ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.02/30.12.2019.FM.65.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ

ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ

МАХМАНОВ УРОЛ КУДРАТОВИЧ

C_{60}, C_{70} ОРГАНИК МАКРОМОЛЕКУЛАЛАРИ ҲАМДА УГЛЕРОДЛИ НАНОТРУБКАЛАРНИНГ ЭРИТМАЛАРДА ВА БУҒЛАНАЁТГАН ТОМЧИЛАР ҲАЖМИДА ЎЗ-ЎЗИДАН ТАШКИЛЛАНИШ МЕХАНИЗМЛАРИ

01.04.05 – Оптика

ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ ДОКТОРИ (DSc) ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ

ТОШКЕНТ – 2021

УДК 546.26.043; 539.23; 535

Докторлик (DSc) диссертацияси автореферати мундарижаси

Оглавление автореферата докторской (DSc) диссертации

Contents of the Doctoral (DSc) Dissertation Abstract

Махманов Урол Кудратович
C_{60}, C_{70} органик макромолекулалари ҳамда углеродли нанотрубкаларнинг эритмаларда ва буғланаётган томчилар ҳажмида ўз-ўзидан ташкилланиш механизмлари..... 3

Махманов Урол Кудратович
Механизмы самоорганизации органических макромолекул фуллеренов C_{60}, C_{70}, а также углеродных нанотрубок в растворах и в объёме испаряющихся капель..... 25

Makhmanov Urol Kudratovich
The mechanisms of self-organization of organic macromolecules of fullerenes C_{60}, C_{70}, as well as carbon nanotubes in solutions and in the volume of evaporating droplets 47

Эълон қилинган ишлар рўйхати
Список опубликованных работ
List of published works 51

ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.02/30.12.2019.FM.65.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ

ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ

МАХМАНОВ УРОЛ КУДРАТОВИЧ

C_{60}, C_{70} ОРГАНИК МАКРОМОЛЕКУЛАЛАРИ ҲАМДА УГЛЕРОДЛИ НАНОТРУБКАЛАРНИНГ ЭРИТМАЛАРДА ВА БУҒЛАНАЁТГАН ТОМЧИЛАР ҲАЖМИДА ЎЗ-ЎЗИДАН ТАШКИЛЛАНИШ МЕХАНИЗМЛАРИ

01.04.05 – Оптика

ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ ДОКТОРИ (DSc) ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ

ТОШКЕНТ – 2021

Докторлик (DSc) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2020.4.DSc/FM169 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Ион-плазма ва лазер технологиялари институтида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифасида (http://iplt.uz/) ҳамда «Ziyonet» Ахборот-таълим порталида (www.ziyonet.uz) жойлаштирилган.

Илмий маслаҳатчи:	**Коххаров Абдулмуталлиб Мамаджанович** физика-математика фанлари доктори
Расмий оппонентлар:	**Нематов Шерзод Каландарович** физика-математика фанлари доктори, профессор
	Пайзиев Шермухаммад Далиевич физика-математика фанлари доктори, кат.и.х.
	Рахматуллаев Илёс Арзимуродович физика-математика фанлари доктори, доцент
Етакчи ташкилот:	**Ўзбекистон Миллий университети**

Диссертация ҳимояси Ион-плазма ва лазер технологиялари институти ҳузуридаги DSc.02/30.12.2019.FM.65.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2021 йил «28» май соат 14⁰⁰ даги мажлисида бўлиб ўтади (Манзил: 100125, Тошкент ш., Дўрмон йўли кўчаси, 33-уй. Тел./факс: (99871) 262-32-54, e-mail: info@iplt.uz, Ион-плазма ва лазер технологиялари институти мажлислар зали).

Диссертация билан Ион-плазма ва лазер технологиялари институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (5 рақами билан рўйхатга олинган). Манзил: 100125, Тошкент ш., Дўрмон йўли кўчаси, 33-уй. Тел./факс: (99871) 262-31-69.

Диссертация автореферати 2021 йил « 12 » май куни тарқатилди.

(2021 йил « 12 » май даги 5 рақамли реестр баённомаси).

Х.Б.Ашуров
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш раиси, т.ф.д., профессор

И.Д.Ядгаров
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш илмий котиби, ф.-м.ф.д. катта илмий ходим

Б.Е.Умирзаков
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш қошидаги илмий семинар раиси ф.-м.ф.д., профессор

КИРИШ (докторлик диссертацияси (DSc) аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурияти. Бугунги кунда жаҳонда, углероднинг наноўлчамли янги аллотроп шаклларининг, хусусан C_{60}, C_{70} фуллеренлари ва углеродли нанотрубкаларнинг эритмалардаги физик хусусиятларини тадқиқ этишга қизиқиш доимий равишда ошиб бормоқда. Эритмалардаги фуллерен молекулаларининг ва углеродли нанотрубкаларнинг ўз-ўзидан ташкилланиши натижасида олинган нанокластерлар ва наноструктуралар ноёб истиқболли нанообъектлар сифатида намоён бўлади ва янги функционал наноматериалларни олиш учун зарур хом-ашё ҳисобланади. Шу жиҳатдан суюқ системаларда наноўлчамли объектларнинг ўз-ўзидан ташкилланиш ва ўз-ўзидан йиғилиш жараёнларини тадқиқ этиш замонавий физиканинг муҳим вазифаларидан бири бўлиб қолмоқда.

Сунгги йилларда эритмалардаги моддаларнинг молекуляр ўз-ўзидан ташкилланиш жараёнларини ўрганишга, хусусан, эритмаларнинг буғланаётган томчилари ҳажмида наноўлчамли структураларни синтез қилишга катта эътибор берилмоқда. Бундай тадқиқотларга қизиқишнинг тобора ортиб бориши, биринчи навбатда, ноёб физик-кимёвий хусусиятларга эга наноматериаллар олишнинг янги юқори самарали усулларини яратиш, шунингдек, улар асосида турли кўп функцияли қурилмаларни яратиш истиқболлари билан боғлиқ.

Ўзбекистонда наноўлчамли материаллар ҳақидаги замонавий фанни ривожлантиришга, хусусан, турли хил наноструктурали объектларни синтез қилишга катта эътибор қаратилмоқда. Хусусан, Ўзбекистон олимлари томонидан наноструктурали материалларнинг бошқариладиган синтези бўйича муҳим натижалар олинди. Уларнинг ўлчам хусусиятлари ҳамда ночизиқли оптик хоссалари аниқланди. Ўзбекистон Республикасини 2017-2020 йилларда ривожлантириш стратегиясига асосан «илмий-тадқиқот ва инновацион фаолиятларни рағбатлантириш, илмий-инновацион ютуқларни амалиётга тадбиқ этишнинг самарали механизмларини ишлаб чиқиш»[1] вазифалари белгилаб берилган. Шунга кўра, C_{60}, C_{70} фуллеренлари органик макромолекулаларининг, шунингдек углеродли нанотрубкаларнинг ҳам эритмаларда, ҳам эритмаларнинг буғланаётган томчилари ҳажмида ўз-ўзидан ташкилланиш жараёнларининг физик механизмларини тадқиқ этиш муҳим аҳамиятга эга.

Ўзбекистон Республикаси Президентнинг 2017 йил 7 февралдаги “Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича ҳаракатлар Стратегияси тўғрисида”ги ПФ-4947-сонли фармонида, Президентнинг 2017 йил 17 февралдаги “Фанлар Академияси фаолияти, илмий-тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида” ПФ-2789-сонли

[1]Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ–4947-сон «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича ҳаракатлар стратегияси тўғрисида» ги Фармони.

фармонларида ва тегишли қонунчилик ҳужжатларида ифодаланган бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга диссетрация иши маълум даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги. Ушбу тадқиқотлар Ўзбекистон Республикаси фан ва технологияларни ривожлантиришнинг устувор йўналишларига мос ҳолда амалга оширилган: II. «Физика, астрономия, энергетика и машинасозлик.

Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий тадқиқотлар шарҳи[2].

Суюқ системаларда фуллеренлар молекулаларининг ва углеродли нанотрубкаларнинг ҳам яккаланган, ҳам агрегацияланган ҳолатларидаги хусусиятларига доир илмий тадқиқотлар жаҳоннинг етакчи илмий марказлари ва олий таълим муассасаларида олиб борилмоқда, жумладан: Florida State University (АҚШ), Nagoya University (Япония), Hanyang University (Жанубий Корея), Tsinghua University (Хитой), University of Huddersfield (Буюк Британия), В.Н. Каразин номидаги Харьков миллий университети (Украина), Тарас Шевченко номидаги Киев миллий университети (Украина), Москва Давлат Университети (Россия), А.Ф. Иоффе номидаги Физика-техника институти (Россия), Жануби-Ғарбий Давлат Университети (Россия), Курчатов институтининг миллий тадқиқотлар маркази (Россия), Ўзбекистон республикаси Фанлар академиясининг Ион-плазма ва лазер технологиялари институти.

Ҳозирги вақтда бу соҳадаги қатор муҳим вазифалар ечилган, хусусан фуллеренларнинг эритувчиларда эриши ҳамда эритмаларининг молекулярдан коллоид ҳолатга ўтишининг кластерли модели назарий тадқиқ этилган (Tsinghua University, University of Huddersfield, Курчатов институтининг миллий тадқиқотлар маркази). Углеродли нанозаррачаларнинг турли концентрациялардаги кенг диапазондаги эритмалардаги ҳолатининг тажрибалардаги тадқиқи ҳамда улар асосида янги наноўлчамли структуралар олиш бўйича ишлар В.Н. Каразин номидаги Харьков миллий университетида, Тарас Шевченко номидаги Киев миллий университетида, Москва Давлат Университетида, А.Ф. Иоффе номидаги Физика-техника институтида ҳамда Ион-плазма ва лазер технологиялари институтида олиб борилмоқда.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Фуллеренлар ва углеродли нанотрубкаларнинг структуравий хусусиятлари ва асосий физик хоссаларини ўрганишга фаол қизиқиш уларни грамм миқдорида синтез қилиш

[2] Preparation and UV/visible spectra of fullerenes C_{60} and C_{70} // Chemical Physics Letters. 2013. Vol. 589, pp. 57–60, Diameter-Dependent Band Gap Modification of Single-Walled Carbon Nanotubes by Encapsulated Fullerenes // J Phys Chem C. 2009. Vol. 113, pp.571–575, Fullerenes in liquid media: an unsettling intrusion into the solution chemistry // Chemical Reviews. 2013. Vol. 113, pp.5149-5193, Improved spectrophotometric analysis of fullerenes C_{60} and C_{70} in high-solubility organic solvents // Anal. Sci. 2015. Vol. 31, pp. 125-130, Self-assembly and self-organization processes of carbon nanotubes in the colloidal systems // Journal of nano- and electronic physics. 2015. Vol. 7, pp. 04014, On the evaporation kinetics of [60] fullerene in aromatic organic solvents // Phys. Chem. Chem. Phys. 2018. Vol.20, pp.11296-11305 ва б.

