

AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASI

Əlyazması hüququnda

LAZER ŞÜALANMASININ METAMATERİALLARDA VƏ ORTA İQ DİAPAZONDA XALKOGENİD KRİSTALLARDA QEYRİ – XƏTTİ TEZLİK ÇEVRİLMƏSİ

İxtisas: 2211.01 – Bərk cisimlər fizikası

Elm sahəsi: Fizika

İddiaçı: **Şəhla Asəf qızı Şamilova**

Fizika üzrə fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi
almaq üçün təqdim edilmiş dissertasiyanın

AVTOREFERATI

Bakı – 2021

Dissertasiya işi Bakı Dövlət Universitetinin “Optika və molekulyar fizika” və “Fiziki elektronika” kafedralarında yerinə yetirilmişdir.

Elmi rəhbərlər: fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor
Rəna Cümşüd qızı Qasımova
fizika üzrə elmlər doktoru, dosent
Hüseyn Mikayıl oğlu Məmmədov

Rəsmi opponentlər: fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor
Sofya Rüstəm qızı Fiqarova
fizika üzrə elmlər doktoru, dosent
Cahangir İslam oğlu Hüseynov
fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor
Rəna Fikrət qızı Babayeva

Azərbaycan Respublikasının Prezidenti yanında Ali Attestasiya Komissiyasının Bakı Dövlət Universitetinin nəzdində fəaliyyət göstərən ED 2.19 Dissertasiya şurası

Dissertasiya şurasının sədri:

AMEA-nın müxbir üzvü,
fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor
_____ **Aydın Həsən oğlu Kazımzadə**

Dissertasiya şurasının elmi katibi:

_____ fizika-riyaziyyat elmləri namizədi, dosent
Bəxtiyar Gülmalı oğlu Paşayev

Elmi seminarın sədri:

_____ fizika üzrə elmləri doktoru, dosent
Sədiyər Soltan oğlu Rəhimov

İŞİN ÜMUMİ XARAKTERİSTİKASI

Mövzunun aktuallığı və işlənmə dərəcəsi. Fotonikanın müasir inkişafı metamaterialların yaradılması texnologiyası ilə əlaqəlidir. Spektrin ifratyüksək tezlikli və optik diapazonlarında mənfi sındırma əmsalına malik bu mühitlərin yaradılmasında əldə edilmiş nailiyyətlər, qarşı qarşıya yayılan dalğaların parametrik qarşılıqlı təsir proseslərinə olan marağı artırdı.

Optik sistemlərdə informasiyanın emalı məqsədi ilə informasiya daşıyıcısı kimi fotonlardan istifadə olunur. Ancaq burada məlumat daşıyıcısının idarə olunması problemi yaranır. Metamaterialların kəşfi qeyri-xətti optikanın üsulları ilə bu cür süni quruluşların optik xüsusiyyətlərini dəyişdirərək işıq şüalanmasını idarə etməyə imkan verdi. Məlumdur ki, metamaterial, materialın rezonans xüsusiyyətlərini təmin edən, daxilolmaları olan, dielektrik matris meydana gətirən kompozit materialdır. Analoji yanaşma, bərk cisim lazerlərinin inkişafında tətbiq olunmuşdur, kristal matrisinə aktivator ionları daxil edilirdi və bu ionlar lazer mühitinin fiziki xüsusiyyətlərini təyin edirdi. Nəticədə bu cür qeyri bircins metamaterialda mühitin (dielektrik ϵ və maqnit μ nüfuzluqları) maddi parametrlərinin sıçrayışlı dəyişməsi və müəyyən tezlik diapazonunda sındırma əmsalının mənfi qiyməti müşahidə olunur. Bunun nəticəsi olaraq, belə mühitdə mənfi sındırma tezliyində elektromaqnit dalğası müxtəlif istiqamətli faza və qrup sürətləri ilə yayılır. Faza sürətinin mənfi qiyməti bildirir ki, dalğanın yayılması zamanı dalğanın faza dəyişməsi qəbuledicidən mənbə istiqamətində, enerjinin daşınması isə öz növbəsində mənbədən qəbuledici istiqamətində baş verir. Belə bir həndəsə ilə, siqnal dalğa əks dalğadır. Beləliklə, metamaterialda düşən elektromaqnit dalğası qeyri-adi dəyişikliklərə məruz qalır ki, bu da yeni qeyri-ənənəvi effektlərə gətirib çıxarır.

Son zamanlarda lazer texnologiyasının inkişafındakı vacib istiqamətlərdən biri lazer şüalanmasının dalğa uzunluğunun genişlənməsinə imkan verən, tezliyi dəyişən işıq mənbələrinin yaradılması və tədqiqidir. Spektrin orta infraqırmızı (İQ) intervalında bu cür mənbələr, optik rabitə sistemlərində yarımkeçirici

elementlərin tədqiqi üçün əvəzsiz vasitədir, müasir LİDAR-ların əsas elementləridir, o cümlədən torpaq və atmosferin, elmi və tibbi təyinatlı cihazların tədqiqi üçün, spektroskopiya məsələləri üçün uğurla istifadə olunur. Lakin, bu məsələləri həyata keçirmək üçün zəruri enerji parametrləri və faydalı iş əmsalı ilə koherent şüalanma mənbələri lazımdır.

Belə ki, bu məqsədlər üçün istifadə olunan kristallar bir sıra çatışmazlıqlara malikdirlər, məsələn, aşağı temperaturlarda işləyən CdGeAs_2 kristalları ikinci harmonikanın dalğa uzunluqlarında yüksək itkilərə malikdirlər, ZnGeP_2 və Te kristalları karbon dioksid lazerin əsas dalğalarının uzunluqlarında itkilərə malikdirlər. Tl_3AsSe_3 və AgGaSe_2 kristalları zəif istilik, GaSe kristalı isə aşağı mexaniki xüsusiyyətlərə malikdirlər. Buradan, xüsusilə, CO_2 lazer əsasında effektiv və etibarlı harmonika generatorlarının yaradılması problemləri yaranır.

Bu səbəbdən müasir qeyri-xətti optika məsələlərinin həyata keçirilməsi üçün perspektivli materialların axtarışı hələ də davam edir.

İQ diapazonunun orta və uzaq sahələrində göstərilən problemləri həll etmək üçün, unikal xüsusiyyətlərinə görə, ZnGeP_2 , AgGaSe_2 , AgGaS_2 , GaSe ($\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Ga}_2\text{S}_4$ и $\text{GaS}_x\text{Se}_{1-x}$ $\text{AgGa}_{x-1}\text{In}_x\text{Se}$ и $\text{AgGa}(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_2$) kimi qeyri-xətti optik İQ kristalları böyük maraqla diqqətə layiqdir. Məlum olduğu kimi, sadalanan İQ kristalları böyük effektiv optik qeyri-xəttiliyə malikdirlər, bununlada tədqiqatçıların diqqətini cəlb edirlər.

Qurğuların hazırkı miniaturlaşdırılma tendensiyası nanoölçülü strukturların texnoloji inkişafı ilə müşayiət olunur. texnoloji inkişafı ilə müşayiət olunur. Bu, həcmli materialların əvəzinə nazik dielektrik və yarımkeçirici təbəqələrdən istifadə etməyə kömək edib. Yarımkeçiricilər və dielektriklərin harmonika generasiya üsulu ilə tədqiqi bu birləşmələrin morfoloqiyası və strukturu haqqında məlumat verir.

Yüksək tərtibli harmonikaların generasiya prosesi isə ultrabənövşəyi və spektrin ekstremal-ultrabənövşəyi diapazonlarında bir sıra tətbiqi məsələlərin həlli, yüksək enerji fotolarının alınması üçün cəlbedicidir. Üçüncü harmonikanın generasiyasının (ÜHG) əsas

üstünlüyü ondan ibarətdir ki, yüksək tezliklər səbəbindən o təmiz koherent elektron qeyri-xəttilik aşkar edir və istilik reaksiyasına həssas deyil.

Yuxarıda deyilənləri nəzərə alaraq praktiki əhəmiyyətlə bağlı qeyri-xətti optik proseslərin öyrənilməsi və tezlik çevrilməsinin effektivliyinin artırılmasına mane olan səbəblərin müəyyənləşdirilməsi aktual problem kimi hesab oluna bilər.

Tədqiqatın obyektı və predmeti. Tədqiqatın obyektləri olaraq $\text{AgGa}_{x-1}\text{In}_x\text{Se}$, $\text{AgGa}(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_2$, $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Ga}_2\text{S}_4$ və $\text{GaS}_x\text{Se}_{1-x}$ bərk məhlulların kristalları, metamaterial və ZnO/PMMA nanokompozit təbəqələri götürülüb. Tədqiqatın predmeti kimi tədqiq olunan halkogenid kristallarda, metamaterialda və nanokompozit təbəqədə baş verən faza effektləri öyrənilmişdir.

Tədqiqatın məqsəd və vəzifələri. Dissertasiya işinin məqsədi metamateriallarda, orta İQ diapazonda halkogenid kristallarda və ZnO/PMMA nanokompozit təbəqələrdə lazer şüalanmasının qeyri-xətti optik çevrilməsinin xüsusiyyətlərinin nəzəri tədqiqi, parametrlərin optimal qiymətlərini (qeyri-xətti mühitin uzunluğunu, faza dəyişilmələrini, əsas dalğanın və parametrik çevrilmə zamanı boşuna dalğanın intensivliklərini) almaq üçün çevrilmə effektivliyinin artırılması yollarının müəyyənləşdirilməsidir.

Məqsədə nail olmaq üçün sabit intensivlik yaxınlaşmasında (SİY) aşağıdakı məsələlərin həlli qarşıya qoyulmuşdur:

1. ZnO/PMMA nanokompozit təbəqələrdə ikinci və üçüncü harmonika generasiya zamanı qarşılıqlı təsirdə olan dalğaların faza dəyişikliklərini təhlil etmək. ZnO nanohissəciklərinin ölçüsü və konsentrasiyasının ZnO/PMMA nanokompozit təbəqələrinin kvadratik və kubik qeyri-xəttiliyinə təsiri nəzəri təhlil etmək. ZnO nanohissəciklərin müxtəlif konsentrasiyalı ZnO/PMMA təbəqələri üçün nəzəri və təcrübi nəticələrin müqayisəsini aparmaq.

