

AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASI

Əlyazması hüququnda

MAYE KRİSTAL-BaTiO₃ NANOHİSSƏCİKLİ SİSTEMLƏRİN FİZİKİ XASSƏLƏRİ

İxtisas: 2222.01 – Nanoquruluşların fizikası və texnologiyası

Elm sahəsi: Fizika

İddiaçı: **Şirxan Ərəstun oğlu Hübətov**

Fizika üzrə fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi
almaq üçün təqdim edilmiş dissertasiyanın

AVTOREFERATI

BAKI – 2022


Dissertasiya işi Bakı Dövlət Universitetinin «Nanomaterialların kimyəvi fizikası» kafedrasında yerinə yetirilmişdir.

Elmi rəhbərlər: – fizika-riyaziyyat elmləri namizədi, dosent
Abbas Rəhim oğlu İmaməliyev;
– fizika elmləri doktoru, professor
Məhəmmədəli Əhməd oğlu Ramazanov

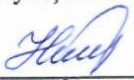
Rəsmi opponentlər: –AMEA-nın müxbir üzvü,
fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor
Oqtay Əbil oğlu Səmədov;
– fizika elmləri doktoru, dosent
Cahangir İslam oğlu Hüseynov;
– fizika-riyaziyyat elmləri namizədi, dosent
Eldar Şahsuvar oğlu Ələkbərov.

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


Dissertasiya şurasının sədri:


AMEA-nın müxbir üzvü,
fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor
Aydın Həsən oğlu Kazımsadə

Dissertasiya şurasının elmi katibi:


fizika üzrə fəlsəfə doktoru
Həbibə Aslan qızı Şirinova

Elmi seminarın sədri:


AMEA-nın müxbir üzvü,
fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor
Oktay Kazım oğlu Qasımov

İmzanı təsdiq edir
BAKİ DÖVLƏT UNIVERSİTETİNİN
ELMI KATIBI
prof. V.M.SALMANOV
«06» 01 2022

İŞİN ÜMUMİ XARAKTERİSTİKASI

Mövzunun aktuallığı və işlənmə dərəcəsi. Məlumdur ki, bəzi çubuqşəkilli (kalamitik) molekulardan təşkil olunmuş üzvi maddələrdə müəyyən temperatur intervalında molekulalar xaotik yox, bir istiqamətdə yönəliirlər. Həmin istiqamət direktor, maddənin bu halı isə maye kristal adlanır, çünki bu sistemlərdə eyni zamanda kristallara xas olan anizotropiya və mayələrə xas olan axıcılıq müşahidə olunur. Maddənin unikal bir halı olan maye kristallar çox böyük elmi maraq cəlb edir. Buna sübut olaraq sırf bu sahəyə aid elmi işlərin və monoqrafiyaların sayının davamlı olaraq artmasını, ixtisaslaşmış elmi jurnalların (Molecular Crystals and Liquid Crystals, Liquid Crystals) olmasını, hər il növbə ilə Beynəlxalq, Avropa və Asiya maye kristal konfranslarının keçirilməsini göstərmək olar. Lakin maye kristallara göstərilən böyük maraq daha çox onların praktik tətbiqləri ilə, əsasən də displey texnikasında tətbiqi ilə bağlıdır. Maye kristallar əsasında düzəldilən displeylər başqaları ilə müqayisədə bir sıra üstünlüklərə malikdirlər: istehsal texnologiyasının sadəliyi, maya dəyərinin aşağı olması, ölçülərin kiçik olması və çox az enerji sərfiyyatı. Displey texnologiyasının durmadan yüksələn tələbləri (xəyalın keyfiyyətinin yaxşılaşdırılması, ölçülərin və enerji sərfiyyatının daha da kiçildilməsi və s.) maye kristalların da istismar parametrlərinin (idarə olunma gərginliyinin, keçid sürətinin, kontrast nisbətinin və s.) durmadan yaxşılaşdırılmasını tələb edir. Bu məsələnin həlli yollarından biri daha yaxşı maddi parametrlərə malik yeni maye kristalların məqsədyönlü sintezidir ki, burada son illər demək olar ki, irəliləyiş yoxdur. Digər alternativ yol isə maye kristalların xassələrinin başqa funksional materiallarla konstruktiv şəkildə uzlaşdırılmasıdır. Məsələn, əyilə bilən displeylərdə istifadə olunan sistem, polimerdə dispersiya olunmuş mikron ölçülü maye kristal damcılarından ibarətdir. Kolloidal maye kristal kompozitlərdə isə, tərsinə, müxtəlif təbiətli (ferromaqnit, seqnetoelektrik, metal hissəciklər və s) submikron ölçülü hissəciklər, həmçinin karbon nanohissəcikləri (nanoborular, fullerenlər, qrafen) maye kristal mühitdə dispersiya olunur. Qeyd olunan hissəciklərin hətta kiçik miqdarda maye kristala əlavə olunması sonuncunun xassələrində çox güclü dəyişikliklər yarada bilər və bəzi hallarda keyfiyyətə yeni effektlərin meydana çıxmasına səbəb ola bilər.

Xüsusilə, tərkibində az miqdarda seqnetoelektrik bariumtitanat (BaTiO_3) hissəcikləri olan nematik maye kristal kolloidlərdə maraqlı effektlər baş verir. Məsələn, seqnetoelektrik hissəciklər nematik maye kristalın dielektrik anizotropiyasını artırmaqla Frederiks effektinin astana gərginliyini azaldır, keçid sürətini artırır, maye kristalın izotrop fazasında yaddaşlı elektromexaniki effekt yaradır.

Termotrop maye kristalların xolesterik və smektik adlanan digər növləri də var. Smektik maye krisrallarda oriyentasiya nizamından başqa translyasiya nizamı da var. Smektik A maye kristallarda molekulların kütlə mərkəzi direktora perpendikulyar və bir-birindən bərabər məsafədə yerləşən (ekvidistant) laylarda yerləşirlər. Bu cür laylı quruluş smektik A maye kristalın özlülüyünün bir-iki tərtib artmasına səbəb olur. Özlülüyün böyük qiyməti smektik A maye kristalda Frederiks effektinin yaddaşla baş verməsinə səbəb olur ki, bu da adı çəkilən maye kristalları informasiyanı yazmaq və yadda saxlamaq üçün perspektivli materiallar sırasına daxil edir. Bundan əlavə, nematik maye kristal əsasında kolloid hazırlayarkən, hissəciklərin aqreqasiyasının qarşısını almaq məqsədi ilə kolloidə əlavə olaraq 1-2% miqdarında stabilizator (məsələn, olein turşusu) daxil edilir. Bir çox hallarda stabilizator maye kristalın maddi parametrlərini arzu olunmaz istiqamətdə dəyişdirir, məsələn, maye kristalın mövcud olmasının temperatur intervalını daraldır. Maye kristal-nanohissəciklər sistemində matris olaraq smektik A maye kristal istifadə olunduqda isə, özlülük çox böyük olduğundan, stabilizatora ehtiyac qalmır. Bu üstünlüklərinə baxmayaraq, smektik maye kristalda baş verən elektrooptik effektin astana gərginliyi nematiklərlə müqayisədə xeyli (bir-iki tərtib) böyük, keçid sürəti isə çox kiçik olur.

Tədqiqatın obyektı və predmeti. Smektik A maye kristal olaraq müsbət dielektrik anizotropiyasına malik 4-nitrofenil 4'-desiloksibenzoat (şərti adı 10NF) və mənfi dielektrik anizotropiyasına malik 4-heksiloksi 3-nitrobenzoy turşusunun 4'-heksiloksibenzoy turşusu (C2) istifadə olunmuşdur. Bundan başqa, birinci maye kristalın smektik A fazasını aşağı temperaturlara sürüşdürmək üçün ona aşağı temperaturu və müsbət dielektrik anizotropiyalı nematik maye kristal-4,4'-pentilsianobifenil (5CB) əlavə olunmuşdur. Seqnetoelektrik hissəciklər olaraq 100 nm, 200 nm, 300 nm, 400 nm və 500 nm ölçülü mono-dispers barium titanat (BaTiO_3) hissəcikləri götürülmüşdür.

Tədqiqatın məqsəd və vəzifələri. Müxtəlif submikron ölçülü seqnetoelektrik barium titanat hissəciklərinin smektik A maye kristalların fiziki xassələrinə (dielektrik nüfuzluğu, elektrik keçiriciliyi, faza keçidi temperaturu və entalpiyası) təsirininin qanunauyğunluqlarını müəyyən etmək və bunun əsasında bu sistemlərdə baş verən yaddaşlı elektrooptik effektin istismar parametrlərinin (astana gərginliyi, keçid müddəti) yaxşılaşdırılması imkanlarını aşkara çıxarmaqdır.

Məqsədə nail olmaq üçün aşağıdakı məsələlərin həlli qarşıya qoyulmuşdur:

1. Smektik A maye kristal – BaTiO_3 hissəcikləri əsasında dayanıqlı kolloidlərinin alınması texnologiyasının mənimsənilməsi;
2. Smektik A maye kristal molekullarının elektrooptik yuvacıqda bircins planar və homotrop oriyentasiyasının alınması metodlarının mənimsənilməsi;
3. Həm müsbət, həm də mənfi dielektrik anizotropiyasına malik smektik A maye kristalın dielektrik nüfuzluğunun və elektrik keçiriciliyinin tezlik asılılığına müxtəlif ölçülü BaTiO_3 hissəciklərinin təsirinin tədqiqi;
4. Smektik A maye kristalın elektrooptik xassələrinə BaTiO_3 hissəciklərinin təsirinin tədqiqi;
5. Smektik A maye kristalın istilik xassələrinə BaTiO_3 hissəciklərinin təsirinin tədqiqi.