технологияси ишлаб чиқилгандан жонланди. Эритмаларда фуллеренлар кластерларининг ҳосил бўлиш жараёнларини тадқиқ этиш фуллеренларнинг кичик ўлчамдаги кластерларидан ташкил топган микро ва наноструктураларнинг бир қанча ноёб ва принципиал жиҳатдан янги физик хусусиятларини очиш имконини беради. Фуллерен молекулаларининг эритмаларида кечадиган кластерланиш жараёнларини ўрганиш учун асосий юқори сезгирликдаги воситалар сифатида нейтронларнинг кичик бурчакли сочилиши, сканловчи туннелли микроскопия, атом-кучли микроскопия, ёритувчи электрон микроскопия, оптик спектроскопия ва бошқа шу каби методлар хизмат қилади.

Ю.П. Сун и К.Е. Бункер каби муаллифларнинг ишларида абсорбцион спектроскопия методида илк бор C_{70} фуллереннинг ацетонитрил ва толуол аралашмаларидаги эритмаларида солватохромизм ҳодисаси аниқланди. Эритувчилар таркибининг озгина ўзгаришларида C_{70} фуллереннинг бинар эритмалари электрон ютилиш спектрлари табиатидаги сезиларли ўзгаришларни муаллифлар ҳам фуллерен молекулаларининг ўз-ўзидан бирлашишга мойиллиги билан, ҳам C_{70} макромолекуласи ва эритувчи молекулалари ўртасида комплекслар ҳосил бўлиши билан изоҳлашади. Бу ҳолда ёруғликнинг динамик сочилиши усулида эритмада C_{70} кластерларининг ўртача геометрик ўлчамларининг ошиши ҳам аралашмадаги ацетонитрил миқдорининг, ҳам эритмадаги фуллерен концентрациясининг ортиши билан бирга содир бўлиши кўрсатилди. Сунгги пайтларда сольватохромизм ҳодисаси ҳар хил бинар эритувчилардаги C_{60} ва C_{70} фуллеренларнинг эритмаларида ҳам фаол тадқиқ этилмоқда.

В.Н. Безмельницин, А.В. Елецкий ва М.В. Окунь каби муаллифларнинг ишларида турли хил органик эритувчиларда фуллеренларнинг "кластерли структураси" ни эълон қилинди. Ҳозиргача фуллеренлар молекулаларининг кам қутбли эритувчилардаги ҳолатини ўрганиш муҳокама мавзусида ҳисобланади. М.В. Авдеев, Т.В. Тропин ва В.Л. Аксеновлар "яхши" эритувчиларда фуллеренларнинг мувозанатли эришида фақат фуллеренларнинг молекуляр эритмалари ҳосил бўлишини назарий жиҳатдан кўрсатди. Нуклеация назарияси доирасида эритмаларда фуллерен кластерларининг ҳосил бўлиши ва ўсишининг кинетик тавсифи ишлаб чиқилди. Классик томчи моделидан фойдаланган ҳолда фуллерен кластерларининг чекланган ўсиш моделлари таклиф этилди.

Бугунги кунга келиб, наноўлчамли углеродли объектларнинг (фуллеренлар ва нанотрубкалар) эритмалардаги ҳолатини ўрганишга бағишланган асосий тажриба ишлари асосан уларнинг молекулаларининг тўйинган эритмаларда кластерланишини кўриб чиқиш билан чекланган. Шу билан бирга, кам концентрацияли эритмалардаги, шунингдек эритмаларнинг буғланаётган томчилари ҳажмида фуллерен кластерларининг шаклланиши ва ўсиши жараёнларининг тадқиқотлари нисбатан жуда камдир. C_{60} ва C_{70} фуллеренларнинг ва углеродли нанотрубкаларнинг бир-бирига ҳам зич йиғилган, ҳам ғовак наноструктурали кластерларини ҳосил бўлиши бўйича олинган тажриба натижалари замонавий технологиялар учун янги

наноўлчамли функционал материаллар ҳамда юпқа плёнкаларни яратишга янги имкониятларни очиб беради.

Тадқиқотнинг диссертация бажарилган олий таълим ёки илмий-тадқиқот муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация иши Ион-плазма ва лазер технологиялари институти илмий тадқиқот ишлари режасининг қўйидаги фундаментал лойиҳаси доирасида бажарилган: № ФА-Ф2-Ф146 «Фуллеренлар эритмаларида кластерланиш, ўз-ўзидан йиғилиш ва ўз-ўзидан ташкилланиш жараёнлари» (2012-2016), № ОТ-Ф2-51 «Фуллеренлар ва уларнинг ҳосилалари асосида оптоэлектроника ва қуёш энергетикаси учун янги функционал наноматериаллар синтез қилишнинг фундаментал асослари» (2017-2020).

Тадқиқот мақсади. Мазкур диссертация ишининг мақсади C_{60}, C_{70} органик макромолекулалари ҳамда углеродли нанотрубкаларнинг эритмаларда ва буғланаётган томчилар ҳажмида ўз-ўзидан ташкилланишининг физикавий механизмларини тадқиқ этишдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

C_{60}, C_{70} фуллеренлари ва уларнинг аралашмалари молекулаларининг қутбли ва кам қутбли органик эритувчиларда ўз-ўзидан ташкилланиши ва ўз-ўзидан йиғилиши моҳиятини тажрибада тадқиқ қилиш;

эритмаларда C_{60} ва C_{70} фуллеренлари молекулаларидан вақт бўйича барқарор бўлган наноструктурали кластерлар олишнинг оптимал усулларини аниқлаш;

C_{70} фуллеренининг ҳамда C_{60} ва C_{70} фуллеренлари аралашмаларининг органик эритувчилардаги эритмаларида лазер импульси эллиптик қутбланишининг ночизиқли бурилиш эффектини тадқиқ қилиш;

C_{60} ва C_{70} фуллеренларнинг бир ва икки компонентли органик эритувчилардаги эритмаларининг буғланаётган томчилари ҳажмида дисперс фазали заррачаларнинг ўз-ўзидан ташкилланишининг аниқ физик механизмларини аниқлаш;

бир деворли углеродли нанотрубкаларнинг ҳам эритмаларда, ҳам эритмаларнинг буғланаётган томчилари ҳажмида ўз-ўзидан ташкилланиш жараёнлари кечишини тажрибада тадқиқ қилиш;

C_{60} фуллерени асосида наноўлчамли органик структуралар (нановискерлар, нанотрубкалар, нанопленкалар ва наноқопламалар) олиш.

Тадқиқот объектлари фуллеренлар (C_{60}, C_{70}) ва бир деворли углеродли нанотрубкаларнинг бир компонентли (толуол, бензол, ксилол, бромбензол, N-метилпирролидон, тетрагидрофуран) ва икки компонентли (толуол+тетрогидрофуран, ксилол+тетрогидрофуран, бензол+ацетонитрил, N-метил-2-пирролидон+ксилол, сув+диметилформамид, этилбензол+изопропил спирт) эритувчилардаги эритмалари ҳисобланади.

Тадқиқотнинг предмети C_{60}, C_{70} фуллеренлари молекулаларининг ҳамда бир деворли углеродли нанотрубкаларнинг ҳам эритмаларда, ҳам буғланаётган томчи ҳажмида ўз-ўзидан ташкилланишининг физик механизмлари ва қонуниятлари, C_{70} фуллерени ва «C_{60}+C_{70}» фуллеренлари

аралшмалари эритмаларида лазер нурланиши эллипсли қутбланишининг ночизиқли ўз-ўзидан бурилиш эффекти ҳисобланади.

Тадқиқот усуллари. Диссертация ишида қўйидаги юқори сезгирликдаги тадқиқот методлари қўлланилди: ёритувчи электрон микроскопия, сканловчи электрон микроскопия, атом-кучли микроскопия, электрон ва инфрақизил (ИҚ) спектроскопия, ёруғликнинг динамик сочилиши ҳамда ночизиқли спектроскопия (эритмаларда лазер импульси эллипсли қутбланишининг ўз-ўзидан бурилиши).

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

фуллеренларнинг (C_{60}, C_{70} ва уларнинг аралашмаларининг) қутбли ва кам қутбли эритувчиларда ҳам зич тахланган, ҳам ғовак фрактал наноструктуралари ҳосил бўлиши ва ўсишининг физик механизмлари аниқланган. Эритмаларда олинган mC_{60}, mC_{70} ва $mC_{60/70}$ нанокластерларнинг (бу ерда m – нанокластерлардаги фуллеренлар молекулалари сони) структураси ва фракталлиги дастлабки эритмаларни тайёрлаш усулига боғлиқлиги тажрибада кўрсатилган;

эритмаларда C_{60}, C_{70} фуллеренлари ва уларнинг аралашмалари молекулаларининг ўз-ўзидан ташкилланиш жараёнлари диагностикаси ҳамда синтезланган нанокластерларнинг (mC_{60}, mC_{70} ва $mC_{60/70}$) барқарорлик даражасини аниқлайдиган янги спектроскопик метод ишлаб чиқилган;

илк бор $C_{60/70}$ эритмаларида импульсли лазер нурланиши эллиптик қутбланишининг ночизиқли бурилиш эффекти нурланишнинг фақат эллиптик қутбланишида кузатилиши аниқланган. $C_{60/70}$ эритмаларида ҳам лазер нурланиши интенсивлигининг, ҳам эллиптиклик даражасининг ошиши эллипсли қутбланиш бурилиш бурчагининг ошишига олиб келиши кўрсатилган;

эритмаларда $mC_{60/70}$ кластерларининг ҳосил бўлиши ва ўсиши билан муҳитдан ўтувчи лазер нурланиши эллипсли қутбланишининг ночизиқли бурилиш бурчаги қийматлари орасидаги ўзаро боғлиқлик аниқланди. $C_{60/70}$ фуллеренининг эритмалардаги концентрациясининг ошиши лазер нурланиши эллипсли қутбланишининг солиштирма бурилиш бурчагининг сезиларли камайишига олиб келиши кўрсатилган;

илк бор қаттиқ тагликнинг текис сиртида жойлашган буғланаётган «эритмалар томчилари» ҳажмида фуллеренларнинг наноструктурали фрактал, шунингдек зич тахланган mC_{60}, mC_{70} кластерларини тезкор синтез қилиш усули таклиф қилинди ва амалга оширилди;

буғланаётган томчи ҳажмида mC_{60} ва mC_{70} кластерларини синтез қилишнинг аниқ физик механизми – "Оствальд етилиши", яъни нисбатан йирикроқ наноструктуралар майдалари ҳисобига ўсиши таклиф этилган;

илк бор C_{60} фуллерен молекулаларидан иборат нано- ва микроўлчамли органик структуралар (нановискерлар, нанотрубкалар, нанопленкалар ва наноқопламалар) ни олишнинг «томчи усули» таклиф қилинган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

фуллеренлар эритмаларнинг буғланаётган томчилари ҳажмида ҳам мономолекуляр зич тахланган, ҳам фрактал ғовакли mC_{60}, mC_{70}, $mC_{60/70}$

нанокластерларини олишнинг янги усуллари ишлаб чиқилди ва амалга оширилди;

буғланаётган томчилар ҳажмида C_{60} фуллеренлари асосида наноўлчамли органик структураларни (нановискерлар, нанотрубкалар, нанопленкалар ва наноқопламалар) олишнинг бошқариладиган селектив усуллари ишлаб чиқилган;

фуллерен макромолекулаларининг эритмаларда ўз-ўзидан ташкилланиш ва ўз-ўзидан йиғилиш жараёнларини диагностика қилиш, шунингдек эритмаларда синтез қилинган фуллерен нанокластерларининг барқарорлик даражасини аниқлаш учун экспериментал оптик усуллар ишлаб чиқилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги фуллеренлар (C_{60}, C_{70}) ва бир деворли углеродли нанотрубкалар кластерларининг хусусиятларини тадқиқ қилишда замонавий юқори аниқликдаги электрон микроскопик ва спектроскопик усулларнинг қўлланилганлиги ҳамда олинган тажриба натижаларининг қайта такрорланиши юқори даражада эканлиги билан асосланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.