2. Metamaterialda üçüncü harmonikanın generasiyası zamanı üç dalğalı qarşılıqlı təsirlərin effektlərini nəzəri tədqiq etmək. Metamateriallarda işıq dalğasının öz-özünə təsir effektini araşdırmaq və bircins kubik mühitlərdə baş verən anoloji effektin nəticələri ilə müqayisə etmək.

3. Metamateriallarda aşağı və yüksək tezlikli doldurma dalğalarında əks dalğaların parametrik qarşılıqlı təsirini sabit intensivlik yaxınlaşmasında öyrənmək.

4. Qarşılıqlı təsirdə olan bütün dalğalarının faza dəyişikliklərini nəzərə alaraq kvadratik qeyri-xətliliyə malik $Hg_{1-x}Cd_xGa_2S_4$ və GaS_xSe_{1-x} halkogenid kristallarda optik parametrik effektləri nəzəri tədqiq etmək. Çevrilmə effektivliyi üçün alınmış nəzəri nəticələrin təcrübədə alınmış nəticələrlə müqayisəsini aparmaq. Tezlik çevrilməsinin effektivliyinin artırılması üçün tövsiyələr vermək.

5. Aparılan mövcud eksperimentlərə nəzərən İQ diapazonun $AgGa_{x-1}In_xSe$ və $AgGa(S_{1-x}S_x)_2$ kristallarında lazer şüalanmasının ikinci harmonikasını nəzəri araşdırmaq. Çevrilmə effektivliyinin artırılması yollarını göstərmək.

Tədqiqat metodları. Dissertasiya işində nəzəri tədqiqat metodu olaraq sabit intensivlik yaxınlaşmasından istifadə olunmuşdur. Bu yaxınlaşmada qarşılıqlı təsirdə olan bütün dalğaların faza dəyişmələrini nəzərə alınmaqla qeyri-xətti proseslərə daha dəqiq baxmaq olar.

Müdafiyyə çıxarılan əsas müddəalar.

1. Güclü lazer şüalanmasının seçilmiş intensivliyi üçün ZnO/PMMA-nın koherent uzunluğu nəzəri yolla hesablanı bilər. ZnO nanozərrəciklərinin yüksək konsentrasiyalarında qeyri-xətti mühitin qarşılıqlı təsirinin böyük uzunluğu hesabına təbəqələr daha güclü ikinci və üçüncü harmonik signal yaradır, lakin digər tərəfdən effektiv kvadratik və kubik qeyri-xətti qavrayıcılıq azalır.

2. Qarşılıqlı təsirdə olan dalğaların faza dəyişikliklərinin nəzərə alınması çevrilmə effektivliyinin 0.91-dən 0.3-ə qədər azalmasına və metamaterialda üçüncü harmonika generasiyasında doldurma intensivliyindən asılı olaraq sinxronizm əyrisinin parametrlərinin dəyişməsinə gətirir.

3. Kubik qeyri-xətti metamaterialda dalğaların yayılması öz-özünə təsir effekti ilə müşayiət olunur. Dalğa ədədləri fərqi dəyişməsi ilə metamaterialda əsas şüalanmanın fazasında mütləq dəyişiklik adi kvadratik mühitdəkindən böyükdür.

4. Metamaterialda aşağı və yüksək tezlikli doldurma zamanı dalğaların parametrik qarşılıqlı təsiri qarşılıqlı təsirin optimal

qiymətlərində effektiv baş verir. Bu halda, güclü və boşuna dalğaların itkiləri hesabına əks siqnal dalğasının itkilərinin kompensasiyası həyata keçirilir.

5. Qeyri-xətti mühitin parametrlərinin optimal qiymətlərini seçərək uzunluğunu 0.3 sm, doldurma intensivliyini 4 MVt/sm^2 , faza fərqi 0.06 sm^{-1} və mühitdəki xətti itkilərin təsirini nəzərə alaraq $\text{AgGa}(\text{Se}_{0.8}\text{S}_{0.2})_2$ halkogenid kristalda ikinci harmonikanın çevrilmə effektivliyini 0.5-ə qədər artırmaq mümkündür və bucaq faza sinxronizm şərtinin yerinə yetirilməsi yaxud kristalların qeyri-kritik dərəcəsini artırmaq üçün müvafiq şərtləri seçmək mümkündür.

6. $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Ga}_2\text{S}_4$ və $\text{GaS}_x\text{Se}_{1-x}$ kristallarında doldurma intensivliyinin artımı, faza fərqi və itkilərin azalması ilə boşuna dalğanın parametrik gücləndirilməsi baş verir və bucaq faza sinxronizminin qeyri-kritik dərəcəsini artırmaq şərtlərini müəyyən etmək mümkündür.

7. Elektrokimyəvi çökdürmə üsulu ilə ZnO/PMMA nanokompozit nazik təbəqələrini almaq mümkündür.

Tədqiqatın elmi yeniliyi.

İşin elmi yeniliyi ondan ibarətdir ki, işdə SİY metodu daha da inkişaf olunub və bu yaxınlaşmada ilk dəfə olaraq aşağıdakı nəticələr alınıb:

1. SİY-da analitik olaraq göstərilmişdir ki, ZnO/PMMA nanokompozitlərdə effektiv kubik qeyri-xətlilik, ZnO nanohissəciklərinin konsentrasiyasının artması ilə azalır, digər tərəfdən qeyri-xətti qarşılıqlı təsirin böyük uzunluğu səbəbindən nanokristal güclü üçüncü harmonikanın dalğasını yaradır (bu nəticə "Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının 2015-ci il üçün mühüm elmi nəticələrə dair illik elmi hesabatı"na, 2016, üçüncü nəşrinə daxil edilmişdir). Analoji fikri ZnO/PMMA nanokompozitlərdə kvadratik qavrayıcılıq və güclü ikinci harmonika dalğasının yaranması haqqında da demək olar.

2. Metamateriallarda qarşılıqlı təsirdə olan bütün dalğaların faza dəyişiklikliyi nəzərə almaqla üçüncü harmonika generasiyası və öz-özünə təsir effektinin nəzəriyyəsi inkişaf etdirilmişdir.

3. Metamateriallarda üçüncü harmonika dalğasının intensivliyi məsələnin müxtəlif parametrlərində (metamaterialın gətirilmiş

uzunluğu, böyük və kiçik qiymətlərdə faza fərqi, doldurma dalğasının intensivliyi, metamaterialın tam uzunluğu) araşdırılmışdır.

4. Sıqnal dalğasının tezliyində mənfi sındırmaya malik olan metamateriallarda aşağı və yüksək tezlikli doldurmada üç dalğalı parametrik qarşılıqlı təsirdə faza effektləri öyrənilmişdir.

5. Orta İQ spektral diapazonda halkogenid kristallarda, qarşılıqlı təsirdə olan optik doldurma, sıqnal və boşuna dalğaların faza dəyişməsində parametrik qarşılıqlı təsir prosesinə baxılmışdır. $Hg_{1-x}Cd_xGa_2S_4$ və GaS_xSe_{1-x} kristallarının əsasında effektiv parametrik işıq generatorlarının hazırlanması üçün şərtlər müəyyən edilmişdir, burada Nd: YAG lazerlərindən doldurma mənbəyi kimi istifadə oluna bilməsi göstərilmişdir.

6. Spekrin orta İQ diapazonunda, halkogenidlərin bərk məhlullarının kristallarında ikinci harmonikanın generasiya (İHG) prosesi dalğaların qeyri-xətti qarşılıqlı təsiri rejimində təhlil edilmişdir. Tətbiq olunan analitik metodun, konkret bir təcrübədə qeyri-kritik faza sinxronizmi şərtləri üçün həm çevirici-kristalının, həm də şüalanma mənbəyinin optimal parametrlərini hesablamağa imkan verdiyi göstərilmişdir.

Tədqiqatın nəzəri və praktik əhəmiyyəti. Işın praktik əhəmiyyəti aşağıdakıdan ibarətdir:

- Tezliyin çeviricilərinin və ikiqat, üçqat tezliyin effektiv parametrik çeviricilərinin işlənilib hazırlanması üçün, çevirmənin konkret parametrləri verilmişdir (doldurma dalğasının intensivliyi, fazalar fərqi, çevirici kristalın uzunluğu, metamaterialanın tam uzunluğu və parametrik çevirmə halında boşuna dalğasının intensivliyi).

- ZnO/PMMA nanokompozit təbəqələrin öyrənilməsi üçün SİY-da "İkinci və üçüncü harmonikaların generasiya metodu" inkişaf etdirilmişdir.

- Faza sinxronizm bucağına qeyri-kritik rejimin şərtlərini təyin etmək üçün orta İQ diapazon $Hg_{1-x}Cd_xGa_2S_4$, GaS_xSe_{1-x} $AgGa_{x-1}In_xSe$ и $AgGa(Se_{1-x}S_x)_2$ kristallar ətraflı tədqiq edilmişdir.

İnkişaf etdirilmiş SİY üsulu qeyri-xətti optika məsələlərindən başqa radiofizikada, qeyri-xətti akustikada, interferometriyada və plazma fizikasında tətbiq oluna bilər.

İnkişaf etdirilmiş yaxınlaşmanın nəticələri, işıq dalğalarının qeyri-xətti dalğaların qarşılıqlı təsirlərinin təhlili çevrilmə prosesini optimallaşdırmağa imkan verir. Qeyri-xətti prosesin tezlik çevrilməsinin effektivliyini bilmək optik sistemin ən əlverişli iş parametrlərini və iş şərtlərini müəyyənləməyə, bununla da bu sistemin parametrlərini yaxşılaşdırmağa imkan verir.

