

## ՊԱՇՏՈՆԱԿԱՆ ԸՆԴԴԻՄԱԽՈՍԻ ԿԱՐԾԻՔ

**Հովհաննես Սամվելի Հարոյանի** ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների դոկտորի աստիճանի հայցման համար Ա.04.03 «Ռեադիոֆիզիկա» մասնագիտությամբ 049 ֆիզիկայի մասնագիտական խորհուրդ ներկայացված «Էլեկտրամագնիսական ալիքների կառավարումը ռեզոնանսային, ենթաալիքային տարրերով կառուցվածքներով» թեմայով ատենախոսության վերաբերյալ:

### Ատենախոսության թեմայի արդիականությունը

Էլեկտրամագնիսական (ԷՄ) դաշտերի կառավարումը ենթաալիքաչափային և պլազմոնային կառուցվածքների միջոցով կարևոր է ինչպես հիմնարար գիտության, այնպես էլ ժամանակակից տեխնոլոգիաների զարգացման տեսանկյունից:

Առաջին հերթին, ավանդական օպտիկական և միկրոալիքային բաղադրիչները սահմանափակված են դիֆրակցիոն շեմով, որը խոչնդոտում է էլեկտրամագնիսական ալիքների տեղայնացումը և կառավարումը ալիքի երկարությանը համադրելի չափերում: Ենթաալիքաչափային և պլազմոնային կառուցվածքները հնարավորություն են տալիս հաղթահարել այս սահմանափակումը՝ ապահովելով էլեկտրամագնիսական դաշտերի խիստ տեղայնացում և ուժեղացում նանոմասշտաբային ծավալներում:

Երկրորդ՝ նման կառուցվածքներում առաջանում են տարբեր ռեզոնանսային մոդեր, որոնք հնարավորություն են տալիս ճշգրիտ վերահսկել ԷՄ ալիքների լայնույթը, փուլը, բևեռացումը և տարածումը: Սա թույլ է տալիս ստեղծել կոմպակտ և բարձր արդյունավետությամբ սարքեր:

Երրորդ՝ պլազմոնային համակարգերում դաշտերի ուժեղ տեղայնացումը զգալիորեն ուժեղացնում է լույս-նյութ փոխազդեցությունները, ինչը կարևոր է բարձր զգայունությամբ սենսորների, նանոլազերների, ոչգծային օպտիկայի և քվանտային ֆոտոնիկայի կիրառությունների համար:

Վերջապես, ենթաալիքաչափային ռեզոնանսային կառուցվածքները հանդիսանում են մետանյութերի և մետամակերևույթների հիմքը՝ հնարավորություն տալով իրականացնել այնպիսի արտասովոր էլեկտրամագնիսական երևույթներ, ինչպիսիք են բացասական բեկումը, կատարյալ կլանումը և անոմալ անդրադարձումը, որոնք հնարավոր չէ ստանալ բնական նյութերի միջոցով:

Ուստի, ենթալիքաչափային և պլազմոնային կառուցվածքների միջոցով ԷՄ դաշտերի կառավարումը կարևոր նշանակություն ունի նոր սերնդի ֆոտոնային, սենսորային, հեռահաղորդակցական և պատկերավորման տեխնոլոգիաների զարգացման համար:

Ներկայացված ատենախոսությունում ուսումնասիրել են ենթալիքային պլազմոնային և մետակառուցվածքներում էլեկտրամագնիսական դաշտերի տեղայնացման և կառավարման առանձնահատկությունները և առաջարկվել նոր կառուցվածքային լուծումներ՝ ֆոտոնային և միկրոալիքային սարքերում դրանց արդյունավետ կիրառման համար:

### **Ատենախոսության կառուցվածքը**

Աշխատանքի ընդհանուր ծավալը կազմում է 253 էջ: Այն բաղկացած է չորս գլուխներից, եզրակացությունից և 471 անուն պարունակող գրականության ցանկից:

Ատենախոսության հիմնական արդյունքները տպագրվել են 21 գիտական հոդվածներում՝ 2.64 միջին ազդեցության գործակցով, որոնցից 8-ը՝ Q1, 5-ը՝ Q2, 1-ը՝ Q3 և 2-ը՝ Q4 հանդեսներում, և զեկուցվել են 11 միջազգային գիտաժողովներում:

**Ներածության մեջ** ներկայացված է աշխատանքի արդիականությունը, նպատակը, գիտական նորույթը և գործնական արժեքը, պաշտպանության ներկայցվող հիմնական դրույթները:

**Ատենախոսության առաջին գլխում** քննարկված են գլանային սիմետրիայով տարատեսակ պլազմոնային միկրոռեզոնատորներ, ներկայացվել են դրանց դիսպերսիոն առնչությունները և մոդալ կառուցվածքը նկարագրող տեսական և թվային հաշվարկման եղանակները: Յուր և տրվել որ տորոիդալ և V-տիպի ակոսաձև ռեզոնատորներում նանոչափական տիրույթում մոդալ ծավալի խիստ տեղայնացման (ալիքի երկարության մեկ տասներորդի չափով) հաշվին էապես աճում է բարորակության և մոդալ ծավալի հարաբերությանը համեմատական սպոնտան ճառագայթումը բնութագրող Պարսելի գործոնը: Այս հանգամանքը նման կառուցվածքների տարատեսակ կիրառական հնարավորություններ է տալիս լուսային աղբյուրների, սենսորների, քվանտային տեղեկատվության մշակման և ֆոտոնային համակարգերում:

Առաջարկվել է բարձր բարորակության կիսագլանային միկրոռեզոնատորի կառուցվածք, որտեղ սկին-շերտի կարգի հաստությամբ հարթ մետաղական շերտի կիրառումը ապահովում է ռեզոնատորի արդյունավետ գրգռում էվանեսցենտ կապի միջոցով՝ ընկնող հարթ ալիքի կամ ալիքատարային մոդի հետ փոխազդեցության պայմաններում:

Կիսագլանային միկրոռեզոնատորում շնչացող մոդերի ձևավորման ընթացքում Ֆաբրի-Պերոյի ռեզոնանսային պայմանի իրականացումը ապահովում է համակարգի բարձր բարորակություն ( $\approx 2.5 \times 10^4$ ) և ռեզոնատորի կոր պարագծին մոտ տեղայնացված մոդերի ձևավորում, ինչը հնարավորություն է տալիս այն կիրառել բարձր զգայունությամբ սենսորային համակարգերում, օրինակ՝ արտաքին միջավայրի բեկման ցուցչի փոփոխությունների գրանցման համար մինչև  $10^{-4}$  ճշգրտությամբ:

**Ատենախոսության երկրորդ գլխում** բացայատվել է գլանաձև կամ շերտավոր մետաատոմներում կառուցվածքային ռեզոնանսի երևույթը: Հետազոտվել է գրաֆիտային խառնուրդներով միկրոշերտերից կազմված համակարգերի վրա ընկնող միկրոալիքային ճառագայթման արձագանքի փուլային կառավարման հնարավորությունը: Վերլուծվել են ենթաալիքային տարրերից կազմված մետակառուցվածքներում լայնաշերտ և կարգավորվող կլանման պայմանները: Ցույց է տրվել, որ աշխատանքային ալիքի երկարությունից զգալիորեն բարակ մետամակերևույթները, որոնք կազմված են գլանաձև կամ շերտավոր հաղորդիչ տարրերից, ապահովում են լայնաշերտ և արդյունավետ կլանում միկրոալիքային, տերահերցային և օպտիկական տիրույթներում՝ մետակառուցվածքի միավոր բջիջներում առաջացող կառուցվածքային ռեզոնանսների շնորհիվ:

Ցույց է տրվել, որ.