Диссертация тадқиқоти натижаларининг илмий аҳамияти шундан иборатки, улар C_{60} ва C_{70} фуллеренлар молекулаларининг ҳамда углеродли нанотрубкаларнинг ҳам эритмаларда, ҳам эритмаларнинг буғланаётган томчилари ҳажмида ўз-ўзидан ташкилланиш жараёнларининг аниқ физик механизмларини тушунтириш имконини беради.

Диссертация тадқиқотининг амалий аҳамияти шундан иборатки, эритмалар буғланаётган томчилари ҳажмида C_{60} фуллерени асосида микро- ва наноўлчамли органик структуралар (нановискерлар, нанотрубкалар, нанопленкалар ва наноқопламалар) синтез қилиш усуллари яқин келажакда янги функционал наноматериаллар ҳамда микро- ва наноэлектроника элементлари олишда олишда қўлланилиши имконини беради.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. C_{60}, C_{70} органик молекулалари ҳамда углеродли нанотрубкаларнинг ҳам эритмаларда, ҳам буғланаётган томчилар ҳажмида ўз-ўзидан ташкилланишини тадқиқ этиш натижалари асосида:

C_{70} фуллерени, шунингдек C_{60} ва C_{70} фуллеренлари аралашмалари эритмаларида кучли интенсивликдаги лазер импульсларининг эллипсли қутбланиши ночизиқли бурилиш эффектини ўрганишда олинган тажриба натижалари № БФ2-027 рақамли «Метал нанозаррачалари шаклланиши ва ўсиши механизмлари ва уларнинг ночизиқли-оптик хоссаларини тадқиқ қилиш» лойиҳасида фойдаланилган (Ўзбекистон Республикаси Инновацион ривожланиш вазирлигининг 2021 йил 5 мартдаги № 02-02/1313-сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш кучли интенсивликдаги импульсли лазер нури таъсирида турли ўлчамдаги метал нанозаррачалари шаклланишини ва уларнинг ночизиқли-оптик параметрларини самарали таҳлил қилиш имконини берган;

C_{60} ва C_{70} фуллеренлари молекулаларининг ўз-ўзидан ташкилланиш жараёнларини тадқиқ қилишда олинган натижалардан № ОТ-Ф2-46:

«Углеродли нанотрубкалар ва фуллеренлар билан атом зарралари, электронлар ва фотонларнинг ўзаро таъсири жараёнини назарий тадқиқ этиш» лойиҳасида фойдаланилган (Ўзбекистон Республикаси Фанлар академиясининг 2021 йил 25 февралдаги № 2/1255-569-сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш фуллеренлар молекулаларининг ўзаро таъсирларини ҳамда фуллерен молекулалари билан бошқа атом зарралари, электронлар ва фотонларнинг ўзаро таъсири жараёнларини назарий жиҳатдан самарали баҳолаш имконини берган;

C_{70} фуллерени эритмаларида лазер импульси эллипсли қутбланишининг ночизиқли ўз-ўзидан бурилиш эффектини тадқиқ этиш жараёнида олинган тажриба натижалари хорижий журналларда (Advances in optics and photonics 2017, V. 9, Scopus, IF – 22.95; Optics express 2014, V.21, Scopus, IF – 7.2; Optics communications 2014, V.310, Scopus, IF – 3.1) икки фазали синхрон кучайтиргичларнинг ночизиқли рефракциясини ҳамда металл нанозаррачаларидан ташкил топган плазмонли композитларнинг юқори тартибли ночизиқлилигини ўрганишда фойдаланилган. Илмий натижалардан фойдаланиш металл-диэлектрик нанокомпозитлар асосида наноструктурали оптик калитлар олиш имконини берган;

қаттиқ таглик сиртида буғланаётган томчилар ҳажмида фуллеренларнинг наноўлчамли структуралари ҳосил бўлишини, шунингдек C_{70} ва $C_{60/70}$ эритмаларида лазер импульсларининг эллипсли қутбланиши ночизиқли бурилиш эффектини тадқиқ қилишда олинган тажриба натижаларидан Шаржадаги Америка университети тадқиқотларида фойдаланилган (Шаржадаги Америка университетининг 2021 йил 8 мартдаги маълумотномаси, БАА). Илмий натижалардан фойдаланиш кучли интенсивликдаги импульсли лазер нурланиши таъсирида ҳар хил ўлчамдаги нанозаррачалар ҳосил бўлиш моҳиятини яхшироқ тушунишга ва уларнинг юқори тартибли ночизиқли оптик параметрларини баҳолашга имкон берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Тадқиқотларнинг асосий натижалари 29 та илмий-амалий конференцияларда, шу жумладан 14 та халқаро ва 15 та республика миқёсидаги илмий-амалий конференцияларда муҳокама қилинган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги Диссертация мавзуси бўйича олинган натижалар 50 та илмий ишларда баён қилинган бўлиб, улардан 21 таси илмий мақола, шу жумладан 7 та чет эл ва 14 та мақола Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссияси томонидан докторлик диссертациянинг асосий илмий натижаларини чоп этишга тавсия этилган илмий журналларида чоп этилган.

Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши. Диссертация таркиби кириш, бешта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертациянинг ҳажми 214 бетни ташкил қилиб, ўз ичига 83 та расм ва 4 та жадвалдан иборатдир.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати асосланган, тадқиқотнинг мақсад ва вазифалари шакллантирилган, объекти ва предмети аниқланган, тадқиқотнинг Ўзбекистон Республикасида фан технологияларни ривожлантиришнинг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, уларнинг ишончлилиги асосланган, олинган натижаларнинг назарий ва амалий аҳамияти очиб берилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий қилиш, ишнинг апробацияси натижалари, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг **«Фуллеренлар молекулаларининг ҳамда углеродли нанотрубкаларнинг турли муҳитларда ўз-ўзидан ташкилланиш жараёнлари тадқиқоти таҳлили »** деб номланган биринчи бобида C_{60} ва C_{70} фуллеренлари молекулаларининг, шунингдек бир деворли углеродли нанотрубкаларнинг ҳам эритмаларда, ҳам буғланаётган томчилари ҳажмида назарий ва экспериментал тадқиқотларининг замонавий ҳолати таҳлили келтирилган. Наноўлчамли углерод таркибли объектларнинг турли муҳитларда кластерли ҳолатини тадқиқ қилишда кенг қўлланиладиган усуллар кўриб чиқилган. Мавжуд маълумотларнинг назарий ва экспериментал таҳлили натижасида тадқиқот вазифаларининг қўйилиши шакллантирилган.

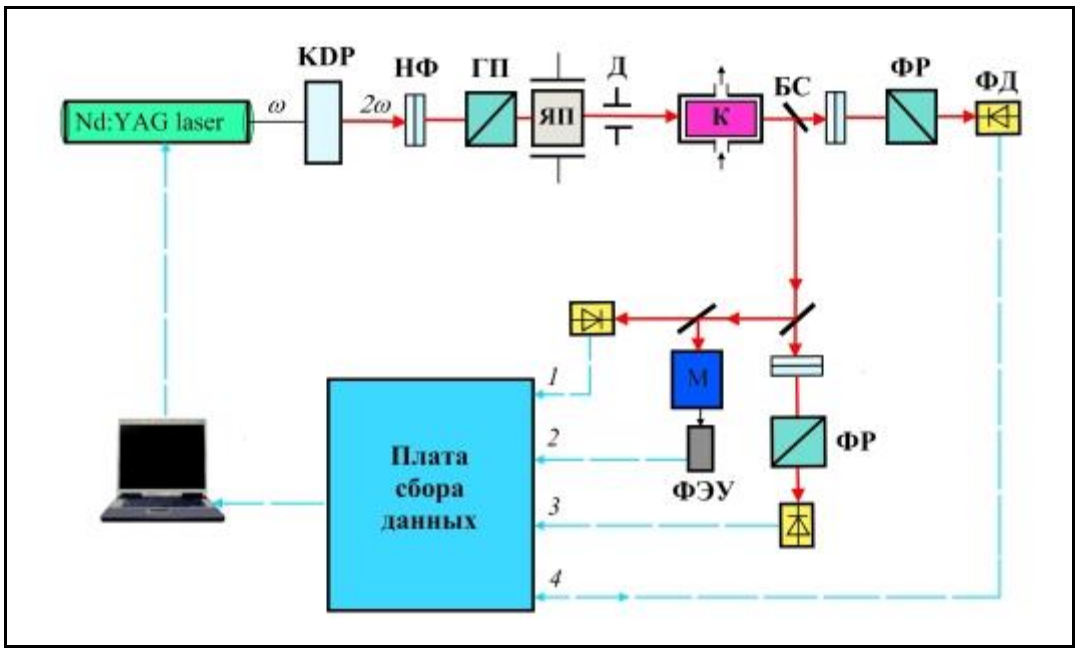
«Наноўлчамли углеродли заррачалар молекулаларининг эритмаларда ва буғланаётган томчилар ҳажмидаги ҳолатининг тадқиқотида қўлланилган усуллар» номли иккинчи бобда қўлланилган тадқиқот методларининг қисқа тавсифи берилган ҳамда тадқиқот объектларининг муҳим хоссалари келтирилган. Юқори сезгирликдаги билвосита (оптик спектроскопия, ёруғликнинг динамик сочилиши (ЁДС) ва вискозиметрия) ва тўғридан-тўғри (юқори ажрата олиш кучига эга ёритувчи электрон микроскопия (ЁЭМ), сканловчи электрон микроскопия (СЭМ) ва атом кучли микроскопия (АКМ) ва оптик микроскопия) тадқиқот методларининг хусусиятлари баён этилган.

C_{70} фуллерени, шунингдек C_{60} ва C_{70} фуллеренлари аралашмаларининг эритмаларида кучли интенсивликдаги лазер импульслари эллипсли қутбланишининг ночизиқли бурилиши (ЭҚНБ) эффектини тадқиқ қилиш учун мўлжаллаб ишлаб чиқилган автоматлашган тажриба қурилмаси хусусиятлари тавсифланган.

Тадқиқот қурилмасининг принципиал схемаси ва автоматлашган қайд этиш системаси 1-расмда келтирилган. Нурланиш манбаи сифатида импульс давомийлиги ~12÷15 нс бўлган YAG:Nd^{3+} лазердан фойдаланилди. KDP кристаллида иккинчи гармоникага (λ=532 нм) айлантирилган лазер импульси энергияси ~50 мЖ бўлди. Нурланишнинг иккинчи гармоникаси Глан призмадан (ГП) ўтказилади ва чизиқли қутбланган нурланиш Поккельс ячейкасига (ЯП) йўналтирилади. Бунда Поккельс ячейкасига берилаётган

электр потенциаллар фарқи қийматини ўзгартириб борилиши ўтаётган нурланиш қутбланишини – чизиқлидан то доиравийгача бўлган кенг диапазонда ўзгартириш имконини беради.