Tədqiqat metodları. Dissertasiya işində təcrübi tədqiqat metodları olaraq aşağı tezlikli dielektrik spektroskopiyası metodunun köməyi ilə dielektrik anizotropiyasının işarəsi fərqli olan iki smektik A maye kristalın və beş müxtəlif ölçülü BaTiO_3 hissəcikləri ilə dispersiya olunmuş kolloidlərlə doldurulmuş elektrooptik yuvacıqların tutum-tezlik asılılıqları tədqiq olunmuşdur. Elektrooptik yuvacığın volt-farad və volt-lümen xarakteristikalarının ölçülməsi metodu ilə submikron ölçülü seqnetoelektrik BaTiO_3 hissəciklərinin smektik A maye kristalda baş verən planar-homeotrop və homeotrop-planar keçidlərinin astana xassələrinə təsiri öyrənilmişdir. Diferensial skanedici kalorimetriya və polyarizasiya mikroskopiyası metodu ilə tədqiq edilən təmiz maye kristalların faza keçidlərinə müxtəlif ölçülü BaTiO_3 hissəciklərinin təsiri araşdırılmışdır.

Müdafiəyə çıxarılan əsas müddəalar:

1. Müəyyən edilmişdir ki, maye kristal kolloiddə xarici sahə olmadıqda seqnetoelektrik BaTiO_3 hissəcikləri öz üstün (polyarizasiya) oxu ilə maye kristalın molekullarının dipol momentləri ilə yox, direktorla eyni istiqamətdə yönəliirlər.

2. Göstərilmişdir ki, müsbət dielektrik anizotropiyasına malik olan smektik A maye kristalda elektrooptik keçid üç mərhələdə baş verir: əvvəlcə BaTiO_3 hissəcikləri maye kristalın daxilində 90° dönür, sonra polidomen haldan monodomen hala keçərək polyarlaşır, daha sonra öz lokal sahəsi ilə maye kristal molekullarını döndərir.

3. 100 nm ölçülü BaTiO_3 hissəcikləri aşağı tezliklər oblastında smektik A maye kristalın dielektrik xassələrində anomal dəyişikliklər yaradır ki, bu da həmin hissəciklərin maye kristalın keçiricilik xassələrinə verdiyi payla izah olunur.

4. BaTiO_3 hissəcikləri smektik A maye kristalın dielektrik dispersiyasına təsir edir və bu təsir həm hissəciklərin ölçüsündən, həm də maye kristalın dielektrik anizotropiyasının işarəsindən asılıdır.

5. Barium titanat hissəciklərinin maye kristal molekulları ilə qarşılıqlı təsiri maye kristaldakı faza keçidlərinə, xüsusi ilə smektik A-izotrop maye keçidinə əhəmiyyətli dərəcədə təsir edir.

Tədqiqatın elmi yeniliyi.

Dissertasiya işində ilk dəfə olaraq müəyyən edilmişdir ki,

1. BaTiO_3 hissəcikləri hər iki maye kristalın həm planar, həm də homeotrop teksturasında dielektrik nüfuzluğunun qiymətini artırır və bu artım, dielektrik nüfuzluğunun uzununa komponentində daha güclü hiss olunur. BaTiO_3 hissəciklərinin ölçüsü böyüdükcə dielektrik nüfuzluğunun uzununa toplananındakı artım daha çox olur.

2. BaTiO_3 hissəcikləri C2 maye kristalının dielektrik nüfuzluğunun dispersiyasına təsir edir. BaTiO_3 hissəcikləri C2 maye kristalının dielektrik nüfuzluğunun eninə toplananının yuxarı tezliklərdə (10^5 Hz) müşahidə olunan dispersiyasını kiçik tezliklər tərəfə sürüşdürür və sürüşmənin qiyməti hissəciklərin ölçüsündən, demək olar ki, asılı deyil.

3. C2 maye kristalının dielektrik nüfuzluğunun uzununa toplananında aşağı tezliklərdə (10^2 Hz) müşahidə olunan zəif dispersiya BaTiO_3 hissəciklərin təsiri ilə böyük tezliklər tərəfə sürüşür. BaTiO_3 hissəciklərinin ölçüsü böyüdükcə bu sürüşmə daha çox olur.

4. BaTiO₃ hissəcikləri müsbət dielektrik anizotropiyasına malik olan smektik A maye kristalında (10NF+5CB) baş verən planar-homeotrop keçidinin astana gərginliyini kəskin azaldır. Bu təsir, maye kristalın dielektrik anizotropiyasının artması ilə yox, polyarlaşmış hissəciklər ətrafında yaranan lokal sahə ilə izah olunur, çünki eyni effekt mənfi dielektrik anizotropiyalı smektik A maye kristalında da baş verir.

5. BaTiO₃ hissəcikləri mənfi dielektrik anizotropiyasına malik olan C2 maye kristalında homeotrop-planar keçidinin astana gərginliyini azı 2 dəfə aşağı salır. Bu nəticə də lokal sahə konsepsiyası çərçivəsində izah edilə bilər.

6. Seqnetoelektrik BaTiO₃ hissəcikləri smektik A maye kristalında baş verən planar-homeotrop və homeotrop-planar keçidinin sürətini bir tərtib artırır ki, bu da BaTiO₃ hissəciklərinin bilavasitə keçidin başladığı mərkəzlər rolunda olması ilə izah olunur.

7. BaTiO₃ hissəcikləri smektik A-izotrop faza keçidi temperaturunu yuxarı qaldırır. Hissəciklərin ölçüsü böyüdükcə, bu artım daha da böyük olur. 500 nm ölçülü BaTiO₃ hissəcikləri halında bu artım 5.5°C təşkil edir. BaTiO₃ hissəcikləri smektik A-izotrop faza keçidinin entalpiyasını artırır. Orta ölçülərdə (200-400 nm) bu artım daha böyük olur.

8. Kristal-smektik A faza keçidi temperaturu BaTiO₃ hissəciklərinin kiçik ölçülərində (100 nm, 200 nm) azca yuxarı qalxır, böyük ölçülərində (300-500 nm) isə azca aşağı sürüşür. Oxşar sözləri keçidinin entalpiyası haqqında da demək olar.

Tədqiqatın nəzəri və praktik əhəmiyyəti.

1. Smektik A maye kristallar əsasında hazırlanan kolloidlər böyük stabilliyə malikdir və onların hazırlanmasında stabilizator tələb olunmur.

2. Smektik A maye kristallar və BaTiO₃ hissəcikləri əsasında düzəldilən kolloidlər təmiz smektik A maye kristallarla müqayisədə daha üstün istismar parametrlərinə (aşağı idarəetmə gərginliyinə və yüksək keçid sürətinə) malikdirlər.

3. BaTiO₃ hissəcikləri smektik A maye kristalın temperatur intervalını əhəmiyyətli dərəcədə genişləndirməyə imkan verir.

4. Alınmış təcrübi nəticələr bənzər kolloidlərin nəzəriyyələrini təkmilləşdirmək və inkişaf etdirməyə kömək edə bilər.

İşin aprobasiyası və tətbiqi. Dissertasiya işinə daxil edilən

tədqiqatların nəticələri aşağıda adları qeyd olunan Respublika və Beynəlxalq səviyyəli konfranslarında məruzə və müzakirə olunmuşdur: «Opto-, nanoelektronika, kondensə olunmuş mühit və yüksək enerjilər fizikası» Beynəlxalq konfransı (Bakı, 25-26 dekabr 2015); The 26th International Liquid Crystal Conference (Kent State University, USA, July 31-August 5, 2016); «Fizikanın aktual problemləri» IX Respublika elmi konfransı (Bakı, 22 dekabr 2016); «Modern Trends in Physics» International Conference (Baku, 20-22 April 2017); International Scientific Conference of Young Researchers (Baku, 05-06 may 2017); The 14th European Conference on Liquid Crystals Moscow State University (Russia, June 25-30, 2017); «Modern Trends in Physics» International Conference (Baku, May 1-3, 2019).

Dissertasiya işinin materialları 10 məqalə və 7 tezis olmaqla yerli və xarici jurnallarda dərc edilmişdir. Bunlardan 3 məqalə Clarivate Analytics (Web of Science) və Scopus bazasına daxil olan impakt faktorlu jurnallarda çap olunmuşdur. Tezislərdən 2-si xaricdə keçirilən Beynəlxalq və Avropa konfranslarında müzakirə olunmuş və materiallarında dərc olunmuşdur.

Dissertasiya işinin yerinə yetirildiyi təşkilatın adı. Dissertasiya işi Bakı Dövlət Universitetinin «Nanomaterialların kimyəvi fizikası» kafedrasında yerinə yetirilmişdir.

Dissertasiyanın struktur bölmələrinin ayrılıqda həcmi qeyd olunmaqla dissertasiyanın işarə ilə ümumi həcmi. Dissertasiya işi 160 səhifə çap olunmuş mətnə təqdim olunmaqla, giriş, beş fəsil, nəticələr, praktik tövsiyələr, 61 şəkil, 7 cədvəl və 150 adda ədəbiyyatın siyahısından ibarətdir. Ədəbiyyat siyahısında 13 əsər Azərbaycan, 3 əsər rus və 134 əsər ingilis dilindədir. Dissertasiyanın həcmi (mətndəki boşluqlar və şəkillər, cədvəllər, qrafiklər, əlavələr və ədəbiyyat siyahısı istisna edilməklə) – 164210 işarədir (giriş – 13924, I fəsil – 39013, II fəsil – 24858, III fəsil – 35142, IV fəsil – 30980, V fəsil – 18795, nəticə – 1498 işarə).

İŞİN QISA MƏZMUNU

Girişdə mövzunun aktuallığı əsaslandırılır, işin məqsədi, elmi yeniliyi, müdafiə üçün təqdim olunan əsas elmi müddəalar göstərilir, praktik əhəmiyyəti əsaslandırılır, dissertasiya fəsillərinin qısa xülasəsi

ayrıca təsvir olunur.

Birinci fəsildə maye kristalların və seqnetoelektriklərin fiziki xassələri haqqında məlumat verilmişdir. Həmçinin maye kristal matrisdə seqnetoelektrik hissəciklərin dispersiya metodları və alınmış kolloidlərin fiziki xassələrinə dair geniş ədəbiyyat icmalı aparılmışdır. BaTiO₃ seqnetoelektrik hissəciklərinin maye kristalın fiziki xassələrinə təsirinə dair alınmış ziddiyyətli nəticələr təhlil edilmiş, bu ziddiyyətlərin səbəbi aydınlaşdırılmışdır.

