

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ, ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ, ՄՇԱԿՈՒՅԹԻ ԵՎ  
ՍՊՈՐՏԻ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ

ԵՐԵՎԱՆԻ ՊԵՏԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

Բաղդասարյան Ժիրայր Արսենի

**ԷԼԵԿՏՐԱՄԱԳՆԻՍՏԱԿԱՆ ԴԱՇԵՐԻ ԲԱՇԽՎԱԾՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ ԱՆԻՉՈՏՐՈՊ  
ՆԱՆՈՉՄԱՍՏՐԱԿԱՆ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔՆԵՐՈՒՄ**

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

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ – 2022թ

---

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ, КУЛЬТУРЫ И СПОРТА  
РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ

ЕРЕВАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Багдасарян Жирайр Арсенович

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В АНИЗОТРОПНЫХ  
НАНОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУРАХ**

АВТОРЕФЕРАТ

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

ЕРЕВАН – 2022

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Երևանի պետական համալսարանում:

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

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ ֆ.մ.գ.դ., պրոֆեսոր **Խ. Վ. Ներկարարյան**  
ֆ.մ.գ.դ., պրոֆեսոր **Հ. Ա. Մարգարյան**

Առաջատար կազմակերպություն՝ **ՀՀ ԳԱԱ Ռադիոֆիզիկայի և էլեկտրոնիկայի  
ինստիտուտ**

Պաշտպանությունը կայանալու է 2022 թ. հոկտեմբերի 22-ին ժամը 12:00-ին Երևանի պետական համալսարանում գործող ԲՈԿ-ի 049 ֆիզիկայի մասնագիտական խորհրդի նիստում: Հասցե՝ Ա. Մանուկյան 1, Երևան 0025:

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ԵՊՀ գրադարանում:

Սեղմագիրն առաքված է 2022 թ. սեպտեմբերի 12-ին:

Մասնագիտական խորհրդի  
գիտական քարտուղար



ֆ.մ.գ.թ., դոցենտ  
**Վ. Պ. Քալանթարյան**

---

Тема диссертации утверждена в Ереванском государственном университете.

Научный руководитель: д.ф.м.н., профессор **А. Ж. Бабаджанян**

Официальные оппоненты: д.ф.м.н., профессор **Х. В. Неркарян**  
д.ф.м.н., профессор **А. А. Саргсян**

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

Защита диссертации состоится 22 октября 2022 г. в 12:00 часов, на заседании специализированного совета ВАК 049 по физике при Ереванском государственном университете. Адрес: А. Манукяна 1, Ереван 0025.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЕГУ.

Автореферат разослан 12 сентября 2022 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета:



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

## ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԸՆԴՀԱՆՈՒՐ ԲՆՈՒԹԱԳԻՐԸ

### Աշխատանքի արդիականությունը

Ատենախոսությունը նվիրված է միկրոալիքային մոտակա դաշտերի արտապատկերման ինդիլերերին, որի ընթացքում նանոչափական մետաղական բարակ թաղանթները օգտագործվել են որպես օպտիկական ինդիկատորներ: Փորձարարական և տեսական մեթոդներով հետազոտվել են էլեկտրամագնիսական (ԷՄ) դաշտերի բաշխվածությունը անիզոտրոպ նանոկառուցվածքներում արհեստական մետանյութերից պատրաստված նոր կառուցվածքներ գտնելու նպատակով, որոնք կարող են կիրառվել որպես սենսորներ: Ավելին, մետամակերևույթների հիմքի վրա նախագծված ինդիկատորները օգտագործվել են մեծ լուծունակությամբ արտապատկերման կիրառական հետազոտություններում:

Նախ, ներկայացվել է ջերմային արտապատկերման նոր եղանակը, որը հիմնված է ջերմաառաձգական օպտիկական ինդիկատորով մանրադիտակի (ՋԱՕԻՄ) վրա [1]: Մեթոդն օգտագործում է օպտիկապես թափանցիկ նյութեր որոնք ծառայում են որպես ջերմաառաձգական ինդիկատորներ: Տեղադրելով ինդիկատորը ուսումնասիրվող սարքի (ՈւՄ) վրա՝ ֆոտոառաձգական էֆեկտի վերլուծության միջոցով հետազոտվում է մեխանիկական լարվածության բաշխվածության փոփոխությունը: Այնուհետև, արտապատկերվում է ԷՄ մոտակա դաշտի բաշխվածությունը ջերմային լարվածությունների վերլուծության միջոցով: Սույն ուսումնասիրության շրջանակներում շատ բարձր զգայունությամբ և օպտիկական լուծունակությամբ արտապատկերվել են էլեկտրական և մագնիսական մոտակա դաշտերը՝ օգտագործելով սովորական բնեռացման մանրադիտակ և ստանդարտ ապակի որը ծառայում է որպես ջերմաառաձգական ինդիկատոր: Ավելին, ՋԱՕԻՄ համակարգի մի քանի օրինակները և գործնական կիրառությունները ցույց են տալիս, որ այս տեխնիկան ապահովում է միկրոալիքային ճառագայթմամբ ազդվող սարքում և նյութում տեղի ունեցող ջերմային գործընթացների բնութագրման և մշտադիտման գործնական եղանակ:

Երկրորդ մասում մենք ՋԱՕԻՄ համակարգի համար նախագծել ենք էլեկտրական դաշտի նոր ինդիկատորներ, որոնք հիմնված է պարբերական մետաղական կառուցվածքների վրա: Այս նոր ինդիկատորները կարող են առանձին-առանձին արտապատկերել էլեկտրական դաշտի բաշխվածության միայն x- կամ y-բաղադրիչները: Արտապատկերվել են ռադիոհաճախային (ՌՀ) ֆիլտրերի միկրոալիքային մոտակա էլեկտրական և մագնիսական դաշտերի բաշխվածությունները: Բոլոր փորձարարական արդյունքները ստուգվել են համակարգչային մոդելավորումների միջոցով, որոնք լավ համաձայնություն մեջ են չափումների հետ: Բացի այդ, դաշտերի եռաչափ պատկերները վերակառուցելու նպատակով, ՋԱՕԻՄ համակարգի համար ստեղծվել է նոր մեթոդ: Այս ինդիկատորները ապագայում կարող են գործնական կիրառություն ունենալ չվնասող (non-invasive) գրանցումների ոլորտում: Բացի այդ, դրանք կարող են հիանալի լուծում լինել որոշակի առաջադրանքների համար, ինչպիսիք են որոշ միացությունների համար մեկ-թիրախային գրանցումները: Սա նոր օպտիկական ինդիկատոր (ՕԻ) է, որը հիմնված է պարբերական մետաղական կառուցվածքների

վրա և ընդունակ է բնութագրելու տարբեր ՌՀ սարքերի և նյութերի էՄ հասկությունները և տրամադրել տեսանելի տեղեկատվություն էՄ դաշտի բաշխվածության մասին: Բացի այդ, այս մեթոդը առաջ է բերում մետակառուցվածքի հետ փոխազդող էՄ դաշտերի արտապատկերման նոր վերլուծական եղանակ:

Վերջում ցույց է տրված, որ ՋԱՕԻՄ տեխնիկան կարող է բնութագրել բարդ հեղուկ խառնուրդային լուծույթները: Տարբեր խտություններով D-գլյուկոզի և նատրիումի քլորիդի լուծույթները առանձին փորձերի ընթացքում ենթարկվել են միկրոալիքային ճառագայթման: Արտապատկերվել են միկրալիքային մոտակա դաշտերի (ՄԱՄԴ) բաշխվածությունը փոքր տրամագծով պլաստիկ խողովակի շուրջը, որտեղ խողովակը օգտագործվել է որպես հեղուկի տարա: Պարզվել է, որ միկրոալիքային դաշտի ինտենսիվությունը կախված է լուծված նյութերի խտությամբ: Ցույց է տրված, որ այս հետազոտությունը ապագայում կարող է ունենալ բժշկական կիրառություն չվնասող դիագնոստիկայի ոլորտում: Որպես օրինակ կնշենք արյան in-situ «տեղում» չափումները երակների շուրջ, որոնց չափերը համեմատելի են փորձում կիրառված պլաստիկ խողովակների չափերի հետ: Մա տարբեր բարդ հեղուկների էՄ հասկությունների բնութագրման նոր մեթոդ է և ապահովում է տեղեկատվություն միկրոալիքներով ճառագայթվող հեղուկ միջավայրի վարքի մասին: Այս տեխնիկան ստեղծում է պարադիգմ նմանատիպ չվնասող գրանցումների հետագա ուսումնասիրությունների համար:

### **Ատենախոսության նպատակը**

- Նախագծել և գործարկել էՄ մոտակա դաշտերի արտապատկերման տեխնիկան և ցույց տալ նրա գործնական կիրառությունները:
- Ուսումնասիրել և մշակել նոր տիպի օպտիկական ինդիկատորներ, որոնք հիմնված է մետաղ-դիէլեկտրիկ պարբերական կառուցվածքի վրա և կարող են ծառայել որպես էլեկտրական և մագնիսական դաշտերի ինդիկատորներ:
- CCD տեսախցիկի վրա հիմնված ՋԱՕԻՄ արտապատկերման տեխնիկայի միջոցով չափել գլյուկոզի և նատրիումի քլորիդի ջրային լուծույթների խտությունները լուծույթներում:
- ՋԱՕԻՄ համակարգի գործնական կիրառություններ՝ մանրամասն նկարագրություններով, ինչպիսին են օրինակ՝ նյութերի չվնասող ուսումնասիրություն, ճաքերի և թերությունների հայտնաբերում, պարբերական կառուցվածքների ստուգում, ներկառուցված մետաղական նյութերի հայտնաբերում և բժշկական կիրառություններ:

### **Գիտական նորույթ**

- Աշխատանքում ներկայացված է ապակե տակդիրների վրա նստեցված ինդիում-անագ օքսիդային (ԻԱՕ) բարակ թաղանթների էլեկտրական դեֆեկտների հայտնաբերման նոր օպտիկական մեթոդ: Մույն մեթոդը հիմնված է միկրոալիքային տաքացմամբ պայմանավորված ջերմային բաշխման արտապատկերման հիման վրա, որը առաջանում է դեֆեկտների շուրջ ԻԱՕ թաղանթի ապակե տակդիրի ջերմային լարվածությունների բաշխումով պայմանավորված:

- Առաջարկվել է դիէլեկտրական միջավայրում ներկառուցված հաղորդիչ օբյեկտի արտապատկերման նոր մեթոդ, որը հիմնված է ՋԱՕԻՄ-ի միջոցով իրականացված միկրոալիքային արտապատկերման վրա: Սույն մեթոդը հիմնված է ՄԱՄԳ բաշխման արտապատկերման վրա, որը գեներացվում է դիէլեկտրական միջավայրում ներկառուցված հաղորդիչ օբյեկտի կողմից:
- Էլեկտրական դաշտի արտապատկերման համար նախագծվել են նոր տիպի օպտիկական ինդիկատորներ, որոնք հիմնված են պարբերական դիէլեկտրիկ-մետաղ կառուցվածքների վրա: Կախված կառուցվածքի կողմնորոշումից նման մետամակերևույթի հիմքի վրա ստեղծված ինդիկատորները թույլ են տալիս իրարից անկախ արտապատկերել նույն հարթության մեջ գտնվող էլեկտրական դաշտի  $E_x$  և  $E_y$  բաղադրիչները:
- ՋԱՕԻՄ-ի միջոցով իրականացված նոր օպտիկական մեթոդով հնարավոր է եղել որոշել D-գլյուկոզի և նատրիումի քլորիդի խտությունները ջրային լուծույթներում:

### **Գործնական արժեքը**

- Միկրոալիքային ճառագայթման հետ միասին օգտագործելով սովորական բնեռացման մանրադիտակը մենք ցույց ենք տվել, որ այս մեթոդը ոչ-կոնտակտային և չվնասող միջոց է և թույլ է տալիս հայտնաբերել թափանցիկ հաղորդիչ բարակ թաղանթի էլեկտրական դեֆեկտները՝ մինչև 1 մմ նվազագույն երկարությամբ, ինչպես նաև  $40 \times 30$  մմ<sup>2</sup> մակերեսով բաշխված էլեկտրական դեֆեկտները: Այս մեթոդի մեծ լուծունակությունը և զգայնությամբ հանդիսանում է գրավիչ եղանակ գննման-ստուգման տեխնոլոգիաներում կիրառությունների համար:
- ՋԱՕԻՄ մեթոդի օգտագործմամբ արտապատկերվել է միկրոալիքային դաշտի բաշխվածությունը հաղորդիչ օբյեկտ պարունակող դիէլեկտրական միջավայրի մակերևույթի մոտ, երբ այն ենթարկվում է միկրոալիքային ճառագայթման: Հաղորդիչ օբյեկտի շուրջ առկա ուժեղ ՄԱՄԳ-ը հայտնվում է դիէլեկտրական միջավայրի արտաքին մակերևույթին, և դրա ինտենսիվությունը կախված է ճառագայթվող միկրոալիքային ազդանշանի հաճախությունից և բնեռացման ուղղությունից: Արտապատկերելով 1-5 մմ խորության վրա ներկառուցված տարբեր հաղորդիչ զծեր՝ որոնք ունեն 1 մմ լայնություն և 4-10 մմ տարբեր երկարություններ, ցույց է տրվել, որ այս մեթոդը կարող է օպտիկապես անթափանց դիէլեկտրիկ միջավայրում ներկառուցված հաղորդիչ զծերի և կառուցվածքների համար լինել չվնասող և ոչ-կոնտակտային հայտնաբերման գործնական միջոց:
- ՋԱՕԻՄ տեխնիկայի միջոցով արտապատկերվել է GPS փաչ անտենայի ՄԱՄԳ-ի բաշխումը 1.575 ԳՀց աշխատանքային հաճախության դեպքում: Անտենայի ճառագայթման արտապատկերման իրականացումը թույլ է տալիս բնութագրել ԷՄ դաշտի ինտենսիվությունը և բաշխումը կախված անտենայի մակերևույթի և օպտիկական ինդիկատորի միջև եղած հեռավորությունից:
- Համոզողված ածխածնային մանրաթելեր/պոլիէթեր էթեր կետոն (ՊԵԵԿ) անիզոտրոպ բաղադրյալ նյութերի ջերմային և ԷՄ հատկությունները

ուսումնասիրելու համար կատարվել է երկու փորձ: ՋԱՕԻՄ-ի միջոցով արտապատկերվել է տաքացված ածխածին/ՊԵԵԿ շերտում առաջացած ջերմային բաշխումը: Ինչպես նաև ՋԱՕԻՄ-ի միջոցով արտապատկերվել է ածխածին/ՊԵԵԿ կոմպոզիտային շերտի ՄԱՄԴ-ի բաշխումը: Միկրոալիքային տաքացման մեխանիզմը և ՄԱՄԴ-ի բաշխումը մեծապես կախված են էՄ դաշտի բևեռացման և ածխածնային մանրաթելերի ուղղության հարաբերական կողմնորոշումից:

- Նախագծվել է մետամակերևույթների վրա հիմնված անիզոտրոպ օպտիկական նոր ինդիկատոր, որը կարող է գործել որպես մեկ-թիրախային սենսոր:
- Մշակվել է կենսաբանական հեղուկներում նատրիումի քլորիդի և գլյուկոզի խտությունների մշտադիտման նոր եղանակ՝ օգտագործելով CCD սենսոր, որն ունակ է առանց տեսաձրման արտապատկերել էՄ դաշտերը բարդ լուծույթներում:

### **Պաշտպանության ներկայացվող հիմնական դրույթներ**

1. Ցույց է տրվել, որ միկրոալիքներով ճառագայթվող ԻՍՕ-ապակու էլեկտրական դեֆեկտները կարելի է հայտնաբերվել ՋԱՕԻՄ եղանակով՝ ի շնորհիվ էլեկտրական դեֆեկտների շուրջ առաջացած տեղայնացված մակերևույթային հոսանքների:
2. Օպտիկապես անթափանց դիէլեկտրիկ միջավայրում ներկառուցված հաղորդիչ օբյեկտները հնարավոր է հայտնաբերել ՋԱՕԻՄ արտապատկերման տեխնիկայի միջոցով: Արտապատկերելով դիէլեկտրիկի ներսում գտնվող հաղորդիչ օբյեկտի շուրջը առաջացած ՄԱՄԴ-ի բաշխումը՝ կարելի է հայտնաբերել ոչ-կոնտակտային և չվնասող եղանակով:
3. ՋԱՕԻՄ արտապատկերման համակարգը թույլ է տալիս հետազոտել GPS անտենայի պարամետրերը և տարածական բնութագրերը, որի շնորհիվ հնարավոր է օպտիմիզացնել անտենայի նախագծման և աշխատանքային առանձնահատկությունները:
4. Համուղղված ածխածնային մանրաթելերի վրա հիմնված բաղադրյալ նյութի էլեկտրական և ջերմային անիզոտրոպիան կարելի է բնութագրել ՋԱՕԻՄ համակարգի օգնությամբ, որի միջոցով ուսումնասիրվել և գնահատվել են բաղադրյալ նյութում էլեկտրական դաշտի՝ նույն հարթության մեջ գտնվող բաղադիրչների և ջերմային բաշխվածությունները:
5. ՋԱՕԻՄ տեխնիկայի միջոցով իրականացվել է ՌՀ ֆիլտրերի միկրոալիքային էլեկտրական և մագնիսական մոտակա դաշտերի բաշխվածությունների արտապատկերումը: Բացի այդ, վերակառուցվել են ՄԱՄԴ-ի բաշխման եռաչափ պատկերները՝ ցույց տալու համար դաշտի ինտենսիվության և բաշխման կախվածությունը ՌՀ ֆիլտրի մակերևույթից եղած հեռավորությունից:
6. Ջրային լուծույթում լուծված գլյուկոզի և նատրիումի քլորիդի խտությունները մշտադիտարկվել են CCD սենսորի միջոցով: ՋԱՕԻՄ-ը ընդունակ է տեսանելի տեղեկատվություն սրամադրել բարդ հեղուկներում լուծված նյութերի խտությունների մասին և գնահատել դրանց միկրոալիքային կլանումը:

### **Աշխատանքի ներկայացումը**

Ատենախոսության հիմնական դրույթներն ու արդյունքները քննարկվել են Երևանի պետական համալսարանի «Կիրառական էլեկտրոդինամիկայի և մոդելավորման ամբիոնի» սեմինարներում, Մեուլի Սոգանգ համալսարանի «Միկրոալիքային ֆոտոնիկայի լաբորատորիայում» և միջազգային գիտաժողովների ժամանակ:

### **Հրատարակումները**

Ատենախոսության թեմայով տպագրվել են 13 գիտական աշխատանքներ, որոնցից 9-ը միջազգային գիտական ամսագրերում, և 3-ը միջազգային գիտաժողովների ժողովածուներում:

### **Ատենախոսության կարուցվածքը**

Ատենախոսությունը բաղկացած է ներածությունից, երեք գլուխներից, եզրակացությունից և 171 հոդում պարունակող գրականության ցանկից: Աշխատանքի ընդհանուր ծավալը 108 էջ է և պարունակում է 46 նկար/գրաֆիկ և 1 աղյուսակ:

## **ԱՏԵՆԱՒՈՍՈՒԹՅԱՆ ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆԸ**

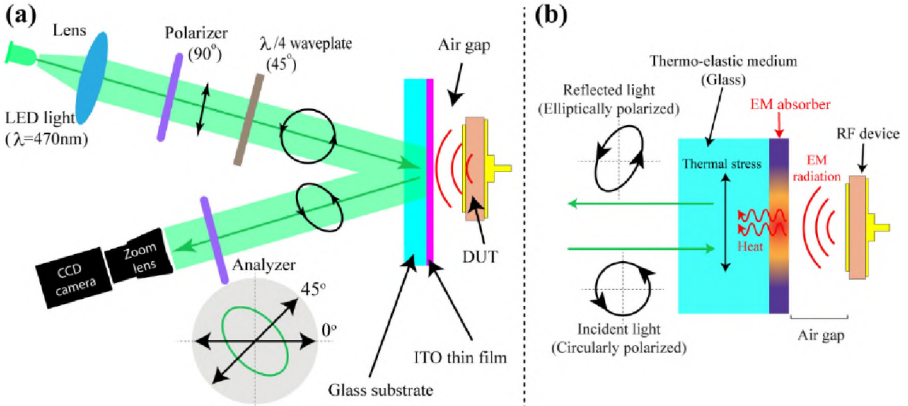
**Ներածության** մեջ հիմնավորված է ատենախոսության արդիականությունը, հստակ ձևակերպված են աշխատանքի նպատակները, խնդիրներն ու պաշտպանության ներկայացվող հիմնական դրույթները: Ինչպես նաև նշված է ստացված արդյունքների գիտական նորույթը և գործնական արժեքը:

**Գլուխ 1-**ում ներկայացված է ատենախոսության հիմքում ընկած ՋԱՕԲՄ-ի աշխատանքի սկզբունքը և բերված են նրա կիրառությունները տարբեր ոլորտներում:

**1.1 պարագրաֆում** ներկայացված է միկրոալիքային արտապատկերման ՋԱՕԲՄ համակարգը, որը մշակվել է բարձր զգայունությամբ ՄԱՄԴ բաշխվածությունների արտապատկերման համար: ՋԱՕԲՄ-ը օպտիկական մեթոդ է և այն՝ չափված ֆոտոառաձգական պատկերների վերլուծության միջոցով, արտապատկերում է նյութերի և էՄ ալիքների փոխազդեցության հետևանքով առաջացած ջերմային բաշխումը:

Նկար 1 (a)-ում բերված է ՋԱՕԲՄ չափումների համակարգի սխեմատիկ պատկերը, որը իրենից ներկայացնում է բևեռացված լույսի մանրադիտակ [1–3]. Նկար 1 (b)-ն ցույց է տալիս ՋԱՕԲՄ-ի աշխատանքի սկզբունքը: Երբ ՈւՄ-ը գտնվում է աշխատանքային ռեժիմում այն ճառագայթում է էՄ դաշտ, և դրանք ընտրողունակ կերպով կլանվում են ՕԻ-ի կողմից կախված նրա կլանման հատկությունից: Կլանող թաղանթի կողմից առաջացած ջերմությունը ներթափանցում է ջերմաառաձգական միջավայր (ապակե տակդիր) և միջավայրի ներսում առաջացնում է ջերմային լարվածություններ: Երբ շրջանաձև բևեռացված լույսն անցնում է լարվածություններ ապրունակող միջավայրով նրա բևեռացման վիճակը փոխվում և դառնում է

էլիպսաձև բևեռացված՝ կախված միջավայրի լարվածության առանցքից և նյութի հատկություններից:



**Նկար 1.** (a) ՋԱՕԻՄ-ի փորձարարական սարքի սխեմատիկ պատկերը: Քառորդ ալիքի թիթեղը և գծային բևեռացուցիչը ընկնող լույսը փոխակերպում են շրջանաձև բևեռացման վիճակի: ՕԻ-ից անդրադարձված լույսի բևեռացման վիճակը որոշվում է 0° կամ 45° կողմնորոշում ունեցող վերլուծիչի միջոցով, որտեղ CCD սենսորը գրանցում է լույսի ինտենսիվությունը ամեն պիքսելի համար: (b) ՋԱՕԻՄ համակարգի գրանցման սկզբունքի սխեմատիկ պատկերը: Շրջանաձև բևեռացված ընկնող լույսը օպտիկական ինդիկատորի ֆոտոառաձգական ազդեցության հետևանքով որն առաջանում է ջերմային լարվածություններից, փոխվում է իր բևեռացումը դառնալով էլիպսաձև: Ջերմային լարվածությունները պայմանավորված են ՕԻ-նյութի և ՈւՄ-ից ճառագայթված էլեկտրամագնիսական ալիքների փոխազդեցությունից առաջացած էլեկտրամագնիսական աքսցմամբ:

**1.2 պարագրաֆում** ներկայացված են ՋԱՕԻՄ համակարգի գրանցած պատկերների մշակման մեթոդները: Ջերմային լարվածությունների վերլուծությունից կարելի է գտնել ջերմության աղբյուրի ստեղծած դաշտի բաշխումը փորձով գրանցած գծային երկբևեռման վերլուծության միջոցով, որը կարելի է ստանալ հետևյալ բանաձևի օգնությամբ

$$\frac{q(x,y)}{c} = 2 \frac{\partial^2 \beta_2(x,y)}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 \beta_1(x,y)}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \beta_2(x,y)}{\partial y^2}, \quad (1)$$

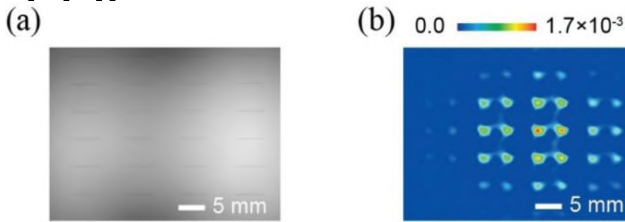
որտեղ  $C$ -ն հաստատուն է՝ կախված լույսի ալիքի երկարությանից և ՕԻ-ի ֆիզիկական հատկություններից, իսկ  $\beta_1$ -ը և  $\beta_2$ -ը գծային երկբևեռման պարամետրերն են: Աշխատանքում քննարկվել են նաև ՕԻ-ի էՄ կլանման հատկությունները: Ներկայացվել է, թե ինչպիսի կլանման հատկություններով պետք է օժտված լինի ՕԻ-ը որպեսզի հնարավոր լինի արտապատկերել էլեկտրական կամ մագնիսական դաշտերը:

**1.3 պարագրաֆում** ներկայացված է ապակե տակդիրների վրա նստեցված ԻՍՕ բարակ թաղանթների էլեկտրական դեֆեկտների հայտնաբերման նպատակով



