

ԵՐԵՎԱՆԻ ՊԵՏԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

Մանուկյան Դավիթ Արմենի

**ՈՉ ԳԾԱՅԻՆ ԵՎ ԹՈՒՆԵԼԱՅԻՆ ՊՐՈՑԵՍՆԵՐԸ ՌԵԶՈՆԱՆՍԱՅԻՆ ՏԱՐՐԵՐՈՎ
ԵՐԿՇԵՐՏ ՄԵՏԱՄԱԿԵՐԵՎՈՒՅԹՆԵՐՈՒՄ**

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

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ – 2026

YEREVAN STATE UNIVERSITY

Manukyan Davit

**NONLINEAR AND TUNNELING PROCESSES IN BILAYER METASURFACES WITH
RESONANT ELEMENTS**

ABSTRACT

of the thesis for the degree of Candidate of Physical and Mathematical Sciences
Speciality 01.04.03 - “Radiophysics”

YEREVAN - 2026

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Երևանի պետական համալսարանում:

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

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ Ֆ.-մ.գ.դ.
Ժ. Ա. Գևորգյան
Ֆ.-մ.գ.թ.
Բ. Ա. Հովհաննիսյան

Առաջատար կազմակերպություն՝ Հայ-ռուսական համալսարան

Պաշտպանությունը կայանալու է 2026թ ապրիլի 29-ին ժամը 14:30-ին Երևանի պետական համալսարանում գործող 049 ֆիզիկայի մասնագիտական խորհրդի նիստում: Հասցե՝ 0025, Ա. Մանուկյան 1:

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ԵՊՀ գրադարանում:
Սեղմագիրն առաքված է 2026 թ. մարտի 27-ին:

Մասնագիտական խորհրդի
գիտական քարտուղար



Ֆ.-մ.գ.թ., դոցենտ
Վ. Պ. Քալանթարյան

The thesis topic was approved at Yerevan State University.

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

Official opponents: Doctor of Phys. Math. Sciences
Z. S. Gevorgyan
Candidate of Phys. Math. Sciences
B. A. Hovhannisyan

Leading organization: Russian-Armenian University

The thesis defense will be held on April 29, 2026, at 14:30, during a session of the Specialized Council 049 in Physics at Yerevan State University.

Address: 0025, 1 A. Manoogian.

The thesis is available for review at the YSU library.

The abstract was distributed on March 27, 2026.

Scientific secretary of
the Specialized Council:



Candidate of Phys. Math. Sciences,
Assoc. Prof. **V. P. Kalantaryan**

ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԸՆԴՀԱՆՈՒՐ ԲՆՈՒԹԱԳԻՐԸ

Աշխատանքի արդիականությունը

Էլեկտրամագնիսական ալիքների կառավարումը ֆոտոնիկայի կարևորագույն խնդիրներից է: Մետանյութերը, որոնք իրենցից ներկայացնում են որոշակի էլեկտրամագնիսական բնութագրերով օժտված ենթաալիքային կառուցվածքային տարրերից (մետատոմներից) կազմված արհեստական նյութեր, հնարավորություն են տալիս իրականացնել լույսի կառավարման այնպիսի երևույթներ, որոնք անհնար է ստանալ բնական նյութերի միջոցով: Սակայն, մեծ ֆիզիկական չափերը, ինչպես նաև բարդ եռաչափ կառուցվածքների պատրաստման մարտահրավերները սահմանափակում են մետանյութերի վրա հիմնված սարքավորումների կիրառելիությունը [1,2]:

Մետամակերևույթները մետանյութերի երկչափ տարբերակներն են, որոնք թույլ են տալիս հաղթահարել բնական նյութերում և մետանյութերում առկա խնդիրները: Մետամակերևույթների աշխատանքը հիմնված է մետատոմների մակերևույթներին էլեկտրամագնիսական ալիքների փուլի կտրուկ փոփոխության վրա, ինչի հետևանքով դրանք կարող են ունենալ ենթաալիքային հաստություն: Բացի այդ, մետամակերևույթների հարթ կոնֆիգուրացիան հեշտացնում է նման համակարգերի պատրաստումը [1]: Համապատասխան ձևով նախագծելով մետամակերևույթի կառուցվածքը կարելի է իրականացնել անդրադարձած կամ անցած ճառագայթման ամպլիտուդի և փուլի անհրաժեշտ անհամասեռ բաշխումներ, հնարավորություն տալով ստանալ ալիքների կառավարման բազմազան էֆեկտներ [1,2]:

Նյութերի ոչ գծային արձագանքը հնարավորություն է տալիս իրականացնել այնպիսի ֆունկցիոնալություններ, որոնք չեն հանդիպում գծային սարքավորումներում, ինչպիսիք են օպտիկական փոխանջատումը, հաճախության փոխակերպումը և երկկայունությունը [3]: Արդյունավետ ոչ գծային գեներացման խոստումնալից և արագ զարգացող մոտեցում են ոչ գծային մետանյութերը և մետամակերևույթները, որոնցում մետաղական կամ բարձր բեկման ցուցիչով դիէլեկտրիկ նանոկառուցվածքների զանգվածներն ենթաալիքային տիրույթներում ապահովում են զգալիորեն ուժեղացված լույս-նյութ փոխազդեցություններ: Համեմատած եռաչափ մետանյութերի հետ, հարթ մետամակերևույթները կարող են ցուցաբերել ուժեղ ոչ գծային օպտիկական արձագանքներ շատ ավելի կոմպակտ տիրույթներում [4]:

Ոչ գծային օպտիկայի կարևորագույն խնդիրներից է ներշերտ կարգավորելի տերահերցային (S<g) ճառագայթման աղբյուրների ստեղծումը, որոնք մեծ պահանջարկ ունեն այնպիսի ոլորտներում, ինչպիսիք են մոտակա դաշտի մանրադիտումը, բարձր լուծողունակությամբ սպեկտրոսկոպիան, պատկերման

համակարգերը և այլն [5]: Նեղշերտ ՏՀց ճառագայթման գեներացման բազմաթիվ մեթոդներ են առաջարկվել, ներառյալ ոչ գծային բյուրեղներում տարբերային հաճախության գեներացումը, քվանտային կասկադային լազերները, ներարկումով սաղմնավորման մեթոդը և այլն, որոնք, սակայն, բախվում են արդյունավետության, սպեկտրալ կառավարման, ինչպես նաև սարքավորումների բարդության հետ կապված մարտահրավերների [5–7]: Այսպիսով, նեղշերտ, բարձր կարգավորելիությամբ ՏՀց ճառագայթում ապահովող և համակարգի նվազագույն բարդությամբ մեխանիզմների ստեղծման խնդիրը մնում է չլուծված:

Ատենախոսության նպատակը

Ատենախոսության հիմնական նպատակն է հետազոտել երկշերտ մետամակերևույթները և նրանց տարրեր հանդիսացող՝ միմյանցից ենթաալիքային հեռավորությամբ բաժանված ռեզոնանսային ձողերն ու ժապավենները, որոնք առաջ են բերում լույսի կառավարման այնպիսի երևույթներ, ինչպիսիք են երկկայունությունը, ամբողջովին օպտիկական փոխանցատունը, ինչպես նաև նեղ տիրույթում էլեկտրամագնիսական ճառագայթման արդյունավետ ամբարումը՝ մոնոքրոմատիկ տատանումների տեսքով:

Գիտական նորույթը

1. Ցույց է տրվել, որ սինուսոիդալ մետաղական լարերից կազմված երկչափ պարբերական հյուսված ցանցի միջով անցնելիս տեղի է ունենում ռեզոնանսային հաճախությամբ ընկնող ՏՀց ճառագայթման բևեռացման պտույտ՝ պայմանավորված ընկնող բևեռացմանը զուգահեռ և ուղղահայաց սինուսոիդալ լարերի վրա ձևավորված մակերևութային ալիքների միջև ալիքային էներգիայի փոխակերպմամբ:
2. Ռեզոնանսային տարրերից կազմված և ոչ գծային բարակ թաղանթով բաժանված երկշերտ մետամակերևույթում նպաստավոր պայմաններ են ստեղծվում սպեկտրի մոտիկ ինֆրակարմիր տիրույթում օպտիկական երկկայունության երևույթի հանդես գալու համար:
3. Թվային մոդելավորման միջոցով ցույց է տրվել, որ ենթանանոմետրային ճեղքով բաժանված ոսկե նանոձողերից կազմված դիմերում էլեկտրոնների թունելային անցումը հանգեցնում է դրա կլանման և ցրման հարաբերության նշանակալի փոփոխության:
4. Երկու վերջավոր երկարությամբ հաղորդիչ ձողերի համակարգում, ուր ձևավորվում են մակերևութային կանգուն ալիքներ, իրականանում է գերկարճ ՏՀց իմպուլսի արդյունավետ փոխակերպում մոնոքրոմատիկ տատանման:

Գործնական արժեքը

Երկշերտ մետամակերևույթներում տեղի ունեցող ալիքային էներգիայի փոխակերպման և ռեզոնանսային կապակցման քննարկվող երևույթները բարենպաստ պայմաններ են ստեղծում լույսի կառավարման համար՝ հնարավորություն տալով ստեղծել կեսալիքային թիթեղներ, օպտիկական երկկայուն տարրեր և ամբողջովին օպտիկական փոխանցատիչ սարքեր:

Հաղորդիչ ձողերից կազմված համակարգում ձևավորվող կապակցված մոդերի ընտրողական գրգռումը թույլ է տալիս արդյունավետ փոխակերպել գերկարճ SՀց իմպուլսի էներգիան նեղշերտ SՀց ճառագայթման, ինչը լայն կիրառություններ կարող է ունենալ ինֆորմացիայի հաղորդման և մշակման համակարգերում, սպեկտրոսկոպիայում, կենսաչափական սենսորներում:

Պաշտպանության ներկայացվող հիմնական դրույթներ

1. Բարակ սինտուսիդալ հաղորդալարերից հյուսված ցանցի միջով անցած SՀց ճառագայթման բևեռացումը ռեզոնանսային հաճախականության տիրույթում (0.4 – 1.2 SՀց) պտտվում է 90°-ով՝ ընկնող ճառագայթման տարածման և բևեռացման ուղղությունների նկատմամբ ցանցի որոշակի տարածական կողմնորոշման դեպքում, ծառայելով որպես կեսալիքային թիթեղ:
2. Դիէլեկտրիկ շերտով բաժանված ենթաալիքային պլազմոնային նանոժապավեններից կազմված երկշերտ մետամակերևույթում առաջանում է անցման նեղշերտ ռեզոնանս՝ 4 նմ գծի լայնությամբ և 210 արժեքով բարորակությամբ: Մետամակերևույթի միջշերտային տարածությունը լցնող ոչ գծային միջավայրում ալիքային դաշտերի զգալի ռեզոնանսային ուժեղացումն ապահովում է լույսի անցման երկկայուն ռեժիմ՝ 8.21 ՄՎտ/սմ² և 8.66 ՄՎտ/սմ² շեմային ինտենսիվություններով:
3. Կիրառված ուժեղ դաշտերի հետևանքով առաջացող էլեկտրոնների թունելացման երևույթը էապես փոփոխում է միմյանցից 0.5 նմ լայնությամբ ճեղքով բաժանված պլազմոնային նանոձողերից կազմված դիմերի էլեկտրամագնիսական բնութագրերը՝ հանգեցնելով կլանման աճի և ցրման արդյունավետության շուրջ եռակի նվազման:
4. Միմյանցից ենթաալիքային հեռավորության վրա տեղակայված հաղորդիչ ձողերից կազմված համակարգը կարող է բերել գերկարճ SՀց իմպուլսներից մոնոքրոմատիկ SՀց ճառագայթման արդյունավետ և կառավարելի փոխակերպման՝ ապահովելով մեկ ձողի երկրաչափական կտրվածքից մոտ 80 անգամ ավելի մեծ գրգռման կտրվածք և փոխակերպման մոտավորապես 25% արդյունավետություն:

Աշխատանքի ներկայացումը

Աշխատանքը ներկայացվել է Համահայկական ամփոփիչ գիտաժողովում (2025), Երևանի պետական համալսարանի Ֆիզիկայի ինստիտուտի ընդհանուր սեմինարներում, ինչպես նաև Ռադիոֆիզիկայի և հեռահաղորդակցության ամբիոնի սեմինարներում:

Ատենախոսության կառուցվածքը

Ատենախոսությունը բաղկացած է առաջաբանից, երեք գլխից, եզրակացությունից, 173 անուն գրականության ցանկից: Ատենախոսության ընդհանուր ծավալը 128 էջ է, որում առկա են 29 նկար և 1 աղյուսակ:

ԱՏԵՆԱԽՈՍՈՒԹՅԱՆ ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆԸ

Առաջաբանում ներկայացված է աշխատանքի արդիականությունը, ձևակերպված են նպատակներն ու խնդիրները, պաշտպանության ներկայացվող հիմնական դրոյթները, աշխատանքի գիտական նորոյթն ու գործնական արժեքը:

Առաջին գլխում ուսումնասիրվել է գծային բևեռացված S<g ճառագայթման բևեռացման պտույտը մետաղական հյուսված ցանցից կազմված մետամակերևույթի միջով անցնելիս, ինչպես նաև մետամակերևույթի տարածական կողմնորոշման ազդեցությունը անցած ճառագայթման վրա:

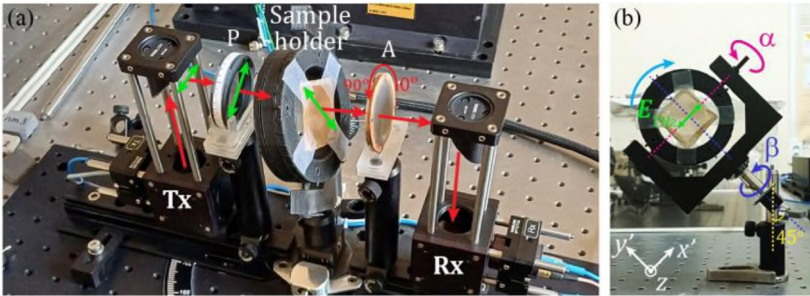
1.1 պարագրաֆում անդրադարձ է կատարվել մետամակերևույթներին, դրանց միջոցով ճառագայթման կառավարման առանձնահատկություններին, ինչպես նաև բնական նյութերի և մետանյութերի նկատմամբ դրանց առավելություններին:

1.2 և 1.3 պարագրաֆներում նկարագրվել են ընկնող ճառագայթման համապատասխանաբար փուլը և բևեռացումը կառավարող մետամակերևույթներ:

1.4 պարագրաֆում փորձարարականորեն ուսումնասիրվել է հյուսված ցանցի միջով անցնելիս գծային բևեռացված S<g ալիքների բևեռացման պտույտը, որը պայմանավորված է ընկնող բևեռացմանը զուգահեռ և ուղղահայաց սինուսոիդալ լարերի վրա ձևավորված մակերևութային ալիքների միջև ալիքային էներգիայի փոխակերպմամբ: Արդյունքում, անցած ճառագայթման բևեռացումը պտտվում է 90°-ով: Յուրյց է տրվել, որ այս երևույթը խիստ կախված է ընկնող S<g ճառագայթման տարածման և բևեռացման ուղղությունների նկատմամբ հյուսված ցանցի կողմնորոշումից:

S<g ալիքների և հյուսված ցանցի փոխազդեցությունը ուսումնասիրվել է ամբողջովին մանրաթելային կցորդմամբ S<g ժամանակային տիրույթի սպեկտրոմետրի (S<g-ժSU) օգնությամբ (TERA K15, Menlo Systems GmbH): Քանի որ օգտագործված S<g-ժSU համակարգի դետեկտորը բևեռացված է, նմուշի թափանցման սպեկտրում ցանկացած ռեզոնանս կարող է պայմանավորված լինել ինչպես նմուշի ռեզոնանսային անդրադարձմամբ/կլանմամբ, այնպես էլ բևեռացման

պտույտով: Խնդիրը լուծելու և անցած SՀց ալիքների բևեռացումը ուսումնասիրելու համար ստանդարտ SՀց-ԺSU համակարգը փոփոխվել է՝ նմուշից առաջ և հետո տեղադրելով երկու մետաղալարային-ցանցային բևեռացուցիչներ, ինչպես պատկերված է Նկ.1(a)-ում: Առաջին բևեռացուցիչը, որը նշանակված է P-ով, ընկնող ճառագայթման բևեռացման նկատմամբ (s-բևեռացված) պտտված է $+45^\circ$ -ով և, հետևաբար, անցած ալիքների բևեռացումը ընկնող բևեռացման նկատմամբ պտտված կլինի -45° -ով: Երկրորդ բևեռացուցիչը՝ նշանակված A-ով, նախատեսված է անցած SՀց ալիքների բևեռացումը վերլուծելու համար: Նմուշի բռնակը թույլ է տալիս պտտել նմուշը իր հարթության մեջ՝ ցանցի հետ կապված յուրաքանչյուր կորդինատային առանցքի շուրջը (x' և y' Նկ.1(b)-ում): α և β անկյունները

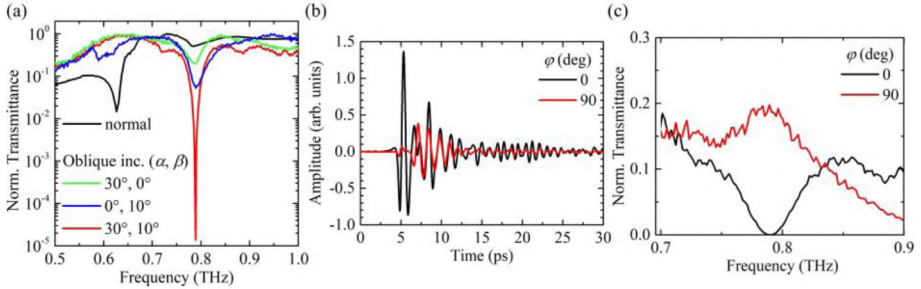


Նկ. 1. (a) Փորձարարական SՀց-ԺSU համակարգը: P-ն և A-ն՝ բևեռացուցիչն ու վերլուծիչն են, որոնք երկուսն էլ մետաղալարային-ցանցային բևեռացուցիչներ են: Բևեռացուցիչը (P) ընկնող ճառագայթման բևեռացման (հորիզոնական) նկատմամբ պտտված է $+45^\circ$ -ով, մինչդեռ վերլուծիչի (A) ϕ անկյունը դրվում է P-ի նկատմամբ 0° կամ 90° ՝ հյուսված ցանցի միջով անցած ճառագայթման բևեռացումը ուսումնասիրելու համար: (b) Նմուշի բռնակի խոշորացված պատկերը: Նկարում ցույց են տրված նաև կորդինատային առանցքների շուրջը պտույտների ուղղությունները և համապատասխան անկյունները:

համապատասխանում են x' և y' առանցքների շուրջը պտույտներին: Ընտրված հյուսված ցանցի մետաղալարերը ունեն 80 մկմ տրամագիծ և 500 մկմ պարբերականություն:

Նախ ուսումնասիրվել է նորմալ ընկնող SՀց ալիքների անցումը ընտրված հյուսված ցանցի միջով: Այդ նպատակով բևեռացուցիչը (P) և վերլուծիչը (A) ուղղվել են միմյանց զուգահեռ, իսկ հյուսված ցանցը պտտվել է իր հարթության մեջ 45° -ով՝ սինուսիդալ լարերը ընկնող դաշտի բևեռացման ուղղությամբ կողմնորոշելու համար: Ցանցի միջով SՀց ալիքների թափանցելիության ստացված սպեկտրը պատկերված է Նկ. 2(a)-ում (սև կոր): 0.63 SՀց հաճախության վրա դիտվում է ասիմետրիկ ռեզոնանս՝ մոտավորապես 0.015 թափանցելիության արժեքով: Թափանցելիության սպեկտրի նման անկումը կապված է ընկնող դաշտի

բևեռացմանը զուգահեռ ուղղված սինուսոիդալ լարերի և SՀց ալիքների կապակցման հետ [8]:



Նկ. 2. (a) Հյուսված ցանցի փորձարարական թափանցելիության սպեկտրը SՀց ալիքների նորմալ (սև) և կողային ($\alpha, \beta \approx 30^\circ, 0^\circ$ - կանաչ, $0^\circ, 10^\circ$ - կապույտ և $30^\circ, 10^\circ$ - կարմիր) անկման դեպքում: (b) Չափված SՀց ազդանշանը և (c) թափանցելիության սպեկտրը՝ հյուսված ցանցի $\alpha, \beta \approx 30^\circ, 10^\circ$ կողմնորոշման և բևեռացուցչի (P) նկատմամբ վերլուծիչի (A) 0° (սև) ու 90° (կարմիր) անկյունների դեպքում:

Հյուսված ցանցի և կողային ընկնող SՀց ճառագայթման փոխազդեցությունը ուսումնասիրելու և ռեզոնանսային անկման դիրքին հետևելու ընթացքում նկատվել է, որ ցանցի որոշակի կողմնորոշման ($\alpha \approx 30^\circ, \beta \approx 10^\circ$) դեպքում, մոտավորապես 0.79 SՀց հաճախականության վրա առաջանում է հստակ արտահայտված անկում՝ թափանցելիության մինչև 10^{-5} արժեքով, որը պատկերված է Նկ. 2(a)-ում (կարմիր կոր): Հյուսված ցանցի որոշակի ($\alpha \approx 30^\circ, \beta \approx 10^\circ$) կողմնորոշում ստանալու համար բռնակը նախ պտտվել է x' առանցքի շուրջը (օղակաձև կրիչ)՝ α անկյունը կարգավորելու համար, ապա y' առանցքի շուրջը (ամբողջ նմուշի բռնակը՝ օպտիկական սյան միջոցով) β անկյունը կարգավորելու համար՝ ինչպես պատկերված է Նկ. 1(b)-ում: Առաջին հայացքից, նման ռեզոնանս կարող էր առաջանալ ընկնող SՀց ալիքների և հյուսված ցանցի միջև ուժեղ կապակցման արդյունքում՝ նորմալ անկման պարագայում տեղի ունեցողին նման: Այնուամենայնիվ, հաշվի առնելով, որ SՀց դետեկտորը ինքնին բևեռացված է, անհրաժեշտ է նաև ուսումնասիրել անցած ալիքների բևեռացումը, որի փոփոխությունը նույնպես կարող է հանգեցնել թափանցելիության սպեկտրում անկման:

Անցած SՀց ալիքների բևեռացումը ուսումնասիրվել է երկրորդ բևեռացուցիչը (A), առաջին բևեռացուցչի (P) նկատմամբ 90° -ով պտտելու միջոցով: Հյուսված ցանցի ($\alpha \approx 30^\circ, \beta \approx 10^\circ$) միջով անցած SՀց իմպուլսների ժամանակային տեսքերը՝ բևեռացուցչին զուգահեռ և ուղղահայաց կողմնորոշված վերլուծիչի համար, պատկերված են Նկ.2(b)-ում՝ համապատասխանաբար սև և կարմիր կորերով:

Կարելի է նկատել, որ ազդանշանի ամպլիտուդի մի մասը զգալիորեն նվազել է: Ավելին, որոշակի ուշացումով մարող տատանումներ են նկատվում, երբ $S < G$ ազդանշանը փոխազդում է ցանցի հետ: Բևեռացուցչին զուգահեռ և ուղղահայաց կողմնորոշված վերլուծիչի դիրքերին համապատասխանող $S < G$ իմպուլսների՝ Ֆուրիե փոխակերպման միջոցով ստացված հաճախականային սպեկտրները ներկայացված են Նկ. 2(с)-ում: Ինչպես երևում է նկարից, միմյանց զուգահեռ բևեռացուցչի և վերլուծիչի դեպքում թափանցելիության սպեկտրում առկա է կտրուկ անկում: Սակայն, այս անկումը անհետանում է վերլուծիչը բևեռացուցչի նկատմամբ $\phi = 90^\circ$ անկյունով պտտելու դեպքում: Փոխարենը $0.79 S < G$ հաճախության վրա ձևավորվում է պիկ՝ նորմավորված թափանցելիության մոտավորապես 0.2 արժեքով, ինչը ցույց է տալիս, որ հյուսված ցանցը կարող է ծառայել որպես կեսալիքային թիթեղ:

1.5 պարագրաֆում ամփոփվել են առաջին գլխի հիմնական արդյունքները:

Երկրորդ գլխում ուսումնասիրվել են երկշերտ պլազմոնային մետամակերևույթի ռեզոնանսային օպտիկական արձագանքը, ինչպես նաև մետամակերևույթի շերտերի միջև դաշտի ինտենսիվության աճով ուղեկցվող նեղշերտ ռեզոնանսի շնորհիվ առաջացող ոչ գծային երևույթները: Նաև հետազոտվել է ինտենսիվ արտաքին էլեկտրամագնիսական դաշտի ազդեցությամբ նանոմասնիկային դիմերի ենթանանոմետրային միջմասնիկային ճեղքում էլեկտրոնների թունելացման երևույթը:

2.1 պարագրաֆում անդրադարձ է կատարվել ոչ գծային օպտիկային, Նյութերում տարբեր ոչ գծային օպտիկական երևույթներին, ինչպես նաև նկարագրվել են կոմպակտ ծավալներում նշանակալի ոչ գծայնության ապահովման տարատեսակ մոտեցումներ:

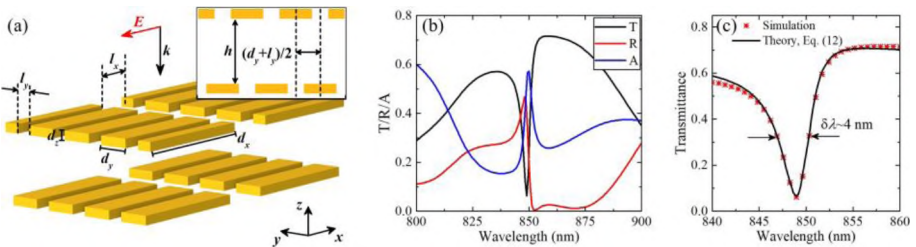
2.2 և 2.3 պարագրաֆներում անդրադարձ է կատարվել պլազմոնային և ամբողջովին դիէլեկտրիկ մետամակերևույթներում ոչ գծային օպտիկական արձագանքների ստացման առանձնահատկություններին:

2.4 պարագրաֆում ուսումնասիրվել է դիէլեկտրիկ շերտով բաժանված ենթաալիքային պլազմոնային նանոժապավեններից կազմված երկշերտ մետամակերևույթի նեղշերտ ռեզոնանսային արձագանքը: Իրականացվել է մանրամասն տեսական վերլուծություն՝ հիմնված կապված ռեզոնատորների մոդելի վրա, որում ենթադրվել է միջշերտային կապակցում հարակից տարրերի միջև: Տեսական վերլուծությունը ցույց է տալիս, որ թափանցելիության սպեկտրում նեղշերտ անկում առաջանում է միայն այն դեպքում, երբ կապակցման գործակիցը կոմպլեքս արժեք ունեցող մեծություն է: Կատարված թվային մոդելավորումները ցույց են տալիս, որ մոտ ինֆրակարմիր տիրույթում առկա է թափանցելիության նեղ անհամաչափ անկում՝ մոտավորապես 4 նմ գծի լայնությամբ, որը