Фуллеренлар эритмалари билан ўзаро таъсир соҳасидаги лазер дастасининг диаметри ~3.5 мм ни ташкил этди. Тажриба давомида нурланиш энергиясини ўзгартириш мақсадида стандарт нейтрал ёруғлик фильтрлари (НФ) ишлатилди. Фуллеренлар эритмалари мавжуд кювета (К) нинг чиқишидаги эллиптик қутбланган лазер нурланиши ориентациясининг ўзгаришини таҳлил қилиш учун икки ўзаро кесишувчи қутбланиш анализаторлари (Франк-Риттер ФР призмалари) ва калибрланган ФД-24 фотодиодлар (ФД) қўлланиладиган икки каналли схемадан фойдаланилади.



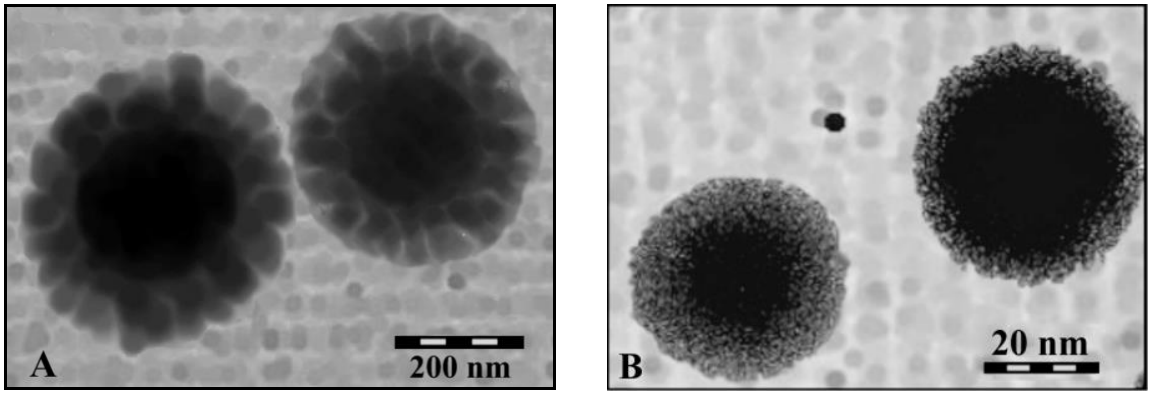
1-расм. Тажриба қурилмаси умумий оптик схемаси: KDP – ночизиқли оптик кристалл (1064 нм → 532 нм); НФ – нейтрал ёруғлик фильтрлари; ГП – Глан қутблагичи; ЯП – Поккельс ячейкаси; Д – диафрагма; К – фуллерен эритмали кювета; БС – ёруғлик бўлгич пластинка; ФР – Франк-Риттер призмаси; ФД – фотодиод; ФЭУ - фотоэлектрон кўпайтирувчи.

Фуллерен эритмаси бўлган кювета орқали ўтган лазер дастасининг бир қисми ёруғлик бўлгич пластинка (БС) ёрдамида нурланишнинг энергетик ва спектрал характеристикаларини назорат қилишга йўналтирилди. Бу нурланишнинг биринчи ярми лазер системасининг энергетик характеристикасининг назорати ва ўлчаш каналидаги датчик сифатида ишлатиладиган фотодиодга йўналтирилади (1-расм, қайд этиш системасининг 1-канали). Нурланишнинг қолган ярми спектрнинг қадамли ўтказгич ёйилмасига созланган дифракцион МДР-204 монохроморнинг (М) кириш тирқишига йўналтирилди. Монохроморнинг чиқиш тирқишига фотоэлектронларни кўпайткич ўрнатилди ва нурланишнинг спектрал характеристикаларини ўлчайдиган каналда сигналга ишлов берилади (1-расм, қайд этиш система-сининг 2-канали). Бир пайтнинг ўзида нурланишнинг қутбланиш, энергетик ва спектрал характеристикаларини қайд этиш учун

реал вақт режимида шахсий компьютер базасида тажриба маълумотларини йиғиш ва қайта ишловчи қўзғалувчан автоматлаштирилган системадан фойдаланилди.

Диссертациянинг **«C_{60}, C_{70} фуллеренлар молекулалари ҳамда бир деворли углерод нанотрубкаларнинг эритмаларда ўз-ўзидан ташкилланиш жараёнлари хусусиятлари»** деб номланган учинчи бобида углерод таркибли объектларнинг (C_{60}, C_{70} фуллеренлар молекулалари ва бир деворли углерод нанотрубкалар) бир компонентли (толуол, бензол, N-метил-2-пирролидон) ва икки компонентли (толуол+тетрогидрофуран, ксилол+тетрогидрофуран, ксилол+NMП, сув+диметилформамид) эритувчиларда ўз-ўзидан ташкилланиш жараёнларини оптик спектроскопия, ёруғликнинг динамик сочилиши, шунингдек электрон ва атом-кучли микроскопия усуллари ёрдамида тажрибада тадқиқ этишнинг асосий натижалари келтирилган.

2А-расмда мувозанатсиз усулда (C_{60} эритмасини механик ротатор билан аралаштириб) тайёрланган фуллереннинг толуолдаги эритмасида синтез қилинган музлатилган mC_{60} кластерларининг юқори аниқликдаги ЁЭМ тасвири кўрсатилган. Эритмада диаметри ~250÷300 нм гача бўлган квазисферик шаклдаги йирик ва ғовакли фрактал кластерлар синтез қилинди. Бу кластерлар диаметри ~32÷40 нм бўлган кичик ва барқарор «дискрет» C_{60} кластерларидан ташкил топиши аниқланди (2А-расм). Юқори ажрата олиш қобилиятига эга ЁЭМ ёрдамида фрактал кластерларнинг маҳаллий ички тузилишини аниқ ўлчашлар шуни кўрсатдики, йирик mC_{60} кластерлар ичида жойлашган иккита энг яқин қўшни барқарор «оралиқ» кластерлари орасидаги энг қисқа масофа ~1÷1.5 нм ни ташкил этади.

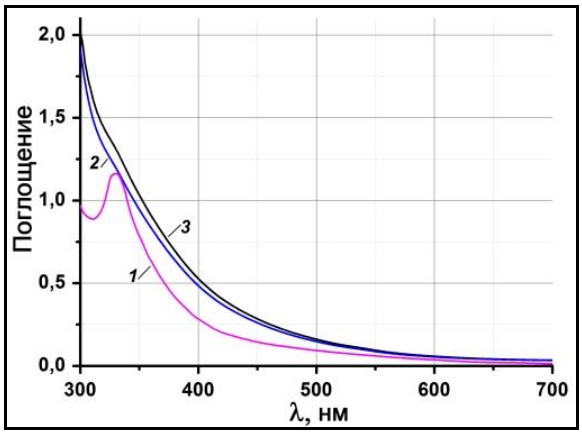


2-расм. C_{60} фуллереннинг толуолдаги эритмаларида синтезланган нанокластерларнинг электрон-микроскопик тасвирлари: А) C_{60} эритмасини механик ратотор ёрдамида аралаштириб тайёрланган мувозанатсиз эритмада; В) C_{60} эритмасига ташқи механик таъсир кўрсатмасдан тайёрланган мувозанатли эритмада. C_{60} бакминстерфуллереннинг эритмалардаги бошланғич концентрацияси ~2.0 г/л.

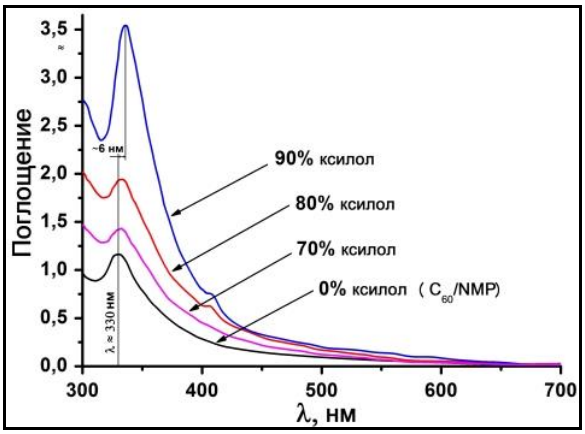
2В-расмда C_{60} фуллереннинг мувозанатли усулда тайёрланган толуолдаги дастлабки эритмасини хона ҳароратида (~25°C) дастлабки 10÷15 кун давомида сақланганда синтез қилинган бакминстерфуллерен C_{60} нинг музлатилган кластерларининг ЁЭМ тасвири кўрсатилган. Кўриниб турибдики, C_{60} эритмасини тайёрлаш учун мувозанатли усулдан (эритмага ташқи механик таъсири қилмасдан) фойдаланганда, фуллерен молекулаларининг ўз-ўзидан ташкилланиш жараёнлари мувозанатсиз усулга

қараганда вақт бўйича бир оз бошқача физикавий механизм бўйича кечади, ва айнан диаметрдаги ўлчами ~38÷40 нм бўлган зич тахланган мономолекуляр кластерлар синтез бўлади (2В-расм).

C_{60} нинг N-метил-2-пирролидондаги (NMП) оптик ютилишини тадқиқи шуни кўрсатдики, дастлабки эритмани вақт бўйича сақлашга боғлиқ ҳолда бу эритма ютилиш спектрларининг табиати ва шакли кескин ўзгаришни бошлайди (3-расм). λ≈330 нм тўлқин узунликдаги мавжуд ёрқин акс этган молекуляр C_{60} учун характерли максимум фақат янги тайёрланган C_{60} эритмаси спектрида кузатилади (3-расм, *1*-спектр) ва бу максимум дастлабки эритма тайёрлангандан бошлаб 1 кун ичида деярли бутунлай йўқолади (*2*-спектр). Эритмани 24 соат (*2*-спектр) ва 10 кун (*3*-спектр) давомида сақлаш пайтида λ≈330 нм даги максимумнинг йўқолиши ва ютилиш интенсивлигининг ошиши эритма «қариши» жараёнида C_{60} молекулаларининг ўз-ўзидан ташкилланиш жараёнларининг кўчайиши ва наноўлчамли фрактал mC_{60} кластерлари ҳосил бўлиши билан боғлиқ.



3-расм. C_{60} фуллеренининг NMП даги ~0.015 г/л концентрациядаги эритмалари электрон ютилиш спектрлари ўзгариши: *1* – янги тайёрланган эритма, *2* – эришдан 24 соат кейин ва *3* – 10 суткадан кейин.



4-расм. C_{60} фуллеренининг NMП даги янги тайёрланган эритмасига турли улушдаги ксилол қўшганда эритма оптик ютилиш спектрлари эволюцияси. C_{60} нинг эритмадаги концентрацияси ~0.03 г/л.