İkinci fəsildə istifadə olunan iki fərqli dielektrik anizotropiyalı smektik A maye kristal və BaTiO₃ seqnetoelektrik hissəciklərinin quruluşu və fiziki xüsusiyyətləri haqqında geniş məlumat verilmişdir. Müsbət dielektrik anizotropiyasına malik smektik A maye kristal iki komponentin – 4-nitrofenil 4'-desiloksibenzoat (şərti adı 10NF) və 4-siano 4'-pentilbifenil(şərti adı 5CB) 1:1 mol nisbətində qarışığından ibarətdir. Alınan qarışıq

Kristal 32,5 °C Smektik A 47 °C Nematik 54°C İzotrop maye faza keçidlərinə malik olub dielektrik nüfuzluğunun anizotropiyası $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp} = +13,8$ -dir.

İşdə tədqiq olunan digər mənfi dielektrik anizotropiyalı maye kristal bir komponentli 4-heksiloksi-3-nitrobenzoy turşusunun 4'-heksiloksifenil efiri (şərti adı C2) olub aşağıdakı fazalara malikdir:

Kristal 30,5 °C Smektik A 71°C İzotropik Maye

C2 maye kristalının dielektrik anizotropiyası $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp} = -8,6$ -dir.

İşdə 100 nm, 200 nm, 300 nm, 400 nm və 500 nm ölçülü mono-dispers BaTiO₃ hissəciklərindən istifadə olunmuşdur. Hissəciklərin ölçüsünün yoxlanması Jeol JSM767-F Skanedici Elektron Mikroskopunda yerinə yetirilmişdir. BaTiO₃ hissəciklərinin maye kristalda dispersiya olunması ultrasəs disperqatorunda yerinə yetirilmişdir. Maye kristalın dielektrik və elektrooptik xassələrinin tədqiqi elektrooptik yuvacığın köməyi ilə aparılmışdır. Dissertasiya işində alınmış saf maye kristal və maye kristal+BaTiO₃ kolloidlərin quruluş və strukturunun analizlərini həyata keçirmək məqsədi ilə kompleks fiziki metodlar: skanedici elektron (SEM), diferensial skanedici kalorimetrik (DSK), aşağı tezlikli dielektrik spektroskopiyası və tutumgərginlik (C-V) analizi metodları istifadə olunmuşdur.

Üçüncü fəsildə müxtəlif submikron ölçülü BaTiO₃ hissəciklərinin

müsbət və mənfi dielektrik anizotropiyalı smektik A maye kristalın dielektrik xassələrinə təsiri öyrənilmişdir. Bu zaman aşağı tezlikli (20 *Hz*-1*MHz*) dielektrik spektroskopiyası metodundan istifadə olunmuşdur. Barium titanat hissəciklərinin kolloiddəki çəki payı 1%, həcm payı isə 0,17%-dir. Dielektrik ölçmələr $t=32^{\circ}\text{C}$ -də, $d=17\mu\text{m}$ qalınlıqlı və işçi sahəsi təxminən 50 mm^2 olan elektrooptik yuvacıqlarda aparılır. İET-1920 RLC-metri maye kristal doldurulmuş elektrooptik yuvacığın elektrik tutumunu (C), elektrik müqavimətini (R) və itki faktorunu (D) [20*Hz*-1*MHz*] tezlik intervalında ölçməyə imkan verir. Yuvacığa verilən sinusoidal test siqnalının amplitudu 1*V* seçilmişdir. Elektrooptik yuvacığa paralel birləşdirilmiş tutum və rezistor kimi baxılır və dielektrik nüfuzluğunun həqiqi və xəyali hissələri, uyğun olaraq

$$\varepsilon' = \frac{\varepsilon}{\sqrt{1+D^2}}, \quad \varepsilon'' = \varepsilon' \cdot D \quad (1)$$

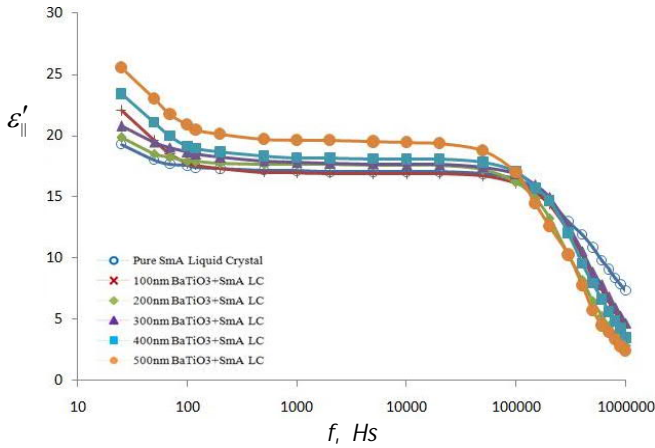
düsturlarının köməyi ilə hesablanır.¹ Homeotrop oriyentasiya halında biz yuxarıda göstərilən fiziki kəmiyyətlərin uzununa komponentinin qiymətini (ε_{\parallel} , ε'_{\parallel} , $\varepsilon''_{\parallel}$ və σ_{\parallel}), planar oriyentasiya halında isə həmin kəmiyyətlərin eninə komponentlərin qiymətini (ε_{\perp} , ε'_{\perp} , ε''_{\perp} və σ_{\perp}) alırıq. Şəkil 1 və 2-də BaTiO₃ müxtəlif ölçülü hissəciklərinin müsbət dielektrik anizotropiyalı maye kristalın dielektrik nüfuzluğunun uzununa komponentinə təsiri göstərilmişdir.

Şəkil 3-dən görüldüyü kimi BaTiO₃ hissəcikləri smektik A maye kristalın dielektrik nüfuzluğunun eninə toplananına əhəmiyyətli dərəcədə təsir göstərmir (ona görə də bu hissəciklərin ε_{\perp} -a təsirinə aid qrafiklər təqdim olunmur). Bu onu göstərir ki, kolloid izotrop fazadan maye kristal fazasına keçərkən BaTiO₃ hissəcikləri öz polyar oxları maye kristalın direktoru istiqamətində yönəliirlər. BaTiO₃ hissəciklərinin kolloiddəki həcm payının çox kiçik olması ($f \approx 0,17\%$) hesabına kolloidin dielektrik nüfuzluğunun eninə və uzununa komponentləri üçün

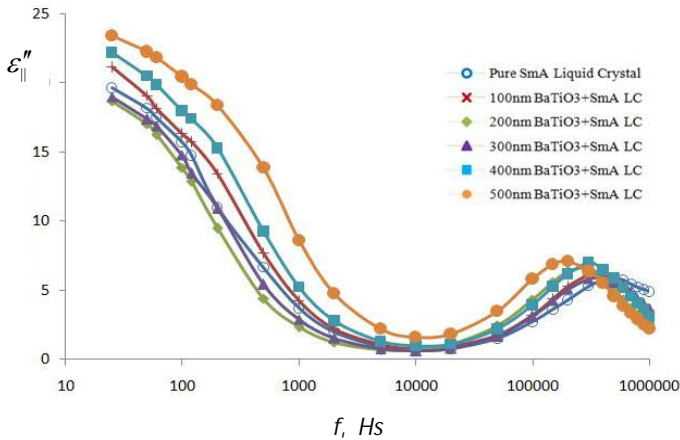
$$\varepsilon_{\parallel}^{colloid} = \varepsilon_{\parallel}^{LC} + f\varepsilon_{\parallel}^{FNP} \quad \text{və} \quad \varepsilon_{\perp}^{colloid} = \varepsilon_{\perp}^{LC} + f\varepsilon_{\perp}^{FNP} \quad (2)$$

düsturlarının doğruluğunu qəbul etsək və BaTiO₃ hissəcikləri üçün $\varepsilon_{\parallel}^{FNP} \sim 10^3$ və $\varepsilon_{\perp}^{FNP} \leq 100$ tərtibində olduğunu nəzərə alsaq, bu təcrübi nəticələrlə tam uyğun gəlir.

¹Feldman Yu. Dielectric relaxation phenomena in complex systems / Yu. Feldman, Yu. Gusev, M. Vasiliyeva. – Kazan: Kazan University, – 2012, – 134p.

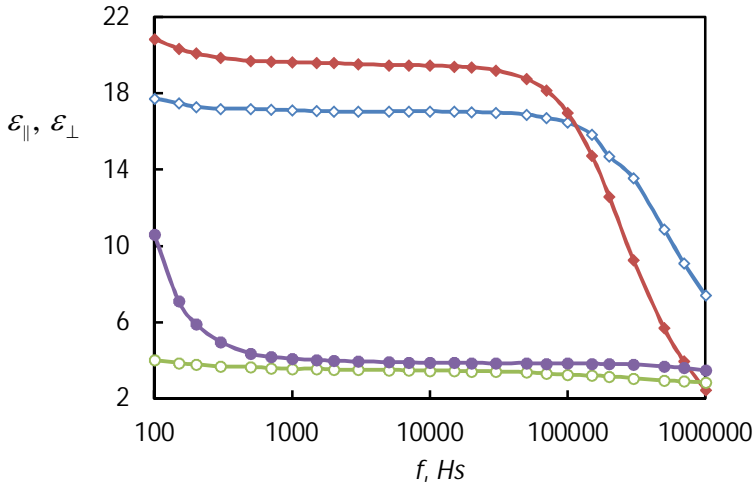


Şəkil 1. Təmiz (10NF+5CB) maye kristalın və onun müxtəlif ölçülü BaTiO₃ hissəciklərindən ibarət kolloidlərinin dielektrik nüfuzluğunun uzununa komponentinin həqiqi hissəsinin tezlikdən asılılığı



Şəkil 2. Təmiz (10NF+5CB) maye kristalın və onun müxtəlif ölçülü BaTiO₃ hissəciklərindən ibarət kolloidlərinin dielektrik nüfuzluğunun uzununa komponentinin xəyali hissəsinin tezlikdən asılılığı

Sinusoidal qanunla dəyişən elektrik sahəsinin kiçik tezliklərində maye kristal molekulları elektrik sahəsinin istiqaməti dəyişdikdə dönməyə macal tapırlar. Böyük tezliklərdə isə ($10^5 Hz$ və daha çox) molekullar elektrik sahəsinin istiqamətinin tez-tez dəyişməsinin ardınca dönməyə vaxt tapa bilmirlər və nəticədə dielektrik nüfuzluğu azalmağa başlayır (şəkil 2).