համապատասխանում է տեսական արդյունքներին: Այսպիսի նեղշերտ ռեզոնանսները բարենպաստ պայմաններ են ստեղծում լույսի կառավարման համար, ինչը ուսումնասիրվել է միջշերտային միջավայրի՝ ինտենսիվությունից կախված բեկման ցուցիչի ներմուծման միջոցով: Արդյունքում, նման համակարգում կարող են իրականացվել ամբողջովին օպտիկական փոխանջատում և երկկայունություն:

Դիտարկվող երկշերտ մետամակերևույթը կազմված է $n = 1.5$ բեկման ցուցիչով համասեռ դիելեկտրիկ միջավայրում ներդրված ոսկե նանոժապավենների երկու նույնական շերտերից (Նկ. 3(a)): Նանոժապավենները իրենցից ներկայացնում են $d_x = 400$ նմ, $d_y = 100$ նմ և $d_z = 30$ նմ չափերով ուղղանկյունաձև նանոկառուցվածքներ: Նանոժապավենների միջև հեռավորությունները՝ համապատասխանաբար x և y ուղղություններով, հավասար են $l_x = 150$ նմ և $l_y = 50$ նմ: Շերտերի միջև հեռավորությունը $h = 200$ նմ է: Մետամակերևույթի շերտերը միմյանց նկատմամբ շեղված են y առանցքի երկայնքով՝ մետամակերևույթի պարբերության կեսին հավասար հեռավորությամբ, այնպես որ ստորին շերտի յուրաքանչյուր նանոժապավեն տեղակայված է վերին շերտի նանոժապավենների միջև բացվածքի անմիջապես ներքևում:

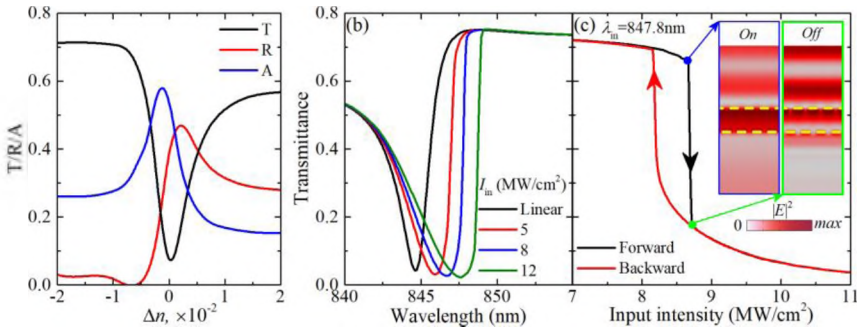
Դիտարկվող երկշերտ մետամակերևույթի լույսի կառավարման ունակությունները ուսումնասիրելու համար COMSOL Multiphysics միջավայրում իրականացվել է թվային մոդելավորում՝ հիմնված վերջավոր տարրերի մեթոդի վրա: Մետամակերևույթը լուսավորվել է x առանցքի երկայնքով բևեռացված և z առանցքի երկայնքով տարածվող հարթ ալիքով:



Նկ.3. (a) Երկշերտ մետամակերևույթի սխեմատիկ պատկերը, որտեղ d_x , d_y և d_z -ը նանոժապավենների չափերն են, l_x -ը և l_y -ը նանոժապավենների միջև հեռավորություններն են համապատասխանաբար x և y առանցքների ուղղություններով, և h -ը շերտերի միջև հեռավորությունն է: Ներդիրում պատկերված է լայնական կտրվածքը yz հարթությունում: (b) Երկշերտ մետամակերևույթի թափանցելիության, անդրադարձելիության և կլանելիության սպեկտրները: (c) Մոդելավորված (սիմվոլներ) և տեսականորեն ստացված (կոր) թափանցելիությունների համեմատությունը:

Երկշերտ մետամակերևույթի թափանցելիության (սև), անդրադարձելիության (կարմիր) և կլանելիության (կապույտ) սպեկտրները պատկերված են Նկ. 3(b)-ում: 850 նմ-ի շրջակայքում թափանցելիության սպեկտրում նկատվում է կտրուկ անկում, ինչպես նաև դրան համապատասխան պիկեր՝ անդրադարձելիության և կլանելիության սպեկտրներում: Մետամակերևույթի Q բարորակությունը գնահատվել է $Q \approx \lambda_0/\delta\lambda$ առնչությամբ, որտեղ λ_0 -ն ռեզոնանսային ալիքի երկարությունն է, իսկ $\delta\lambda$ -ն՝ կիսալայնությունը: 849 նմ-ի վրա դիտարկվող ռեզոնանսի կիսալայնությունը մոտավորապես $\delta\lambda \approx 4$ նմ է, իսկ համապատասխան Q բարորակությունը՝ շուրջ 210: Մոդելավորված և տեսականորեն հաշվարկված թափանցելիության ռեզոնանսները համեմատված են Նկ. 3(c)-ում: Արդյունքների միջև առկա է բավականին լավ համապատասխանություն:

Ըստ տեսական վերլուծության՝ թափանցելիության սպեկտրում նման կտրուկ ռեզոնանսի ի հայտ գալուն նպաստում են երկու հիմնական պրոցեսներ: Առաջինը առանձին նանոժապավենի ռեզոնանսային փոխազդեցությունն է ընկնող էլեկտրամագնիսական ալիքների հետ: Երկրորդ պրոցեսը վերին և ստորին շերտերի տարրերի միջև ուժեղ կապակցումն է, որը պայմանավորված է նանոժապավենների լրկալիզացված մակերևութային պլազմոնային ռեզոնանսով (ԼՄՊՈ):



Նկ.4. (a) Երկշերտ մետամակերևույթի թափանցելիության, անդրադարձելիության և կլանելիության կախվածությունները շրջապատող դիէլեկտրիկի բեկման ցուցիչի փոփոխությունից: (b) Մետամակերևույթի թափանցելիությունը գծային ռեժիմում (սև) և ոչ գծային ռեժիմում՝ 5 ՄՎտ/սմ² (կարմիր), 8 ՄՎտ/սմ² (կապույտ) և 12 ՄՎտ/սմ² (կանաչ) ընկնող ինտենսիվությունների դեպքում: (c) Երկշերտ մետամակերևույթի թափանցելիության՝ մուտքային ինտենսիվությունից կախվածության հիստերեզիսը $\lambda_{in} = 847.8$ նմ ալիքի երկարության դեպքում: Ներդիրը պատկերում է մետամակերևույթի շուրջը ինտենսիվության բաշխումը ON և OFF վիճակներում:

Բարձր բարորակությամբ ռեզոնանսներով օժտված օպտիկական համակարգերի մեծապես դիսպերսիվ թափանցելիությունը հնարավորություն է

տալիս ստեղծելու սարքավորումներ, որոնց օպտիկական արձագանքը կարելի է կառավարել էլեկտրաօպտիկական միջոցներով: Սա ցույց տալու համար, ընկնող ալիքի երկարությունը ֆիքսվել է ռեզոնանսային $\lambda = 849$ նմ արժեքի վրա և հաշվարկվել է թափանցելիության կախվածությունը շրջակա դիէլեկտրիկ միջավայրի բեկման ցուցչի փոփոխությունից: Արդյունքները պատկերված են Նկ. 4(a)-ում: Ինչպես երևում է նկարից, բեկման ցուցիչը մոտավորապես 6×10^{-3} -ով փոփոխելը հանգեցնում է թափանցելիության գրեթե 6-ակի աճի:

Մետամակերևույթի ոչ գծային օպտիկական արձագանքն ուսումնասիրելու նպատակով շերտերի միջև տարածությունը լցնող միջավայրի համար սահմանվել է ինտենսիվությունից կախված բեկման ցուցիչ՝ $n_s = n_0 + n_2 I_{loc}$, որտեղ n_0 -ն գծային բեկման ցուցիչն է, n_2 -ը՝ երկրորդ կարգի բեկման ցուցիչը, իսկ I_{loc} -ը՝ միջշերտային տիրույթում լույսի ինտենսիվությունը: Քանի որ, ոչ գծային հաշվարկները շատ զգայուն են սինգուլարությունների նկատմամբ, որոնք սովորաբար առաջանում են կառուցվածքային տիրույթների սուր եզրերում, նանոժապավենների անկյունները կլորացվել են 10 նմ շառավղով: Ստացված մետամակերևույթի գծային արձագանքը պատկերված է Նկ. 4(b)-ում՝ սև կորով: Ինչպես երևում է նկարից, ռեզոնանսային ալիքի երկարությունը ենթարկվել է փոքր-ինչ կապույտ շեղման՝ ընդունելով $\lambda = 844.6$ նմ արժեք, ընդ որում նեղշերտ ռեզոնանսային բնութագրերը պահպանվել են: Դիէլեկտրիկ միջավայրի երկրորդ կարգի ոչ գծային բեկման ցուցչի համար սահմանվել է $n_2 = 10^{-11}$ սմ²/Վտ արժեք: Այսպիսով, կարգավորելով երկշերտ մետամակերևույթի մոդելը, նախ ուսումնասիրվել է նման համակարգի սպեկտրալ արձագանքը՝ ֆիքսելով մուտքային ինտենսիվությունը 5, 8 և 12 ՄՎտ/սմ² արժեքների վրա և դուրս բերելով թափանցելիության կախվածությունը մուտքային ալիքի երկարությունից: Արդյունքները պատկերված են Նկ. 4(b)-ում համապատասխանաբար կարմիր, կապույտ և կանաչ կորերով: Ինչպես երևում է նկարից, ընկնող դաշտի ինտենսիվության բարձրացումը թափանցելիության կորը դարձնում է ավելի եռանկյունաձև, ինչպես նաև հանգեցնում է ռեզոնանսային ալիքի երկարության կարմիր շեղման: Գծային ռեժիմում նվազագույն և առավելագույն թափանցելիության դիրքերի միջև անցում կատարելու համար անհրաժեշտ է փոխել ընկնող ալիքի երկարությունը մոտ 3.4 նմ-ով: Բարձր ինտենսիվության ռեժիմում անցման տիրույթը կրճատվում է՝ $I_{th} = 12$ ՄՎտ/սմ² դեպքում կազմելով գրեթե 1.4 նմ:

Առաջարկվող նեղշերտ մետամակերևույթը որպես ամբողջովին օպտիկական երկկայուն տարր օգտագործելու հնարավորությունը ցույց տալու համար ընկնող դաշտի ալիքի երկարությունը ֆիքսվել է 847.8 նմ արժեքի վրա և աստիճանաբար փոփոխվել է մուտքային ինտենսիվությունը: Նկ.4(c)-ում պատկերված է ստացված հիստերեզիսը: Համակարգի՝ բարձր և ցածր թափանցելիության վիճակների միջև փոխանջատման շեմային ինտենսիվությունները հավասար են մոտավորապես 8.21

ՄՎտ/սմ² և 8.66 ՄՎտ/սմ²: Նվազագույն փոխանջատման ժամանակը գնահատվել է մոտ 600 ֆվ: Բարձր թափանցելիության վիճակից ցածր թափանցելիության վիճակի փոխանջատելու համար (On-Off անցում) պահանջվող մուտքային էներգիան գնահատվել է մոտ 3.1 ֆձ:

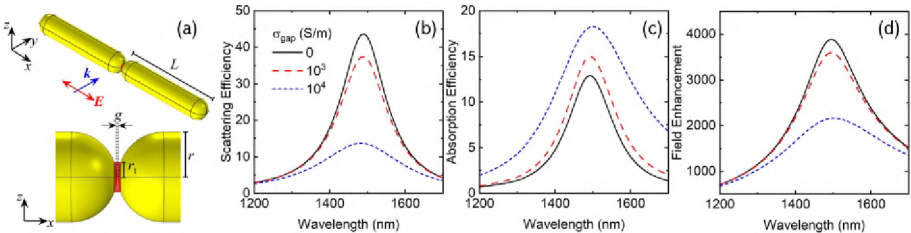
2.5 պարագրաֆում թվայինորեն ուսումնասիրվել է երկու գլանաձև նանոանտենաներից բաղկացած նանոմասնիկային դիմեր: Ինչպես ունակային, այնպես էլ հաղորդիչ կապով կապակցման ռեժիմներում վերլուծվել են դիմերի ցրման և կլանման բնութագրերը, ինչպես նաև ենթանանոմետրային միջմասնիկային ճեղքում դաշտի ուժեղացումը: Ուսումնասիրված նանոմասնիկային դիմերը կարող է ծառայել որպես մետամակերևույթի տարր:

Դիտարկված նանոանտենաների դիմերի սխեմատիկ դիագրամը, ինչպես նաև ենթանանոմետրային ճեղքի խոշորացված պատկերը ներկայացված են Նկ.5(a)-ում: $L = 230$ նմ երկարությամբ և $r = 15$ նմ շառավղով երկու գլանաձև ոսկե նանոանտենաներ ուղղված են x առանցքի երկայնքով և բաժանված են $g = 0.5$ նմ լայնությամբ օղային ճեղքով: Նանոանտենաների հիմքերը կազմում են նույն r շառավղով կիսագնդեր: Ամբողջ համակարգը շրջապատված է օդով: Համակարգը ճառագայթվում է x առանցքի երկայնքով բևեռացված և y առանցքի երկայնքով տարածվող հարթ ալիքով: Ոսկե նանոանտենաների ընտրված երկրաչափական կառուցվածքը և չափերը հանգեցնում են մոտ ինֆրակարմիր տիրույթում ԼՄՊՌ-ի առաջացմանը: Մյուս կողմից, ճեղքի ենթանանոմետրային չափերը հանգեցնում են նշանակալի դաշտի ուժեղացման: Բարձր ինտենսիվությամբ ընկնող ճառագայթման արդյունքում՝ նանոճեղքում ձևավորված բավականաչափ մեծ էլեկտրական դաշտը ($\sim 10^9$ Վ/մ կարգի) կարող է ստիպել նանոանտենաների էլեկտրոններին հաղթահարել ոսկի-օդ մակերևույթի քվանտային արգելքը [9], հետևաբար կարող է տեղի ունենալ քվանտային թունելացում՝ հանգեցնելով նանոանտենաների միջև էլեկտրոնային կանալի ձևավորման: Թունելային երևույթը մոդելավորելու համար թունելացման տիրույթի σ հաղորդականությունը փոփոխվել է 0-ից մինչև 10^4 Սմ/մ միջակայքում, ինչը համապատասխանում է տվյալ ճեղքի լայնության համար տեսականորեն առաջարկված արժեքներին [9]:

Վերլուծության մեջ ցրման և կլանման կտրվածքները նորմավորվել են նանոանտենաների դիմերի երկայնական երկրաչափական կտրվածքի նկատմամբ: Ստացված անչափ մեծությունները համապատասխանաբար կոչվում են ցրման և կլանման արդյունավետություններ: Համակարգի ցրման և կլանման բնութագրերը ուսումնասիրելու համար իրականացվել է թվային վերլուծություն՝ հիմնված վերջավոր տարրերի մեթոդի վրա:

Դիտարկված նանոանտենաների դիմերի ԼՄՊՌ պիկը գտնվում է ~ 1500 նմ ալիքի երկարության շրջանում, որտեղ ցրման և կլանման արդյունավետությունները

հասնում են համապատասխանաբար ~ 45 և ~ 13 : Համակարգի օպտիկական արձագանքի վրա հաղորդիչ կանալի ազդեցությունը ուսումնասիրելու համար դիտարկվել են կանալի հաղորդականության երեք տարբեր արժեքներ՝ $\sigma = 0, 10^3$ Սմ/մ և 10^4 Սմ/մ: Նկ. 5-ում ներկայացված են ցրման արդյունավետության (b), կլանման արդյունավետության (c) և դաշտի ուժեղացման (d) կախվածությունները ընկնող ալիքի երկարությունից՝ ճեղքի կանալի հաղորդականության տարբեր արժեքների համար: Ռեզոնանսային ալիքի երկարության դեպքում ցրման արդյունավետությունը ~ 45 -ից նվազում է մինչև ~ 13 , երբ կանալի հաղորդականությունը $\sigma = 0$ Սմ/մ-ից հասնում է $\sigma = 10^4$ Սմ/մ: Համանմանորեն, ճեղքում դաշտի ուժեղացումը նույնպես նվազում է ~ 3900 -ից, երբ $\sigma = 0$ Սմ/մ, մինչև ~ 2200 ՝ $\sigma = 10^4$ Սմ/մ դեպքում: Մյուս կողմից կլանման արդյունավետությունն աճում է ճեղքի կանալի հաղորդականության աճին զուգընթաց՝ $\sigma = 0$ Սմ/մ դեպքում ~ 12.5 -ից հասնելով մինչև ~ 18 ՝ $\sigma = 10^4$ Սմ/մ դեպքում: Բացի այդ, ճեղքի հաղորդականության աճին զուգընթաց նկատվում է նաև կլանման արդյունավետության կորի լայնացում, ինչը համակարգի կորուստների աճի հետևանք է: Գծային ռեժիմում ռեզոնանսի ժամանակ կլանման և ցրման հարաբերությունը հավասար է մոտավորապես 0.3, մինչդեռ $\sigma = 10^4$ Սմ/մ դեպքում այն աճում է մինչև ~ 1.33 :



Նկ.5. Դիմերի (a) սխեմատիկ պատկերը, որտեղ L -ը նանոանտենայի երկարությունն է, r -ը՝ նանոանտենայի շառավիղը, r -ն՝ ճեղքի շառավիղը, g -ն՝ ճեղքի լայնությունը, E -ն ցույց է տալիս ընկնող դաշտի բևեռացումը, k -ն ալիքային վեկտորն է, (b) ցրման արդյունավետության, (c) կլանման արդյունավետության և (d) դաշտի ուժեղացման ռեզոնանսային գրաֆիկները՝ ճեղքի հաղորդականության $\sigma = 0, 10^3$ Սմ/մ և 10^4 Սմ/մ արժեքների դեպքում:

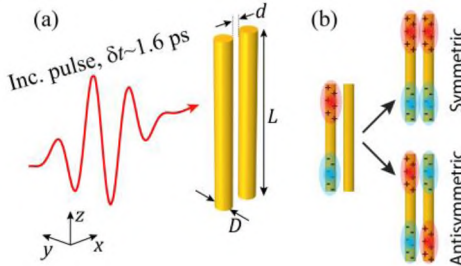
2.6 պարագրաֆում ամփոփվել են երկրորդ գլխում ստացված հիմնական արդյունքները:

Երրորդ գլխում ուսումնասիրվել է կապակցված ձողերի համակարգում գերկարճ S<g իմպուլսների փոխակերպումը կոհերենտ նեղշերտ S<g ճառագայթման:

3.1 պարագրաֆում ընդհանուր անդրադարձ է կատարվել S<g> ճառագայթման գեներացման տարբեր մեթոդներին:

3.2 պարագրաֆում ներկայացվել է գերկարճ S<g> իմպուլսների կառավարելի նեղացման և հաճախության կարգավորելի փոխակերպման պարզ, սակայն բարձր արդյունավետությամբ մեխանիզմ, որն օգտագործում է երկու կապակցված օսցիլյատորների համակարգ: Օգտագործելով ուսումնասիրված համակարգը որպես մետամակերևույթի տարր՝ կարելի է ստանալ նեղշերտ և ուղղորդված S<g> ճառագայթում:

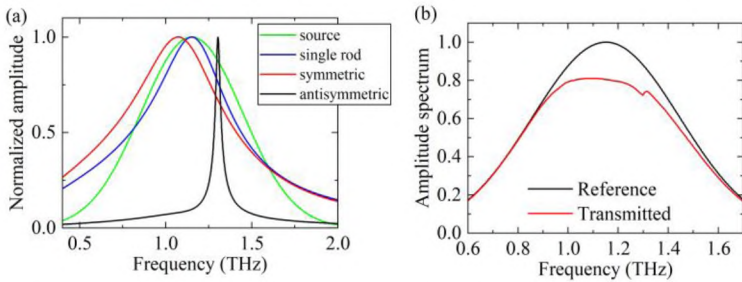
Փոխակերպման պրոցեսի ուսումնասիրության համար դիտարկվել է կողք-կողքի դասավորված $L = 100$ մկմ երկարությամբ և $D = 10$ մկմ տրամագծով ու մակերևույթների միջև $d = 7$ մկմ լայնությամբ ճեղքով միմյանցից բաժանված երկու նույնական ոսկե ձողերից կազմված համակարգ (Նկ. 6(a)): Շրջակա միջավայրը օդ է: Կատարվել է ձողերի համակարգի ժամանակային վերլուծություն՝ օգտագործելով վերջավոր տարբերությամբ ժամանակային տիրույթի Lumerical FDTD միջավայրը: z առանցքի երկայնքով բևեռացված ընկնող իմպուլսի հզորության ժամանակային սպեկտրի կիսալայնությունը մոտավորապես 1.6 պլ է: Ձողերը կողմնորոշված են z առանցքի երկայնքով և բաժանված են x առանցքի երկայնքով: Միմյանցից ենթաալիքային հեռավորությամբ բաժանված ձողերի համակարգի գրգռման ժամանակ՝ ձողերի միջև ուժեղ փոխազդեցության շնորհիվ առաջանում են կապակցված մոդեր: Առաջինը դիպոլայես ակտիվ համաչափ մոդն է, որը բնութագրվում է ճառագայթման մեծ գծի լայնությամբ, մինչդեռ երկրորդը դիպոլայես ոչ ակտիվ հակահամաչափ մոդն է՝ էականորեն ավելի նեղ ռեզոնանսային գծի լայնությամբ (Նկ. 6(b)) [10]:



Նկ.6. (a) Գերկարճ իմպուլսով գրգռված երկու կողք-կողքի դասավորված նույնական ոսկե ձողերից բաղկացած համակարգի սխեմատիկ դիագրամը: Գրգռող իմպուլսը բևեռացված է z առանցքի երկայնքով և տարածվում է x առանցքի երկայնքով: Երկու ձողերն էլ ունեն $L = 100$ մկմ երկարություն և $D = 10$ մկմ տրամագիծ: Ձողերի մակերևույթների միջև հեռավորությունը $d = 7$ մկմ: Ընկնող իմպուլսի տևողությունը մոտավորապես 1.6 պլ է: (b) Ձողերի միջև կապակցման շնորհիվ առաջացող համաչափ և հակահամաչափ մոդերի պատկերը:

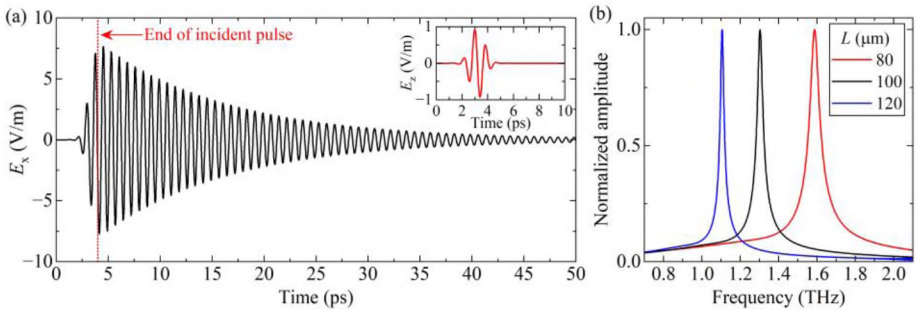
Համակարգում տեղի ունեցող տատանողական պրոցեսների սպեկտրները պատկերված են Նկ.7(a)-ում: Գրգռման գերկարճ իմպուլսի սպեկտրը պատկերված է Նկ.7(a)-ում կանաչ կորով՝ 1.15 SՀց պիկային հաճախությամբ և մոտավորապես $\delta f = 0.5$ SՀց գծի լայնությամբ: Թվային մոդելավորումները ցույց են տալիս, որ ընկնող իմպուլսի էներգիան հիմնականում կուտակվում է առջևի ձողի կողմից, որն ունի 1.15 SՀց պիկային ռեզոնանսային հաճախություն և փոքր-ինչ ավելի նեղ $\delta f = 0.389$ SՀց գծի լայնություն (կապույտ կոր): Այս կորը ներկայացնում է մեկ մեկուսացված ձողի մոտակայքում էլեկտրական դաշտի սպեկտրալ բաշխումը: Ձողերի միջև փոխազդեցության շնորհիվ մակերևութային լիցքերը և դրանց հետ կապված դաշտերը վերաբաշխվում են՝ հանգեցնելով համաչափ (կարմիր կոր) և հակահամաչափ (սև կոր) մոդերի առաջացմանը: Համաչափ մոդը ունի ռեզոնանս 1.07 SՀց հաճախության վրա, որի գծի լայնությունը $\delta f = 0.45$ SՀց է: Ի հակադրություն, հակահամաչափ մոդն ունի պիկ ~ 1.3 SՀց հաճախության վրա և օժտված է զգալիորեն ավելի նեղ $\delta f = 0.026$ SՀց գծի լայնությամբ, որը մոտ 20 անգամ ավելի փոքր է ընկնող իմպուլսի գծի լայնությունից:

Գերկարճ իմպուլսով համակարգի գրգռման վերաբերյալ լրացուցիչ պատկերացումներ կարելի է ստանալ վերլուծելով ընկնող և անցած իմպուլսների ալիքային սպեկտրները (Նկ. 7(b)): Այս սպեկտրների համեմատությունը ցույց է տալիս, որ ընկնող գերկարճ իմպուլսից կորած սպեկտրային բաղադրիչները համապատասխանում են մեկուսացված ձողի արձագանքի հետ կապված սպեկտրային տիրույթին: Հարկ է նշել նաև, որ հակահամաչափ մոդն առաջանում է կապակցված ձողերում լիցքերի և նրանց հետ կապված էլեկտրամագնիսական դաշտերի վերաբաշխման շնորհիվ, և այն թույլ է գրգռվում անմիջապես ընկնող իմպուլսի կողմից:



Նկ.7. (a) Գրգռող գերկարճ իմպուլսի (կանաչ), մեկ մեկուսացված ձողի (կապույտ), ինչպես նաև կապակցված ձողերի համակարգում համաչափ (կարմիր) և հակահամաչափ (սև) մոդերի էլեկտրական դաշտերի նորմավորված սպեկտրները: (b) 0.5 մմ տրամագծով ընկնող Գաուսյան փնջի (սև) և անցած փնջի (կարմիր) ամպլիտուդային սպեկտրները, որոնք ցույց են տալիս կառուցվածքի առաջացրած սպեկտրային փոփոխությունը:

Հակահամաչափ մոդի՝ ձողերի միջև ճեղքում դաշտի E_x բաղադրիչի ժամանակային տեսքը ներկայացված է Նկ.8(a)-ում: Ընկնող իմպուլսը սահմանվել է 3 պվ ժամանակային շեղումով, ինչը նշանակում է, որ այն իր առավելագույն ամպլիտուդին հասնում է սիմուլյացիայի մեկնարկից 3 պվ անց: Ներդիրում պատկերված է ընկնող իմպուլսի E_z բաղադրիչը: Հատկանշական է, որ մոնոքրոմատիկ տատանման կրող հաճախությունը կարելի է կարգավորել հաճախության լայն միջակայքում՝ համապատասխանորեն փոփոխելով ձողերի երկարությունները, ինչպես երևում է Նկ. 8(b)-ից, որտեղ համեմատված են $L = 80$, 100 և 120 մկմ երկարություններով կապակցված ձողերում E_x բաղադրիչների նորմավորված հաճախային սպեկտրները:

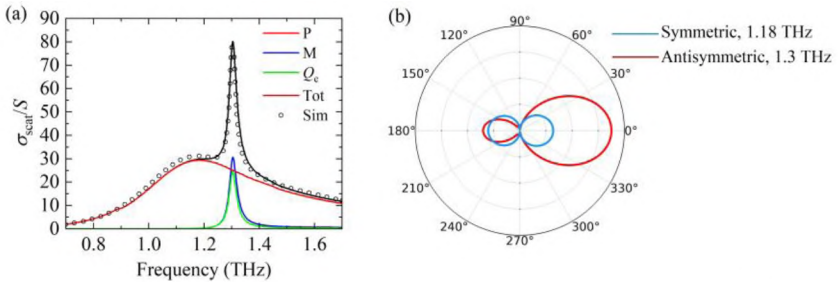


Նկ.8. (a) Կապակցված ձողերի համակարգում հակահամաչափ մոդի էլեկտրական դաշտի E_x բաղադրիչի ժամանակային տեսքը: Կարմիր ընդհատ գիծը նշում է ընկնող իմպուլսի ավարտը: Ներդիրում պատկերված է ընկնող իմպուլսը: (b) Էլեկտրական դաշտի E_x բաղադրիչի հաճախային սպեկտրները $L = 80$ մկմ (կարմիր), 100 մկմ (սև) և 120 մկմ (կապույտ) դեպքերում:

$L = 100$ մկմ երկարությամբ ձողերի համակարգի ցրման կտրվածքի մուլտիպոլյար վերլուծության արդյունքները, որոնք պատկերված են Նկ. 9(a)-ում, բացահայտում են համաչափ մոդի ուժեղ ճառագայթային մարման հիմքում ընկած պատճառը՝ դրա զուտ էլեկտրական դիպոլային բնույթը (P , կարմիր կոր)՝ այլ բաղադրիչների աննշան ներդրումներով: Ի հակադրություն, թեև հակահամաչափ մոդը ցուցաբերում է ոչ նշանակալի էլեկտրական դիպոլային ներդրում, նրա ռեզոնանսը հիմնականում պայմանավորված է մագնիսական դիպոլային (M , կապույտ կոր) և էլեկտրական քվադրոպոլային (Q_e , կանաչ կոր) մոմենտների միաժամանակյա գրգռմամբ՝ գրեթե հավասար ցրման ամպլիտուդներով $1.3 S < G$ հաճախության վրա: Մագնիսական քվադրոպոլային մոմենտը աննշան փոքր է և, հետևաբար, բաց է թողնվել վերլուծությունից: Սև կորը պատկերում է բոլոր դիտարկված մուլտիպոլյար բաղադրիչների գումարը, իսկ օղակները ներկայացնում են մոդելավորված ընդհանուր ցրման կտրվածքը, որն անմիջականորեն ստացվել է վերջավոր տարրերի մեթոդի վրա հիմնված մոդելավորումից: Այս երկուսի միջև

առկա ուժեղ համապատասխանությունը լրացուցիչ անգամ հաստատում է համակարգում այլ բարձր կարգի մուլտիպոլյար ներդրումների բացակայությունը:

$L = 100$ մկմ երկարությամբ կապակցված ձողերի համաչափ (1.18 SՀg) և հակահամաչափ (1.3 SՀg) մոդերի հեռու գոտու ուղղվածության դիագրամների ուսումնասիրությունը ցույց է տալիս սովորական դիպոլանման ցրման պրոֆիլ համաչափ մոդի համար (կապույտ գիծ), մինչդեռ հակահամաչափ մոդը (կարմիր գիծ) ցուցաբերում է խիստ ուղղորդված ցրում (Նկ.9(b)): Համաչափ և հակահամաչափ մոդերի հեռու գոտու ցրման ամպլիտուդները դեպի ետ ուղղությամբ համեմատելի են, մինչդեռ հակահամաչափ մոդի դեպի առաջ ցրման ամպլիտուդը ցուցաբերում է գրեթե եռակի աճ՝ համեմատած համաչափ մոդի հետ: Այսպիսով, համակարգը որպես մետամակերևույթի տարր օգտագործելով ավիքային գոտում կարելի է ստանալ նեղշերտ և ուղղորդված ճառագայթում:



Նկ.9. (a) Կապակցված ձողերի համակարգի ցրման կտրվածքի մուլտիպոլյար վերլուծությունը, որը ներառում է էլեկտրական դիպոլային (P , կարմիր), մագնիսական դիպոլային (M , կապույտ) և էլեկտրական քվադրոպոլային (Q_e , կանաչ) ներդրումները: Հոժ սև կորը ներկայացնում է բոլոր մուլտիպոլային բաղադրիչների գումարային ներդրումը, մինչդեռ շրջանաձև նշիչները ցույց են տալիս թվայնորեն ստացված ցրման կտրվածքը: (b) Կապակցված ձողերի համակարգի համաչափ (1.18 SՀg, կապույտ) և հակահամաչափ (1.3 SՀg, կարմիր) մոդերին համապատասխանող հեռու գոտու ուղղվածության դիագրամները: (a)-ում ցրման կտրվածքները նորմավորված են մեկ ձողի երկայնական երկրաչափական կտրվածքի նկատմամբ:

Ինչպես նախկինում նշվել է, ընկնող իմպուլսի էներգիան հիմնականում կուտակվում է համակարգի առջևի ձողի կողմից: Ձողերի միջև ուժեղ փոխազդեցությունը հանգեցնում է համակարգում մակերևութային լիցքերի և նրանց հետ կապված դաշտերի վերաբաշխման, ինչի արդյունքում ձևավորվում են համաչափ և հակահամաչափ մոդեր: Կատարված տեսական վերլուծությունը ցույց է տալիս, որ առջևի ձողի կողմից սկզբնապես կուտակված ընդհանուր էներգիայի մոտավորապես 25%-ը փոխակերպվում է մոնոքրոմատիկ տատանումների:

3.3 պարագրաֆում ամփոփվել են երրորդ գլխի հիմնական արդյունքները:

ԵՋՐԱԿԱՑՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐ

Սինուսոիդալ մետաղական հաղորդալարերից կազմված երկչափ պարբերական հյուսված ցանցի միջով անցնելիս տեղի է ունենում ռեզոնանսային հաճախությամբ ընկնող SՀց ճառագայթման բևեռացման պտույտ՝ պայմանավորված ընկնող բևեռացմանը զուգահեռ և ուղղահայաց սինուսոիդալ լարերի վրա ձևավորված մակերևութային ալիքների միջև ալիքային էներգիայի փոխակերպմամբ: Անցման սպեկտրում խաչաձև բևեռացված ալիքների մասնաբաժինը կախված է հյուսված ցանցի տարածական կողմնորոշումից:

Պարբերաբար դասավորված ուղղանկյունաձև բարակ մետաղական նանոժապավեններից կազմված երկշերտ մետամակերևույթի միջոցով կարելի է արդյունավետորեն և վերահսկելիորեն կառավարել լուսային ազդանշանը: Մետամակերևույթի տարրական բջիջների ռեզոնանսային բնույթի և շերտերի միջև կապակցման շնորհիվ անցման սպեկտրում առաջանում է բարձր բարորակության ռեզոնանս, որը հնարավորություն է տալիս օգտագործել մետամակերևույթը որպես օպտիկական երկկայուն տարր:

Արտաքին ինտենսիվ էլեկտրամագնիսական ճառագայթման ազդեցությամբ գլանաձև նանոանտենաներից կազմված դիմերի՝ նանոանտենաները միմյանցից բաժանող ենթանանոմետրային ճեղքում ձևավորվող ուժեղ դաշտերը հանգեցնում են էլեկտրոնների թունելացման: Թունելացումը նվազեցնում է դիմերի ցրման արդյունավետությունը և ճեղքում դաշտի ուժեղացումը, մինչդեռ կլանումն աճում է:

Երկու կապակցված հաղորդիչ ձողերից կազմված համակարգում կարելի է իրականացնել գերկարճ SՀց իմպուլսների բարձր արդյունավետությամբ փոխակերպում կոհերենտ նեղշերտ SՀց ճառագայթման՝ հիմնված իմպուլսի կողային անկման պայմաններում համակարգում մակաձված համաչափ և հակահամաչափ կանգուն մակերևութային ալիքների մոդերի համաձայնեցված գրգռման վրա: Ուսումնասիրված համակարգը որպես մետամակերևույթի տարր օգտագործելով կարելի է ստանալ նեղշերտ և ուղղորդված SՀց ճառագայթում:

Հղված գրականություն

- [1] Sun, S., He, Q., Hao, J., Xiao, S., and Zhou, L. (2019) Electromagnetic metasurfaces: physics and applications. *Advances in Optics and Photonics*. 11 (2), 380.
- [2] He, Q., Sun, S., Xiao, S., and Zhou, L. (2018) High-Efficiency Metasurfaces: Principles, Realizations, and Applications. *Advanced Optical Materials*. 6 (19),.
- [3] Rahimi, E. and Gordon, R. (2018) Nonlinear Plasmonic Metasurfaces. *Advanced Optical Materials*. 6 (18),.
- [4] Krasnok, A., Tymchenko, M., and Alù, A. (2018) Nonlinear metasurfaces: a paradigm shift in nonlinear optics. *Materials Today*. 21 (1), 8–21.
- [5] Wang, Z., Wang, Y., Li, H., Liu, Z., Xu, D., and Yao, J. (2025) Tunable and narrow-linewidth THz difference frequency generator with DAST crystal pumped by dual-seeded KTP optical parametric oscillator. *Optics Express*. 33 (17), 36698.

- [6] Gingras, L. and Cooke, D.G. (2017) Direct temporal shaping of terahertz light pulses. *Optica*. 4 (11), 1416.
- [7] Köhler, R., Tredicucci, A., Beltram, F., Beere, H.E., Linfield, E.H., Davies, A.G., et al. (2002) Terahertz semiconductor-heterostructure laser. *Nature*. 417 (6885), 156–159.
- [8] Rossel, S., Zhang, W., Hafez, H.A., Fabretti, S., and Turchinovich, D. (2023) Efficient terahertz optical filtering with large-area all-metal and polymer-metal woven wire meshes. *Optics Express*. 31 (12), 19076.
- [9] Zhang, P. (2015) Scaling for quantum tunneling current in nano- and subnano-scale plasmonic junctions. *Scientific Reports*. 5 (1), 9826.
- [10] Hakala, T.K., Rekola, H.T., Väkeväinen, A.I., Martikainen, J.-P., Nečada, M., Moilanen, A.J., et al. (2017) Lasing in dark and bright modes of a finite-sized plasmonic lattice. *Nature Communications*. 8 (1), 13687.

Հրատարակված աշխատանքների ցուցակ

- [1] Abrahamyan, T., Parsamyan, H., Manukyan, D., and Nerkararyan, K. (2025) Resonant conversion of THz waves with orthogonal polarization upon transmission through a woven mesh. *Applied Optics*. 64 (1), 123.
- [2] Manukyan, D., Parsamyan, H.A., and Nerkararyan, K. (2024) High dispersion and bistability of the light transmission through a bilayer metasurface with resonant plasmonic elements. *Applied Surface Science*. 678 161105.
- [3] Manukyan, D.A. (2023) THE RESONANT RESPONSE OF STRONGLY COUPLED NANORODS TO THE ELECTROMAGNETIC WAVE. *Proceedings of the YSU A: Physical and Mathematical Sciences*. 57 (3 (262)), 101–110.
- [4] Parsamyan, H., Manukyan, D., Sahakyan, K., Yezekyan, T., and Nerkararyan, K. (2025) Efficient conversion of the ultrashort THz pulse into a narrowband oscillation. *Journal of Physics D: Applied Physics*.

НЕЛИНЕЙНЫЕ И ТУННЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ДВУХСЛОЙНЫХ
МЕТАЛЛОВЕРХНОСТЯХ С РЕЗОНАНСНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

АННОТАЦИЯ

Основной целью диссертации является исследование двухслойных металловых поверхностей и их составных элементов – резонансных стержней и пленок, разделенных субволновыми расстояниями, которые приводят к возникновению явлений управления светом, таких как бистабильность, полностью оптическое переключение, а также эффективное хранение узкополосного электромагнитного излучения в виде монохроматических кобаний.

Было экспериментально продемонстрировано, что поляризация терагерцового (THz) излучения, проходящего через двумерную периодическую пленочную сетку, состоящую из синусоидальных металлических проволочек диаметром 80 мкм, поворачивается на 90° в резонансном диапазоне частот. Это явление обусловлено передачей энергии волны между поверхностными волнами, формирующимися на синусоидальных проволочках, ориентированных параллельно и перпендикулярно падающей поляризации. В спектре пропускания для кросс-поляризованных волн зависит от пространственной ориентации пленочной сетки.

В двухслойной металловых поверхности, состоящей из периодически расположенных прямоугольных субволновых плазмонных нанопленок, разделенных тонким диэлектрическим слоем, возникает узкополосный резонанс пропускания в ближнем инфракрасном спектре, с широкой линией и добротностью ~210. Согласно теоретическому анализу, столь резкий резонанс в спектре пропускания обусловлен резонансной природой элементарных членов металловых поверхностей и межслойной связью. Существенное усиление волновых полей в нелинейной среде, заполняющей межслойную область металловых поверхностей, обеспечивает бистабильный режим

пропускания света с пороговыми интенсивностями пяти гисерезиса 8,21 МВт/см² и 8,66 МВт/см².

Под воздействием внешнего электромагнитного излучения в зазоре шириной 0,5 нм, разделяющем две цилиндрические золотые наноструктуры, формируются сильные поля, приводящие к туннелированию электронов. Численное моделирование показывает, что преобразование ёмкостной связи наноструктур в проводящую обусловленное туннельным эффектом, приводит к значительному изменению электромагнитных характеристик димера. В результате наблюдается снижение эффективности рассеяния димера и усиления поля в зазоре, тогда как эффективность поглощения возрастает.

Эффективное преобразование ультракороткого ТГц импульса в монохроматическое колебание достигается в системе из двух проводящих стержней конечной длины. Процесс основан на согласованном возбуждении симметричной и антисимметричной мод стоячих поверхностных волн, индивидуированных боковым падением импульса. Примечательно, что такая конфигурация обеспечивает сечение возбуждения почти в 80 раз превышающее геометрическое сечение одиночного стержня, при эффективности преобразования в узкополосные ТГц колебания около 25%. При использовании данной системы в качестве элемента метаповерхности возможно получение узкополосного и направленного ТГц излучения в волновой зоне.

NONLINEAR AND TUNNELING PROCESSES IN BILAYER METASURFACES
WITH RESONANT ELEMENTS

ANNOTATION

The main objective of the dissertation is to investigate bilayer metasurfaces and their constituent elements - resonant rods and bars separated by subwavelength distances - which give rise to light manipulation phenomena such as bistability, all-optical switching, as well as the efficient storage of narrowband electromagnetic radiation in the form of monochromatic oscillations.

It has been experimentally demonstrated that the polarization of terahertz (THz) radiation passing through a 2D periodic woven mesh - composed of sinusoidal metal wires with a diameter of $80\ \mu\text{m}$ - is rotated by 90° within the resonant frequency range. This phenomenon is caused by the conversion of wave energy between surface waves formed on the sinusoidal wires parallel and perpendicular to the incident polarization. In the transmission spectrum, the fraction of cross-polarized waves depends on the spatial orientation of the woven mesh.

In a bilayer metasurface composed of periodically arranged rectangular subwavelength plasmonic nanobars separated by a thin dielectric layer, a narrowband transmittance resonance emerges in the near-infrared spectrum with a linewidth of $4\ \text{nm}$ and a Q-factor of ~ 210 . According to the theoretical analysis, such a sharp resonance in the transmittance spectrum is facilitated by the resonant nature of the metasurface unit cells and the interlayer coupling. The significant resonant enhancement of the wave fields in the nonlinear medium filling the interlayer area of the metasurface ensures a bistable regime of light transmission, with hysteresis loop threshold intensities of $8.21\ \text{MW}/\text{cm}^2$ and $8.66\ \text{MW}/\text{cm}^2$.

Under intense external electromagnetic radiation, strong fields form in the $0.5\ \text{nm}$ gap separating the two cylindrical Au nanoantennas of a dimer, leading

Numerical simulations show that the transformation of the nanoantennas capacitive coupling into a conductive one, caused by the tunneling phenomenon, leads to a significant change in the electromagnetic characteristics of the dimer. As a result, there is a decrease in the scattering efficiency of the dimer as well as the gap field enhancement, whereas the absorption efficiency increases.

Efficient conversion of an ultrashort THz pulse into monochromatic oscillation is realized in a system of two finite-length conducting rods. The process is based on the matched excitation of symmetric and antisymmetric standing surface wave modes induced by lateral pulse incidence. Remarkably, this configuration yields an excitation cross-section nearly 80 times larger than the geometric cross-section of a single rod, with a conversion efficiency of approximately 25% into narrowband THz oscillations. By using the system as a metasurface element, narrowband and directional THz radiation can be obtained in the wave zone.