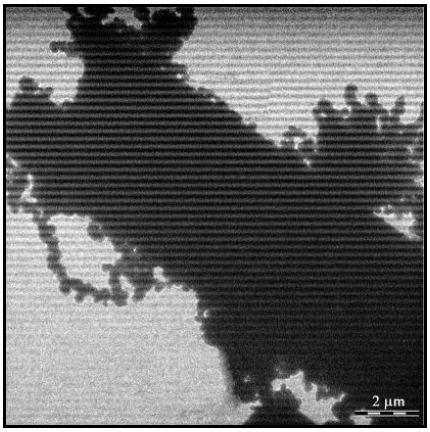
C_{60} фуллереннинг NMП даги эритмаси оптик ютилиш спектрлари эритмага нисбатан юқори ҳажмий улушдаги (≥70 ҳажмий улуш) ксилол қўшилганда кескин ўзгаради, айнан спектр амплитудасининг ошиши ва ~330 нм даги характерли пикнинг узун тўлқин узунлиги соҳасига силжиши, яъни ижобий сольватохромизм эффекти кўзатилади (4-расм). Қайд этиш жоизки, бу ҳолда максимал батохромик силжиш C_{60}/NMП системасига ~90 % ҳажмдаги ксилол қўшилганда ~6 нм гача етади. Бу ҳолда C_{60}/NMП/ксилол системасидаги қўшилган компонент (ксилол) C_{60} молекуласининг эритувчи (NMП) молекулалари билан ҳам селектив сольватланишини, ҳам уларни қайта ташкилланишини кучайтиради.

5-расмда C_{60}/NMП ва C_{60}/NMП/ксилол эритмаларининг ЁДС тажриба натижалари келтирилган. Эритмалардаги mC_{60} нанокластерларининг гидродинамик ўлчамлари Zetasizer Nano ZEN3600 (Malvern Instruments Ltd.) қурилмасида ўлчанган. 10 кунлик C_{60}/NMП эритмада ёруғлик сочувчи

нанозаррачаларнинг асосий улуши диаметри ~465÷520 нм бўлган диапазонда тақсимланган, C_{60} кластерларининг максимал тақсимланиши ~490 нм соҳада жойлашган (5-расм, *1*-гистограмма). Қайд этиш жоизки, 10 кунлик C_{60}/NMП эритмасида синтезланган mC_{60} нанокластерлар C_{60} ва NMП молекулалари комплекси кўринишидаги кўп миқдордаги NMП молекулаларидан ҳам иборат бўлади. C_{60}/NMП/ксилол эритмасида ёруғлик сочувчи фуллерен заррачаларининг максимал гидродинамик диаметри кичраяди ва ~430 нм га силжийди, mC_{60} нанокластерларнинг гидродинамик ўлчамлари диапазони эса ~410÷450 нм га мос келади (*2*-гистограмма). C_{60}/NMП эритмасига ксилолнинг қўшилиши C_{60} ва NMП молекулалариаро комплексларнинг қисман бузилишига ва нанозаррачаларнинг қайта ўз-ўзидан ташкилланишига олиб келади. Кўриниб турибдики, C_{60}/NMП/ксилол эритмасида нанозаррачаларнинг қайта ташкилланишидан сунг mC_{60} нанокластерларининг геометрик ўлчамлари C_{60}/NMП эритмадагига нисбатан камайган.



5-расм. C_{60}/NMП (*1-гистограмма*) ва C_{60}/NMП/ксилол (*2*) эритмаларида mC_{60} кластерларининг гидродинамик диаметрлари бўйича тақсимланиши. C_{60} нинг эритмалардаги концентрацияси ~0.03 г/л.



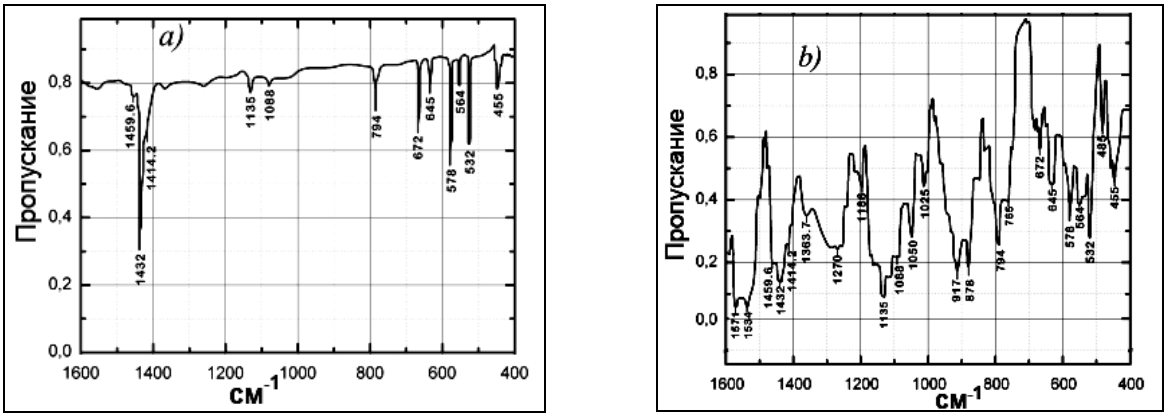
6-расм. Бир деворли углеродли нанотрубкаларнинг коллоид эритмасида синтез қилинган тартибланган наноструктуравий агрегатнинг ЁЭМ тасвири**.** Нанотрубканинг эритмадаги бошланғич концентрацияси ~0.4 г/л.

6-расмда бир деворли углеродли нанотрубкаларнинг «сув+диметилформамид» эритувчиларининг мос ҳолда 0.9:0.1 ҳажмий улушлардаги аралашмасидаги эритмасида синтез қилинган тартибланган агрегатининг ЁЭМ тасвири кўрсатилган. Бу ҳолда, нанотрубкаларнинг ўзаро бир-бирига ёпишиши ва эритмада агрегатлар ҳосил қилишга мойиллиги кузатилди. Кўриниб турибдики, эритмада нанотрубкаларнинг ўзаро параллел тўпламларидан ташкил топган тартибланган агрегатлар ҳосил бўлади. Бу ҳолда бир деворли нанотрубкалар агрегати узунлиги ~16 мкм, диаметри ~5.2 мкм ни ташкил этади.

Диссертациянинг «**Турли эритувчиларда $C_{60/70}$ фуллеренлар аралашмаси молекулаларининг ўз-ўзидан йиғилиш жараёнларини тадқиқ қилиш**» деб номланган тўртинчи бобида оптик спектроскопия, ЁДС ҳамда ЁЭМ методларида органик эритувчиларда $C_{60/70}$ (C_{70} −95 масс. % ва C_{60}− 5

масс. %) фуллеренлари кластерларининг синтезланиши ва ўлчамларининг ўсишининг асосий қонуниятларини тадқиқ этиш натижалари баён қилинган. Эритмаларда кластер ҳосил бўлишининг $C_{60/70}$ фуллеренлари эритмаларининг ҳам электрон, ҳам инфрақизил (ИҚ) ютилиш спектрлари эволюциясига таъсири натижалари берилган. Ҳам тоза C_{70} фуллеренининг, ҳам $C_{60/70}$ фуллеренлар аралашмаларининг турли эритувчилардаги эритмалари ночизиқли-оптик хоссалари тадқиқ қилинган.

7-расмда ~400÷1600 $см^{-1}$ спектрал диапазонда $C_{60/70}$ нинг толуолдаги эритмалари ИҚ-ютилиш спектрлари берилган: янги тайёрланган эритма (*a* спектр) ва янги эритмани хона ҳароратида 60 сутка сақлагандан сунг (*b* спектр).



7-расм. $C_{60/70}$ (C_{70} –95 масс. % и C_{60}– 5 масс. %) фуллереннинг толуолдаги ~0.15 г/л концентрацияли эритмаси ИҚ спектрлари: (*a*) эритма тайёрланганидан бирданига; (*b*) уни хона ҳароратида 60 сутка сақлашдан сунг.

ИҚ диапазондаги ютилиш соҳасида C_{60} нинг иккита нисбатан интенсив F_{1u} симметрияли ютилиш чизиқлари (~1432 ва ~578 $см^{-1}$) кузатилди (7*a*-расм). $C_{60/70}$ эритмаси спектрларида C_{70} фуллеренига тегишли ҳамма 12 та ИҚ чизиқлари, айнан ~1459.6, ~1432, ~1414.2, ~1135, ~1088, ~794, ~672, ~645, ~578, ~564, ~532 ва ~455 $см^{-1}$ намоён бўлди (7*a*-расм).

$C_{60/70}$ нинг толуолдаги эритмасини хона ҳароратида 60 сутка сақлагандан сунг унинг ИҚ спектри дастлабки эритма спектрига нисбатан сезиларли ўзгаришларга учрайди(7*b*-расм), хусусан:

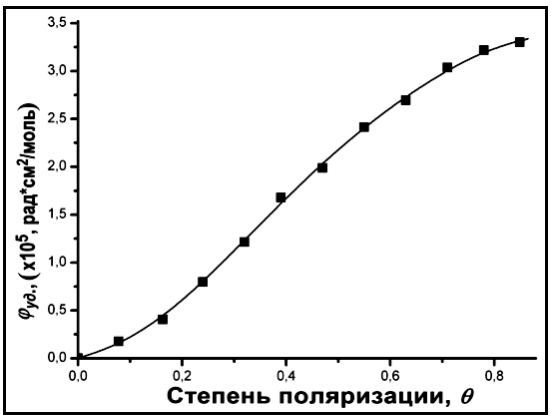
(i) ~1571, ~1534, ~1363.7, ~1270, ~1186, ~1050, ~1025, ~917, ~878, ~765 ва ~485 $см^{-1}$ частоталардаги 11 та янги кенгайган ютилиш соҳалари пайдо бўлиб, улардан фақат битта чизиқ (~1186 $см^{-1}$) C_{60} молекуласи тебранишларига тегишли ва қолган ҳамма чизиқлар эритмада $mC_{60/70}$ кластерлари ҳосил бўлишига тегишли ҳисобланади;

(ii) янги тайёрланган эритмада ҳам кузатилган асосий ютилиш чизиқлари (~1459.6, ~1432, ~1414.2, ~1135, ~1088, ~794, ~645, ~578, ~564 ва ~455 $см^{-1}$) кенгайди.

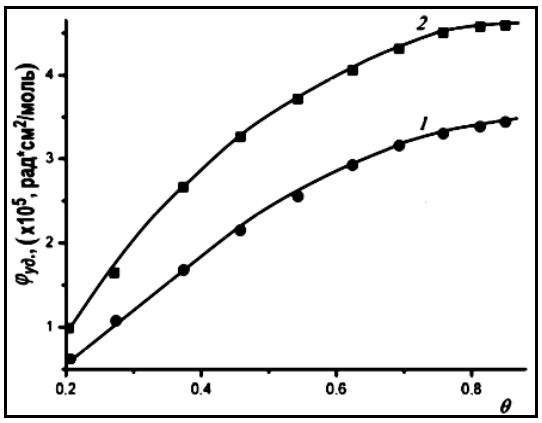
8-расмда $C_{60/70}$ фуллеренларининг толуолдаги ~0.15 г/л концентрацияли эритмасидан ўтувчи лазер нурланиши эллипсли қутбланиши солиштирма бурилиши ($\varphi_{уд.}$) қийматлари ўзгаришининг нурланиш эллиптиклик даражаси

(θ) га боғлиқлиги графиги келтирилган. Тажрибада лазер нурланиши интенсивлиги $I \approx 520$ кВт/см^2 бўлди.