Şəkil 3. 10NF+5CB smektik A maye kristalın təmiz və (10NF+5CB+BaTiO₃-500 nm) kolloidinin dielektrik nüfuzluğunun tezlik asılılığı: içi boş romb – təmiz maye kristal üçün $\varepsilon_{||}$; dolu romb – kolloid üçün $\varepsilon_{||}$; içi boş dairə – təmiz maye kristal üçün ε_{\perp} ; içi dolu dairə – kolloid üçün ε_{\perp} .

Səqnetoelektrik barium titanat hissəciyinə R radiuslu dipol kimi baxsaq, onun mərkəzindən r məsafədə yaratdığı elektrik sahəsinin intensivliyi

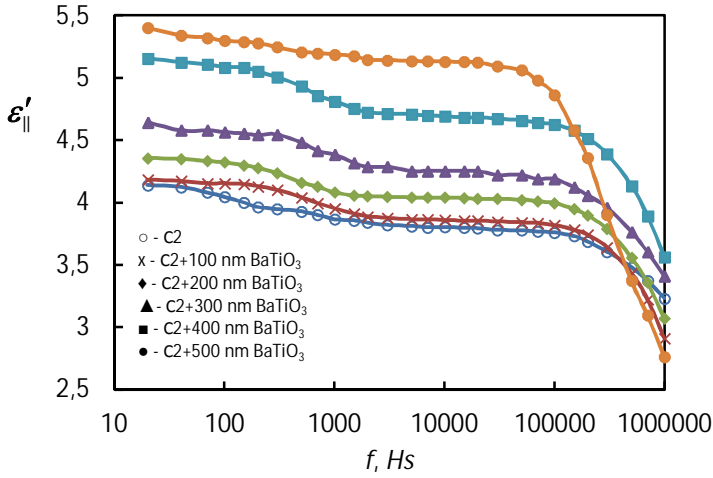
$$E_{FNP} = \frac{P_s \cdot R^3}{3\varepsilon_0 r^3} (3\cos^2 \theta + 1) \quad (3)$$

ifadəsi ilə təyin olunur².

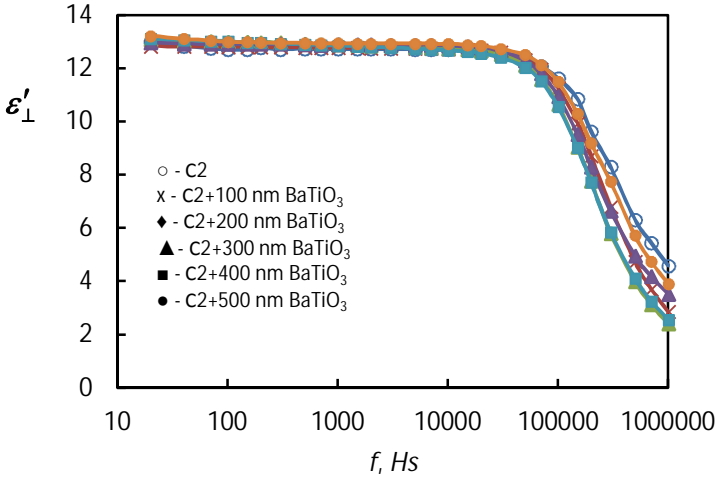
Bu düsturdan görünür ki, hissəciyin ölçüsü böyüdükcə onun yaratdığı lokal sahə güclənir və bu dəyişən xarici elektik sahəsində maye kristal molekullarının fırlanmasını çətinləşdirir. Dielektrik nüfuzluğunun eninə komponentində 1 MHz tezliklərə qədər dispersiyanın müşahidə olunmaması bir tərəfdən maye kristal molekulların uzun oxuna perpendikulyar istiqamətdə hər hansı birgüclü dipol qrupunun olmaması ilə, digər tərəfdən molekulların uzun ox ətrafında rahat fırlanması ilə izah oluna bilər.

Mənfi dielektrik anizotropiyalı smektik A fazalı maye kristalında aparılmış təcrübələrdən aşağıdakı nəticələr alınmışdır (şəkil 4 və 5).

² Matveev A.N. Electricity and Magnetism. – Moscow: Mir Publishers, – 1986, – 448p.



Şəkil 4. Təmiz (C2) maye kristalın və onun müxtəlif ölçülü BaTiO₃ hissəciklərindən ibarət kolloidlərinin dielektrik nüfuzluğunun uzununa komponentinin həqiqi hissəsinin tezlikdən asılılığı



Şəkil 5. Təmiz (C-2) maye kristalın və onun müxtəlif ölçülü BaTiO₃ hissəciklərindən ibarət kolloidlərinin dielektrik nüfuzluğunun eninə komponentinin həqiqi hissəsinin tezlikdən asılılığı

BaTiO₃ hissəciklərinin smektik A maye kristala əlavə olunması dielektrik nüfuzluğunun uzununa toplananını əhəmiyyətli dərəcədə artırır və hissəciklərin ölçüsü böyüdükcə bu artım daha çox hiss

olunur, eninə toplananını isə demək olar ki, dəyişmir. Bu qanuna uyğunluq BaTiO_3 hissəciklərinin spontan polarizasiyasının maye kristalın direktor sahəsi ilə qarşılıqlı təsiri ilə izah oluna bilər³.

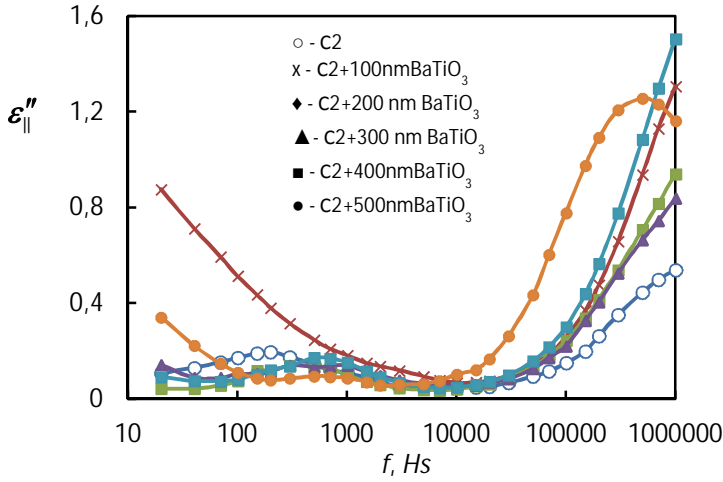
İzotrop maye-kristal keçidi ərəfəsində yaranan və maye kristal fazası üçün cavabdeh olan molekullarası anizotrop qarşılıqlı təsir polidomen barium titanat hissəciklərini müəyyən dərəcədə polarlaşdırır və direktor istiqamətində yönəldir. Düstur (2)-də barium titanat hissəciklərinin həcm payının $f \approx 0,0017$, polyar ox istiqamətində dielektrik nüfuzluğunun qiymətinin $\varepsilon_{\parallel}^{FNP} \sim 10^2 \div 10^3$ tərtibində, polyar oxa perpendikulyar istiqamətdə isə $\varepsilon_{\perp}^{FNP} \sim 10^1 \div 10^2$ tərtibində olduğunu nəzərə alsaq, alınan nəticələr keyfiyyətcə öz izahını tapır.

Şəkil 6-da təmiz smektik A maye kristalın və onun kolloidlərinin dielektrik nüfuzluğunun uzununa komponentinin xəyali hissəsinin (ε'') tezlik asılılığı verilmişdir. Göründüyü kimi, 100 nm ölçülü BaTiO_3 qatılmış kolloid istisna olmaqla, bütün hallarda aşağı tezliklərdə (100-1000 Hz tezlik intervalında) zəif dispersiya müşahidə olunur. Bu onunla izah oluna bilər ki, molekulun uzun oxuna perpendikulyar yönəldiyi hesab etdiyimiz $-\text{C}-\text{NO}_2$ və $-\text{COOH}$ polyar qrupları, əslində molekulun uzun oxuna dəqiq perpendikulyar deyil. Məsələn, $-\text{C}-\text{NO}_2$ polyar nitrofenil qrupu (dipol momenti təxminən $p \approx 4 \text{ debay} = 1,3 \cdot 10^{-29} \text{ Kl}\cdot\text{m}$) molekulun uzun oxu ilə təxminən 60° bucaq əmələ gətirir. Bu o deməkdir ki, qrupun dipol momentinin molekulun uzun oxuna paralel toplananı da mövcuddur:

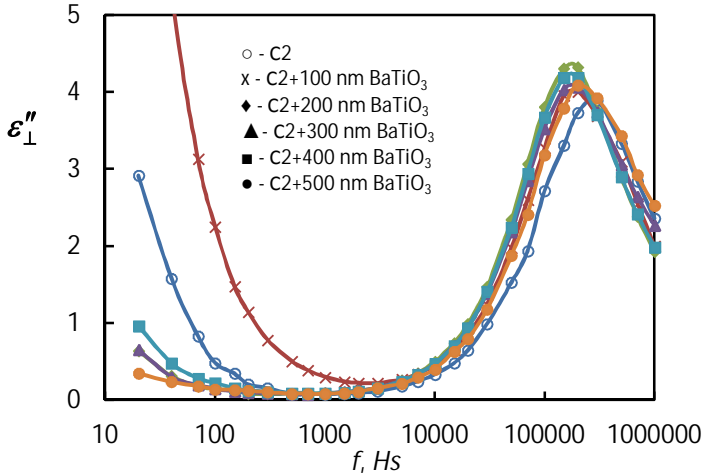
$$p_{\perp} \approx p \cos 60^\circ \approx 4 \cdot \frac{1}{2} \text{ debay} = 2 \text{ debay}.$$

Oxşar sözləri $-\text{COOH}$ polyar karboksil qrupu haqqında da söyləmək olar: ($p \approx 1,6 \text{ debay} = 5,3 \cdot 10^{-30} \text{ Kl}\cdot\text{m}$). Maye kristala BaTiO_3 hissəcikləri əlavə olunduqda relaksasiya tezliyi (dielektrik itkisinin maksimumuna uyğun gələn tezlik) böyük tezliklər tərəfə sürüşür. Hissəciklərin ölçüsü artdıqca bu sürüşmə daha çox nəzərə çarpır.