Aprobasiyası və tətbiqi. Dissertasiya işinə daxil edilən tədqiqatların nəticələri aşağıda adları qeyd olunan Beynəlxalq və Respublika konfranslarında müzakirə olunmuş və materiallarında dərc olunmuşdur: Materials digest of the X International Scientific and Practical Conference “Trends of modern science 2014”, Sheffield, May30-7June, 2014; Workshop, Georgian Technical University, Tbilisi, 1-2 June 2015; Materials of 8th International Scientific Conference “Science and Society”, London, November, 2015; "Fizikanın aktual problemləri" VIII Respublika elmi konfransı, Bakı, 17 dekabr, 2015; Materials of the XI International Scientific and practical Conference “Conduct of modern science-2015” England,7 December, 2015; Materials digest of the IX International Conference "Science, Technology and Higher Education", Canada, December 23-24, 2015; “Opto, nanoelektronika, kondensə olunmuş mühit və yüksək enerjilər fizikası” Beynəlxalq konfransın materialları, Bakı, 25-26 dekabr, 2015; Eastern-European Scientific Journal, Dusseldorf, Ausgabe 5 2016;"Fizikanın aktual problemləri" IX Respublika elmi konfransı, Bakı, 22 dekabr, 2016; “XƏZƏRNEFTQAZYATAQ 2016” elmi-təcrübi konfransı, Bakı, 24-25 dekabr 2016, “Modern Trends in Physics” İnternational Conference, Bakı, 20-22 April 2017; "Fizika və asrtonomiya problemləri” beynəlxalq elmi konfransı. Bakı, 24-25 may, 2018.

Dissertasiya işinin materialları əsasında 11 məqalə və 11 tezis çap olunmuşdur. Onlardan 7 - si impakt faktorlu jurnallarda (3 məqalə, 1 konfrans materialı Clarivate Analytics (Web of Science) və 3 məqalə Scopus bazalarında indekslənen jurnallarda) dərc edilmişdir.

Dissertasiya işinin yerinə yetirildiyi təşkilatın adı. Dissertasiya işi Bakı Dövlət Universitetinin "Optika və molekulyar fizika" və "Fiziki elektronika" kafedralarında yerinə yetirilmişdir.

Dissertasiyanın struktur bölmələrinin ayrılıqda həcmi qeyd olunmaqla dissertasiyanın işarə ilə ümumi həcmi. Dissertasiya işi 192 səhifə çap olunmuş mətnədə təqdim olunur, giriş, dörd fəsil, nəticələr, praktik tövsiyələrdən, 64 şəkil və 10 cədvəl və 181 adda ədəbiyyatın siyahısından ibarətdir. Ədəbiyyatda 38 əsər rus dilində, 140 əsər ingilis dilində və 3 ədəbiyyat azərbaycan dilindədir. Dissertasiyanın həcmi (mətnədəki boşluqlar və şəkillər, cədvəllər, qrafiklər, əlavələr və ədəbiyyat siyahısı istisna edilməklə) - 210819 işarədir (giriş -23212, I fəsil -40843, II fəsil -38596, III fəsil -29281 , IV fəsil -76844, nəticə - 2043 işarə).

İŞİN MƏZMUNU

Girişdə mövzunun aktuallığı əsaslandırılır, işin məqsədi, elmi yeniliyi, müdafiə üçün təqdim olunan əsas elmi müddəalar göstərilir, praktiki əhəmiyyəti əsaslandırılır, dissertasiya fəsillərinin qısa xülasəsi ayrıca təsvir olunur.

Birinci fəsil ilk növbədə, tədqiqatçıların metamateriallarda, eləcə də qeyri-xətti halkogenid kristallarda qeyri-xətti optik təsirləri araşdırarkən qarşılaşdıqları müasir problemlərə həsr olunmuş yerli və xarici elmi ədəbiyyatın ətraflı təsviri verilmişdir. Həmçinin bu sahədə aparıcı tədqiqat mərkəzlərinin işlərinin nəticələri təhlil edilmişdir.

İkinci fəsil SİY-da nanokompozitlərdə və metamateriallarda qarşılıqlı təsirdə olan optik dalğaların ÜHG tədqiqatına həsr edilir. İstifadə olunan yaxınlaşma çərçivəsində nəzəri tədqiqatın nəticələri təqdim olunur, bunun köməyi ilə geniş istifadə olunan sabit amplitud yaxınlaşmasından (SAY) istifadə edərək əldə edilə bilməyən qeyri-xətti prosesin fiziki xüsusiyyətlərini daha dəqiq təsvir etmək mümkündür.

Doldurmanın ω_1 tezliyində dielektrik və maqnit nüfuzluqlarının mənfi qiymətinin və ω_3 harmonika tezliyində dielektrik və maqnit nüfuzluğunun müsbət qiymətinin baxılan halında, qısaldılmış tənliklər sistemini aşağıdakı sərhəd şərtləri daxilində araşdıraraq:

$$A_1(z = \ell) = A_{1\ell} \exp(i\varphi_{1\ell}), \quad A_3(z = 0) = 0, \quad (1)$$

burada $A_{1,3}$, uyğun olaraq $\omega_{1,3}$ tezliklərində doldurma və üçüncü harmonika dalğalarının kompleks amplitudları. Dalğaların z oxu boyunca yayıldığını hesab edək. $z = \ell$ metamaterialın sağ tərəfdən girişinə (z oxun mənfi istiqamətində) uyğundur, $\varphi_{1\ell}$ - qeyri-xətti mühitin girişindəki doldurma dalğasının başlanğıc fazası.

Qeyri-xətti mühitin çıxışında SİY-da harmonik dalğasının kompleks amplitudası üçün alırıq.

$$A_3(z) = i\gamma_3 A_{1\ell}^3 \frac{\sin \lambda' z}{\lambda' \cos \lambda' \ell - \frac{i\Delta}{2} \sin \lambda' \ell} e^{-\frac{i\Delta}{2}(z+\ell) + i3\varphi_{1\ell}} \quad (2)$$

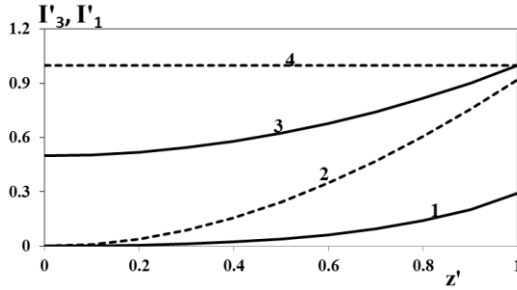
$$\lambda'^2 = \frac{\Delta^2}{4} - 3\Gamma^2 \quad \Gamma^2 = \gamma_1 \gamma_3 I_{1\ell}^2,$$

harada $\gamma_{1,3}$ – qeyri-xətti əlaqə əmsalları, $\Delta = k_3 - 3k_1$ - qarşılıqlı təsirdə olan dalğalar arasında fazalar fərqi, $k_{1,3}$ ($k_{1,3} > 0$) – müsbət z oxu boyunca yönəlmiş dalğa vektorlarının modullarıdır.

Metamaterialda (1) sərhəd şərti daxilində hesablanmış tezlik çevrilməsi üçün alınmış (2) analitik ifadə, birbaşa metamaterialın tam uzunluğundan asılıdır, belə ki, adi materialda tezlik çevrilməsi üçün alınmış analitik ifadədən fərqlənir.

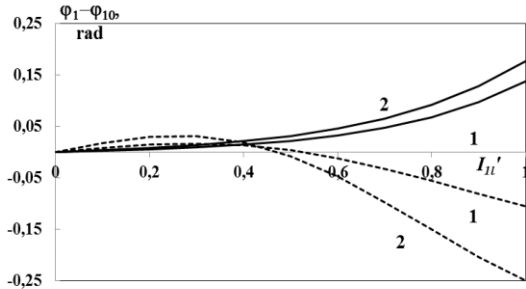
Harmonika dalğasının amplitudu üçün alınmış (2) ifadəsinə görə, amplituda həyəcanlanan harmonika dalğasının doldurma dalğasına əks təsirini nəzərə alan amildən asılıdır. Bundan əlavə, SAY-dan fərqli olaraq, harmonika dalğasının fazası doldurma dalğasının intensivliyindən asılıdır.

Alınmışdır ki, metamaterial güzgü rolunu oynayır, yəni həyəcanlanan harmonika dalğasının həyəcanlandıran doldurma dalğasına qarşı yönəldilmişdir. Şəkil 1-də SAY və SİY-da doldurmanın və üçüncü harmonikanın intensivliyinin ayrılmasının müqayisəsindən görünür ki, həyəcanlanan harmonika dalğasının əsas dalğaya əks reaksiyasını nəzərə alınması doldurma dalğasının gətirilmiş intensivliyinin 2 dəfə və harmonika dalğasının gətirilmiş intensivliyinin 3 dəfə azalmasına səbəb olur.



Şəkil 1. Metamaterialda SİY-da (1 və 3 əyriləri) və SAY-da (2, 4 qırıq xətti əyrilər) hesablanmış doldurma dalğasının (3 və 4 əyriləri) və üçüncü harmonikanın (1 və 2 əyriləri) gətirilmiş intensivliklərinin gətirilmiş uzunluğundan asılılığı.

Həmçinin bu fəsilə metamaterialda işıq dalğasının öz-özünə təsirinin effekti öyrənilir və şəkil 2-də adi kubik mühitdə baş verən analogi effektlə müqayisə aparılmışdır.



Şəkil 2. $\Gamma \ell = 1$ -də fazalar fərqlinin $\Delta = 0.5$ (bütöv və qırıq xətti 1 əyrisi) və 1 (bütöv və qırıq xətti 2 əyrisi) müxtəlif qiymətlərində metamaterialda (1 və 2 bütöv əyrilər) və adi mühitdə (1 və 2 qırıq xətti əyrilər) doldurma dalğasının faza dəyişməsinin əsas dalğanın intensivliyindən asılılığı.

Daha sonra ZnO/PMMA nanokompozit təbəqədə ÜHG prosesinə baxılır. ÜHG hər hansı bir materialda baş verdiyinə görə, alt qatın və hər təbəqə üçün analitik hesablama aparılmışdır. Strukturda laydan laya qeyri-xətti qarşılıqlı təsirin ardıcıl

hesablamaları SAY-da işində¹ aparıldığı kimi biz tərəfdən SİY-da aparılıb. Təbəqə+alt və qat layda üçüncü harmonikanın kompleks amplitudası üçün iki ifadə alınmışdır.