9-расмда тоза C_{70} фуллеренининг толуол (~0.48 г/л концентрацияли) ва бензолдаги (~0.585 г/л концентрацияли) эритмаларида лазер нурланиши эллипсли қутбланиши солиштирма бурилиши ($\varphi_{уд.}$) нинг эллиптиклик даражаси (θ) га боғлиқлиги тасвирланган.



8-расм. $C_{60/70}$ фуллеренларининг толуолдаги ~0.15 г/л концентрацияли эритмасида лазер нурланиши эллипсли қутбланиши солиштирма бурилиши $\varphi_{уд.}$ нинг эллиптиклик даражаси (θ) га боғлиқлиги.



9-расм. Тоза C_{70} фуллерени эритмаларида лазер нурланиши эллипсли қутбланиши солиштирма бурилиши $\varphi_{уд.}$ нинг эллиптиклик даражаси (θ) га боғлиқлиги: *1* эгри чизиқ – толуолда; *2* – бензолда.

8- ва 9-расмлардан кўриниб турибдики, C_{70} ва $C_{60/70}$ эритмаларида лазер нурланиши эллипсли қутбланишда бўлганда ЭҚНБ эффекти кузатилади ва қутбланиш чизиқли бўлганда эса кузатилмайди. Кучли интенсивликдаги ($I \approx 5.2 \cdot 10^5$ Вт/см^2) эллиптик қутбланган лазер нурланишининг изотропик муҳит (фуллеренлар эритмалари) билан ўзаро таъсири эритмаларда чизиқли бўлмаган эффектни юзага келтиради. Нурланишнинг эллиптиклик даражаси ортиши солиштирма бурилиш қийматининг ошишига олиб келади ва $\varphi_{уд.}(\theta)$ боғлиқлик эгри чизиғи доиравий қутбланишга яқинлашиб тўйинишга чиқади.

1-жадвал

$C_{60/70}$ фуллеренларининг толуолдаги эритмасининг лазер нурланиши қутбланишининг турли эллиптиклик (θ) даражаларига мос ночизиқ оптик параметрлари (n_2 ва $\chi^{(3)}(\omega;\omega,\omega,-\omega)$) қийматлари

θ	0.1	0.2	0.3	0.4	0.45	0.55	0.6	0.7	0.8
$-n_2$, ($\times 10^{-21}$, СГСЭ)	6.28	9.2	11.5	13.9	14.9	16.4	17.1	18.3	19.1
$-\chi^{(3)}(\omega;\omega,\omega,-\omega)$, ($\times 10^{-12}$, СГСЭ)	3.52	5.2	6.4	7.8	8.3	9.2	9.6	10.2	10.7

Таъкидлаш жоизки, лазер нурланишининг ўзгармас интенсивлик ва эллиптиклиги даражасида $C_{60/70}$ эритмасидаги концентрациясининг аста-

секин ортиши лазер нурланиши эллипсли қутбланиши бурчагининг камайишига олиб келади. Бу $C_{60/70}$ фуллерен молекулаларининг эритмада турли шаклдаги ва ўлчамдаги $mC_{60/70}$ нанокластерларини синтез қилишга мойиллиги билан боғлиқ. Демак, фуллеренлар молекулаларининг ўз-ўзидан йиғилиш жараёни $C_{60/70}$ эритмасининг ночизиқли оптик хусусиятларига, яъни эритмадан ўтадиган лазер нурланишининг эллипсли қутбланиши солиштирма бурилиши қийматларига таъсир қилади.

Лазер импульси эллипсли қутбланиши ночизиқли бурилишининг эллиптиклик даражасига боғлиқлик эгри чизиғини (8-расм) аппроксимациялаш йўли билан $C_{60/70}$ нинг толуолдаги эритмаси учун ночизиқли Керр коэффициенти n_2 ва учинчи даражали ночизиқли қабул қилувчанлик $\chi^{(3)}(\omega;\omega,\omega,-\omega)$ қийматлари аниқланди (1-жадвал).

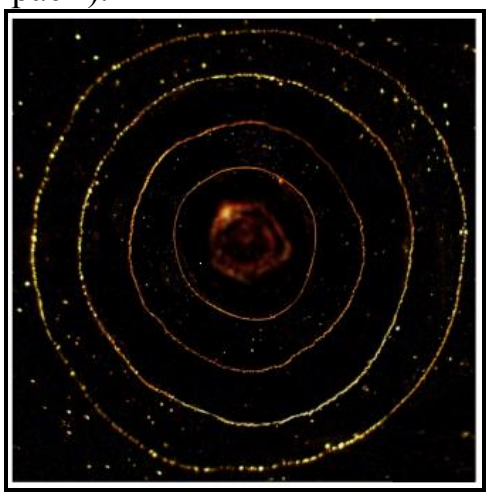
«C_{60} ва C_{70} фуллеренлари молекулаларининг, шунингдек бир деворли углеродли нанотрубкаларнинг эритмалар буғланаётган томчилари ҳажмида ўз-ўзидан ташкилланиш жараёнларини тадқиқ қилиш» деб номланган бешинчи бобда углерод таркибли наноўлчамли объектлар (C_{60}, C_{70} фуллеренлари ва бир деворли углеродли нанотрубкалар) эритмалари томчиларининг иссиқлик буғланиши асосий физик қонуниятлари ва механизмларини тадқиқ этиш натижалари баён қилинган. Тагликнинг гидрофил сиртида фуллерен эритмаларининг буғланаётган томчилари ҳажмида микро ва наноструктураларни, шунингдек нанопленкаларни олишнинг аниқ юқори самарали селектив усуллари таклиф қилинган.

Слюда сиртига жойлаштирилган C_{60} эритмаси томчисидан органик эритувчилар (бензол ва ацетонитрил) аралашмалари буғланганда, C_{60} молекулаларининг ўз-ўзидан ташкилланишлари руй берди ва тўрт хил ўлчамдаги фуллерен mC_{60} нанокластерларини ўз ичига олган характерли халқалар (10-расм) шаклланди. Бу ҳолда томчидаги C_{60} нинг бошланғич концентрацияси ~0.36 г/л, томчи радиуси R≈3.0 мм, томчи баландлиги h≈1.9 мм ни ташкил этган. Хона ҳароратида томчи ҳажмидан эритувчилар (бензол ва ацетонитрил) аралашмасининг тўлиқ буғланиб кетиш вақти $\Delta t \approx 395$ секунд бўлди. Бу ҳолда mC_{60} кластерлари синтезида иштирок этмайдиган C_{60} молекулалари таглик сирти бўйлаб эритувчи билан биргаликда ҳаракатланади ва якунда қаттиқ доиравий диск шаклидаги «қуриган томчи» нинг марказий қисмида тўпланади.

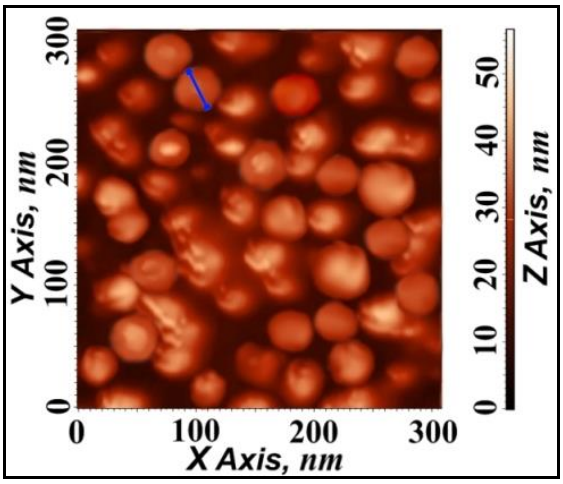
11-расмда C_{60} фуллереннинг мувозанатли усулда тайёрланган «бензол+ацетонитрил» аралашмасидаги эритмасининг буғланаётган томчилари ҳажмида синтез қилинган mC_{60} нанокластерларининг АКМ тасвири берилган. Кўриниб турибдики, синтезланган mC_{60} кластерлари мономолекуляр ва зич тахланган бўлиб, диаметрдаги ўлчамлари ~25÷50 нм га тенг.

12-расмда шиша тагликнинг текис сиртида C_{60} фуллерен эритмаси томчисининг ҳажмидан органик эритувчи (ксилол) тўлиқ буғлангандан сўнг ҳалқа ичида синтезланган наноструктурали mC_{60} кластерларининг СЭМ тасвири кўрсатилган. Бу ҳолда дастлабки эритма мувозанатсиз усулда

тайёрланган. Кўриниб турибдики, C_{60} эритмаси томчисидан ксилол тўлиқ буғлангандан сўнг, таглик сиртида ҳам квазисферик, ҳам чўзинчоқ шарсимон (яъни, эллипсоидал) шаклдаги йирик ғовак mC_{60} кластерлари синтез қилинди (12*а*-расм).

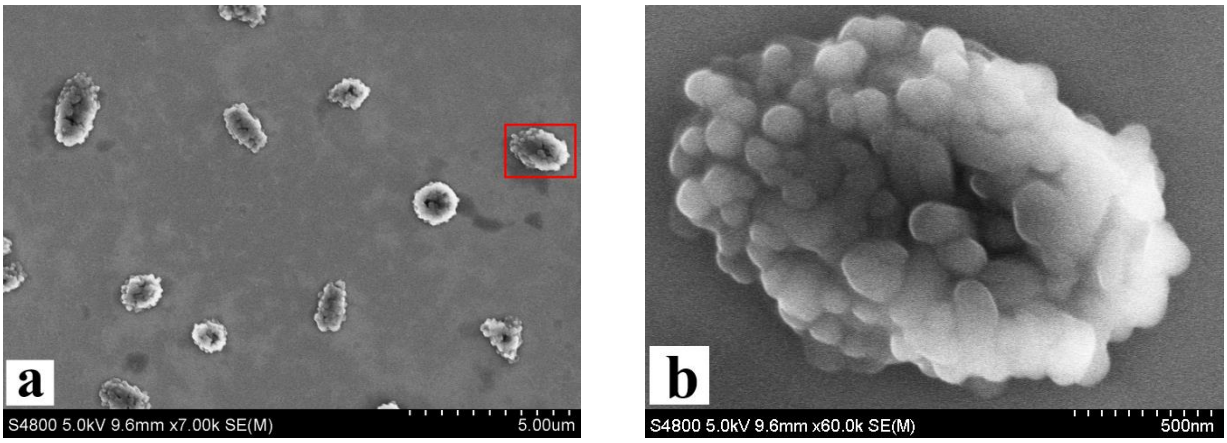


10-расм. Слюда сиртида C_{60} фуллеренининг органик эритувчилар (бензол ва ацетонитрил) аралашмаларидаги эритмаси томчисидан эритувчилар иссиқликдан тулиқ буғланганда қаттиқ фазали заррачаларнинг якуний тақсимланиши.