³Al-Zangana, A comparison between size dependent paraelectric and ferroelectric BaTiO_3 nanoparticle doped nematic and ferroelectric liquid crystals / S.Al-Zangana, M.Turner, I.Dierking // Journal of Applied Physics, – 2017. v.121, 085105, – p.1-12.



Şəkil 6. Təmiz (C-2) smektik A maye kristalın və onun müxtəlif ölçülü BaTiO₃ hissəciklərindən ibarət kolloidlərinin dielektrik nüfuzluğunun xəyali hissəsinin uzununa komponentinin tezlikdən asılılığı



Şəkil 7. Təmiz (C-2) smektik A maye kristalın və onun müxtəlif ölçülü BaTiO₃ hissəciklərindən ibarət kolloidlərinin dielektrik nüfuzluğunun eninə komponentinin xəyali hissəsinin tezlikdən asılılığı

Dielektrik nüfuzluğunun eninə toplananının (ϵ_{\perp}) da dispersiyası (şəkil 6) maye kristal molekullarında güclü $-C-NO_2$ və zəif $-COOH$ eninə dipol qruplarının relaksasiyası ilə bağlıdır. Molekulların uzun ox ətrafında fırlanması daha asandır. Ona görə də dielektrik nüfuzluğunun

eninə toplananının dispersiyası qat-qat yüksək tezliklərdə baş verir. Maye kristala BaTO₃ hissəcikləri əlavə olunduqda relaksasiya tezliyi kiçik tezliklər tərəfə sürüşür. BaTO₃ hissəcikləri (100 nm ölçülü hissəciklər istisna olmaqla) aşağı tezliklərdə dielektrik nüfuzluğunun uzununa komponentinin xəyali hissəsini (və ya dielektrik itkilərini) azaldır. Bunun səbəbi, polyarlaşmış hissəciklərin lokal elektrik sahəsinin ionları «tələyə salması» ilə bağlıdır. Tezlik artdıqca bu effekt zəifləyir, çünki elektrik sahəsinin istiqaməti əksinə dəyişdikdə hissəciklərin özlərinin, əks istiqamətdə yenidən polyarlaşması çətinləşir.

100 nm ölçülü BaTO₃ hissəcikləri isə, tərsinə, aşağı tezliklərdə dielektrik itkilərini artırır. Bu, bir tərəfdən, bu ölçüdəki hissəciklərin zəif polyarlaşması, yəni «ion tələsi» effektinin özünü zəif büruzə verməsi ilə bağlıdır. Digər tərəfdən də, bu hissəciklərin ölçüsü smektik maye kristalın molekullarının ölçüsünə (5-10 nm) nisbətən yaxın olduğundan, bu ölçü effekti nəticəsində maye kristalın maddi parametrləri əhəmiyyətli dərəcədə dəyişə, məsələn, translyasiya özlülüyünü dəyişə bilər. Bu isə maye kristalın elektrik keçiriciliyinin və dielektrik itkilərinin kəskin artmasına səbəb olur.

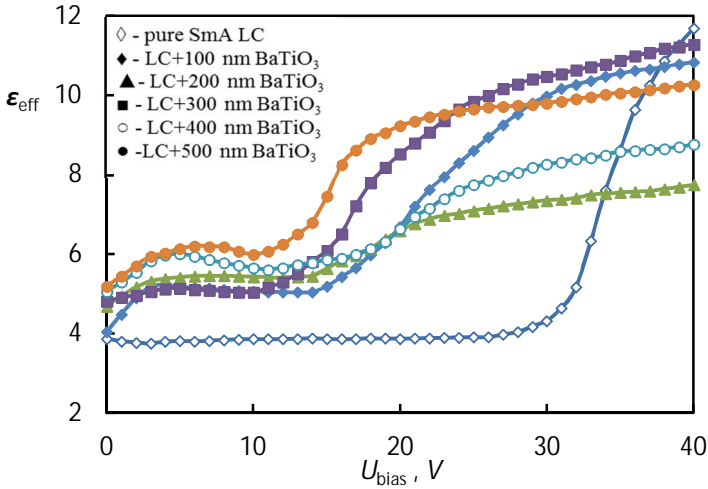
Dördüncü fəsildə volt-farad xarakteristikası əsasında seqnetoelektrik BaTiO₃ hissəciklərinin hər iki – müsbət ($\epsilon_{\parallel} > \epsilon_{\perp}$) və mənfi ($\epsilon_{\perp} > \epsilon_{\parallel}$) dielektrik anizotropiyalı maye kristalın astana gərginliyinə və digər elektrooptik xassələrinə təsiri tədqiq edilmişdir. Tədqiq olunan maye kristalın və uyğun kolloidlərin dielektrik nüfuzluğunun anizotropiyası müsbət işarəyə malik olduqda onlarda baş verən elektrooptik effekt planar-homeotrop keçidi şəklində olur. Astana gərginliyi (U_{th}) elektrooptik yuvacığın volt-farad xarakteristikasından tapılır, çünki planar-homeotrop keçid zamanı maye kristalın effektiv dielektrik nüfuzluğu (ϵ_{eff}) artır ki, bu da

$$C = \epsilon_0 \epsilon_{eff} \frac{S}{d} \quad (4)$$

düsturuna görə yuvacığın elektrik tutumunu artırır. Astana gərginliyi olaraq yuvacığın elektrik tutumunun, yəni maye kristalın dielektrik nüfuzluğunun artmağa başladığı gərginlik götürülür. Astana gərginliyini polyarizasiya mikroskopunda vizual olaraq planar teksturanın pozulduğu gərginlik kimi də müəyyən etmək olar. Lakin bu üsul dəqiq olmadığından astana gərginliyinin farad-volt və ya lümen-farad

xarakteristikasının köməyi ilə ölçülməsi daha məqsədə uyğundur.

Şəkil 8-də təmiz 10NF+5CB smektik A maye kristalın və onun əsasında hazırlanmış kolloidlərin effektiv dielektrik nüfuzluğunun elektrooptik yuvacığa verilən sürüşmə gərginliyindən asılılıq qrafikləri göstərilmişdir. Gözləndiyi kimi, BaTiO₃ hissəciklərinin əlavə olunması maye kristalın dielektrik nüfuzluğunun eninə toplananının (ϵ_{\perp}) qiymətini bir qədər artırır. Bütün kolloidlərdə dielektrik nüfuzluğunun gərginlik asılılığında kiçik gərginliklərdə ($U < 10V$) təmiz maye kristala xas olmayan zəif bir maksimum (U_{max}) müşahidə olunur. Yəni dielektrik nüfuzluğu əvvəlcə zəif artır, sonra isə zəif azalır. Daha sonra müəyyən gərginlikdən başlayaraq U_{th} -astana gərginliyi dielektrik nüfuzluğunun qiyməti maye kristalda baş verən planar-homeotrop keçidi ilə bağlı olaraq yenidən artır və bu artım kifayət qədər kəskin xarakter daşıyır.



Şəkil 8. Təmiz smektik A maye kristalın və kolloidlərin effektiv dielektrik nüfuzluğunun elektrooptik yuvacığa verilən sürüşmə gərginliyindən asılılığı

Qrafikdəki verilənlərdən alınan nəticələri aşağıdakı cədvəldə ümumiləşdirmək olar.

Cədvəldən görüldüyü kimi:

1) maye kristala BaTiO₃ hissəciklərinin əlavə olunması dielektrik nüfuzluğunun eninə toplananını artırır;

Cədvəl 1. Təmiz smektik A maye kristalın və kolloidlərin planar-homeotrop keçidə uyğun gərginlik qiymətləri

Nümunə	Təmiz SmA	SmA+ BaTiO ₃ (100 nm)	SmA+ BaTiO ₃ (200 nm)	SmA+ BaTiO ₃ (300 nm)	SmA+ BaTiO ₃ (400 nm)	SmA+ BaTiO ₃ (500 nm)
ε_{\perp}	3.9	4.0	4.6	4.8	5.0	5.2
U_{\max}		3	5	6	6	6
U_{th}	26	14	14	10	11	18

2) kolloidlərin $\varepsilon_{\perp}(U)$ asılılığında zəif bir maksimum alınır, yəni gərginlik artdıqca dielektrik nüfuzluğu əvvəlcə artır, sonra zəif azalır. Bu maksimuma uyğun gələn gərginlik BaTiO₃ hissəciklərinin ölçüsü 100 nm-dən 300 nm-ə qədər artdıqca artır, 400 nm-dən 500 nm-ə qədər sonra isə dəyişmir;

3) BaTiO₃ hissəcikləri smektik A maye kristalın astana gərginliyini kəskin azaldır və bu azalma 300 və 400 nm ölçülü hissəciklərdə daha güclüdür.

Alınan nəticələri izah etmək üçün barium titanat hissəciklərinin strukturu və xassələri ilə bağlı müasir nəzəriyyələrə nəzər yetirsək görürük ki, seqnetoelektrik hissəciklər tetraqonal quruluşa malik kö-tükdən və kubik quruluşa malik 5 *mkm* qalınlıqlı qabıqdan ibarətdir⁴.