Alınan ifadələr əsasında, nanokompozit strukturunun çıxışında üçüncü harmonika dalğasına tezliyin çevrilməsinin effektivliyi ($\eta_3(\ell_2) = I_3(\ell_2)/I_{10}$) üçün müəyyən edilmişdir:

$$\eta_3(\ell_2) = (t_{sa}^{3\omega})^2 (t_{fs}^{3\omega})^2 \eta_3(\ell_1) \left[\left(\cos \lambda_2 \ell_2 + c_1 \frac{\sin \lambda_2 \ell_2}{\lambda_2} \right)^2 + b^2 \frac{\sin^2 \lambda_2 \ell_2}{\lambda_2^2} \right] \exp(-2\delta_3 \ell_2), \quad (3),$$

harada

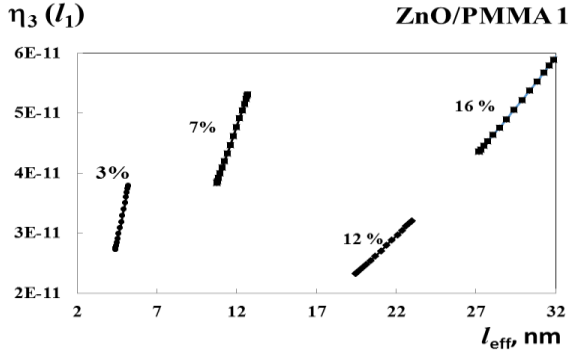
$$c_1 = \frac{\gamma_3^{sut}}{\gamma_3^f} \lambda_1 ctg \lambda_1 \ell_1, \quad b = \left(\frac{\gamma_3^{sut}}{\gamma_3^f} \Delta_f - \Delta_{sub} \right) / 2$$

γ_j^f -dalğaların qeyri-xətti əlaqə əmsalı, δ_j^f - ZnO/PMMA təbəqə üçün uyğun tezliklərdə mühitin udulma əmsalı ($j=1,3$), $t_{fs,sa}^{3\omega}$ - üçüncü harmonika dəstəsi üçün nazik təbəqə-altqat və altqat – hava sərhəddi üçün Frenel buraxma əmsalı, $\eta_3(\ell_1) = I_3(\ell_1)/I_{10}$ -dalğa birinci təbəqədən keçəndə siqnal dalğasının üçüncü harmonikaya çevrilmə effektivliyi.

Çevrilmə effektivliyi üçün alınmış düstura əsasən (3) ZnO/PMMA strukturlarında üçüncü harmonikaya tezlik çevrilməsinin dinamik prosesi göstərilmişdir.

Alınmışdır ki, ZnO -un yüksək konsentrasiyalarında, qeyri-xətti mühitin qarşılıqlı təsirinin böyük uzunluğu hesabına təbəqələr daha güclü üçüncü harmonik siqnal yaradır (şəkil 3).

¹Tagiev, Z. H., Kasumova, R.J. Safarova, G.A. Third-harmonic generation in regular domain structures // Journal of Russian Laser Research, – 2010. 31 №4, – p.319-331.



Şəkil 3. Doldurmanın $20\text{GVt}/\text{sm}^2$ intensivliyində və $\delta_3=3\delta_1=0.06\cdot 10^4\text{sm}^{-1}$ (1 və 3 ayrıları), $0.076\cdot 10^4\text{sm}^{-1}$ (2 və 4 ayrıları), $0.13\cdot 10^4\text{sm}^{-1}$ (5 və 6 ayrıları) doldurma dalğasının üçüncü harmonika dalğasına çevrilmə effektivliyinin effektiv uzunluqdan asılılığı.

Üçüncü fəsil metamateriallarda yaranan qeyri-xətti polyarlaşma hesabına optik dalğaların qeyri-xətti parametrik qarşılıqlı təsiri proseslərinə həsr olunmuşdur, nəticədə qeyri-xətti mühitin parametrləri dəyişir.

Baxılan fəsildə, aşağı tezlikli və yüksək tezlikli doldurmalarda faza effektlərini nəzərə almaqla metamaterialın kvadratik mühitindəki dalğaların parametrik qarşılıqlı təsiri öyrənilir, burada doldurma və boşuna dalğaların tezlikləri sındırma əmsalı müsbət olan sahədə, siqnal dalğası isə mənfi olan sahəsində yerləşirlər.

Baxılan dalğaların bu həndəsəsinə uyğun olan sərhəd şərtləri aşağıdakı şəkildə göstərilə bilər:

$$A_{2,3}(z=0) = A_{20,30} \exp(i\varphi_{20,30}), A_1(z=\ell) = A_{1\ell} \exp(i\varphi_{1\ell}). \quad (4)$$

Burada $z=0$ metamaterialın soldan girişinə uyğundur, $A_{20,30}, \varphi_{20,30}$ - soldan qeyri-xətti mühitə daxil olan doldurma və boşuna dalğaların başlanğıc amplitudları və fazalarıdır, $A_{1\ell}, \varphi_{1\ell}$ - sağdan qeyri-xətti mühitə daxil olan siqnal dalğasının amplitud və fazasıdır ($z=\ell$). (4) sərhəd şərtlərini nəzərə alaraq aşağı və yükək tezlikli doldurmada əks dalğanın kompleks amplitudları üçün ifadələr alır. Daha sonra

aşağı və yükək tezlikli doldurma zamanı metamaterialda gücləndirmə prosesinin dinamikasını və çevrilmə effektivliyini təyin edən iki vacib parametrlər nəzərə alınır.

Aşağı tezlikli doldurma halında siqnal dalğasının tezlik çevrilməsinin effektivliyi aşağıdakı düstürlə təsvir olunur:

$$\eta_1(z=0) = \frac{\Gamma_3^2 \sin^2 \lambda \ell}{\lambda^2 \cos^2 \lambda \ell + \frac{\Delta^2}{4} \sin^2 \lambda \ell}, \quad (5)$$

harada $\lambda = \sqrt{\frac{\Delta^2}{4} - \Gamma_3^2 - \Gamma_2^2}$, yükək doldurma halında isə

$$\eta_1 = \frac{\Gamma_3^2 \sin^2 \lambda \ell}{\left(\frac{\Delta}{2}\right)^2 \sin^2 \lambda \ell + \lambda^2 \cos^2 \lambda \ell}, \quad (6)$$

harada $\lambda = \sqrt{\frac{\Delta^2}{4} + \Gamma_3^2 - \Gamma_2^2}$, $\Gamma_3^2 = \gamma_1 \gamma_2 I_{30}$, $\Gamma_2^2 = \gamma_1 \gamma_3 I_{20}$, $I_j = A_j \cdot A_j^*$.

Aşağı tezlikli doldurma halında siqnal dalğasının gücləndirmə əmsalı

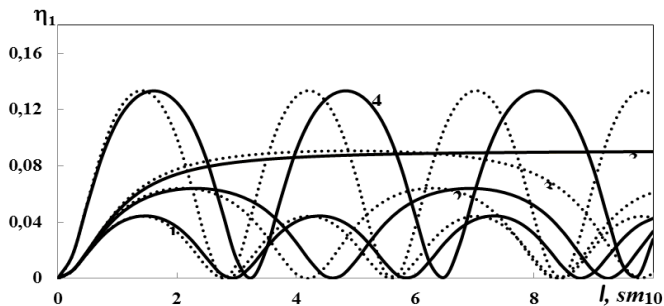
$$\eta_{yc} = \frac{1}{\cos^2 \lambda \ell + \left(\frac{\Delta}{2\lambda}\right)^2 \sin^2 \lambda \ell}, \quad (7)$$

ifadə ilə müəyyən edilir. YT doldurma zamanı siqnal dalğasının gücləndirmə əmsalı isə

$$\eta_{yc} = \left| \frac{\sin \lambda z + ib \cos \lambda z}{\sin \lambda \ell + ib \cos \lambda \ell} \right|^2, \quad (8)$$

ifadə ilə müəyyən edilir, burada $b = \frac{2\lambda}{\Delta}$.

Aşağı tezlikli doldurma zamanı metamaterialda gücləndirmə əmsalı və çevrilmə effektivliyi üçün analitik ifadələr əsasında qarşılıqlı təsir prosesinin dinamikasını təyin edən asılılıqların qrafikləri qurulub.

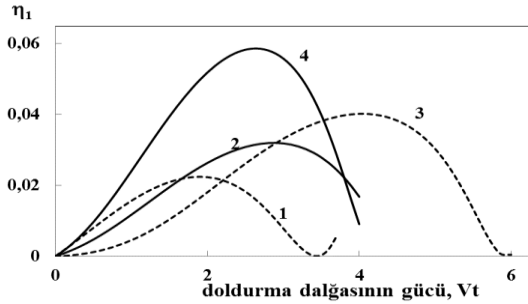


Şəkil 4. SIY-da alınmış siqnal dalğasına çevirmə effektivliyinin metamaterialın tam uzunluğundan ℓ asılılığı, $I_{1\ell}=0$ üçün $\Gamma_3=1\text{sm}^{-1}$, $\Delta=3\text{sm}^{-1}$ (1 və 4 bütöv əyrilər), 2.5sm^{-1} (2 bütöv əyri) və 2.097688sm^{-1} (3 bütöv əyri), $I_{20}/I_{30}=0.1$ (1-3 bütöv əyrilər) və 0.3 (4 bütöv əyri). Burada SAY-da alınmış uyğun nəticələr göstərilib (nöqtəvi əyrilər).

Şəkil 4-dən görünür ki, fazalar fərqlərinin hər bir qiyməti üçün çevirmə effektivliyi maksimum olan metamaterialın tam uzunluğunun optimal qiyməti mövcuddur. Bu halda metamaterialın tam uzunluğunun optimal qiyməti, qeyri-xətti mühitin koherent tam uzunluğunun rolunu oynayır. Fazalar fərqlərinin artmasıyla ossilyasiyanın amplitudası azalır, tezliyi isə artır (1 və 2 əyrilərini müqayisə etmək).

