փոխակերպված և սկզբնական բևեռացումով անդրադարձած ալիքների փուլերը և դրանց տարբերությունը: Նկար 5 (c)-ն ցույց է տալիս բևեռացման փոխակերպման գործակցի (ԲՓԳ) և զծային բևեռացման աստիճանի (ԳԲԱ) վարքագիծը, իսկ Նկ. 5 (d)-ն ցույց է տալիս համակարգի բևեռացման մարման գործակիցը (ԲՄԳ): Մուտքային էներգիայի ավելի քան 80%-ը վերադարձվում է որպես փոխակերպված բևեռացված ալիք, ինչը լավ արդյունք է, իսկ աշխատանքային տիրույթում կորուստները կազմում են 20%-ից պակաս: ԲՓԳ-ի և ԲՄԳ-ի առումով այս համակարգը նույնպես բավականին գրավիչ է, քանի որ ԲՄԳ-ի մակարդակը 20 դբ-ից բարձր է ամբողջ աշխատանքային տիրույթում այն դարձնում է հուսալի սարք և մոտ 100 նմ-ում (700-ից 800 նմ) ԲՓԳ-ն 99% է: Ինչ վերաբերում է փուլային պարամետրերի վերլուծությանը, ապա խնդիրը բարդ է և պետք է դիտարկել ամպլիտուդափուլային համատեքստում: Համաձայն տեսության, չփոխակերպված և փոխակերպված բևեռացված բաղադրիչների միջև փուլային տարբերությունը պետք է

հավասար լինի ու, որտեղ n -ը ամբողջ թիվ է: Արդյունքների հիման վրա ակնհայտ է դառնում, որ դա կարող է իրականացվել միայն մոտ 10 նմ շերտում (Նկ. 5 (b) կանաչ գոտի), որտեղ փուլային տարբերությունը առավելապես մոտ է π -ին, բայց երբ ալիքի երկարության ավելացումը կորուստներն ավելի քիչ են դառնում, և այս հանգամանքով պայմանավորված համակարգի արդյունավետությունը գործնականում չի նվազում, ինչի մասին է վկայում Նկ. 5 (d)-ում պատկերված ԳԲԱ-ի վարքը, որն ընդունում է արժեքներ, որոնք գրեթե հավասար են մեկին, սկսած 710 նմ-ից և փաստացի ապահովվում է ամպլիտուդների հարաբերությունն ու փուլային տարբերությունը:

Պարագրաֆ 3.3-ում մանրամասնորեն շարադրված է օպտիկական բիստաբիլության երևույթը, դրա առանձնահատկությունները և օրինաչափությունները: Քննարկվել է ոսկու նանոսֆերաների տեսք ունեցող միջուկների և ոչ գծային բեկման ցուցով պատյանի կառուցվածքը: Տույց է տրվել, որ կարելի է փոքր հզորություններով ստանալ բավականին բարորակ և կայուն օպտիկական փոխանցատիչ, որը աշխատում է խիստ որոշակի ինտենսիվությունների դեպքում կախված միջուկ – պատյան համակարգի պարամետրերից:

Նկար 6-ում պատկերված են էլեկտրական դաշտի նորմավորված ամպլիտուդի բաշխումը ՄՊ-ում 647 նմ երկարությամբ ընկնող հարթ ալիքի հետ 375 կՎտ/սմ² և 225 կՎտ/սմ² ինտենսիվությունների դեպքում: Մասնիկների շուրջ սպիտակ սլաքները ցույց են տալիս էլեկտրական դաշտի ուղղությունը: Տեսանելի են ՄՊ-ի երկու տարբեր պլազմոնային մոդեր, համապատասխան ստորին և վերին հիպերբեզիսի հանգույցի ճյուղերը: Մասնավորապես, ֆիքսելով մուտքային ալիքի երկարությունը 647 նմ-ում և բարձրացնելով ինտենսիվությունը, աստիճանաբար փոխել ենք պատյանի բեկման ցուցիչը, և հիմնական պլազմոնային դիպոլային մոդը հայտնվում է 375 կՎտ/սմ²-ի մոտ, ինչպես ցույց է տրված Նկ. 6 (a)-ում: Այստեղ, բացի էլեկտրական դաշտի՝ նաոճեղքի մեջ ուժեղ պարփակումից, էլեկտրական դաշտի ուժեղացում նկատվում է նաև ՄՊ-ի վերին և ստորին եզրերին: Այստեղ պետք է նկատի ունենալ, որ այս մոդը կարելի է դիտարկել որպես հիմնական դիպոլային մոդ, քանի որ այն միակն է, որ դիտվում է ցածր ինտենսիվություններում գծային ռեժիմում, երբ $\lambda_0 = 605$ նմ: Այնուհետև գրգռող դաշտի ինտենսիվության բարձրացման դեպքում առաջանում է մեկ այլ ռեժիմ, ինչպես ցույց է տրված Նկ. 6 (b)-ում: Այս պլազմոնային մոդը, որի էլեկտրական դաշտը, բացի նանոճեղքի շրջակայքից, նաև կենտրոնացած է ամբողջ պատյանի շուրջ, բնութագրվում է ցրման արդյունավետության ակնթարթային անկմամբ, ինչը հաստատվում է ՄՊ-ի շուրջը էլեկտրական դաշտի սլաքային գծերով և Q_{scat} -ի հիպերբեզիսային ցիկլի վերին ճյուղի ժամանակ: ՄՊ կազմաձևի բիստաբիլ արձագանքը հիմնականում պայմանավորված է նանոճեղքի հատվածում բարձր հզորության խտությամբ: Ինչպես և սպասվում էր, նույնիսկ ավելի ուժեղ դաշտեր կարող են առաջանալ նանոճեղքում դրա լայնությունը նվազեցնելու հաշվին:

ՄՊ երկբաղադրիչի նանոճեղքի լայնության ազդեցությունը ոչ գծային օպտիկական արձագանքը վերլուծելու համար ճեղքի լայնությունը կրճատվել է մինչև 2 նմ և կառուցվել է Q_{scat} -ի (ձախ առանցք) և q -ի (աջ առանցք) սպեկտրները, որոնք բերված են

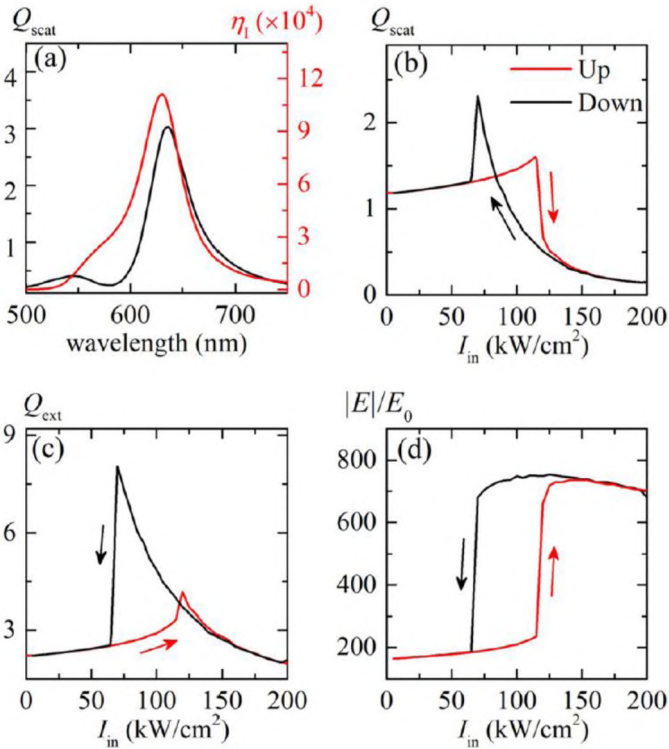


Նկ. 6: Երկու էլեկտրական դաշտի նորմավորված արժեքների բաշխվածությունը ՄՊ-ի բնութագրական պլազմոնային մոդերի մուտքային (a) 375 կՎտ/սմ² և (b) 225 կՎտ/սմ² ինտենսիվությամբ ճառագայթման դեպքում: Սլաքները պատկերում են էլեկտրական դաշտերը: Երկու մոդելներում սլաքների սանդղակը նույնն է:

Նկ. 7 (a)-ում: Գծային ռեժիմում պլազմոնային ռեզոնանսը նկատվում է, երբ $\lambda_0 = 628$ նմ է պլիքի՝ ինտենսիվության ուժեղացմամբ մինչև 10^5 : Օպտիկական բիստաբիլությունը դիտարկելու համար գրգռող դաշտի պլիքի երկարությունը ընտրվել է 671 նմ:

Q_{scat} , Q_{ext} և էլեկտրական դաշտի նորմալացված արժեքի հիսթերեզիսի ցիկլերը ցույց են տրված Նկ. 7 (b-d)-ում, որտեղ կարմիր և սև գծերը ցույց են տալիս երկբաղադրիչի արձագանքի համար համապատասխանաբար մոնոտոն աճով և նվազումով գրգռող դաշտի ինտենսիվությունը: Երևում է, որ ոչ գծային արձագանքը բավականին նման է ՄՊ-ի արձագանքին՝ 3 նմ ճեղքով:

Այնուամենայնիվ, փոփոխական ինտենսիվության տիրույթը, որն ապահովում է բիստաբիլ արձագանք, նկատելիորեն կրճատվել է: Մասնավորապես, առաջին և երկրորդ ինտենսիվության շեմերը համապատասխանաբար կազմում են մոտ 118 և 67 կՎտ/սմ²:



Նկ. 7: (a) Մարման արդյունավետության սպեկտրներ (ձախ առանցք) և ինտենսիվության ուժեղացում (աջ առանցք) դի ՄՊ երկբաղադրիչի նանոճեղքի կենտրոնում, երբ $g = 2$ նմ: Մնացած բոլոր պարամետրերը, որոնք ներկայացված են (b–d)-ում՝ Q_{scat} , Q_{ext} և նանոճեղքի կենտրոնում էլեկտրական դաշտի նորմալացված մեծությունը, կախված են ընկնող դաշտի ինտենսիվությունից: Գրգռման այլքի երկարությունը 671 նմ է: Սլաքները ցույց են տալիս ընկնող դաշտի ինտենսիվության փոփոխության ուղղությունը:

Պարագրաֆ 3.4-ում ամփոփ տեղեկություն է տրված տեսանելի տիրույթի մետամակերևույթների աշխատանքի արդյունավետության մասին:

ԵԶՐԱԿԱՑՈՒԹՅՈՒՆ

Գաբուի գծին ուղղահայաց բացվածքի տեղամասում հաղորդիչ ձողը փոխանցման սպեկտրում ստեղծում է կտրուկ փակման գոտի, որը չափազանց զգայուն է շրջակա միջավայրի փոփոխությունների նկատմամբ: Ռեզոնանսային կտրվածքի արագությունը, կախված դիէլեկտրական թաղանթի հաստությունից, մոտավորապես 1.4 ԳՀg/մմ է: Պղնձի ձողերի բարորակությունը կախված է դրանց չափից և դիէլեկտրական թաղանթի հաստությունից: Ավելի երկար ձողերը, որոնք ունեն ավելի մեծ էներգիայի

տեղայնացման տարածք, ունեն բարորակության ավելի բարձր արժեքներ, սովորաբար 1.7 անգամ (12.7-ը ընդդեմ 7.5-ի):

Վերջավոր քանակությամբ հաղորդիչ ձողերով գծային զանգվածի հետ փոխազդող էլեկտրամագնիսական ալիքը կարող է հաստատել ամուր կապ, և վերջինիս դեպքում հարակից ձողերը, որոնք գործում են որպես ճառագայթային ալիքների բաց ռեզոնատորներ, առաջացնում են մի շարք ռեզոնանսներ՝ ձողերի քանակին համապատասխան: Յուրաքանչյուր ռեզոնանս ցույց է տալիս տարբեր ձողերի երկայնքով լիցքի տատանումների ամպլիտուդներն ու փուլերը, ինչը հանգեցնում է ճառագայթման տարբեր կորուստների: Հատկանշական է, որ համակարգում ռեզոնանսային փոխազդող երկու ձողերի լիցքի հակափուլային տատանումները հանգեցնում են գրեթե 30 անգամ տեղայնացված դաշտի լարվածության մեծացման, իսկ բարորակությունը հասնում է ընդուպ մինչև 400-ի:

Մետաղական գլանային եռաբաղադրիչ համակարգը կարող է առաջացնել ֆանոյի կրկնակի ռեզոնանս, իսկ բարորակությունը գերազանցել 300-ը: Ընդ որում այդ երկու ֆանո ռեզոնանսները ունեն տարբեր ֆիզիկական բնույթ: Առաջին ռեզոնանսը 9.05 ԳՀց հաճախության մոտ, ալիքի և կազմաձևի ուժեղ փոխազդեցության արդյունք է, մինչդեռ երկրորդը ավելի սուր է և դիտվել է 9.47 ԳՀց հաճախության մոտ: Վերջինս ձողերի միջև փոխազդեցության արդյունք է: Իր պարզության և կառավարելիության շնորհիվ համակարգը կարող է լինել շատ գրավիչ միկրոալիքային տիրույթում սենսորների և այլ հաճախաընտրողունակ սարքերի պատրաստման համար:

Մետամակերևույթների վրա հիմնված եռաշերտ համակարգը, որն աշխատում է որպես կես ալիքային թիթեղ և բաղկացած է միտեղ-դիէլեկտրի-մետաղ կառուցվածքից, անդրադարձնող է և ցույց է տալիս գրեթե կատարյալ վարք 10 նմ սպեկտրի լայնությամբ տիրույթում՝ մոտ 735-745 նմ սահմաններում: Կորուստներն աննշան են, իսկ 700-800 նմ սահմաններում անդրադարձած էներգիայի 99%-ը փոխակերպվում է: Բացի այդ, համակարգն ունի առավելություն, որը բնորոշ է մետամակերեսներին. անկախ ընկնող ալիքի անկման անկյունից, այն ցույց է տալիս բարձր արդյունավետություն, և նույնիսկ այն դեպքում, երբ ընկնող ալիքի անկման անկյունը 45°-ից փոքր է, բևեռացման փոխարկման գործակիցը մնում է ավելի քան 80%:

Տեղայնացված մակերևույթային պլազմոնային ռեզոնանսը պայմանավորված ունակային բնույթով, կապված մետաղական միջուկներով երկբաղադրիչներում կարող է հանգեցնել լոկալ դաշտի ուժեղացման նանոճեղքում և հանգեցնել ոչ գծային էֆեկտների: Մասնավորապես ոչ գծային բեկման ցուցչով միջավայրում նանոճեղքով բաժանված ոսկու նանոմասնիկները կարող են առաջացնել օպտիկական բիստաբիլության երևույթը, որում հիսթերեզիսային փոխանջատման ինտենսիվության արժեքները մի քանի հարյուր կՎտ/սմ² են: Գրգռող դաշտի փոխանջատման ինտենսիվությունները կարելի է կառավարել ճեղքի չափերը փոփոխելով:

Հղված գրականություն

- [1] Parsamyan H, Haroyan H and Nerkararyan K 2022 Broadband tunable mid-infrared absorber based on conductive strip-like meta-atom elements *Materials Today Communications* **31** 103692
- [2] Yu Y, Zhu H, Sun B and Yang W 2020 Tunable toroidal Fano resonance in the multiple split-ring resonators metamaterials *Optik* **216** 164936
- [3] Gibbs H M 1985 *Optical bistability: controlling light with light* (Orlando: Academic Press)
- [4] Barclay P E, Srinivasan K and Painter O 2005 Nonlinear response of silicon photonic crystal micresonators excited via an integrated waveguide and fiber taper *Opt. Express* **13** 801
- [5] Ramiro-Manzano F, Prtljaga N, Pavesi L, Pucker G and Ghulinyan M 2013 Thermo-optical bistability with Si nanocrystals in a whispering gallery mode resonator *Opt. Lett.* **38** 3562

УЛУЧШЕННАЯ РЕГУЛИРУЕМАЯ КОМБИНАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ МИКРО И
НАНОСТРУКТУРАМИ, СОСТОЯЩИМИ ИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН И
МЕТАЭЛЕМЕНТОВ

АННОТАЦИЯ

Уникальная роль метаповерхностей как эффективных систем управления волнами в настоящее время полностью обоснована. Современные применения метаповерхностей, которые служат альтернативой традиционным микроволновым и оптическим материалам, включают управление частотно-избирательным поведением проходящих или отражённых волн, манипуляцию поляризацией и волновым фронтом, идеальное поглощение, кодирование, а также генерацию поверхностных волн. Многофункциональность метаповерхностей в основном определяется структурными характеристиками их элементарных ячеек (элементов метаповерхности), которые часто обладают особыми резонансными свойствами. Кроме того, фильтрация электромагнитных волн, являющаяся стандартной операцией в современных системах микроволновой, оптической связи и обработки сигналов, эффективно реализуется с помощью частотно-избирательной фильтрации с дисперсионными характеристиками отражения или передачи. Электромагнитный отклик метаматериалов обусловлен различными факторами, такими как геометрические параметры метаповерхности и количество элементов, а также материалы, используемые при их изготовлении. Это влияние достигается за счёт изменения размеров резонаторов, количества зазоров и их взаимного расположения.

Особый интерес представляют также мультиплетные резонансы Фано. Они могут проявляться как в радиочастотном, так и в видимом диапазоне. Естественно, мультиплетные резонансы Фано разнообразны по своей природе. В некоторых случаях один из двух резонансов возникает в результате взаимодействия поля с данной конфигурацией, тогда как второй является следствием сильного взаимодействия между компонентами. Управляемые и настраиваемые резонансы могут играть чрезвычайно важную роль в специализированных приложениях. Что касается применимости, поскольку измерения проводятся в свободном пространстве, такие системы могут использоваться в беспроводных системах связи, в отличие от многих других случаев, где коаксиальный порт возбуждает резонансную систему контактным способом. В частности, в гигагерцовом диапазоне такая структура может использоваться как полосовой фильтр. Известно, что подобные системы перспективны и в оптике и могут работать как маломощные переключатели или сенсоры, управляя задержку радиосигнала.