Submikron BaTiO₃ hissəcikləri monokristal quruluşa malikdir və elektrik sahəsi olmadıqda polidomen halda olur. Spontan polyarizasiyanın yarandığı *c* oxu istiqamətində dielektrik nüfuzluğunun qiyməti (ε_c^{FP}), *a* oxu istiqamətindəki qiymətindən (ε_a^{FP}) xeyli böyük qiymətə malikdir. Kolloid izotrop fazadan smektik A fazaya keçən zaman seqnetoelektrik BaTiO₃ hissəciklərinin *c* oxu xaotik yönəllər və onların dielektrik nüfuzluğuna verdiyi pay $f \cdot \varepsilon_a^{FP}$ orta qiymət kimi götürülə bilər. Elektrooptik yuvacığa sürüşmə gərginliyi tətbiq etdikdə elektrik sahəsinin təsiri ilə BaTiO₃ hissəciklərini fırladan moment yaranır və hissəciklər özlərinin *c* oxu ilə elektrik sahəsi istiqamətində yönəllər və onların kolloidin effektiv dielektrik nüfuzluğuna verdiyi

⁴Sedych P. Size Effects in Fine Barium Titanate Particles / P. Sedych, D. Michel, E.V. Charnaya // Ferroelectrics, -2010. v.400, -p.135–143.

pay daha böyük olur. Müəyyən gərginlikdə (U_{\max}) bu pay maksimuma çatır ($f \cdot \varepsilon_c^{FP}$), çünki bu gərginlikdə hissəciklərin c oxunun sahə istiqamətində düzülməsi başa çatır.

Dielektrik nüfuzluğunun azalması seqnetolektrik hissəciklərin polyarizasiyasının elektrik sahəsinin intensivliyindən qeyri-xətti asılılığı ilə izah oluna bilər. Doğrudan da elektrooptik yuvacığa verilən gərginlik artdıqca seqnetolektrik hissəciklərin polyarizasiyası doyma halına yaxınlaşır, yəni elektrik sahəsinin intensivliyindən asılı olaraq polyarizasiyanın artma sürəti (P/E) zəifləyir. Onda

$$\varepsilon^{FP} = 1 + \frac{P}{\varepsilon_0 E} \quad (5)$$

düsturuna görə seqnetoelektrik hissəciyin və (2) düsturuna görə bütövlükdə kolloidinin elektrik nüfuzluğunun azalmasına gətirib çıxarır. Böyük gərginliklərdə həm kolloidin, həm də təmiz smektik A maye kristalın dielektrik nüfuzluğunun kəskin artması, yuxarıda qeyd edildiyi kimi, planar-homeotrop keçidi ilə bağlıdır. Bu keçid nəticəsində maye kristalın özünün dielektrik nüfuzluğu (ε^{LC}) təxminən 3 dəfə artır və (2) düsturuna görə, bu kolloidinin effektiv dielektrik nüfuzluğunun da kəskin artmasına səbəb olur. Polyarlaşmış BaTiO₃ hissəciklərinin bilavasitə səthi yaxınlığında

$$E_{loc} \sim \frac{P}{\varepsilon_0 \varepsilon^{LC}} = \frac{\varepsilon_0 (\varepsilon^{FP} - 1) E_0}{\varepsilon_0 \varepsilon^{LC}} = \frac{(\varepsilon^{FP} - 1) E_0}{\varepsilon^{LC}} \quad (6)$$

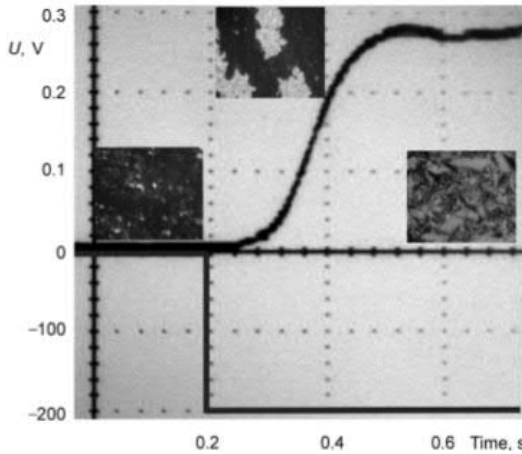
tərtibində elektrik sahəsi yaranır. ε^{LC} , ε^{FP} və E_0 kəmiyyətlərinin qiymətlərinin uyğun olaraq 10, 10³ və 10⁶ V/m tərtibində olduğunu nəzərə alsaq, lokal sahənin tərtibi üçün $E_{loc} \sim 10^8$ V/m alarıq ki, bu da maye kristal molekullarını BaTiO₃ hissəciklərinin ətrafında döndərmək üçün kifayət edir. Nəticədə, BaTiO₃ hissəcikləri daha kiçik gərginliklərdə planar-homeotrop keçidin başladığı mərkəz rolunu oynayırlar.

Mənfi dielektrik anizotropiyalı smektik A maye kristalda homeotrop-planar keçidin astana gərginliyini volt-farad xarakteristikasının köməyi ilə təyin etmək mümkün deyil, çünki E7-20 imitansmetrində tətbiq oluna biləcək ən böyük sürüşmə gərginliyi 120 V-dur ki, bu da Frederiks keçidi yarada bilmir. Ona görə də baxılan sistemlərdə astana

gərginliyi polyarizasiya mikroskopunda vizual şəkildə, daha dəqiq rəqəm almaq üçün elektrooptik yuvacığın volt-lümen xarakteristikasının köməyi ilə təyin edilmişdir. Nəticələr Cədvəl 2-də ümumiləşdirilmişdir. Cədvəldəki keçid müddətləri elektrooptik yuvacığa sabit gərginlik verdikdə onun işıqburaxmasının zamandan asılılığına görə təyin edilmişdir (şəkil 9).

Cədvəl 2. Təmiz smektik A maye kristalın və kolloidlərin homeotrop-planar keçidə uyğun gərginlik və relaksasiya müddətinin qiymətləri

Nümunə	Təmiz SmA	SmA+ BaTiO ₃ (100 nm)	SmA+ BaTiO ₃ (200 nm)	SmA+ BaTiO ₃ (300 nm)	SmA+ BaTiO ₃ (400 nm)	SmA+ BaTiO ₃ (500 nm)
U_{th}, V	230	220	180	160	145	135
τ, san	1,6	1,3	0,18	0,22	0,28	0,35



Şəkil 9. Homeotrop-planar keçid zamanı işıqburaxmanın zamandan asılılığı.

Cədvəldəki verilənlər aşağıdakı kimi dəyərləndirilə bilər:

1) smektik A maye kristala BaTiO₃ hissəciklərinin əlavə olunması homeotrop-planar keçidin astana gərginliyini aşağı salır və hissəciklərin ölçüsü böyüdükcə bu azalma daha da güclənir;

2) 100 nm ölçülü hissəciklər istisna olmaqla BaTiO₃ hissəcikləri homeotrop-planar keçidin müddətini kəskin azaldır. 200 nm ölçülü BaTiO₃ hissəcikləri halında bu effekt maksimum olur (9 dəfə).

Hissəciklərin ölçüsü artdıqca bu effekt bir qədər zəifləyir.

Mövcud nəzəriyyələr əsasında yuxarıda göstərilən qanunauyğunluqları izah etmək mümkündür. Mənfi dielektrik anizotropiyasına malik smektik A maye kristalda baş verən homeotrop-planar keçid xarici elektrik sahəsinin təsiri ilə təsadüfi defektlərdə rüşeymlərin yaranması, onların böyüməsi və bir-birini örtməsi şəklində baş verir. Parodi nəzəriyyəsinə görə bu keçidin astana gərginliyi⁵

$$U_{th}^2 = \frac{W_a d}{2\varepsilon_0 |\Delta\varepsilon| l} \quad (7)$$

düsturu ilə təyin olunur (burada W_a smektik quruluşun təhrif olunması ilə bağlı elastik enerjilərin cəmi, l isə molekulun uzunluğudur). Biz gördük ki, BaTiO₃ hissəcikləri C2 maye kristalının dielektrik anizotropiyasının mütləq qiymətini azaldır. Onda (7) düsturuna görə homeotrop-planar keçidin astana gərginliyi artmalıdır. Lakin kolloidlər üçün eksperimental nəticələr bunun əksini deyir. Bu ziddiyyət ya Parodi düsturunun kolloid halında tətbiq oluna bilmədiyini, ya da düsturdakı W_a kəmiyyətinin qiymətinin kəskin azalması ilə də bağlı ola bilər. Elektrooptik yuvacığa 100 V tərtibində gərginlik verdikdə bu hissəciklərin olduğu yerdə yaranan elektrik sahəsinin intensivliyi

$$E_{ext} = \frac{U}{d \cdot \varepsilon_{\perp}} \approx \frac{100 \text{ V}}{2 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot 5} = 10^6 \frac{\text{V}}{\text{m}} = 10 \frac{\text{kV}}{\text{cm}} \quad (8)$$

tərtibində olur. Bu sahə seqnetoelektrik BaTiO₃ hissəciklərini polyarlaşdırmaq üçün kifayət edir.

200 nm ölçülü BaTiO₃ hissəciklərinin sferik formada olduğunu qəbul etsək, onların əldə etdiyi dipol momentini qiymətləndirmək olar:

$$p = \frac{4\pi R^3}{3} \cdot P_s \approx \frac{4 \cdot 3 \cdot (10^{-7} \text{ m})^3}{3} \cdot 0,1 \frac{\text{C}}{\text{m}^2} = 4 \cdot 10^{-22} \text{ C} \cdot \text{m} . \quad (9)$$

Burada hissəciklərin ölçüsü (radiusu) $100 \text{ nm} = 10^{-7} \text{ m}$, spontan polyarizasiya vektorunun modulu isə $0,1 \text{ C/m}^2$ götürülmüşdür. p dipol momentinə malik olan zərrəciyin ondan r məsafədə yaratdığı elektrik sahəsinin intensivliyi (3) düsturu ilə təyin olunur. Polyarlaşmış hissəciklərin oxu boyunca ($\theta=0$) onların səthi yaxınlığında ($r=0,5 \text{ mkm}$) bu sahənin intensivliyi

⁵Blinov L.M. Electrooptic Effects in Liquid Crystal Materials / L.M.Blinov, V.G. Chigrinov // Springer Verlag, New York,-1994.-p.464.