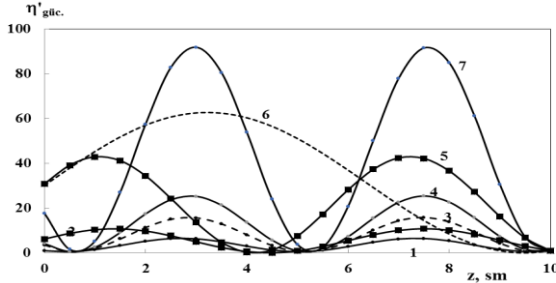
Siqnal dalğasının giriş intensivliyinin iki müxtəlif qiymətləri üçün $I_{20}/I_{30}=0.1$ və 0.2 siqnal dalğasına çevirmə effektivliyi üçün nəticələr şəkil 5 təsvir olunur.

Asılılıqların davranışından gözləniləndiyi kimi siqnal dalğasının intensivliyinin $I_{1\ell}$ giriş qiymətinin 2 dəfə artması ilə soldan metamaterialdan çıxışda $I_1(z=0)$ gücləndirmə əmsalı 2 dəfə artır, bu halda doldurma gücünün optimal qiyməti 2.85Vt təşkil edir. Beləliklə, girişdə əks dalğanın daha yüksək səviyyədə seçilməsi metamaterialdan çıxışda daha intensiv siqnal dalğasını həyata keçirtmək olar.



Şəkil 5. Siqnal dalğasına çevrilmə effektivliyinin doldurma gücündən asılılığı. $I_{1\ell} = 0$ üçün və $I_{20}/I_{30} = 0.1$ (1-3 əyriləri) və 0.2 (4 əyrisi) və $\Delta = 5 \text{ sm}^{-1}$ (3 əyrisi), 5.5 sm^{-1} (2 və 4 əyriləri) 6 sm^{-1} (3 əyrisi).

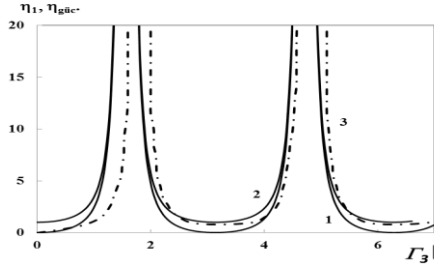
Metamaterialın girişində hər üç dalğa mövcud olduğu halda (şək.6), gücləndirmə əmsalı üçün ifadənin təhlili nəticəsində alınır ki, siqnal dalğasının gücləndirmə əmsalının artması metamaterialın girişində boşuna və siqnal dalğalarının intensivliklərinin səviyyələrinin nisbətindən asılıdır. Bu nisbət nə qədər böyük olarsa siqnal dalğasının gücləndirmə əmsalı bir o qədər böyükdür, məsələn 2 və 7 əyriləri, harada boşuna dalğanın siqnal dalğasına olan intensivlik səviyyəsi 5 dəfədə fərqlənir.



Şəkil 6. Gücləndirmə əmsalının metamaterialın uzunluğundan asılılığı: $\Gamma_3 = 1 \text{ sm}^{-1}$ üçün $\ell = 10 \text{ sm}$, $\Delta = 2.5 \text{ sm}^{-1}$, $I_{20}/I_{30} = 0.1$ (1, 3, 4 və 6 əyriləri), 0.3 (2 və 5 əyriləri) və 0.5 (7 əyrisi), $I_{20}/I_{1\ell} = 1$ (1 əyrisi), 5 (3 əyrisi), 10 (2 və 4 əyriləri), 50 (5, 6 və 7 əyriləri)

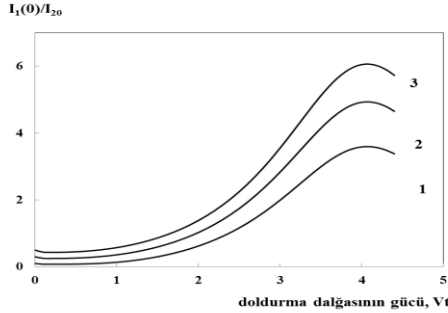
Beləliklə, SİY-də işdə alınmış analitik ifadələrə görə, hər bir konkret eksperiment şərtləri üçün aşağı tezlikli doldurma halında metamaterialda çevrilmə effektivliyi və gücləndirmə əmsalı üçün gözlənilən qiymətləri hesablamaq olar.

Aşağı tezlikli halında metamaterialın tam gətirilmiş uzunluğunun optimal qiymətini seçərkən siqnal dalğasına çevrilmə effektivliyinin və siqnal dalğasının gücləndirmə əmsalının sonsuz böyük qiymətləri müşahidə olunur (şəx.7).



Şəkil 7. Siqnal dalğasına çevrilmə effektivliyinin (1 əyrisi) və gücləndirmə əmsalının (2 və 3 əyriləri) metamaterialın tam gətirilmiş uzunluğundan asılılığı ($\Delta = 0$, $I_{1\ell} / I_{20} = 0.1$). Burada 1 və 2 əyriləri SİY-da, 3 əyrisi SAY-da hesablanmışdır.

Siqnal dalğasının giriş intensivliyinin üç müxtəlif səviyyəsi $I_{1\ell} / I_{20} = 0.1; 0.3; 0.5$ üçün siqnal dalğasına çevrilmə effektivliyi üçün nəticələr 8 şəkildə təqdim olunur. Asılılıqların davranışından görüldüyü kimi, giriş (metamaterialın sağ tərəfində) siqnal dalğasının intensivliyinin qiymətinin 5 dəfə artması ilə, metamaterialın sol tərəfindəki çıxışda gücləndirmə əmsalı təxminən 2 dəfə artır (bu halda doldurma gücünün optimal qiyməti $4.205 Vt$ təşkil edir). Beləliklə, daha böyük əks (siqnal) dalğasının giriş qiymətini seçməklə, metamaterialın çıxışında güclü əks dalğa siqnalını almaq olar.



Şəkil 8. Metamaterialın tam uzunluğu üçün doldurma dalğasının gücündən siqnal dalğasına çevrilmənin effektivliyinin asılılığı $\ell=2$ sm, $\Delta\ell/2=2.6$ -da $I_{1\ell}/I_{20}=0.1$ (əyri 1), 0.3 (əyri 2) və 0.5 (əyri 3).

Dördüncü fəsil nəzəri yolla SİY-da nanokompozit və halkogenid kristallarda infraqırmızı diapazonda İHG və elektromaqnit dalğalarının parametrik qarşılıqlı təsirinə xüsusiyyətləri tədqiq edilib.

Bu fəsildə $\text{GaS}_x\text{Se}_{1-x}$, $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Ga}_2\text{S}_4$, $\text{AgGa}(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_2$, $\text{AgGa}_x\text{In}_{1-x}\text{Se}_2$ kristallarda faza effektləri araşdırılıb. Bu birləşmələrdə, bir elementin tərkibindəki artım və digərinin tərkibindəki azalma səbəbindən, şüalanən dalğanın seçilmiş uzunluğunda faza sinxronizmi kritik olmayan kristalların işlənilməsi nəzəri olaraq göstərilmişdir.

Qeyri-xətti çevrilmə üçün, $\text{GaS}_x\text{Se}_{1-x}$ mənfi bir oxlu kristallarda dalğaların qarşılıqlı təsirinə nəzəri təhlili qısaldılmış tənliklər sistemindən istifadə edərək SİY-da həyata keçirilir²

²Тагиев, З.А., Касумова, Р.Дж., Салманова, Р.А. Теория вырожденного четырёхволнового взаимодействия в приближении заданной интенсивности // – Санкт-Петербург: Оптика и спектроскопия, – 1999, 87, №1, – с. 94-97.

$$\begin{aligned}
\frac{dA_s}{dz} + \delta_s A_s + \frac{\gamma_n}{2} I^{n-1} A_s &= -i\gamma_s A_p A_i^* \exp(i\Delta z), \\
\frac{dA_i}{dz} + \delta_i A_i + \frac{\gamma_n}{2} I^{n-1} A_i &= -i\gamma_i A_p A_s^* \exp(i\Delta z), \\
\frac{dA_p}{dz} + \delta_p A_p + \frac{\gamma_n}{2} I^{n-1} A_p &= -i\gamma_p A_s A_i \exp(-i\Delta z).
\end{aligned} \tag{9}$$

Burada $A_{s,i,p}$ - z oxu istiqamətində uyğun tezliklərdə siqnal, boşuna və doldurma dalğalarının kompleks amplitudları. j -dalğa ($j=s,i,p$) üçün qeyri-xətti əmsallar və itki parametrləri uyğun olaraq γ_j və δ_j kimi işarə olunublar, $\gamma_n - n$ foton udulmasının sabitidir.

Fərz olunur ki, kristal xətti və iki fotonlu udulmaya ($n=2$) malikdir. Qarşılıqlı təsirdə olan dalğalar arasındakı fazalar fərqi isə $\Delta = k_p - k_s - k_i$ şəklində verilir.

Məsələ ümumi halda, $\omega_{p,i,s}$ tezlikdə olan hər üç dalğa girişdə olduqda yerinə yetirilir, buna görə sərhəd şərtləri belə olur:

$$A_{p,i,s}(z=0) = A_{p0,i0,s0} \exp(i\varphi_{p0,i0,s0}) \tag{10}$$

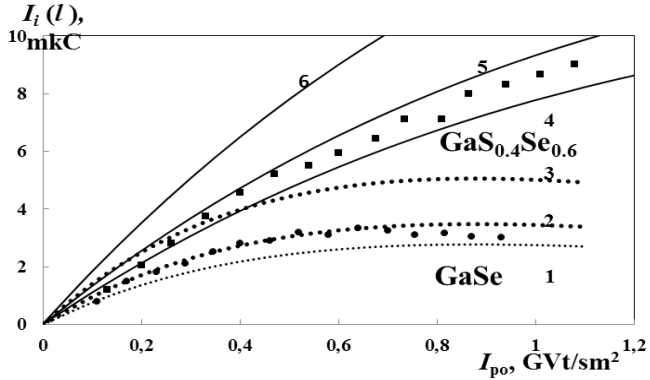
Harada $\varphi_{p0,i0,s0}$ -mühitə girişdə doldurma dalğasının, boşuna və siqnal dalğalarının başlanğıc fazaları, $z=0$ kristalın girişinə uyğundur.