В последние годы разработка и производство золотых нанодисков значительно продвинулись вперёд, что открыло широкие возможности для проектирования и экспериментального исследования различных наноразмерных оптических устройств. В первую очередь можно отметить поляризаторы, в работе которых описанные метаповерхности являются гиперболическими и обладают анизотропией. Их резонансная природа также используется в фотолюминесцентных регуляторах и оптомеханических манипуляторах. Кроме того, недиссипативные свойства можно выделить благодаря анизотропии, что позволяет применять их в высокоразрешающей нанолитографии. Одним из явлений, представляющих большой интерес, также является оптическая бистабильность, нелинейное явление, характеризующее системы с двумя различными состояниями отклика в зависимости от направления изменения интенсивности входного сигнала. Возникновение двух различных состояний отклика при одном и том же входном сигнале связано с нелинейной модуляцией показателя преломления под действием интенсивности падающего света. Несколько физических механизмов способствуют изменению комплексного показателя преломления в зависимости от интенсивности, например нелинейность Керра, термооптический эффект и дисперсия свободных носителей заряда, возникающая вследствие двухфотонного поглощения. В частности, в эффекте Керра, также называемом квадратичным электрооптическим эффектом, функциональная зависимость показателя преломления от интенсивности входного сигнала определяется нелинейным коэффициентом. Идея управления светом с помощью самого света лежит в основе создания оптических устройств и нашла широкое применение в оптическом переключении, логических операциях, оптических цифровых устройствах, обработке данных, хранении информации и др.

TUNABLE INTEGRATION AND CONTROL OF MICRO AND NANOSTRUCTURES
BASED ON ELECTROMAGNETIC WAVES AND METASTRUCTURES

ANNOTATION

The unique role of metasurfaces as effective wave management systems is now fully justified. Modern applications of metasurfaces, which serve as an alternative to traditional microwave and optical materials, include controlling the frequency selective behavior of transmitted or reflected waves, polarization and wavefront manipulation, ideal absorption, encoding, and surface wave generation. The multifunctionality of metasurfaces is mainly determined by the structural characteristics of their elementary cells (metasurface elements), which often have special resonant properties. In addition, electromagnetic wave filtering, which is a standard operation in modern microwave, optical communication and signal processing systems, is effectively implemented using frequency selective filtering with dispersion characteristics of reflection or transmission. The electromagnetic response of metamaterials is determined by various factors, such as the geometric parameters of the metasurface and the number of elements, as well as the materials used in their manufacture. This effect is achieved by changing the size of the resonators, the number of gaps and their relative position.

Multipleresonances of Fano are also of particular interest. They can manifest themselves both in the radio frequency and in the visible range. Naturally, the multiplet resonances of Fano are diverse in nature. In some cases, one of the two resonances arises as a result of the interaction of the field with a given configuration, while the second is a consequence of the strong interaction between the components. Controlled and tunable resonances can play an extremely important role in specialized applications. As for applicability, since measurements are carried out in free space, such systems can be used in wireless communication systems, unlike in many other cases where the coaxial port excites the resonant system in a contact manner. In particular, in the gigahertz range, such a structure can be used as a band-pass filter. It is known that such systems are promising in optics and can work as low-power switches or sensors, controlling the delay of the radio signal.

In recent years, the development and production of gold nanodiscs has made significant progress, which has opened up wide opportunities for the design and experimental research of various nanoscale optical devices. First of all, we can mention polarizers in which the described metasurfaces are hyperbolic and have anisotropy. Their

resonant nature is also used in photoluminescent controllers and optomechanical manipulators. In addition, non-dissipative properties can be distinguished due to anisotropy, which allows them to be used in high-resolution nanolithography.

One of the phenomena of great interest is also optical bistability, a nonlinear phenomenon that characterizes systems with two different response states depending on the direction of change in the intensity of the input signal. The occurrence of two different response states with the same input signal is due to the nonlinear modulation of the refractive index under the influence of the intensity of the incident light. Several physical mechanisms contribute to a change in the complex refractive index depending on the intensity, for example, the Kerr nonlinearity, the thermo-optical effect, and the dispersion of free charge carriers resulting from two-photon absorption. Particularly, in the Kerr effect, also called the quadratic electro-optical effect, the functional dependence of the refractive index on the intensity of the input signal is determined by a nonlinear coefficient. The idea of controlling light using light itself underlies the creation of optical devices and has found wide application in optical switching, logical operations, optical digital devices, data processing, information storage, etc.