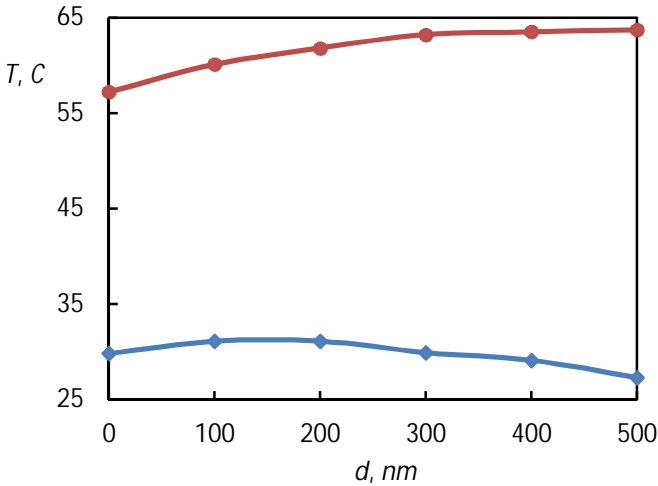
$$E_{FNP} \approx \frac{p}{4\pi\epsilon_0 r^3} \approx \frac{4 \div 10^{-22}}{4 \cdot 3 \cdot 10^{-11} \cdot (5 \cdot 10^{-7})^3} \approx 6 \cdot 10^6 \frac{V}{m} = 6 \frac{V}{mkm} \quad (10)$$

alınır ki, bu da maye kristal molekullarını döndərmək üçün kifayətdir. Beləliklə, alınır ki, BaTiO₃+C2 kolloidi halında homeotrop-planar keçidinin astana gərginliyinin təmiz C2 smektik maye kristalı ilə müqayisədə az olması polyarlaşmış BaTiO₃ hissəciklərinin yaratdığı lokal sahə ilə bağlıdır. Zərrəciklərin ölçüsü böyüdükcə, (9) düsturuna görə, onun dipol momenti də artır və səthi yaxınlığında yaratdığı lokal sahə də güclənir. Bu isə daha az gərginliklərdə homeotrop-planar keçidin yaranmasına səbəb olur. Yuxarıda qeyd olundu ki, elektro-optik yuvacıqda baş verən homeotrop-planar keçid müəyyən defektlərdən rüşeym şəklində başlayıb böyüyür və proses, bu ərazilər bir-birini örtənə qədər davam edir (şəkil 9). Aydınır ki, keçid müddəti ilkin rüşeymlərin sayından və onların divarının böyümə sürətindən asılıdır. Smektik A maye kristala barium titanat hissəcikləri əlavə etdikdə bu hissəciklər rüşeymlərin yarandığı defekt rolunu oynayır. Ona görə də C2+BaTiO₃ kolloidində homeotrop-planar keçidinin sürəti təmiz C2 maye kristalı ilə müqayisədə artır (keçid müddəti azalır). Keçid müddətinə təsir edən digər faktor rüşeym divarının böyümə sürətidir ki, bu da tətbiq olunan xarici gərginliklə astana gərginliyi arasındakı fərqdən ($U - U_{th}$) asılıdır: bu fərq nə qədər böyük olarsa, rüşeym divarının böyümə sürəti bir o qədər böyük, keçid müddəti isə bir o qədər kiçik olar. Beləliklə, homeotrop haldan planar hala keçid müddəti BaTiO₃ hissəciklərinin sayından və yaratdıqları lokal sahənin intensivliyindən asılıdır. Həcm payının eyni bir qiymətində hissəciklərin ölçüsü kiçildikdə, bir tərəfdən, onların sayı artır və bu keçid sürətinə müsbət təsir edir, digər tərəfdən isə BaTiO₃ hissəciklərinin yaratdığı lokal sahə zəifləyir və bu keçid sürətinə mənfi təsir edir. Cədvəl 2-dən görünür ki, bu iki əks faktorda dominant rolunu birinci oynayır. 100 nm ölçülü BaTiO₃ hissəcikləri halındakı (keçid sürətinin kiçik olması) istisna da bu hissəciklərin seqnetoelektrik xassəsinin zəif olması (və ya heç olmaması) ilə bağlıdır.

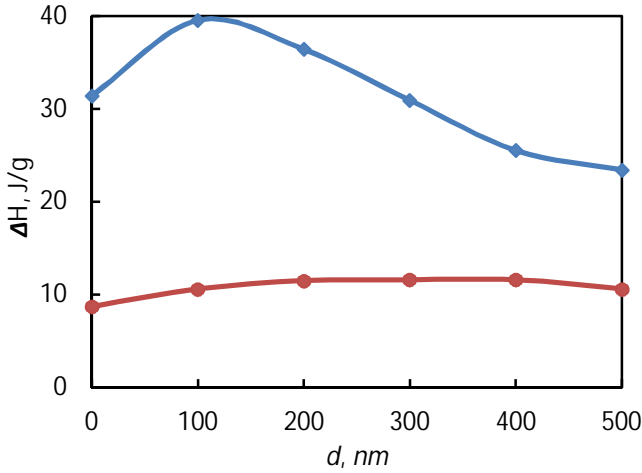
Beşinci fəsilə DSK metodu ilə tədqiq edilən təmiz maye kristalların faza keçidlərinə müxtəlif ölçülü BaTiO₃ hissəciklərinin təsiri araşdırılmışdır. 10NF+5CB smektik A maye kristalı və onun kolloidlərinə uyğun DSK termoqramlarında izotrop-nematik və nematik-

smektik A faza keçidlərinə uyğun gələn piklər əksər hallarda bir-birini örtüyündən onları ayırd etmək müəyyən çətinliklər yaradır. Ona görə də əsas diqqət mənfi dielektrik anizotropiyalı C2 maye kristalına ayrılmışdır.

C2 maye kristalında aparılmış ölçmələrin nəticələri şəkil 10 və 11-də göstərilmişdir. Alınan qanunauyğunluqları aşağıdakı kimi təqdim etmək olar: Kristal – smektik A faza keçidi temperaturu (T_{CA}) $BaTiO_3$ hissəciklərinin kiçik ölçülərində (100 nm, 200 nm) yuxarı qalxır. Böyük ölçülərində (300-500 nm) isə aşağı sürüşür. $BaTiO_3$ hissəcikləri T_{AI} smektik A – izotrop faza keçidi temperaturunu (smektik A fazanın termik stabilliyini) artırır və hissəciklərin ölçüsü böyüdükcə bu artım daha da böyük olur. Oxşar sözləri kristal – smektik A faza keçidinin entalpiyası (ΔH_{AI}) haqqında da söyləmək olar. $BaTiO_3$ hissəcikləri zəif I növ faza keçidi olan smektik A – izotrop faza keçidini bir qədər gücləndirir, yəni ΔH_{AI} faza keçidi entalpiyasını) bir qədər artırır.



Şəkil 10. Smektik A maye kristalın faza keçidi temperaturlarının əlavə olunmuş $BaTiO_3$ hissəciklərinin ölçüsündən asılılıq qrafiki: *dairelər* – T_{AI} smektik A – izotrop faza keçidi temperaturu, *romblar* – T_{CA} kristal – smektik A faza keçidi temperaturu.



Şəkil 11. Smektik A maye kristalın faza keçidi entalpiyalarının əlavə olunmuş BaTiO₃ hissəciklərinin ölçüsündən asılılıq qrafiki: *dairələr* – ΔH_{AI} smektik A – izotrop faza keçidi entalpiyası, *romblar* – ΔH_{CA} kristal – smektik A faza keçidi entalpiyası.

Bizim baxdığımız maye kristalda nematik faza yoxdur, smektik A faza birbaşa izotrop fazaya keçir və buna görə keçid kifayət qədər güclü I növ faza keçidi şəklində olur $\Delta H_{AI} = 8.7 \text{ J/g}$. BaTiO₃ hissəciklərinin smektik A – izotrop faza keçidini daha da gücləndirməsi (keçid entalpiyasını artırması) və smektik A fazanın termik stabilliyini (T_{AI}) artırması, oriyentasiya nizam parametrinin artması ilə izah olunur. Əvvəlki bölmələrdə qeyd etdiyimiz kimi, seqnetoelektrik BaTiO₃ hissəcikləri maye kristalda ehtə paylanırlar ki, onların optik oxları (spontan polyarizasiyanın yarandığı üstün istiqamət) ilə maye kristalın optik oxu (direktor) paralel olsun. Bunun nəticəsində BaTiO₃ hissəcikləri müəyyən dipol momenti əldə edirlər ki, bu dipolların da yaratdığı lokal elektrik sahəsi maye kristalın nizam parametrini artırır. Bu isə son nəticədə həm smektik A izotrop faza keçidi temperaturunun, həm də keçid entalpiyasının artmasına səbəb olur. Hissəciklərin ölçüsü artdıqca onların dipol momenti də artdığından adı çəkilən kəmiyyətlərin qiyməti daha çox artır. BaTiO₃ hissəciklərinin kristal-smektik A faza keçidini aşağı sürüşdürməsi seqnetoelektrik hissəciklərin kristal-smektik A keçidi üçün cavabdeh olan qarşılıqlı təsiri

zəiflətməsi ilə izah oluna bilər.

Müsbət dielektrik anizotropiyalı maye kristala (5CB+10NF) əlavə edilmiş BaTiO₃ hissəcikləri kristal-smektik A faza keçidi temperaturunu zəif də olsa aşağıya doğru sürüşdürür. Nematik-izotrop faza keçidinin temperaturunu isə artırır. Təcrübədə istifadə edilmiş maye kristalın xüsusiyyətinə uyğun olaraq, demək olar ki, kristal-smektik A faza keçidi I növ güclü faza keçididir. Smektik A – nematik faza keçidi isə II növ və ya zəif I növ faza keçididir. Bizim təcrübələrdə bu keçidə uyğun gələn pik BaTiO₃ hissəciklərinin yalnız 500 nm ölçüsündə çox zəif hiss edilir. Nematik-izotrop keçidi zəif I növ faza keçididir. Nematik-izotrop faza keçidinin temperaturun artması isə

$$T_{NI} = 1.03 \times \frac{\phi_{NP} \Delta \epsilon P^2}{135 k_B \rho_{LC} \epsilon_0 \epsilon^2} \quad (11)$$

düsturu ilə izah oluna bilər. Burada ϕ_{NP} – nanohissəciklərin həcm payı, P – polyarizasiya, ρ_{LC} – maye kristalın sıxlığıdır. Hissəciklərin daha böyük ölçüdə spontan polyarizasiyasının daha böyük qiymət alması ilə bağlı faza keçidi temperaturu daha da artır⁶.