SİY-dan istifadə edərək (10) sərhəd şərtlərindən istifadə edərək boşuna dalğanın A_i kompleks amplitudu üçün (9) tənliklər sistemini həll edərək kristalın çıxışında faydasız dalğanın intensivliyi $I_i(\ell_1) = A_i(\ell_1) \cdot A_i^*(\ell_1)$ üçün aşağıdakı ifadəni alırıq

$$I_i(\ell_1) = I_{i0} \exp(-2\delta_i \ell_1) \left[\cosh^2 q \ell_1 + \left(\frac{\Delta}{2} + \frac{\gamma_i A_{s0}^* A_{p0}}{A_{i0}} \right)^2 \frac{\sinh^2 q \ell_1}{q^2} \right], \tag{11}$$

$$\text{harada } q^2 = \Gamma_p^2 - \Gamma_s^2 - \frac{\Delta^2}{4}, \quad \Gamma_s^2 = \gamma_i \gamma_p I_{s0}, \quad \Gamma_p^2 = \gamma_s \gamma_i I_{p0}.$$

Əsas dalğanın ikinci harmonika dalğasına çevrilmə effektivliyi və gücləndirmə əmsalları üçün əldə etdiyimiz analitik ifadələrə görə, proseslərin dinamikası qurulmuş asılılıqlar əsasında öyrənilir.



Şəkil 9. SİY-da $\text{GaS}_{0.4}\text{Se}_{0.6}$ (4-6 əyriləri) və GaSe (1-3 əyriləri) kristallarında boşuna dalğanın intensivliyinin $I_i(\ell)$ doldurmanın gətirilmiş intensivliyindən I_{p0} asılılığı, fazalar fərqi və $I_{so} / I_{p0} = 4.5 \cdot 10^{-8}$ qiymətində $I_{io} = 1 \text{ mK}$ (1 və 4 əyriləri), 2 mK (2 və 5 əyriləri) və 5 mK (3 və 6 əyriləri). $\text{GaS}_{0.4}\text{Se}_{0.6}$ kristalın uzunluğu $\ell = 0,47 \text{ sm}^3$ üçün $\delta_i = 0.07 \text{ sm}^{-1}$ və $\gamma_n = 0.415 \text{ sm/GVt}$ GaSe kristalın $\ell = 0.39 \text{ sm}^3$ uzunluğu üçün $\delta_i = 0.29 \text{ sm}^{-1}$ və $\gamma_n = 1.46 \text{ sm/GVt}$.

Şəkil 9-un əyrilərindən görüldüyü kimi, məsələnin parametrinin müəyyən qiymətlərində GaSSe kristalında GaSe -nə nəzərən boşuna dalğanın daha güclü siqnalını əldə etmək olar. Burada eksperimental nöqtələr də göstərilir (kvadratlar- GaSSe və nöqtələr- GaSe)³.

Aşağıda cədvəl 1-də boşuna dalğada işığın parametrik generasiyası halında $\text{Hg}_{0.7}\text{Cd}_{0.3}\text{Ga}_2\text{S}_4$ kristal üçün sinxronizm bucağının və bucaq dispersiya əmsalının ikinci tərtibinin hesablanmış qiymətləri göstərilir.

³ Miyata, K., Picosecond mid-IR optical parametric amplifier based on the wide-bandgap $\text{GaS}_{0.4}\text{Se}_{0.6}$ pumped by a Nd:YAG laser system at 1064 nm / K.Miyata, G.Marchev, A.Tyazhev [et al.] // Optics Letters, – 2011, 36, – p. 1785-1787

Cədvəl 1.

**Boşuna dalğada işığın parametrik generasiyası halı üçün
Hg_{0.7}Cd_{0.3}Ga₂S₄ kristala görə verilənlər**

Kristal	λ , mkm	n_o^ω	n_e^ω	Sinx roni zmi n növü	d_{eff} , m/V	θ_s , dərəcə	Bucaq dispersiyası əmsalının ikinci tərtibi, sm^{-1} bucaq.d əq. ⁻¹
Hg _{0.7} Cd _{0.3} Ga ₂ S ₄	1.064 doldurma	2.430288	2.39899	e→ oo	24.94	90	0.0000634955
	1.5772 signal	2.405065	2.367763				
	3.27 boşuna	2.386262	2.35255				

Bundan sonra perspektiv AgGa(Se_{1-x}S_x)₂ və AgGa_xIn_{1-x}Se₂ kristallarda İHG effektinə baxılıb.

Məsələ ω_1 tezliyində A_1 kompleks amplitudlu doldurmanın və ω_2 tezliyində A_2 kompleks amplitudlu ikinci harmonika müstəvi dalğalar halı üçün həll olunur. Mühitdə harmonikanın generasiyasının təhlilini məlum qısaldılmış tənliklərlə yazmaq olar (oo-e qarşılıqlı təsir)⁴

$$\frac{dA_1}{dz} + \delta_1 A_1 = -i \frac{8\pi^2 d_{1eff}}{\lambda_1 n(\omega_1)} A_2 A_1^* \exp(-i\Delta z),$$

$$\frac{dA_2}{dz} + \delta_2 A_2 = -i \frac{4\pi^2 d_{2eff}}{\lambda_2 n(\omega_2)} A_1^2 \exp(i\Delta z)$$
(12)

⁴Дмитриев, В.Г. Прикладная нелинейная оптика: Генераторы второй гармоники и параметрические генераторы света / В.Г.Дмитриев, Л.В.Тарасов. – Москва: Физматлит, – 2004, – 512 с.

burada $\delta_{1,2}$ - udulma əmsalları, $d_{1,2,eff}$ - oo→e skalyar sinxronizm halı üçün effektiv qeyri-xətti əmsallar, $\lambda_{1,2}$ – dalğa uzunluqları, $n(\omega_{1,2})$ - kristalın sındırma əmsalları, $\Delta = k_2 - 2k_1$ - faza fərqi, k_1, k_2 – uyğun olaraq $\omega_{1,2}$ tezliklərində dalğa vektorlar ədədləridir.

Tədqiqat aşağıdakı sərhəd şərtlərini nəzərdə tutur

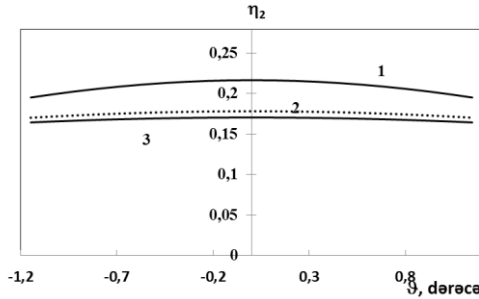
$$A_1(z=0) = A_{10} \exp(i\varphi_{10}), \quad A_2(z=0) = 0, \quad (13)$$

harada $z = 0$ kristalın girişinə uyğundur, φ_{10} isə mühitin girişində doldurma dalğasının başlanğıc fazasıdır.

Harmonika amplituduna görə ikinci tənliyi differensiallayaraq və SİY-dan istifadə edərək (12) qısaldılmış tənliklər sistemini həll edirik. Nəticədə kristalın çıxışında ($z = \ell$) ikinci harmonikaya çevrilmənin effektivliyi üçün aşağıdakı ifadəni alırıq⁵

$$\eta_2(\ell) = I_2(\ell)/I_{10} = \gamma_2^2 I_{10} \ell^2 \text{sinc}^2 \lambda \ell \exp[-(\delta_2 + 2\delta_1)\ell], \quad (14)$$

harada $\lambda^2 = 2\Gamma^2 - (\delta_2 - 2\delta_1 + i\Delta)^2/4$, $\Gamma^2 = \gamma_1\gamma_2 I_{10}$, $\text{sinc } x = \sin x/x$ burada γ_1, γ_2 -ikinci tərtib dalğaların qeyri-xətti əlaqə əmsalları.

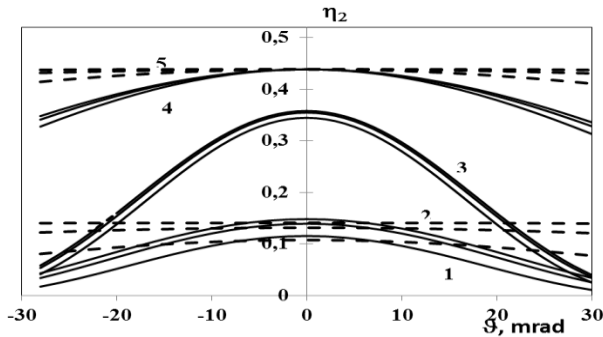


Şəkil 10. AgGa(Se_{1-x}S_x)₂ kristalında ikinci harmonikanın çevrilmə effektivliyinin ($\lambda=9.55$ mkm) fazalar fərqindən asılılığı: $\delta_{1,2}=0.1 \text{ sm}^{-1}$, $I_{10}= 1.5 \text{ mVt/sm}^2$ kristalın uzunluğu üçün $l=0.2 \text{ sm}$ $x=0$ (3 əyrisi), 0,2 (2 əyrisi) və 1 (1 əyrisi).

⁵ Tagiev, Z.H., Constant-intensity approximation in a nonlinear wave theory / Z.H.Tagiev, R.J.Kasumova, R.A.Salmanova [et al.] // Journal of Optics B: Quantum and Semiclass, – 2001.3, – p. 84-87.