- Միկրոալիքային տիրույթում մետամակերևույթի տարր հանդիսացող գրաֆիտի խառնուրդով շերտերի կլանման լայնական հատույթը մոտ 22 անգամ գերազանցում է դրանց երկրաչափական լայնական հատույթը: Արդյունքում հնարավոր է ապահովել 82% համաչափ կլանում 8-12 ԳՀց հաճախականային տիրույթում՝ անդրադարձման և անցման գործակիցների համապատասխանաբար 0.13 և 0.05 միջին արժեքներով:

- Տերահերցային (ՏՀց) տիրույթում  $VO_2$  շերտերից կազմված մետամակերևույթի համադրումը անդրադարձնող ոսկյա շերտի հետ, որոնք իրարից բաժանված են 35 մկմ հաստությամբ բարակ դիէլեկտրիկ շերտով, ապահովում է 90%-ից բարձր կլանում 0.66-1.84 ՏՀց հաճախականային շերտում: Միաժամանակ ցույց է տրվել կլանման մակարդակի կառավարման հնարավորությունը  $VO_2$ -ի հաղորդականության՝ ջերմաստիճանից կախված փոփոխության միջոցով:

- Ինֆրակարմիր տիրույթում նիկելի ժապավեններից կազմված մետամակերևույթը, որը սիլիցիումի երկօքսիդի ( $SiO_2$ ) մոտ 1.8 մկմ հաստությամբ մեկուսիչ շերտով տարանջատված է անդրադարձնող նիկելի մետաղական հարթ մակերևույթից, դրսևորում է լայնաշերտ (8.2-18 մկմ) և 90%-ից բարձր կլանում՝

պայմանավորված նիկելի շերտերում ցածր բարորակությամբ ռեզոնանսային մոդերի գրգռմամբ:

**Ատենախոսության երրորդ գլխում** առաջարկվել են մագնիսադիէլեկտրիկ նյութերի կիրառման և ռեզոնատորների հետ կապակցման վրա հիմնված մոտեցումներ, որոնք հնարավորություն են տալիս ստանալու փոքր չափերի բարձր արդյունավետությամբ և լայնաշերտ անտենաներ:

Ցույց է տրվել, որ մագնիսադիէլեկտրիկ նյութերի կիրառումը հնարավորություն է տալիս զգալիորեն փոքրացնել անտենայի չափերը (մոտ 7 անգամ) և միաժամանակ մոտ 6 անգամ ընդլայնել դրա թողարկման հաճախականային շերտը՝ ստանալով լայնաշերտ, էլեկտրականապես փոքր անտենա: Այս մոտեցումը հնարավորություն է տալիս հաղթահարել փոքր անտենաների նախագծմանը բնորոշ սահմանափակումը, որը պայմանավորված է դրանց բարձր բարորակությամբ: Ցույց է տրվել, որ միկրոշերտավոր անտենայի վրա տեղադրված կիսագնդաձև մագնիսադիէլեկտրիկ ռեզոնատորներում գրգռվող շնչացող ռեզոնանսային մոդերի շնորհիվ անտենան սկսում է արդյունավետորեն ճառագայթել զգալիորեն ավելի ցածր հաճախություններում՝ նախնական համաձայնեցված 13 ԳՀց-ից մոտ հինգ անգամ փոքր՝ շուրջ 2.5 ԳՀց-ում, միաժամանակ պահպանելով ուժեղացման գործակցի բարձր ընդունելի արժեքներ:

**Ատենախոսության չորրորդ գլխում** լուսաբանվել են ԳԲՀ և ՏՀց տիրույթներում փոքր օհմական կորուստներով, տվյալների հաղորդման մեծ արագություններ ապահովող և լայնաշերտ ռեզոնանսային արձագանք ունեցող համակարգերի մշակման եղանակները: Նշված համակարգերը հիմնված են ենթալիքային չափերի հաղորդիչ գծերում մակերևութային զոմերֆելդյան ալիքների գրգռման և տարածման սկզբունքի վրա: Բացահայտվել է նաև երկշերտ մետամակերևութներում անոմալ խիստ դիսպերսիոն անցման երևույթը: Որպես գործնական կիրառություն դիտարկվել է օպտիկական և ՏՀց տիրույթներում լայնաշերտ և կարգավորվող փակոցային զտիչների իրականացումը՝ երկշերտ մետակառուցվածքների կիրառմամբ:

Պարզվել է, որ ենթալիքային չափերի հաղորդիչ ձողերում հնարավոր է գրգռել մակերևութային ալիքներ՝ ձևավորելով այսպես կոչված Գաբուի գծեր, որոնք գիգահերցային և տերահերցային հաճախականային տիրույթներում ապահովում են փոքր օհմական կորուստներ, տվյալների փոխանցման ցածր դիսպերսիա և մեծ արագություն: Այս հանգամանքը հնարավորություն է տալիս կիրառել դրանք նշված տիրույթներում էլեկտրամագնիսական ալիքների մանիպուլյացիայի և ազդանշանների մշակման գործընթացներում: Ցույց է տրվել նաև, որ պարբերականորեն դասավորված ենթալիքային չափերի հաղորդիչ ձողերից