11-расм. Слюда сиртида C_{60} нинг «бензол+ацетонитрил» аралашмаларидаги эритмаси томчиси буғланишида синтезланган зич тахланган mC_{60} кластерларининг АКМ тасвири.

Ҳалқага нисбатан тасодифий йўналган mC_{60} эллипсоид шаклидаги кластерларининг катта ва кичик ўқлари узунлиги мос равишда ~1900 нм ва ~1250 нм (12*в*-расм). Ушбу тасвирдан яққол кўриниб турибдики, синтез қилинган наноструктурали ва ғовак йирик mC_{60} кластерлар диаметри ~80÷220 нм бўлган кичикроқ оралиқ дискрет C_{60} кластерларидан иборат.



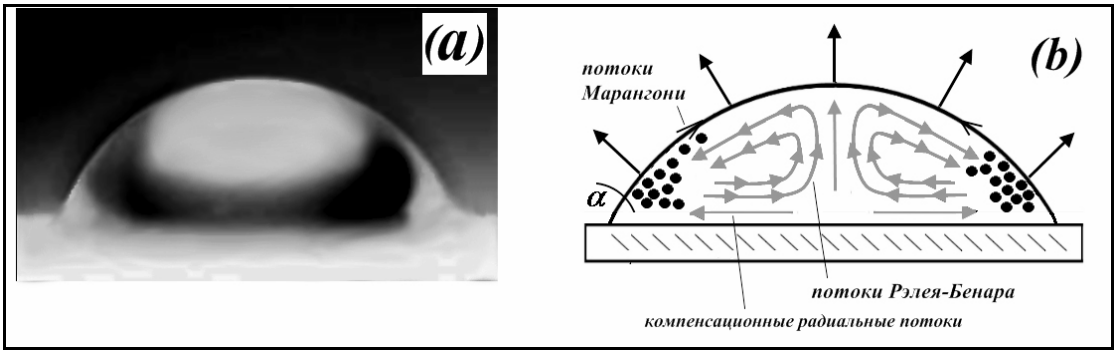
12-расм. (*а*) шиша тагликнинг текис сиртида C_{60} фуллерен эритмаси томчисининг ҳажмидан органик эритувчи (ксилол) тўлиқ буғлангандан сўнг ҳалқа ичида синтезланган наноструктурали mC_{60} кластерларнинг СЭМ тасвири; (*в*) белгиланган кластернинг катталаштирилган СЭМ тасвири. C_{60} фуллереннинг эритмадаги бошланғич концентрацияси ~0.24 г/л.

Горизонтал равишда ўрнатилган қаттиқ тагликнинг текис сиртида жойлаштирилган бир ва кўп компонентли эритувчилардаги C_{60} фуллерени

(ёки C_{70} фуллерени, углеродли нанотрубка) нинг эритмалари томчиларининг буғланиш хусусиятларини кўп марта микроскопик тадқиқ қилиш натижасида қўйидаги қонуниятлар аниқланди:

– тоза органик эритувчилар (бензол, толуол, тетрагидрофуран, …) нинг томчилари иссиқликдан буғланишда чегаравий бурчак α нинг қиймати сақланади (13*b*-расм). Бироқ, «томчи–таглик» контакт асоси юзасининг томчи тўла буғланиб кетгунича аста секин кичрайиши содир бўлади;

– агар томчи таркибида эриган модданинг молекуляр ёки коллоид заррачалари (C_{60}, C_{70} фуллеренлари, углеродли нанотрубка) бўлса (13*a*-расм), у ҳолда тубдан бошқача ҳолат содир бўлади – эритувчининг иссиқликдан буғланишида томчи асоси юзаси доимий сақланади. Бу ҳолатда «контакт чизиғи пиннинги» режими амалга ошади. Бундан ташқари, томчи чегаравий бурчаги α қиймати аста секин $\alpha \approx 0°$ гача камаяди.

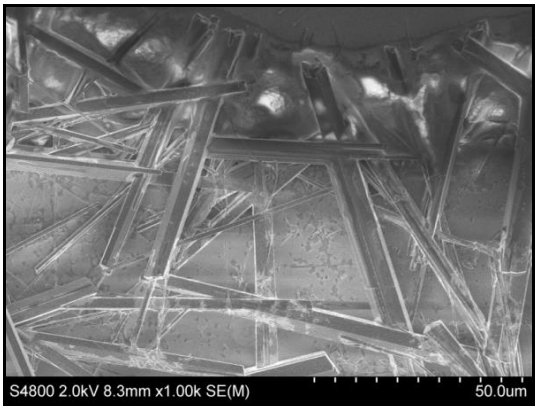


13-расм. (*a*) шиша таглик сиртида C_{60} эритмасининг асоси диаметри $d_0 \approx 9.2$ мм бўлган томчиси фототасвири; (*b*) буғланаётган томчи ичида C_{60} фуллерени (ёки C_{70} фуллерени, углеродли нанотрубка) нинг ўз-ўзидан йиғилиши ва ҳаракат оқими схемаси.

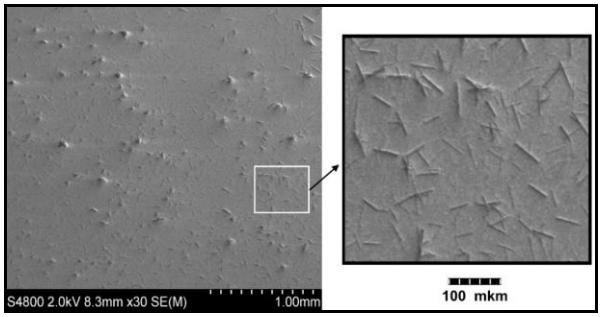
C_{60} (ёки C_{70}) фуллерени эритмаси томчиларининг буғланиши жараёнида Релей–Бенар ва Марангони эффектларининг буғланаётган томчининг ҳам ҳажмида, ҳам сиртга яқин қатламларида биргаликдаги таъсири туфайли кучли капилляр оқимлари (Релей–Бенар оқимлари ва Марангони оқимлари деб аталадиган) пайдо бўлади. Бу эса C_{60} (ёки C_{70}) молекулаларининг ўзаро яқинлашишига ва эриган модда молекулаларидан $C_{60}+C_{60}+ \cdots +C_{60} \rightarrow mC_{60}$ (ёки $C_{70}+C_{70}+ \cdots +C_{70} \rightarrow mC_{70}$) схемаси бўйича mC_{60} (ёки mC_{70}) кластерлари синтезига олиб келади. Таглик сиртидаги фуллерен эритмаси томчиси ҳолатининг ушбу қонуниятлари хона ҳароратида эритувчи буғланишидан то тўлиқ йўқолишига қадар давом етади.

14-расмда C_{60} фуллеренининг орто-ксилолдаги молекуляр эритмасидан олинган ва $T \approx 35°C$ гача қиздирилган горизонтал жойлашган шиша таглик силлиқ сиртига томизилган битта «яккаланган» томчи ҳажмидан орто-ксилолнинг буғланиши жараёнида ҳосил бўлган ипсимон кристалли mC_{60} нановискерларнинг СЭМ тасвири кўрсатилган. Таъкидлаш жоизки, ишчи эритма томчисида қатъий белгиланган C_{60} концентрациясида таглик ҳароратининг оширилиши нафақат тезкор нановискерлар шаклланишига ва кристалли нановискерларнинг ўсишига, балки синтез қилинган mC_{60} нановискерлар якуний геометрик ўлчамларининг катталашишига ҳам олиб келди. Биздаги тажриба шароитида олинган ипсимон кристал *«вискер»*

ларнинг максимал узунлиги ва эни қийматлари ~80 мкм ва ~7.0 мкм гача етди (14-расм).



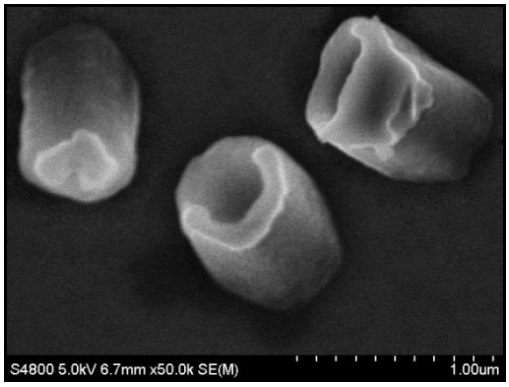
14-расм. C_{60} фуллерени ипсимон структуралари (whiskers) нинг СЭМ тасвири. C_{60} фуллереннинг томчидаги дастлабки концентрацияси ~2.84 г/л.



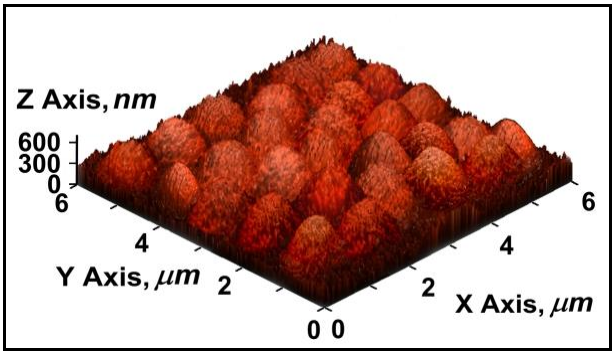
15-расм. Олинган юпқа фуллеренли пленканинг СЭМ тасвири (чапда) ва юпқа пленка белгиланган фрагментининг катталашган тасвири (унгда).

15-расмда тажрибада олинган бир-бирига зич жойлашган ипсимон кристалл mC_{60} вискерлар ва C_{60} фуллерени молекуляр қатламларидан ташкил топган, қалинлиги ~10 мкм бўлган яримўтказгичли юпқа қопламанинг СЭМ тасвири кўрсатилган. Бу тажрибада C_{60} фуллереннинг томчидаги бошланғич концентрацияси ~3.86 г/л ва таглик ҳарорати ~28°C ни ташкил этган.

16-расмда C_{60} фуллерени эритмасининг кремнийли таглик силлиқ сиртидаги яккаланган томчиси ҳажмидан органик эритувчилар (0.8:0.2 ҳажмий улушдаги «этилбензол+изопропил спирт») нинг иссиқликдан буғланиши жараёнида олинган C_{60} фуллерени асосли нанотрубкаларнинг СЭМ тасвири берилган.



16-расм. C_{60} фуллерени эритмасининг кремнийли таглик силлиқ сиртидаги буғланаётган томчиси ҳажмида олинган C_{60} фуллерени асосли нанотрубкаларнинг СЭМ тасвири. C_{60} фуллереннинг томчидаги дастлабки концентрацияси ~2.2 г/л.



17-расм. Бир қатламли ғовак фрактал mC_{60} кластерларидан ташкил топган наноқопламанинг АКМ тасвири. C_{60} фуллереннинг томчидаги дастлабки концентрацияси ~1.2 г/л.

16-расмдан кўриниб турибдики, нанотрубкаларнинг ташқи ва ички диаметрлари мос ҳолда $d_1 \approx 600\pm5$ нм ва $d_2 \approx 410\pm5$ нм. Олинган нанотрубкаларнинг ўртача узунлиги $l\approx790\pm10$ нм ни ташкил этади. Таъкидлаш жоизки, нанотрубканинг дастлабки шаклланиши ва кейинчалик ўсиши бошланадиган бир томони ёпиқдир (16-расм). Бу эса C_{60}

нанотрубкаларини нанокапиллярлар, нанореакторлар ва наносорбентлар сифатида қўлланилишида функционаллиги ва қулайлигини таъминлайди.