Şəkil 10-da 1-3 əyrilərindən görünür ki, x parametri artdıqca asılılıq daha hamar olur. Bu fakt təsdiq edir ki, faza sinxronizm şərtinin yerinə yetirilməsinə kristalın kritik olmaması rejimi kükürd konsentrasiyasının artması ilə daha yaxşı yerinə yetirilir. Lakin bu zaman baxılan strukturun qeyri-xətti qavrayıcılığı azalır. Bu perspektivli $\text{AgGa}_{(Se_{1-x}S_x)_2}$ -in qeyri-xətti kristalların sonrakı eksperimental tədqiqatları kükürdün müxtəlif konsentrasiyaları üçün qeyri-xətti qavrayıcılıq tenzorunun komponentlərini müəyyən etməyə imkan verəcək. Bu, öz növbəsində, bu perspektivli birləşmədə optimal nisbi kükürd tərkibini SİY-da analitik hesablamağa və lazer cihazlarının istehsalçılarına tövsiyələr verməyə imkan verəcəkdir.

Şəkil 11-də, $\text{AgGa}_x\text{In}_{1-x}\text{Se}_2$ kristalda indiumun üç fərqli



Şəkil 11. $\text{AgGa}_x\text{In}_{1-x}\text{Se}_2$ kristalında ikinci harmonikanın çevrilmə effektivliyinin fazalar fərqiindən asılılığı: $I_{10} = 0.6 \text{ MVt/sm}^2$, $x=0.7$ (1 və 4 əyrilər qrupu), 0.6 (2 və 5 əyrilər qrupu), 1 (3 əyrilər qrupu). Qrupların hər birində yuxarıdakı əyri 9.64 mkm, ortadakı – 9.55 mkm, aşağıdakı əyri isə 9.31 mkm bərabər olan dalğa uzunluğuna uyğundur. Kristalın uzunluğu⁶ $l = 1.05 \text{ sm}$, (1 və 2 əyrilər qrupu), 0.8 sm (3 əyrisi) və 0.65 sm (4 və 5 əyrilər qrupu). AgGaSe_2 kristalı üçün $\delta_1 = 0.09 \text{ sm}^{-1}$, $\delta_2 = 0.15 \text{ sm}^{-1}$ və $\text{AgGa}_x\text{In}_{1-x}\text{Se}_2$ $\delta_1 = 0.06 \text{ sm}^{-1}$, $\delta_2 = 0.08 \text{ sm}^{-1}$

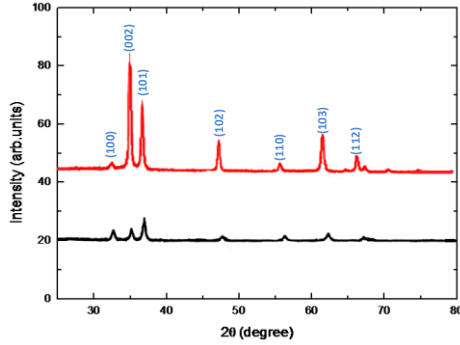
⁶ Андреев, Ю.М., Удвоение частоты CO_2 -лазеров в новом нелинейном кристалле $\text{AgGa}_x\text{In}_{1-x}\text{Se}_2$ / Ю.М.Андреев, И.С.Батулин, П.П.Гейко [и др.] // Квантовая электроника, – Москва: – 1999. 29, №1, –с. 66-70.

konsentrasiyası: 0, 0.3 və 0.4 halında tezlik çevrilmə prosesinin SİY təhlilinin nəticələri göstərilir. CO₂ lazerin doldurma dalğa uzunluğunun üç variantı: 9.31 mkm, 9.55 mkm и 9.64 mkm baxılıb.

3, 4 və 5 əyriilər qrupunun müqayisəsindən görünür ki, indium konsentrasiyası 1-dən 0.6-ya qədər artdıqda asılılıq hamarlaşır və getdikçə daha yastı olur. Bu, faza sinxronizm rejiminin yerinə yetirilməsində kristalın qeyri-kritiklik rejiminə keçidi göstərir. Məsələn, AgGaSe₂ kristalında - 0.6 mrad-dan + 0.6 mrad-a qədər olan bucaq aralığında çevrilmə effektivliyi 0.036% dəyişir. Kristalda Ga-nın bir hissəsi indiumun $x = 0.7$ -ə qədər dəyişdirilməsi (AgGa_{0.7}In_{0.3}Se₂) effektivliyin analoji dəyişməsinə gətirib çıxarır, lakin artıq bucaq aralığında 1.67 dəfə böyükdür (- 1 mrad-dan + 1 mrad-a). Sonra kristala $x = 0.6$ (AgGa_{0.6}In_{0.4}Se₂) -ə qədər indium yeridilməsi, AgGaSe₂ kristalı ilə müqayisədə bucaq aralığı 33 dəfə artır (- 20 mrad + 20 mrad). Beləliklə, AgGa_{0.6}In_{0.4}Se₂ kristallarında faza sinxronizm şərtinin qeyri-kritikliyi AgGa_{0.7}In_{0.3}Se₂ ilə müqayisədə daha böyük bir bucaq aralığında, nəyinki AgGaSe₂-də yerinə yetirilir. Bu məsələ eksperimental olaraq araşdırılmışdır⁶, lakin AgGa_xIn_{1-x}Se₂ kristalının eksperimental nümunəsinin uzunluğu 1.05 sm-ə bərabərdir. Bizim halda, bu 1 ($x = 0.7$) və 2 ($x = 0.6$) əyriilər qrupuna uyğundur. 1 və 4 əyriilər qrupunun və 2 və 5 qrupların müqayisəsində görünür ki, kristal-çeviricinin optimal uzunluğunda çevrilmə effektivliyini 0.15-dən 0.45-ə qədər 3 dəfə artırmaq olar.

Bu fəsildə halkogenid kristallarda qeyri-xətti proseslərdən əlavə olaraq, ZnO/PMMA nanokompozit təbəqələrdə İHG da baxılır. ZnO nanokristalları PMMA təbəqələrinin səthində elektrokimyəvi çökdürülmə üsulu ilə əldə edilmişdir.

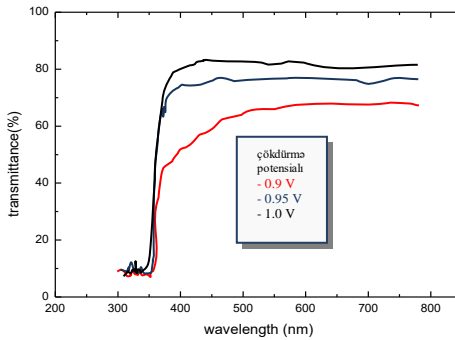
Təbəqələrin səthinin morfologiyasının öyrənilməsi skanedici elektron mikroskopun köməyi ilə aparılmışdır. Bundan başqa, rentgen-struktur analizi aparılmış və onun nəticələri şəkil 12-də göstərilmişdir.



Şəkil 12. ZnO təbəqənin rentgen struktur görünüşü

Difraktogramda -1.0 V-də çökdürülmüş təbəqələr təsvir edilmişdir. Şəkilə görə təbəqələr heksoqanal fazaya malik olan və (002) müstəvidə güclü pikə malik olan polikristallardır.

Şəkil 13-də, müxtəlif katod potensiallarda çökdürülmüş ZnO təbəqələrinin buraxma spektrləri göstərilib. -1.0 V-da çökdürülmüş təbəqə üçün optik buraxma əmsalı $\sim 85\%$ təşkil edir. Təbəqənin qadağan olunmuş zonasının eni 3.3 eV.



Şəkil 13. Optik buraxma spektrləri

Həmçinin ZnO üçün sındırma əmsalının hesablanması müxtəlif üsulları göstərilib. Koşi udulmanın empirik modeli⁷ analizində istifadə olunmuşdur

⁷Tompkins, H. G. Spectroscopic Ellipsometry and Reflectometry and / H.G.Tompkins, W.A.McGahan, – New York: John Wiley & Sons, – 1999. – p. 93.

$$n(\lambda) = A + B/\lambda^2 + C/\lambda^4$$

ZnO/PMMA2 üçün (cədvəl 2)

Cədvəl 2.

ZnO/PMMA2 üçün Koşi metodu ilə hesablanmış sındırma əmsalları

λ , nm	A	B, nm ²	C, nm ⁴	$n_{\omega,2\omega}$
1064	1.9960	-0.024	0.01	1.9960
532	1.9960	-0.024	0.01	1.9960

ZnO/PMMA1 üçün (cədvəl 3).

Cədvəl 3.

ZnO/PMMA1 üçün Koşi metodu ilə hesablanmış sındırma əmsalları

λ , nm	A	B, nm ²	C, nm ⁴	$n_{\omega,2\omega}$
1064	1.984	-0.023	0.011	1.984
532	1.984	-0.023	0.011	1.984

Nəzəri olaraq əldə edilmiş nəticələrə görə analoji həcmli materiallardan fərqli olaraq ZnO konsentrasiyasının artması ilə kvadratik qavrayıcılığın azalması aşkar edilmişdir. ZnO/PMMA təbəqələri optik dalğaların qarşılıqlı təsirinin böyük uzunluğuna görə ikinci harmonikanın güclü siqnalını yaradırlar. Bu nəticə işin⁸ eksperimental nəticələrinə uyğun gəlir.

⁸Kulyk, B. Linear and nonlinear optical properties of ZnO/PMMA nanocomposite films / B.Kulyk, B.Sahraoui, O.Krupka [et al.] //Journal of Applied Physics, – 2009. 106, – p. 093102-1-093102-6.

NƏTİCƏ

1. 20 GVt/sm² doldurma intensivliyində, 0.64 mkm-ə bərabər koherent uzunluqda, ZnO-nun 16% konsentrasiyası üçün, ÜHG çevrilmə effektivliyi maksimumdur. ZnO-nun konsentrasiyası 3% -dən 16% -ə qədər artdıqda ÜHG tezlik çevrilməsinin effektivliyi təqribən 1.6 dəfə, 5% -dən 15% -ə qədər artdıqda isə ikinci harmonika generasiyasının çevrilməsinin effektivliyi təqribən iki dəfə artır;

2. Üçüncü harmonika dalğasının mənfi sındırma əmsalı olan materiallarda əsas şüalanma fazasına əks təsirinin nəzərə alınması, əsas şüalanmanın intensivliyinin $\Gamma\ell = 0.7 \div 1$ intervalında artması ilə çevrilmə effektivliyinin üç dəfə azalmasına gətirib çıxarır.