NƏTİCƏ

1. Müəyyən edilmişdir ki, submikron ölçülü BaTiO₃ hissəcikləri dielektrik anizotropiyasının işarəsindən asılı olmayaraq smektik A maye kristalın dielektrik nüfuzluğunun yalnız uzununa toplananını əhəmiyyətli dərəcədə artırır. BaTiO₃ hissəciklərinin ölçüsünün artması ilə bu artma daha güclü hiss olunur. Bu nəticə, BaTiO₃ hissəciklərinin polyar oxu ilə maye kristalın direktoru arasındakı qarşılıqlı təsirlə izah olunmuşdur.
2. BaTiO₃ hissəcikləri həm müsbət, həm də mənfi dielektrik anizotropiyalı smektik A maye kristalın dielektrik nüfuzluğunun yuxarı tezliklərdə (10^5 Hz) müşahidə olunan dispersiyasını kiçik tezliklər tərəfə sürüşdürür. Bu sürüşmə BaTiO₃ hissəciklərinin yaratdığı lokal sahənin molekulyar dipolların fırlanmasına göstərdikləri əks təsirlə izah olunmuşdur.
3. Müəyyən olunmuşdur ki, BaTiO₃ hissəcikləri smektik A maye

⁶ Lin, Y. On the phase transitions of 8CB/Sn2P2S6 liquid crystal nanocolloids / Y. Lin, R. Douali, F. Dubois // The European Physical Journal E, – 2015. v.38, 103, – p.1-8

kristalda (10NF+5CB) baş verən Frederiks keçidinin (həm planar-homeotrop, həm də homeotrop-planar) astana gərginliyini təqribən 2 dəfə azaldır. Bu azalma maye kristalın dielektrik anizotropiyasının artması ilə yox, polyarlaşmış BaTiO₃ hissəcikləri ətrafında yaranan lokal sahə ilə izah olunmuşdur.

4. BaTiO₃ hissəcikləri maye kristalda baş verən Frederiks keçidinin sürətini ən azı bir tərtib artırır ki, bu da BaTiO₃ hissəciklərinin bilavasitə keçidin başladığı mərkəzlər rolunda çıxış etməsi ilə izah olunmuşdur.
5. BaTiO₃ hissəcikləri smektik A-izotrop faza keçidinin temperaturunu bir neçə dərəcə artırır, digər tərəfdən kristal-smektik A faza keçidi temperaturuna zəif təsir edir. Nəticədə, BaTiO₃ hissəciklərinin köməyi ilə smektik A fazanın temperatur intervalının genişləndirilməsi imkanı yaranır.

Dissertasiya mövzusu üzrə çap olunmuş elmi işlər:

1. Humbatov, Sh.A. The study of BaTiO₃ nanoparticles effect on threshold properties of Liquid Crystal 5CB / Sh.A. Humbatov, M.A. Ramazanov, A.R. İmaməliyev // Molecular Crystals and Liquid Crystals, – 2017. 646, – p.263-267.
2. Hübətov, Ş.Ə., BaTiO₃ hissəciklərinin smektik A maye kristalının faza keçidlərinə təsirinin tədqiqi / Ş.Ə. Hübətov, M.Ə. Ramazanov, A.R. İmaməliyev, Z.Ə. Ağaməliyev, M.N. Mirzəyev // – Bakı: AJP Fizika jurnalı, – 2017. XXIII, №2, – s.15-19.
3. İmaməliyev, A.R., Əks işarəli dielektrik anizotropiyalı smektik A maye kristalların dielektrik xassələrinə BaTiO₃ hissəciklərinin təsirinin öyrənilməsi / A.R. İmaməliyev, M.Ə. Ramazanov, Ş.Ə. Hübətov // – Bakı: Bakı Universitetinin Xəbərləri, fizika-riyaziyyat elmləri seriyası, – 2017. №4, – s.139-145.
4. İmaməliyev, A.R. Müxtəlif ölçülü BaTiO₃ hissəciklərinin smektik a maye kristalın astana xassələrinə təsiri / A.R. İmaməliyev, M.Ə. Ramazanov, Ş.Ə. Hübətov [və b.] // AJP Fizika jurnalı, – Bakı: –2018. XXIV, №4, – s. 27-30.
5. Ramazanov, M.A. Effect of Barium Titanate Particles on Dielectric and Electro-Optical Properties of a Smectic-a Liquid Crystal / M.A. Ramazanov, A.R. İmaməliyev, S.A. Humbatov [et al.] //

- Russian Physics Journal, – 2018. v.60, – p.1659-1666.
6. Imamaliyev, A.R. Effect of ferroelectric BaTiO₃ particles on the threshold voltage of a smectic A liquid crystals / A.R. Imamaliyev, M.A. Ramazanov, S.A. Humbatov // Beilstein Journal of Nanotechnology, – 2018. 9, – p.824-828.
 7. Imamaliyev, A.R. Influence of size of small ferroelectric barium titanate particles on dielectric properties of smectic a liquid crystal with a positive dielectric anisotropy / A.R. Imamaliyev, M.A. Ramazanov, Sh.A. Humbatov [et al.] // Journal of Low Dimensional Systems, – Baku: – 2019. 3(2), – p.19-22.
 8. Hübətov, Ş.Ə. Mənfi dielektrik anizotropiyalı smektik a maye kristalin dielektrik xassələrinə barium titanat hissəciklərinin ölçü effektinin təsiri // – Bakı: AJP Fizika jurnalı, – 2019. XXV, №2, – s. 50-56.
 9. Hübətov, Ş.Ə. BaTiO₃ hissəciklərinin müsbət dielektrik anizotropiyalı smektik a maye kristalin faza keçidlərinə təsiri // – Bakı: AJP Fizika jurnalı, – 2019. XXV, №4, – s. 44-49.
 10. İmaməliyev, A.R., Mənfi dielektrik anizotropiyalı smektik a maye kristalin elektro-optik xassələrinə BaTiO₃ hissəciklərinin ölçü effektinin təsiri / A.R. İmaməliyev, M.Ə. Ramazanov, Ş.Ə. Hübətov [və b.] // – Bakı: AJP Fizika jurnalı, – 2020. XXVI, №3, –s. 13-18.
 11. Ramazanov, M.Ə., İmaməliyev, A.R., Hübətov, Ş.Ə., 5CB nematik maye kristalının astana gərginliyinə BaTiO₃ nanohissəciklərinin təsiri // Fizika Problemləri İnstitutunun yaradılmasının 10 illiyinə həsr olunmuş «Opto-, nanoelektronika, kondensə olunmuş mühit və yüksək enerjilər fizikası» Beynəlxalq konfransı, Bakı: – 25 – 26 dekabr, – 2015, – s. 76-78.
 12. Humbatov, Sh.A., Ramazanov, M.A., Imamaliyev, A.R. The study of BaTiO₃ nanoparticles effect on threshold properties of Liquid Crystal 5CB // 26th International Liquid Crystal Conference, Kent State University, USA, – 31 July – 5 August, – 2016.
 13. Ramazanov, M.Ə., İmaməliyev, A.R., Hübətov, Ş.Ə., Mirzəyev, M.N. Smektik A fazalı maye kristalda faza keçidlərinə BaTiO₃ nanohissəciklərinin ölçü effektinin təsiri / Fizikanın aktual problemləri» IX Respublika elmi konfransı, Bakı, – 22 dekabr, – 2016. -s.181-183.

14. Гумбатов, Ш.А., Рамазанов, М.А., Имамалиев, А.Р., Ибрагимов, Т.Д., Агамалиев, З.А. Влияние частиц титаната бария на диэлектрические свойства смектического А жидкого кристалла // Proceedings of International Conference «Modern Trends in Physics», – Baku: – 20 – 22 April, – 2017, – p. 89.
15. Hübətov, Ş.Ə., Ramazanov, M.Ə., İmaməliyev, A.R., Ağamalıyev, Z.Ə., İbrahimov, T.C. Seqnetoelektrik barium titanat hissəciklərinin smektik A maye kristalının dielektrik xassələrinə təsiri / I International scientific conference of young researchers dedicated to the 94th Anniversary of the National leader of Azerbaijan Heydar Aliyev, – Baku: Baku Engineering University, – 05 – 06 May, – 2017, – s.77-78.
16. Ramazanov, M.A., Imamaliyev, A.R., Humbatov, Sh.A. Effect of ferroelectric BaTiO₃ particles on threshold voltage of smectic A liquid crystal // 14th European Conference on Liquid Crystals, Moscow State University, Moscow, Russia, – 25 – 30 June, – 2017.
17. Humbatov, Sh.A., Imamaliyev, A.R., Ramazanov, M.A., Bayramov G.M. Size effect of small ferroelectric BaTiO₃ particles on dielectric properties of a smectic A liquid crystal with negative dielectric anisotropy / International Conference «Modern Trends in Physics», – Baku: – 1 – 3 May, – 2019. – p.61-62.

Dissertasiyanın müdafiəsi **10 fevral 2022-ci il** tarixində saat **15⁰⁰-da** Bakı Dövlət Universitetinin nəzdində fəaliyyət göstərən BFD 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 **07 yanvar 2022-ci il** tarixində zəruri ünvanlara göndərilmişdir.

Çapa imzalanıb: **30.12.2021**
Kağızın formatı: **60×90 1/16**
Həcm: **37 990 işarə**
Tiraj: **100 nüsxə**