կազմված համակարգերը դրսևորում են բազմառեզոնանսային վարք՝ բարձր կարգերում առաջացնելով ոչ ճառագայթային ռեժիմներ, որոնք նպաստում են ալիքների խիստ տեղայնացմանը և ուժեղ ռեզոնանսային բնութագրերի ձևավորմանը:

Բացահայտվել է հաղորդիչ ձողերից կազմված երկշերտ մետամակերևույթներում խիստ դիսպերսիոն անցման երևույթը և պարզաբանվել են դրա առաջացման հիմնական գործոնները: Ցույց է տրվել, որ միկրոալիքային դաշտը ձողերի վրա ձևավորում է մակերևութային կանգուն ալիքներ, որոնք ապահովում են մոտակա դաշտերի փոխազդեցությունը միջձողային գոտիներում: Միաժամանակ հաստատվել է, որ հակադիր շերտերում տեղակայված ձողերի միջև կապի գործակիցը կոպլեքս բնույթ ունի, և դրա կեղծ մասի առկայությունը հանգեցնում է ռեզոնանսային գծի ասիմետրիայի և թափանցելիության կտրուկ փոփոխությունների: Արդյունքում ցույց է տրվել, որ նման երկշերտ մետամակերևույթները կարող են կիրառվել որպես կառավարելի լայնաշերտ փակոցային գոտիներ մոտակա ինֆրակարմիր տիրույթում:

**Եզրակացության մեջ** ամփոփված են աշխատանքում ստացված հիմնական արդյունքները:

### **Աշխատանքի վերաբերյալ նկատված թերությունները**

Ատենախոսական աշխատանքը կատարված է բարձր գիտական մակարդակով, սակայն այն գերծ չէ որոշ թերություններից: Աշխատանքի վերաբերյալ կարելի է անել հետևյալ դիտողությունները.

1. Ատենախոսության 1.4 պարագրաֆում դիտարկված պլազմոնային ռեզոնատորի ռեզոնանսային հաճախությունը և բարորակությունը կախված են համակարգի մի շարք պարամետրերից ( $R_0, R, d_0, \varepsilon_0, \varepsilon_m$ ): Նման բազմապարամետր համակարգերի օպտիմալ բնութագրերի որոշման համար նպատակահարմար կլինեն ներկայացնել կախումների գրաֆիկները եռաչափ ձևով (օրինակ՝ Նկ. 1.14-ում բերվեր  $f(R, R_0)$  եռաչափ կախումը: Նաև, անհասկանալի է, թե ո՞ր բանաձևով է հաշվարկվել Նկ. 1.15-ի  $Q(f)$  կախումը:
2. 1.6 և 1.7 պարագրաֆներում դիտարկված կիսգլանային ռեզոնատորի վերլուծությունը ներկայացված է 2D չափայնության (ըստ  $z$  առանցքի համակարգն անվերջ է) դեպքում: Ցանկալի կլիներ նաև ներկայացնել վերջավոր երկարությամբ ռեզոնատորում մոդալ բաշխումը և ռեզոնանսի պայմանները: Հետաքրքիր կլիներ նաև կիսագնդաձև ռեզոնատորի գրգռման նման մեխանիզմների հետազոտությունը և ռեզոնանսային պայմանների բացահայտումը:

3. 2.1 պարագրաֆում նշվում է, որ գրաֆիտե միկրոշերտի դիէլեկտրիկ թափանցելիության իրական մասը 500 կարգի է, ինչը տարօրինակ է, քանի որ սովորաբար այն կազմում է 5-20:
4. 2.4 պարագրաֆում հեղինակը նշում է, որ հնրավոր է փոփոխել  $VO_2$ -ի հաղորդականությունը ջերմաստիճանից կախված և հետևաբար փոփոխել կլանման աստիճանը: Պետք է նշել, որ ջերմային փոփոխությունները բավական դանդաղ են, և այս մոտեցումով ստեղծված մոդուլատորը կլինի բավականին դանդաղագործ:
5. Երրորդ գլխում դիտարկված անտենայի չափափաքացման մեթոդում՝ հիմնված միկրոշերտավոր անտենայի վրա տեղադրված մագնիսադիէլեկտրիկ ռեզոնատորի կիրառմամբ, չի հիմնավորված կիսագնդաձև երկրաչափության ընտրության նպատակահարմարությունը: Արդյո՞ք նման արդյունքի հնարավոր չէր հասնել միայն դիէլեկտրիկական ռեզոնատորով:
6. 4.4 պարագրաֆում փակոցային գտիչի լայն շերտի առաջացումը բացատրվում է երկու հարևան շերտերում գտնվող հաղորդիչ ձողերի պլազմոնային մոդերի հիբրիդացման միջոցով, սակայն հստակ չի բացատրվում թե ինչպե՞ս է այն տեղի ունենում: Նաև որքանո՞վ է շերտի կենտրոնական ալիքի երկարությունը առնչվում առանձին ձողի պլազմոնային ռեզոնանսի հետ և ինչպե՞ս է այն փոփոխվում մետաղի ընտրությունից կախված:
7. Աշխատանքում առկա են որոշ անփութություններ: Մասնավորապես՝ 13-րդ էջի վերջին պարբերությունն ամբողջական չէ, 1.3 պարագրաֆի բանաձևերում առկա են չափայնության անհամապատասխանություններ, 1.3 նկարում նշված չեն x,y,z առանցքները, 29-րդ էջի 2-րդ տողում բերված անհավասարությունն ամբողջական չէ և այլն:

Նշված դիտողությունները չեն կրում սկզբունքային բնույթ, չեն վերաբերվում պաշտպանությանը ներկայացված հիմնական դրույթներին և աշխատանքի հիմնական արդյունքներին, ուստի չեն նսեմացնում աշխատանքի վերաբերյալ բարձր կարծիքը:

### **Եզրակացություն**

Այսպիսով, կարելի է եզրակացնել, որ Հովհաննես Հարոյանի ատենախոսական աշխատանքում ստացված են տեսական, փորձարարական և կիրառական բնույթի նոր և արժեքավոր արդյունքներ, որոնց գիտական հավաստիությունը կասկած չի հարուցում: Աշխատանքը կարող է գնահատվել որպես գիտատեխնիկական առաջընթացին նպաստող էական նվաճում՝ էլեկտրամագնիսական ճառագայթման

կառավարման և միկրոռեզոնատորների, պլազմոնային կառուցվածքների ու մետանյութերի մշակման բնագավառում:

Ատենախոսության սեղմագիրը համապատասխանում է ատենախոսության բովանդակությանը և ընդգրկում է դրա հիմնական դրույթները: Հեղինակի հրատարակած գիտական աշխատանքները լիովին արտացոլում են ատենախոսության հիմնական բովանդակությունը:

Հաշվի առնելով վերոնշյալը, համարում եմ, որ Հովհաննես Հարոյանի «էլեկտրամագնիսական ալիքների կառավարումը ռեզոնանսային, ենթաալիքային տարրերով կառուցվածքներով» վերնագրով ատենախոսությունը լիովին համապատասխանում է դոկտորական ատենախոսություններին ներկայացվող պահանջներին, իսկ հեղինակը արժանի է Ա.04.03 «Ռադիոֆիզիկա» մասնագիտությամբ ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների դոկտորի գիտական աստիճանի շնորհմանը:

Պաշտոնական ընդդիմախոս՝

ՀՀ ԳԱԱ Ֆիզիկական հետազոտությունների ինստիտուտի  
առաջատար գիտաշխատող, ֆ.մ.գ.դ. Ա.Վ. Պապոյան

26 մարտի 2026թ.

Ա.Վ. Պապոյանի ստորագրությունը հաստատում եմ՝

ՀՀ ԳԱԱ Ֆիզիկական հետազոտությունների ինստիտուտի  
գիտական քարտուղար, ֆ.մ.գ.թ. Լ.Մ. Ծառուկյան



Լ. Մ. Ծառուկյան