3. Metamaterialda öz-özünə təsir effektinin tədqiqi nəticəsində müəyyən olunmuşdur ki, faza fərqlinin 0.1-dən 0.5-ə qədər dəyişməsi doldurma dalğasının fazasının təqribən beş dəfə artırılmasına gətirir, adi kubik mühitlərdə isə bu dəyişikliyin qiyməti 26.4 dəfə kiçikdir.

4. Aşağı tezlikdə girişdə siqnal intensivliyi ilə müqayisədə boşuna dalğanın intensivliyinin 5 dəfə artması, siqnal dalğasının gücləndirilməsinin demək olar ki, 20 dəfə artmasına səbəb olur. Metamaterialın gətirilmiş tam uzunluğunun optimal qiymətində yüksək tezlikli doldurma halında, çevrilmə effektivliyinin və siqnal dalğasının gücləndirmə əmsalının sonsuz böyük qiymətləri müşahidə olunur.

5. Doldurma intensivliyi artdıqca, çevrilmənin maksimumu kristalın daha kiçik uzunluqlarında əldə edilir. AgGa(Se_{1-x}S_x)₂ və AgGa_{1-x}In_xSe₂ kristallarının faza sinxronizm şərtinin yerinə yetirilməsində qeyri-kritiklik rejim bu birləşmələrdə x parametrinin artması ilə daha yaxşı yerinə yetirilir. AgGa_{0.6}In_{0.4}Se₂-də çevrilmə effektivliyinin 0.036% dəyişməsi, AgGaSe₂ ilə müqayisədə 33 dəfə böyük bucaq intervalında baş verir.

6. GaSse kristalında doldurma intensivliyi ($\lambda=1.0642$ mkm) 0.7 GVt/sm² və 0.07 sm⁻¹ itkisində boşuna dalğanın ($\lambda=6.45$ mkm) 5 mK-dan 10 mK-a qədər gücləndirilməsi baş verir. Doldurma və siqnal dalğalarının aşağı intensivliklərində baxılan kristalların qeyri kritik rejimi həyata keçirilə bilər.

7. Elektrokimyəvi çökdürülmə üsulu ilə alınmış ZnO/PMMA nanokompozit nazik təbəqələrində rentgen struktur analizi ilə təbəqələrin heksoqanal fazası təsdiq edilmişdir.

Dissertasiya mövzusu üzrə çap olunmuş elmi işlər

1. Qasımova, R.C., Səfərova, G.Ə., Şamilova, Ş.A., Məlikova Əhmədova, N.A. Metamateriallarda üçüncü harmonikanın generasiyası // “Fizikanın aktual problemləri” VIII Respublika Konfransının materialları, – Bakı: –17 dekabr, –2015, –səh. 174-178.
2. Qasımova, R.C., Şamilova, Ş.A., Səfərova, G.A., Məlikova Əhmədova, N.A. Metamateriallarda optik dalğaların parametrik qarşılıqlı təsiri // “Fizikanın aktual problemləri” IX Respublika Konfransının materialları, – Bakı: –22 dekabr, – 2016, – səh.138-140.
3. Şamilova, Ş.A., Məlikova Əhmədova, N.A. Mənfi indeksli mühitlərdə üçüncü harmonika dalğasının kompleks amplitudu // “XƏZƏRNEFTQAZYATAQ”-2016 elmi-təcrübi konfransı, –Bakı: –24-25 dekabr, – 2016, səh. 646-650.
4. Касумова, Р.Дж., Амиров, Ш.Ш., Шамилова, Ш.А. Встречное взаимодействие оптических волн в метаматериалах при низкочастотной накачке квантовая электроника // – Москва: Квантовая электроника, – 2017, 47 №7, – с. 655-660.
5. Касумова, Р.Дж., Мамедов, Г.М., Шамилова, Ш.А. Получение и генерация второй гармоники в ZnO/PMMA нанокomпозитных пленок // – Dusseldorf: Eastern-European Scientific Journal, – 2016., – p.112-115.
6. Касумова, Р.Дж., Мамедов, Г.М., Шамилова, Ш.А. Получение и исследование оптических свойств ZnO/PMMA нанокomпозитных пленок // “Opto, nanoelektronika, kondensə olunmuş mühit və yüksək enerjilər fizikası” Beynəlxalq Konfrans, – Bakı: – 25-26 dekabr, – 2015, – səh. 45-47.
7. Шамилова, Ш.А., Касумова, Р.Дж. Параметрическое взаимодействие встречных волн при высокочастотной и

- низкочастотной накачках // Magistrantların və gənc tədqiqatçıların “Fizika və astronomiya problemləri” Beynəlxalq Elmi konfrans, – Bakı: – 24-25 may, – 2018, s.144-146.
8. Kasumova, R.J., Phase effects in metamaterials at Third-Harmonic Generation / R.J.Kasumova, G.A.Safarova, Sh.A.Shamilova [et al.] // International Journal of Engineering and Technology, – 2015, 15, № 06, – p. 19–30.
 9. Kasumova, R.J., Mamedov, H.M., Shamilova, Sh.A., Mamedova, V.C. Angular dispersion coefficient for $\text{GaS}_{0.4}\text{Se}_{0.6}$ at 6.45 μm // Materials of 8th International Scientific Conference «Science and Society», – London: – 24-29 November, – 2015, – p. 43-46.
 10. Kasumova, R.J., Shamilova, Sh.A. Optical parametric amplification at 6.45 μm for $\text{GaS}_x\text{Se}_{1-x}$ // International Journal of Scientific & Technology Research, – 2014. 3, № 6, – p. 189-192.
 11. Kasumova, R.J., Shamilova, Sh.A. Phase Effects at Third Harmonic Generation in ZnO/PMMA nanocomposite films // International Journal of Engineering and Technology, – 2015. 15, № 4, – p. 10-21.
 12. Kasumova, R.J., Shamilova, Sh.A. Second harmonic generation of laser radiation in $\text{AgGa}(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_2$ crystal // Materials digest of the X International Scientific and Practice Conference “Trends of modern science 2014”, – Sheffield: – May 30-June 7, – 2014, 23, – p. 58 – 60.
 13. Kasumova, R.J., Safarova, G.A., Shamilova, Sh.A., Kerimova, N.V. $\text{GaS}_{0.4}\text{Se}_{0.6}$ crystals as parametric converters in mid-IR range of spectrum // Materials digest of the IX International Conference "Science, Technology and Higher Education", – Canada: – 23-24 december, № 2015, – p. 218-221.
 14. Kasumova, R.J., Mamedov, H. M., Shamilova, Sh.A. Phase Effects at Second-Harmonic Generation in ZnO/PMMA nanocomposite films // Journal of Physical Sciences and Application, – 2015. 7, №5, – p. 48-58.
 15. Kasumova, R.J., Mamedov, H.M., Shamilova, Sh.A., Mamedova, V.C. // Materials of 8th International Scientific

- Conference «Science and Society» , – London: – 24-29 November, –2015, – p. 43-46.
16. Kasumova, R.J., Mamedov, H.M., Shamilova, Sh.A, Safarova, G.A., Kerimova, N.V. Phase Effects in ZnO/PMMA nanocomposite films, at Second-Harmonic Generation // Proceeding of International Conference “Modern Trends in Physics“ – Baku:, – 20-22 April, – 2017, – p.25-27.
 17. Kasumova, R.J., Optical parametric oscillation in $Hg_{1-x}Cd_xGa_2S_4$ / R.J.Kasumova, Sh.A.Shamilova, G.A.Safarova [et al.] International Journal of Engineering and Sciences, – 2015, 15, № 02, – p. 16-22.
 18. Kasumova, R.J., Phase Effects at parametrical interaction in metamaterials / R.J.Kasumova, Z.H.Tagiyev, Sh.Sh.Amirov [et al.] // Journal of Russian Laser Research, – 2017.38, №4, – p. 211-218.
 19. Mamedov, H. M., Electrical and photoelectrical characteristics of c-Si/Porous–Si/CdS heterojunctions / H. M.Mamedov, A.Kukevecz, Z.Konya [et al.] // Russian Physics Journal, – 2019. 61, №. 9, –p. 1660-1666.
 20. Mamedov, H.M., Mamedova, V.J., Ahmadova, Kh.M., Shamilova, Sh.A., Safarov, V.H., Garibov, G.I. Effect of deposition and heat treatment regimes on the electrical and photoelectrical properties Of heterojunctions p-Si/ $Cd_{1-x}Zn_xO$ //Opto-nanoelektronika, kondensə olunmuş mühit və yüksək enerjilər fizikası, – Bakı, – 25-26 dekabr, – 2015, – səh.218-221.
 21. Shamilova, Sh.A. Influence of doping material on optical parametric oscillation in $Hg_{1-x}Cd_xGaS_4$ crystal // – Baku: Journal of Low Dimensional Systems, – 2019. 4, №1, – p.9-14.
 22. Shamilova, Sh.A. Influence of doping material on second harmonic generation in $AgGaSe_2$ crystal // – Baku: Journal of Low Dimensional Systems, – 2019. 3, №2, – p.23-29.

Dissertasiyanın müdafiəsi 11 noyabr 2021- ci il tarixində saat 15⁰⁰-da Bakı Dövlət Universitetinin nəzdində fəaliyyət göstərən ED 2.19 Dissertasiya şurasının iclasında keçiriləcəkdir.

Ünvan: AZ 1148, Bakı şəh., Z.Xəlilov küç.23, Bakı Dövlət Universiteti, əsas bina

Dissertasiya ilə Bakı Dövlət Universitetinin Elmi Kitabxanasında tanış olmaq mümkündür.

Dissertasiya və avtoreferatın elektron versiyaları Bakı Dövlət Universitetinin rəsmi internet saytında yerləşdirilmişdir.

Avtoreferat 08 oktyabr 2021-ci il tarixində zəruri ünvanlara göndərilmişdir.

Çapa imzalanıb: 05.10.2021

Kağızın formatı: A5

Həcm: 37044

Tiraj: 30