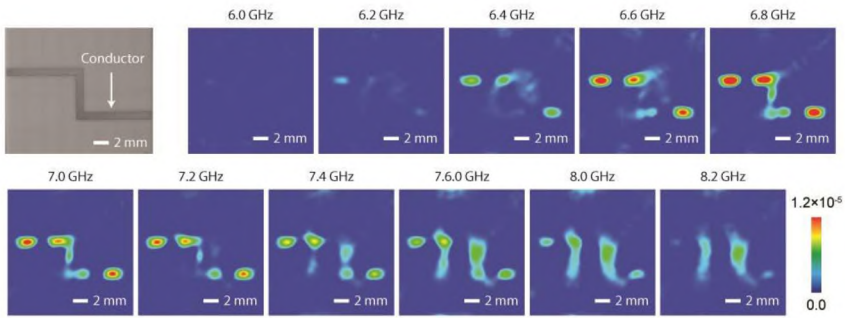
իրականացված համակարգված հետազոտությունը: Դիտարկվել են տարբեր չափսերի դեֆեկտներ, կախված ընկնող ԷՄ ալիքների բևեռացման ուղղությունից և հաճախությունից, որպեսզի պարզվի էլեկտրական դեֆեկտների հայտնաբերման լավագույն պայմանները: Չափումների արդյունքներից ելնելով ցույց է տրվել, որ գրգռող ԷՄ ալիքի երկարությունից շատ ավելի փոքր էլեկտրական դեֆեկտները կարելի է արտապատկերել ելնելով այն հանգամանքից, որ դեֆեկտի շուրջ նկատվում են ջերմային խիստ տեղայնացված բաշխումներ:

Նկար 2-ում ներկայացված են էլեկտրական դեֆեկտների (a) օպտիկական և (b) ջերմային բաշխման պատկերները: Չափումների արդյունքներից կարելի է տեսնել, որ դեֆեկտների հայտնաբերման տեսադաշտը կարող է հասնել մինչև  $4 \times 3$  սմ մակերեսի: Նշենք, որ այս տեսադաշտում բոլոր էլեկտրական թերությունները հայտնաբերվել են միաժամանակ: Մա հանդիսանում է ներկայացված մեթոդի առավելությունը, և իր արտապատկերման արագագարծությամբ գերազանցում է տեսածրման մեթոդներին:



**Նկար 2.** Պարբերական էլեկտրական դեֆեկտների (a) օպտիկական և (b) ջերմային բաշխման պատկերները: Պատկերների չափսերն ու պիքսելները համապատասխանաբար  $43 \times 32$  սմ<sup>2</sup> և  $1024 \times 768$  են: 5 մմ երկարությամբ սպիտակ հոծ գծերը համապատասխանում է դեֆեկտների երկարություններին և իրական մաշտաբին:

**1.4 պարագրաֆում** ներկայացված են ՋՍՕԻՄ-ի գործնական կիրառումը օպտիկապես անթափանց դիէլեկտրիկ միջավայրում ներկառուցված հաղորդիչ օբյեկտի հայտնաբերման նպատակով: Օգտագործելով ԻՍՕ-ով պատված ապակի, արտապատկերվել է մագնիսական ՄԱՄԴ, որը հայտնվում է հաղորդիչ օբյեկտ պարունակող դիէլեկտրիկ նյութի մակերևույթին: Ներկառուցված հաղորդիչ օբյեկտների հայտնաբերման օպտիմալ պայմաններ գտնելու նպատակով փորձարկվել են տարբեր չափերի հաղորդիչ գծեր և դրանք ՋՍՕԻՄ համակարգի միջոցով արտապատկերվել է կախված ընկնող ԷՄ դաշտի բևեռացման ուղղությունից և հաճախությունից: Չափումների արդյունքներից մենք ցույց են տալիս, որ դիէլեկտրական նյութի մակերևույթին հայտնված միկրոալիքային մագնիսական դաշտի բաշխումից կարելի է տեղորոշել օպտիկապես անթափանց դիէլեկտրիկների մեջ ներկառուցված հաղորդիչ օբյեկտները:

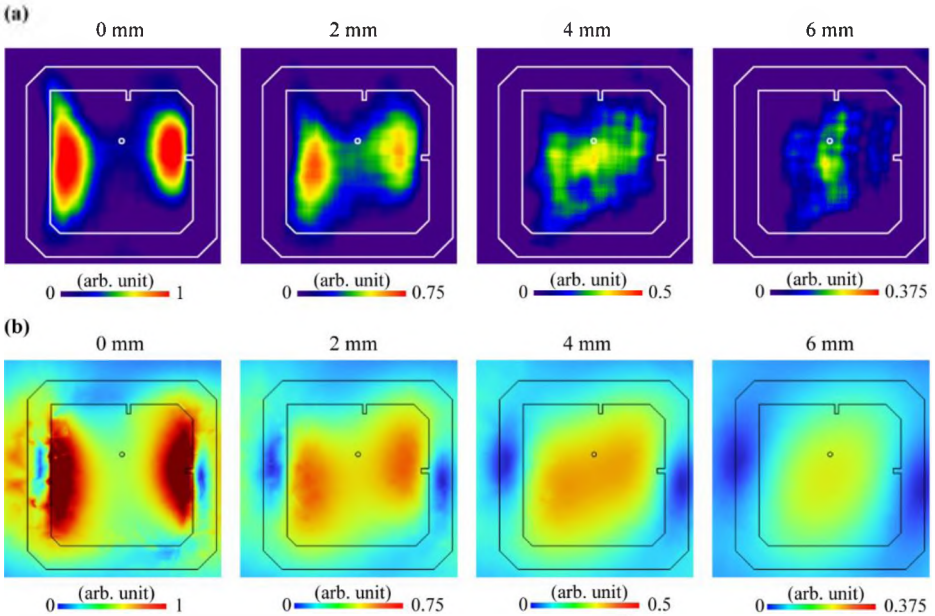


**Նկար 3.** Հաղորդիչ զծի օպտիկական պատկերը և նրա մագնիսական ՄԱՄԴ-ի բաշխման պատկերները, որոնք չափվել են ՋԱՕԲՄ համակարգով՝ 6.0-8.2 ԳՀց հաճախային տիրույթում: Պատկերների լայնությունը և բարձրությունը համապատասխանաբար 40 մմ և 30 մմ են:

Որպես օրինակ, փորձ է արվել հայտնաբերել Նկար 3-ում պատկերված կառուցվածքով հաղորդիչ զծը: Մա լավ օրինակ է դիէլեկտրական միջավայրում ներկառուցված հաղորդալարերով ինտեգրալային շրթանների ոչ-կոնտակտային և չվնասող ուսումնասիրությունների համար: Չափումները ցույց են տալիս, որ արտապատկերված մագնիսական ՄԱՄԴ բաշխումների շնորհիվ հաղորդիչ զծերը բավականին հստակ տեսանելի են 6.4-7.4 ԳՀց հաճախությունների միջակայքում երբ նույնիսկ հաղորդիչ զծը ծածկված է 1 մմ հաստությամբ կերամիկական թիթեղով:

**1.5 պարագրաֆում** ներկայացվում է ՋԱՕԲՄ-ի միջոցով իրականացվող GPS փաչ անտենայի ուսումնասիրությունը: Նշենք, որ յուրաքանչյուր GPS արբանյակի կողմից տվյալների փոխանցումը իրականացվում է հետևյալ հաճախություններով՝ 1575.42 ՄՀց (L1), 1227.60 ՄՀց (L2) և 1176.45 ՄՀց (L5): Անտենայի մակերևույթից տարբեր հեռավորությունների վրա արտապատկերվել է ՄԱՄԴ-ի բաշխումը: Միևնույն ժամանակ, փորձով ստացված արդյունքների համեմատման նպատակով ստեղծվել է համակարգչային մոդել՝ հիմնվելով իրական GPS անտենայի կառուցվածային չափսերի վրա:

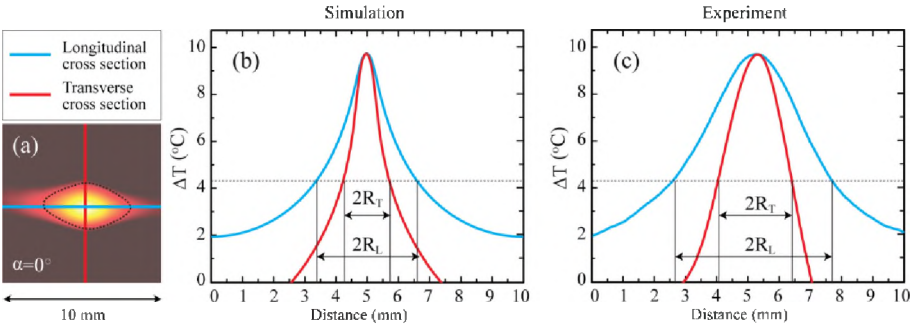
Նկար 4 (a)-ն ցույց է տալիս չափումների արդյունքները, որոնք համապատասխանում են 1.575 ԳՀց հաճախությամբ մագնիսական ՄԱՄԴ-ի բաշխմանը անտենայի հարթության մեջ, երբ ՕԲ-ի և անտենայի միջև եղած հեռավորությունը եղել է 0 մմ, 2 մմ, 4 մմ և 6 մմ: Ինչպես տեսնում ենք նկարներից, ինդիկատորի և ՈւՄ-ի միջև հեռավորությունը մեծացնելիս, մագնիսական ՄԱՄԴ-ի բաշխման միջին ինտենսիվությունը նվազում է, և դաշտի տեղայնացված բաշխումը ձախ և աջ եզրերից տեղափոխվում է մակերևույթի կենտրոնական հատվածը: Ներգծված ուրվագիծը ցույց է տալիս փաչ անտենայի երկրաչափական ձևը, իսկ արտաքին ուրվագիծը ցույց է տալիս ալեհավաքի դիէլեկտրական տակդիրի տեսքը: Նկար 4 (b)-ն ցույց է տալիս համակարգչային մոդելավորման արդյունքները, որոնք պունակներով համապատասխանում են Նկար 4 (a)-ում պատկերված մագնիսական ՄԱՄԴ-երի բաշխումներին տարբեր հեռավորությունների դեպքում:



**Նկար 4.** 1.575 ԳՀց հաճախության դեպքում ստացված՝ մագնիսական ՄԱՄԴ-երի բաշխումների (a) փորձարարական և (b) մոդելավորման պատկերները, ինդիկատորի և անտենայի մակերևույթի միջև եղած տարբեր հեռավորությունների դեպքում (0 մմ, 2 մմ, 4 մմ և 6 մմ):

**1.6 պարագրաֆում** ներկայացնում է համուղված ածխածին/ՊԵԿ կոմպոզիտային նյութի ջերմային և էՄ հատկությունները բնութագրելու կիրառական եղանակ, որի ընթացքում օգտագործվել է ՋԱՕԻՄ: Նյութի և էՄ դաշտի փոխազդեցության ուսումնասիրությունների համար այն հանդիսանում է հզոր գործիք: Այս ուսումնասիրության մեջ համուղված ածխածնային մանրաթելերով բաղադրյալ շերտը տաքացվել է ջերմության կետային աղբյուրով և ջերմային ազդեցության գոտին ուսումնասիրվում է ՋԱՕԻՄ-ի միջոցով:

Ջերմային ազդեցության գոտու ուսումնասիրության շնորհիվ գնահատվել են ածխածնային բաղադրյալ նյութի անիզոտրոպ ջերմային հատկությունները: Ինչպես նաև կատարվել է լրացուցիչ փորձնական ուսումնասիրություն պարզելու համար բաղադրյալ նյութում ՄԱՄԴ-ի բաշխման մեխանիզմները 9-15 ԳՀց հաճախությունների միջակայքում: Ուսումնասիրվել են անիզոտրոպ էլեկրական հատկություններով օժտված բաղադրյալ նյութի վրա ընկնող էՄ ալիքի բևեռացումից կախված փոխազդեցությունները և քննարկվել են այդ երևույթների կիրառման հնարավորությունները:



**Նկար 5.** (a) Կետային աղբյուրով տաքացման դեպքում ջերմության ուղղակի բաշխման պատկերը ածխածին/ՊԵԵԿ կոմպոզիտային նյութի վրա երկայնական և լայնակի հատման ուղիներով: Կետագծերը ցույց է տալիս ջերմային ազդեցության գոտու նույն ջերմաստիճանով էլիպսաձև հատվածը: Ջերմային բաշխման գրաֆիկները երկայնական (կապույտ գիծ) և լայնակի (կարմիր գիծ) ուղղություններով համապատասխանաբար (b) մոդելավորման և (c) փորձի դեպքում:  $R_L$ -ը և  $R_T$ -ը ջերմային ազդեցության գոտու երկայնական և լայնակյան շառավիղներն են:

Նկար 5 (b) և (c) պատկերը ցույց է տալիս արտապատկերված և մոդելավորված ջերմության բաշխումները երկայնական (կապույտ գիծ) և լայնակի (կարմիր գիծ) ուղղություններով՝ ինչպես ցույց են տրված Նկար 5 (a)-ում: Համակարգչային մոդելում երկայնական և լայնակյան ջերմահաղորդունակություններն համապատասխանաբար գնահատվել են 4.5 Վտ/(մ·Կ) և 0.67 Վտ/(մ·Կ): Ի վերջո հնարավոր է եղել փորձականորեն գնահատել, որ երկայնական ջերմահաղորդունակությունը մոտավորապես 4.6 անգամ գերազանցում է լայնակյան ջերմահաղորդունակության արժեքը:

**1.7 պարագրաֆում** համառոտ ներկայացված են այս գլխում քննարկված ՋՍՕԻՄ համակարգով արված բոլոր ուսամնասիրությունների արդյունքները:

**Գլուխ 2**-ում ներկայացված է ՋՍՕԻՄ-ի այլընտրանքային կիրառություններն ու հնարավորությունները՝ հիմնական ուշադրությունը դարձնելով ՕԲ-ների նոր տեսակի նախագծման անհրաժեշտության հարցերին: Այս նոր ինդիկատորները պատրաստվել են նանոչափական հասությամբ մետամակերևույթների հիմքի վրա և ունեն անիզոտրոպ էՄ հատկություններ:

**2.1 պարագրաֆում** ներկայացվում է էլեկտրական դաշտերի արտապատկերման տարածված մեթոդները, Ինչպես նաև էլեկտրական դաշտի ինդիկատորներ պատրաստելու հիմնական խնդիրները: Մոկորական ԻՍՕ թաղանթով պատված ապակիները հիանալի ինդիկատորներ են մագնիսական դաշտի արտապատկերման համար, սակայն դժվար է գտնել և ստեղծել ինդիկատորներ, որոնք կունենան բարձր դիէլեկտրական կորուստներ, ինչը թույլ կտա արտապատկերել էլեկտրական դաշտերը: Հետազոտությունը ներկայացնում է այս տեսակի ինդիկատորների

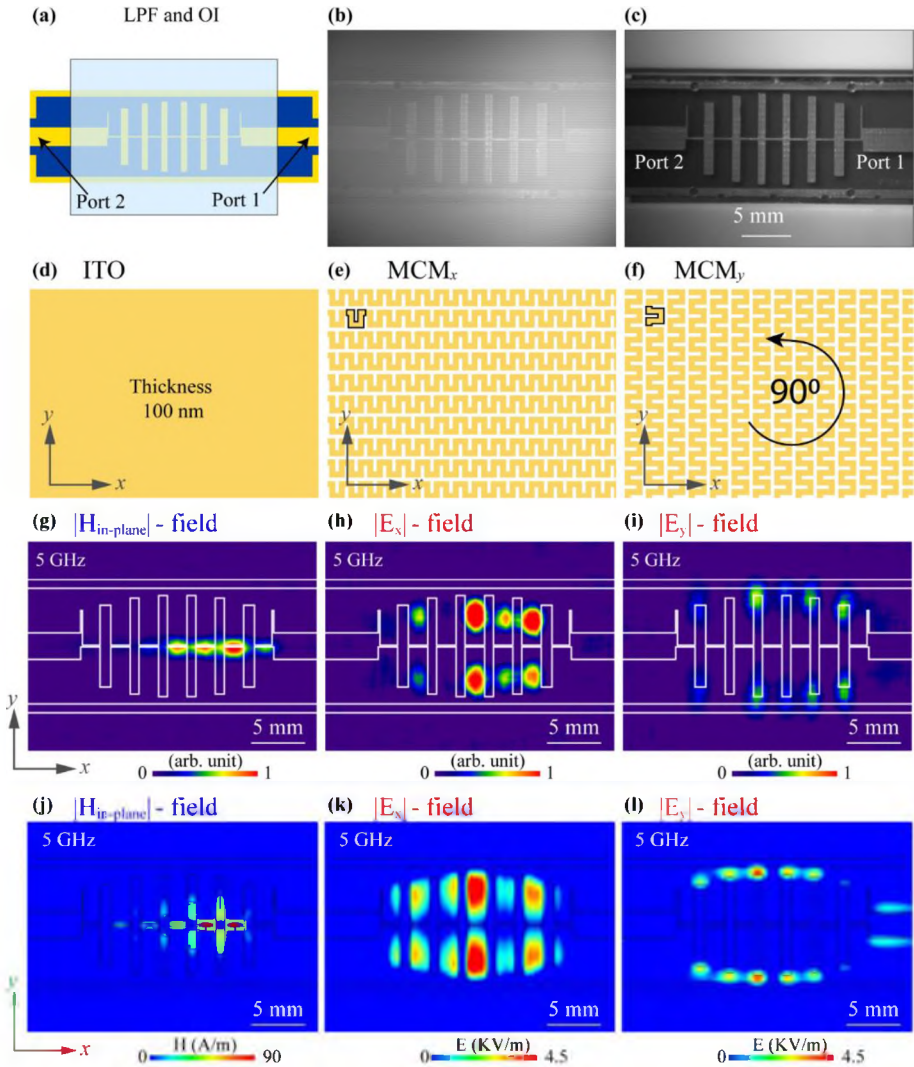
պատրաստման հեշտ լուծում, և այն հիմնված է պարբերական կառուցվածքների վրա: Էլեկտրական դաշտի արտապատկերման համար ԻՍՕ ապակիների վրա նախագծվել է ոլորապտույտ շղթայով մետամակերևույթ (meander chain metasurface (MCM)): Մշակված մետամակերևույթի վրա հիմնված ՕԻ-ները կարող են ընտրողաբար արտապատկերել էլեկտրական դաշտի  $|E_x|$  և  $|E_y|$  բաղադրիչները:

**2.2 պարագրաֆում** ներկայացված են էլեկտրական և մագնիսական դաշտերի ինդիկատորների ԷՄ կլանումների մեխանիզմները: Նշվել է, թե առաջարկվող մեթոդը ինչպես է հեշտացնում էլեկտրական դաշտի ինդիկատորների պատրաստումը: Ջուգահեռներ են տարվել այս նոր մեթոդի և նախորդ առաջարկված պատրաստման եղանակների միջև:

**2.3 պարագրաֆում** ներկայացված են միկրոալիքային ճառագայթման ազդեցության տակ գտնվող նախագծված ինդիկատորների մակերևույթին ստեղծված ԷՄ դաշտերի բաշխվածությունների և ԷՄ կլանումներից առաջացած ջերմային բաշխվածությունների արդյունքները ըստ համակարգչային մոդելավորուման:

**2.4 պարագրաֆում** քննարկված են ՋՍՕԻՄ համակարգով ստացված արդյունքները որոնք հաստատվել են համակարգչային մոդելավորմամբ ստացված արդյունքների հետ:

Նկար 6 (d-f)-ը ցույց են տալիս համասեռ և փորագրված ԻՍՕ թաղանթների տեսքերը MCM կառուցվածքներով, երբ ոլորապտույտ գծերը ուղղված են համապատասխանաբար  $x$  առանցքի (նշված է MCM<sub>x</sub>) և  $y$  առանցքի (նշված է MCM<sub>y</sub>) երկայնքով: Նկար 6 (g) ցույց է տալիս ՌՀ ֆիլտրի մագնիսական դաշտի բաշխումը 5 ԳՀց հաճախության դեպքում, որտեղ որպես ՕԻ օգտագործվել է համասեռ ԻՍՕ-ապակի: Նախագծված ինդիկատորը որոշակի կողմնորոշման դեպքում կարող է արտապատկերել ՌՀ սարքի էլեկտրական դաշտի բաշխման միայն մեկ բաղադրիչը: Էլեկտրական դաշտի  $|E_x|$  բաղադրիչը (Նկար 6 (h)) արտապատկերվել է օգտագործելով Նկար 6 (e)-ում պատկերված ՕԻ-ը: Նմանապես, նկար 6 (i) պատկերում ներկայացված է էլեկտրական դաշտի բաշխման  $|E_y|$  բաղադրիչը, որը արտապատկերվել է նկար 6 (f)-ում ցուցադրված ՕԻ-ով: Բոլոր դեպքերում աշխատանքային հաճախությունը 5 ԳՀց է: Այս փորձարարական արդյունքները ամբողջովին հաստատվում են համակարգչային մոդելավորումամբ, որոնք բերված են Նկար 6 (j-l)-ում և համապատասխանաբար ցույց են տալիս ՈւՄ-ի ԷՄ դաշտերի  $|H_{in-plane}|$ ,  $|E_x|$  և  $|E_y|$  բաղադրիչները:



**Նկար 6.** (a) Փորձարկվող ՖՀ ֆիլտրի սխեմատիկ պատկերը: CCD տեսախցիկով նկարված ՈւՄ-ի օպտիկական պատկերը (b) ինդիկատորով և (c) առանց ինդիկատորի: (d) Համասեռ ԻՍՕ-ապակի ինդիկատորի տեսքը: Նախագծված ԻՍՕ-ապակի մետամակերևույթներով (e)  $MCM_x$  և (f)  $MCM_y$  ինդիկատորները: ՄԱՄԴ-ի բաշխման արտապատկերման արդյունքը որոնք ստացվել հետևյալ ինդիկատորների միջոցով՝ (g) ԻՍՕ-ապակի, (h)  $MCM_x$ -մետամակերևույթ և (i)  $MCM_y$ -մետամակերևույթ, 5 ԳՀց հաճախության դեպքում: 5 ԳՀց հաճախության դեպքում ստացված մոդելավորման արդյունքները՝ (j) նմուշի հարթության մեջ մագնիսական դաշտի բաշխումը ( $|H_{in-plane}|$ ), (k) էլեկտրական դաշտի x-բաղադրիչ բաշխումը ( $|E_x|$ ) և (l) էլեկտրական դաշտի y-բաղադրիչ բաշխումը ( $|E_y|$ ):

**2.5 պարագրաֆում** ամփոփված են մետամակերևութային հիման վրա նախագծած ՕԻ-ով ստացված արդյունքները:

**Գլուխ 3-ում** ներկայացված է ՋԱՕԻՄ արտապատկերման տեխնիկայի միջոցով իրականացվող բարդ ջրային լուծույթների բնութագրման նոր մեթոդ: Օգտագործելով այս մանրադիտման տեխնիկան արտապատկերվել է մագնիսական ՄԱՄԴ բաշխումը նատրիումի քլորիդի և գլյուկոզի ջրային լուծույթների մերձակայքում: Փորձի արդյունքները ցույց են տալիս, որ մագնիսական-ՄԱՄԴ ինտենսիվությունը հակադարձ ձևով կապված է նատրիումի քլորիդի և գլյուկոզի ջրային լուծույթում խտությունների հետ:

**3.1 պարագրաֆը** համառոտ ներածական մաս է, որտեղ խոսվում է մեթոդի նորարարության և հնարավորությունների մասին՝ որոշ գույափոփոխություններ տանելով խտությունների որոշման ներկայում կիրառվող այլ մեթոդների միջև:

**3.2 պարագրաֆում** մանրամասնված են փորձնական սարքավորումները և մեթոդը լոգիկային վերաբերվող որոշ հարցեր: Քննարկված են հեղուկ նմուշների էՄ տաքացման ջերմային պայմանները:

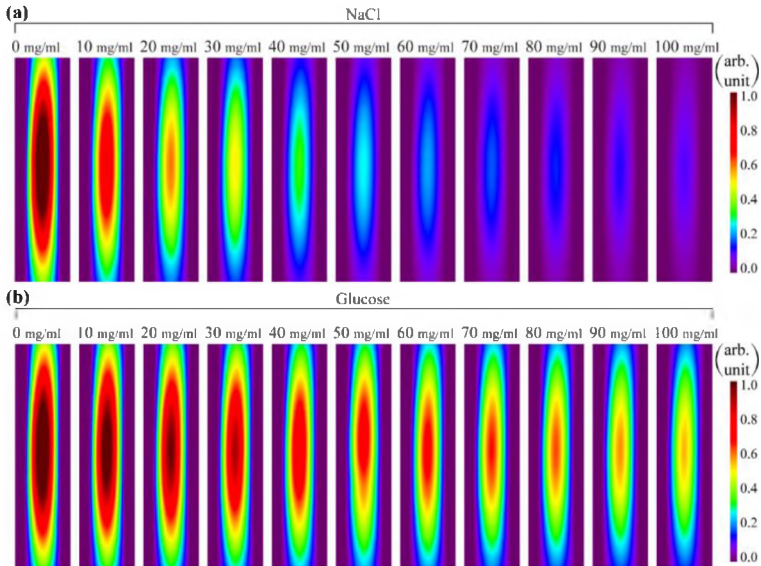
**3.3 պարագրաֆը** հիմնականում տեսական մաս է, որտեղ նկարագրվում է միկրոայիքային ազդեցության ենթարկվող հեղուկների վարքը և էՄ կլանումների մեխանիզմը: Քննարկված են այդ մեխանիզմները պարզաբանող որոշ մոդելներ:

**3.4 պարագրաֆում** ներկայացված են ՋԱՕԻՄ եղանակով հեղուկներում լուծված նյութերի խտությունների չափման փորձնական արդյունքները:

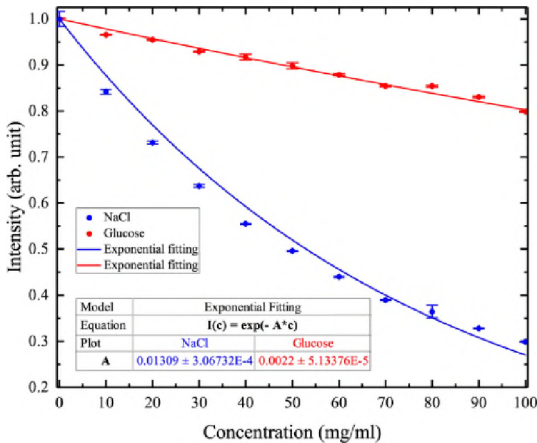
Նկար 7-ում ներկայացված են 0-100 մգ/մլ խտությունների միջակայքում գտնվող նատրիումի քլորիդի և գլյուկոզի ջրային լուծույթներ համար փորձնականորեն ստացված արտապատկերումների արդյունքները: Այս արդյունքները պարունակում են տեսանելի տեղեկատվություն էՄ դաշտի և տարբեր խտություններով նատրիումի քլորիդի և գլյուկոզի ջրային լուծույթներ փոխազդեցությունների բնույթի մասին: Լուծույթի խտությունների մեծացմանը զուգնթաց, լուծույթում մագնիսական-ՄԱՄԴ-ի ինտենսիվությունը երկու դեպքում էլ նվազում է:

Նկար 8-ը ցույց է տալիս 12 ԳՀց հաճախության դեպքում մագնիսական ՄԱՄԴ-ի բաշխման պատկերների միջինացված ինտենսիվության կախվածությունը լուծված նյութի խտությունից 0-100 մգ/մլ տիրույթում՝ 10 մգ/մլ աճման քայլով:

**3.5 պարագրաֆում** ամփոփված են այս գլխում ներկայացված կենսահեղուկների խտությունների նոր եղանակով չափման արդյունքները:



**Նկար 7.** ՋԱՕԻՄ համակարգով ստացած 12 Գձց հաճախությամբ մագնիսական ՄԱՄԴ-ի բաշխման պատկերները (a) նատրիումի քլորիդի և (b) գլյուկոզի ջրային լուծույթների տարբեր խտությունների դեպքում 0-100 մգ/մլ տիրույթում: Յուրաքանչյուր պատկերի չափսը 20×5 մմ<sup>2</sup> է:



**Նկար 8.** 12 Գձց հաճախությամբ մագնիսական ՄԱՄԴ-ի բաշխման միջինացված ինտենսիվության գրաֆիկական վարքը կախված 0-100 մգ/մլ միջակայքում փոփոխվող նատրիումի քլորիդի և գլյուկոզի ջրային լուծույթների խտություններից: Գծիկներով ներկայացված են հինգ անկախ փորձերի միջին քառակուսային շեղումները յուրաքանչյուր խտության դեպքում: Թավ գծերը ցույց են տալիս փորձարարական տվյալների էքսպոնենցիալ մոտարկումները:  
**Հղված գրականություն**



1. H. Lee, S. Arakelyan, B. Friedman, and K. Lee, "Temperature and microwave near field imaging by thermo-elastic optical indicator microscopy," *Sci. Rep.* 6, 1–11 (2016).
2. S. Arakelyan, H. Lee, Y. Jeong, A. Babajanyan, B. Friedman, and K. Lee, "Direct imaging of the SSD and USB memory drives heating by thermo-elastic optical indicator microscopy," *Case Stud. Therm. Eng.* 10, 407–412 (2017).
3. S. Arakelyan, H. Lee, K. Lee, A. Babajanyan, and B. Friedman, "Detecting defects in sub-skin-depth metallic layers by a thermo-elastic sensor," *Proc. IEEE Sensors 2017-Decem*, 1–3 (2017).

## ԵԶՐԱԿԱՑՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐ

- ՋԱՕԻՄ-ը բարձր լուծունակությամբ և արագ արձագանքման ժամանակով կարող է արտապատկերել միկրոալիքային էլեկտրամագնիսական մոտակա դաշտերի բաշխումները՝ օգտագործելով նանոչափական հաստությամբ օպտիկական ինդիկատոր: Տեխնիկական հիմնված է ջերմաստաձգական և ֆոտոաստաձգական էֆեկտների, որոնք օգտագործվում են արտապատկերելու ջերմային բաշխումը՝ օգտագործելով հարթության մեջ եղած մեխանիկական լարվածությունների վերլուծությունը: Այն կիրառվել է միկրոալիքային էլեկտրամագնիսական և ջերմային դաշտերի բաշխվածությունները արտապատկերելու համար:
- ՋԱՕԻՄ արտապատկերման համակարգը կարող է ունենալ բազմաթիվ արդյունաբերական և գործառույթային կիրառություններ ինժեներների և գիտնականների համար, ինչպիսիք են նյութերի անվնաս ուսումնասիրությունները, չափազանց բարակ մետաղական շերտերի թերությունների ստուգումը, անտենայի պարամետրերի բնութագրումը, կոմպոզիտային նյութերի անիզոտրոպ էլեկտրական և ջերմային հաղորդականությունների բնութագրումը և այլն: Օգտագործելով ՋԱՕԻՄ տեխնիկան՝ ԻԱՕ ապակու վրա հայտնաբերվել է տարբեր երկրաչափական ձևեր ունեցող էլեկտրական դեֆեկտներ, հաղորդիչ օբյեկտներ, որոնք ներկառուցված են եղել օպտիկապես անթափանց դիէլեկտրական միջավայրում, գնահատվել է համալուրջած ածխածնային մանրաթելերից պատրաստված բաղադրյալ նյութերի էլեկտրական և ջերմային անիզոտրոպ հատկությունները և հետազոտվել է միկրոալիքային մոտակա դաշտի բաշխում GPS փաշ անտենայի մակերևույթին մոտակայքում:
- Մետամակերևույթների վրա հիմնված նանոչափական կառուցվածքներով առաջադեմ օպտիկական ինդիկատորները կարող են մեծացնել ՋԱՕԻՄ համակարգի զգայունությունը և լրացուցիչ հնարավորություններ ապահովել մեկ-թիրախային գրանցումների համար: Օպտիկական ինդիկատորների համար նախագծվել է անիզոտրոպ պարբերական կառուցվածքներ, որոնց օգնությամբ հնարավոր է եղել ընտրողաբար արտապատկերել էլեկտրական դաշտի բաշխման  $x$  կամ  $y$  բաղադրիչները: Օգտագործելով հավաքագրված երկչափ պատկերները, ՌՀ ֆիլտրերի համար վերակառուցվել են ՄԱՄԴ բաշխման եռաչափ պատկերները:
- Ցույց է տրվել, որ ՋԱՕԻՄ համակարգը կարող է կենսաբժշկական կիրառություն ունենալ կենսահեղուկների խտությունների գնահատման, բարդ կենսաբանական հեղուկների վերլուծության և միկրոալիքային փոխազդեցությունների բնութագրման համար: Փորձարկվել են տարբեր խտություններով նատրիումի քլորիդի և գլյուկոզի ջրային լուծույթներ, և արտապատկերելով նմուշների շուրջ առաջացած ՄԱՄԴ բաշխումը, ոչ-կոնտակտային և անվնաս եղանակով գնահատվել են խտությունները: Ցույց է տրվել, որ դաշտի ինտենսիվության փոփոխության վարքագիծն ավելի կտրուկ է էլեկտրոլիտային լուծույթների համար, ինչպես օրինակ նատրիումի քլորիդի դեպքում:

## Հրատարակված աշխատանքների ցուցակ

1. Z. Baghdasaryan, A. Babajanyan, L. Odabashyan, J.-H. Lee, B. Friedman, and K. Lee, "Visualization of microwave near-field distribution in sodium chloride and glucose aqueous solutions by a thermo-elastic optical indicator microscope," *Sci. Rep.* **11**, 2589 (2021).
2. Z. Baghdasaryan, A. Babajanyan, H. Parsamyan, B. Friedman, S. Kim, J.-H. Lee, and K. Lee, "3D visualization of microwave electric and magnetic fields by using a metasurface-based indicator," *Sci. Rep.* **12**, 6150 (2022).
3. L. Odabashyan, A. Babajanyan, Z. Baghdasaryan, S. Kim, J. Kim, B. Friedman, J.-H. Lee, and K. Lee, "Real-Time Noninvasive Measurement of Glucose Concentration Using a Modified Hilbert Shaped Microwave Sensor," *Sensors* **19**, 5525 (2019).
4. Z. Baghdasaryan, A. Babajanyan, L. Odabashyan, S. Arakelyan, H. Lee, G. Berthiau, B. Friedman, and K. Lee, "Thermal distribution in unidirectional carbon composite material due to the direct heating and microwave influence visualized by a thermo-elastic optical indicator microscope," *Measurement* **151**, 107189 (2020).
5. H. Lee, Z. Baghdasaryan, B. Friedman, and K. Lee, "Electrical Defect Imaging of ITO Coated Glass by Optical Microscope With Microwave Heating," *IEEE Access* **7**, 42201–42209 (2019).
6. H. Lee, Z. Baghdasaryan, B. Friedman, and K. Lee, "Detection of a Conductive Object Embedded in an Optically Opaque Dielectric Medium by the Thermo-Elastic Optical Indicator Microscopy," *IEEE Access* **7**, 46084–46091 (2019).
7. Z. A. Baghdasaryan, "IMAGING OF MICROWAVE NEAR-FIELD DISTRIBUTION OF GPS PATCH ANTIENNA," *Proc. YSU A Phys. Math. Sci.* **56**, 66–73 (2022).
8. B. J. Minasyan, L. A. Odabashyan, Z. A. Baghdasaryan, A. Z. Babajanyan, and K. Lee, "COMPUTER MODELING OF MICROWAVE STRIPLINE RESONATORS FOR NON-INVASIVE SENSING," *Proc. YSU A Phys. Math. Sci.* **53**, 60–64 (2019).
9. L. Odabashyan, A. Babajanyan, Z. Baghdasaryan, B. Friedman, and K. Lee, "Glucose Aqueous Solution Sensing by Modified Hilbert Shaped Microwave Sensor," *Armen. J. Phys.* **11**, 214–222 (2018).
10. Z. Baghdasaryan, A. Babajanyan, L. Odabashyan, H. Lee, B. Friedman, and K. Lee, "Visualization of Microwave Heatingformesh-Patterned Indium-tin-Oxide by a Thermo-Elastic Optical Indicator Microscope," *Armen. J. Phys.* **11**, 175–179 (2018).
11. D. KIM, Z. BAGHDASARTAN, and K. LEE, "Thickness-Dependent Phase Change and Morphological and Electric Characteristic of Devices with Pentacene," *New Phys. Sae Mulli* **69**, 1231–1234 (2019).
12. J. HWANG, D. KIM, M. KIM, H. LEE, A. BABAJANYAN, L. ODABASHYAN, Z. BAGHDASARYAN, K. LEE, and D. CHA, "Performance of Pentacene-based Thin-film Transistors Fabricated at Different Deposition Rates," *New Phys. Sae Mulli* **68**, 1192–1195 (2018).
13. K. Lee, H. Parsamyan, A. Babajanyan, and Z. Baghdasaryan, "Imaging of microwave electric- and magnetic-fields by optical indicator microscopy," in *The 44th Annual Conference on MAGNETICS in Japan* (2020), p. 23.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В АНИЗОТРОПНЫХ  
НАНОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУРАХ

АННОТАЦИЯ

Диссертация посвящена микроволновой визуализации ближнего поля с использованием наноразмерных металлических тонких пленок в качестве оптического индикатора. Распределение электромагнитного поля в анизотропных наноструктурах исследовано экспериментально и теоретически с целью нахождения новых структур из искусственных метаматериалов для сенсорных приложений. Кроме того, разработанные индикаторы на основе метаповерхностей использовались в практических приложениях визуализации с высоким разрешением.

Во-первых, был представлен новый метод термографии, основанный на термоупругой оптической индикаторной микроскопии (ТУОИМ). Метод использует оптически прозрачный материал в качестве термоупругого индикатора. Поместив индикатор на тестируемое устройство (ТУ), он отслеживает изменение распределения механических напряжений за счет фотоупругого эффекта. Кроме того, он визуализирует электромагнитное (ЭМ) распределение ближнего поля с помощью анализа термических напряжений. В настоящем исследовании была получена электрическая и магнитная ближнепольная визуализация с очень высокой чувствительностью и оптическим разрешением с использованием стандартного стекла в качестве термоупругого индикатора и обычного поляризационного микроскопа. Кроме того, несколько примеров и практических применений системы ТУОИМ продемонстрировали, что настоящая методика обеспечивает практический способ мониторинга и характеристики тепловых процессов, происходящих в устройстве и материале под воздействием микроволнового излучения.

С помощью методики ТУОИМ были проинспектированы электрические дефекты различной геометрической формы на стекле ИТО, обнаружены проводящие объекты, внедренные в оптически непрозрачную диэлектрическую среду, оценены анизотропные электрические и тепловые свойства однонаправленных углеродных композиционных материалов, исследованы распределение микроволнового ближнего поля в ближней области патч-антенны GPS.

Во второй части мы разработали новые индикаторы электрического поля на основе периодической металлической структуры для системы ТУОИМ. Эти новые индикаторы могут визуализировать x- и y- компоненты распределения электрического поля отдельно. Мы визуализировали микроволновое распределение радиочастотных (РЧ) фильтров в ближней зоне и показали распределения электрического и магнитного полей в практических приложениях. Все экспериментальные результаты были подтверждены компьютерным моделированием, которое показывает хорошее согласование с измерениями.

Кроме того, был разработан новый метод реконструкции объемных 3D-изображений для системы ТУОИМ. Эти индикаторы в будущем могут иметь

практическое применение, ориентированное на неинвазивную диагностику. Кроме того, они могут стать отличным решением для частных задач, таких как одноцелевые сенсоры для некоторых соединений. Это новый оптический индикатор (ОИ), основанный на периодической металлической структуре, для характеристики электромагнитных свойств различных радиочастотных устройств и материалов и предоставления визуальной информации о распределении электромагнитного поля. Метод демонстрирует новый оптический способ визуализации ЭМ полей, взаимодействующих с метаструктурой.

Под конец, мы продемонстрировали, что метод ТУОИМ может характеризовать сложные жидкие вещества. В ходе отдельных экспериментов микроволновое излучение возбуждало растворы различной концентрации D-глюкозы и хлорида натрия. Показано, что характер изменения напряженности поля более резок для растворов электролитов, как и в случае NaCl. В качестве контейнера использовалась пластиковая трубка небольшого диаметра, и мы визуализировали распределение микроволнового ближнего поля вокруг трубки. Мы обнаружили, что интенсивность микроволнового поля зависит от концентрации растворенного вещества. Мы находим, что это исследование в будущем может иметь медицинское применение с упором на неинвазивную диагностику. Например, упомянем измерения крови «на месте» (in-situ) вокруг вен, размеры которых сопоставимы с экспериментальной пластиковой трубкой. Это новый метод характеристики электромагнитных свойств различных жидкостей, который позволяет получить визуальную информацию о поведении жидкости под воздействием микроволнового излучения. Этот новый оптический метод может быть применим к передовым бесконтактным методам и методам неразрушающего контроля для определения электромагнитных свойств водных растворов, а также для определения изменений концентрации растворенных веществ в водных растворах для ионных и неионных комплексных веществ. Наша техника создает парадигму для будущих исследований этого типа неинвазивной диагностики.

ELECTROMAGNETIC FIELD DISTRIBUTIONS IN ANISOTROPIC NANOSCALE  
STRUCTURES

ANNOTATION

This dissertation is devoted to near-field microwave imaging using nanoscale metallic thin films as an optical indicator. The electromagnetic field distribution in anisotropic nanostructures has been investigated experimentally and theoretically in order to find new structures made of artificial metamaterials for sensor applications. Furthermore, the designed indicators based on metasurfaces have been used in practical high-resolution visualization applications.

First, a new thermography technique based on thermo-elastic optical indicator microscopy (TEOIM) was presented. The method uses an optically transparent material as a thermoelastic indicator. By placing the indicator on a device under test (DUT), it monitors a change in stress distribution by the photoelastic effect. In addition, it visualizes an electromagnetic (EM) near-field distribution through thermal stress analysis. The present study achieved electric and magnetic near-field imaging with very high sensitivity and optical resolution by using a standard slide glass as a thermoelastic indicator and a conventional polarization microscope. Furthermore, several examples and practical applications of the TEOIM system demonstrated that the present technique provides a practical way to monitor and characterize the thermal processes occurring in a device and DUT under microwave radiation.

Using the technique of the TEOIM, we inspected electrical defects having different geometrical shapes on the ITO glass, detected conductive objects which were embedded in the optically opaque dielectric medium, evaluated the anisotropic electrical and thermal properties of unidirectional carbon fiber composite materials, and investigated the microwave near-field distribution in the near region of the GPS patch antenna.

In the second part, we designed new electric field indicators based on the periodic metallic structure for the TEOIM system. These new indicators can visualize x- and y- components of electric field distributions separately. We visualized the microwave near-field distribution of radio-frequency (RF) filters and showed the electric and magnetic field distributions in practical applications. All experimental results were verified by computer simulations, which show good agreement with measurements.

Additionally, a new method was produced to reconstruct 3D bulk images for a TEOIM system. These indicators in the future can have a practical application focusing on non-invasive sensing. In addition, they can be an excellent solution for particular tasks, such as single-target sensors for some compounds. This is a new optical indicator (OI) based on the periodic metallic structure to characterize EM properties of different RF devices and DUTs and provides visual information about EM field distribution. In addition, this method shows a new optical way of visualization for EM fields interacting with a metastructure.

Finally, we uncovered that the TEOIM technique could characterize complex liquid substances. In separate experiments, microwave radiation excited D-glucose and NaCl solutions with various concentrations. It was shown that the changing behavior of the field intensity is more drastic for electrolyte solutions, like in the case of NaCl. A plastic tube with a small

diameter was used as a container, and we visualized the microwave near-field distribution around the tube. We found that the microwave field intensity has a dependency on solute concentration. We showed that this study in the future can have a medical application focusing on non-invasive sensing. For example, we will mention in-situ blood measurements around veins whose sizes are comparable to the experimental plastic tubes. This is a new method of characterizing EM properties of different liquids and provides visual information about liquid behavior under microwave irradiation. This new optical method can be applicable to advanced non-contact and NDT approaches for the EM property of aqueous solutions, and to determine solute concentration changes in aqueous solutions for ionic and non-ionic complex substances. Our technique creates a paradigm for future studies of this type of non-invasive sensing.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'N. Singh', written in a cursive style.