17-расмда ўлчамлари $X\times Y\times Z=6\times6\times0.6$ мкм^3 бўлган тўла органик наноқопламанинг АКМ тасвири берилган. Ушбу наноқоплама фрактал mC_{60} кластерлари мавжуд C_{60} фуллеренининг коллоид эритмасидан (~1.2 г/л) олинган умумий $V\approx400$ мкл ҳажмдаги томчиларининг оптик шишанинг силлиқ сиртида буғланиши натижасида олинган. Ушбу тасвир эса коллоид эритма томчиси ҳажмидан органик эритувчилар (0.9:0.1 ҳажмий улушдаги толуол ва тетрагидрофуран) тўлиқ буғланиб кетгандан сунг олинган. Кўриниб турибдики, оптик шиша сиртида олинган уч ўлчамли наноқоплама бир-бирига зич жойлашган диаметрдаги ўлчамлари ~700÷1200 нм бўлган фрактал mC_{60} кластерларининг фақат битта қатламидан иборат.

ХУЛОСАЛАР

1. Ёритувчи электрон микроскопия методида мувозанатли усулда тайёрланган толуолдаги C_{60} эритмасида диаметрдаги ўлчамлари ~30÷60 нм бўлган квазисферик шаклдаги зич тахланган мономолекуляр mC_{60} нанокластерлари ҳосил бўлиши аниқланди. Мувозанатсиз усулда тайёрланган толуолдаги C_{60} эритмаларида эса диаметрдаги ўлчамлари ~280÷350 нм бўлган квазисферик шаклдаги фрактал йирик mC_{60} нанокластерлар синтез бўлиши аниқланди.
2. Фуллеренларнинг (C_{60}, C_{70} ва уларнинг аралашмаларининг) қутбли ва кам қутбли эритувчиларда ҳам зич тахланган, ҳам фрактал наноструктуралари ҳосил бўлиши ва ўсишининг физик механизмлари таклиф этилди.
3. Эритмаларда C_{60}, C_{70} ва уларнинг аралашмалари молекулаларининг ўз-ўзидан ташкилланиш жараёнининг диагностикаси ҳамда синтезланган нанокластерларнинг (mC_{60}, mC_{70} ва $mC_{60/70}$) барқарорлик даражасини аниқлайдиган янги спектроскопик метод таклиф этилди.
4. Оптик спектроскопия методида C_{60}/NMП эритмасига ксилолнинг қўшилиши эритмада «C_{60}–NMП» комплексларининг бузилиши ҳисобига mC_{60} кластерларнинг қайта ташкилланишига олиб келиши кўрсатилди. Ёруғликнинг динамик сочилиши ва ёритувчи электрон микроскопия методларида C_{60}/NMП/ксилол эритмада нанокластерларнинг қайта ташкилланишидан кейин синтезланган ғовак mC_{60} нанокластерларининг геометрик ўлчамлари камайиши аниқланди.
5. Бир деворли углеродли нанотрубкаларнинг «сув+диметилформамид» эритувчиларининг мос ҳолда 0.9:0.1 ҳажмий улушлардаги аралашмасидаги эритмасида асосан нанотрубкаларнинг ўзаро параллел тўпламларидан ташкил топган тартибланган агрегатлар ҳосил бўлиши ўрнатилди. Бу ҳолда бир деворли нанотрубкалардан олинган агрегатлар узунлиги ~16 мкм, диаметри ~5.2 мкм ни ташкил этди.
6. ИҚ спектроскопия методида $C_{60/70}$ нинг толуолдаги эритмасини хона ҳароратида 60 сутка сақлагандан сунг ~1571, ~1534, ~1363.7, ~1270, ~1186, ~1050, ~1025, ~917, ~878, ~765 ва ~485 см$^{-1}$ частотавий максимумларга эга

11 та янги кенгайган ютилиш соҳалари пайдо бўлиши илк бор кўрсатилди. Бундан ташқари янги тайёрланган эритмада ҳам кузатилган асосий ИҚ-ютилиш чизиқлари (~1459.6, ~1432, ~1414.2, ~1135, ~1088, ~794, ~645, ~578, ~564 ва ~455 $см^{-1}$) сезиларли кенгайиши аниқланди.

7. Илк бор $C_{60/70}$ нинг толуол ва ксилолдаги эритмаларида импульсли лазер нурланиши эллиптик қутбланишининг ночизиқли бурилиш эффекти лазер нурланишининг фақат эллиптик қутбланишида кузатилиб, чизиқли қутбланишда йўқолиши ўрнатилди. $C_{60/70}$ эритмаларида ҳам лазер нурланиши қутбланиши эллиптиклик даражасининг, ҳам интенсивлигининг ошиши эллипсли қутбланиш бурилиш бурчагининг ошишига олиб келиши кўрсатилди. Бундан ташқари $C_{60/70}$ фуллереннинг эритмалардаги концентрациясининг ошиши лазер нурланиши эллипсли қутбланишининг солиштирма бурилиш бурчагининг сезиларли камайишига олиб келиши аниқланди.

8. Илк бор қаттиқ тагликнинг силлиқ сиртида буғланаётган «эритмалар томчилари» ҳажмида фуллеренларнинг ҳам фрактал наноструктурали, ҳам зич тахланган кластерлари (mC_{60}, mC_{70}) ни тезкор синтези усули таклиф қилинди ва амалга оширилди.

9. Тоза органик эритувчилар (бензол, толуол, ксилол, …) ва уларнинг аралашмаларининг томчилари хона ҳароратида иссиқликдан буғланишда чегаравий бурчак α нинг қиймати сақлайди, бироқ «томчи–таглик» контакт асоси юзасининг томчи тўла буғланиб кетгунича аста секин кичрайиши содир бўлиши ўрнатилди. C_{60}, C_{70} фуллеренлари, шунингдек углеродли нанотрубка эритмалари томчилари иссиқликдан буғланишида «томчи–таглик» контакт асоси юзаси доимий сақланиб, томчи чегаравий бурчаги α нинг қиймати аста секин йўқолгунча ($\alpha \approx 0°$) камаяди.

10. Томчи ҳажмида фуллеренларнинг mC_{60} ва mC_{70} кластерларини синтез қилишнинг аниқ физик механизми – "Оствальд етилиши", яъни нисбатан йирикроқ наноструктуралар майдалари ҳисобига ўсиши таклиф этилди.

11. Илк бор C_{60} фуллерен макромолекулаларидан ташкил топган нано- ва микроўлчамли органик структуралар (нановискерлар, нанотрубкалар, нанопленкалар ва наноқопламалар) ни олишнинг янги «томчи усули» таклиф қилинди.

12. Кремнийли силлиқ таглик сиртида бир-бирига зич жойлашган ипсимон кристалл mC_{60} вискерлар ҳамда C_{60} фуллерени молекуляр қатламларидан ташкил топган, қалинлиги ~10 мкм бўлган наноструктурали яримўтказгичли органик қоплама олинди.

13. Илк бор тажрибада олинган C_{60} фуллерени асосли кўп деворли нанотрубкаларнинг ~100÷120 нм қалинликдаги ташқи девори мономолекуляр ва силлиқ, шунингдек ~70÷90 нм қалинликдаги ички девори ғовак структурали эканлиги кўрсатилди.

14. Илк бор қаттиқ таглик сиртида бир-бирига зич жойлашган қалинлиги ~700÷1200 нм бўлган фрактал mC_{60} кластерларининг фақат битта қатламидан иборат органик қоплама олинди.

НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК DSc.02/30.12.2019.FM.65.01 ПРИ ИНСТИТУТЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

ИНСТИТУТ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

МАХМАНОВ УРОЛ КУДРАТОВИЧ

МЕХАНИЗМЫ САМООРГАНИЗАЦИИ ОРГАНИЧЕСКИХ МАКРОМОЛЕКУЛ ФУЛЛЕРЕНОВ C_{60}, C_{70}, А ТАКЖЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК В РАСТВОРАХ И В ОБЪЁМЕ ИСПАРЯЮЩИХСЯ КАПЕЛЬ

01.01.05-Оптика

АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА (DSC) ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК

ТАШКЕНТ –2021

Тема докторской (DSc) диссертации зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № B2020.4.DSc/FM169.

Диссертация выполнена в Институте ионно-плазменных и лазерных технологий им. У.А.Арифова

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещён на веб-странице Научного совета (http://iplt.uz/) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziyonet.uz).

Научный консультант:	**Коххаров Абдулмуталлиб Мамаджанович** доктор физико-математических наук
Официальные оппоненты:	**Нематов Шерзод Каландарович** доктор физико-математических наук, профессор
	Пайзиев Шермухаммад Далиевич доктор физико-математических наук, с.н.с.
	Рахматуллаев Илёс Арзимуродович доктор физико-математических наук, доцент
Ведущая организация:	**Национальный Университет Узбекистана**

Защита диссертация состоится «28» мая 2021 г. в 14^{00} часов на заседании Научного совета DSc.02/30.12.2019.FM.65.01 при Институте ионно-плазменных и лазерных технологий по адресу: 100125, г. Ташкент, ул. Дурмон йўли 33.Тел./факс: (99871) 262-32-54, e-mail: info@iplt.uz.

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института ионно-плазменных и лазерных технологий (зарегистрирована за № 5), по адресу. 100125, г. Ташкент, ул. Дурмон йўли, 33. Тел: (+99871) 262-31-69.

Автореферат диссертации разослан « 12 » мая 2021 г.

(протокол реестра № 5 от « 12 » мая 2021 г.).

Х.Б. Ашуров
Председатель научного совета по присуждению ученых степеней, д.т.н., профессор

И.Д. Ядгаров
Ученый секретарь научного совета по присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н., с.н.с

Б.Е. Умирзаков
Председатель научного семинара при научном совете по присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация докторской (DSc) диссертации)

Актуальность и востребованность темы диссертации. На сегодняшний день, в мире непрерывно возрастает интерес к изучению физических особенностей новых наноразмерных аллотропных форм углерода, в частности к фуллеренам C_{60}, C_{70} и углеродным нанотрубкам в растворах. Нанокластеры и наноструктуры, полученные в результате самоорганизации молекул фуллеренов, а также углеродных нанотрубок в растворах представляют собой уникальные перспективные нанообъекты, необходимые при получении новых наноструктурированных функциональных материалов. В связи с этим изучение процессов самоорганизации и самосборки наноразмерных объектов в жидких системах является одной из важнейших задач современной физики.

В последние годы уделяется большое внимание к изучению процессов молекулярной самоорганизации вещества в растворах, в частности к синтезу наноразмерных структур в объёме испаряющихся капель растворов. Растущий интерес к подобным исследованиям обусловлен, в первую очередь, перспективами создания новых высокоэффективных методов получения наноматериалов с новыми физико-химическими свойствами, а также создание различных функциональных устройств на их основе.

В Узбекистане большое внимание уделяется развитию современной науки о наноразмерных материалах, в частности, к синтезу различных наноструктурированных объектов. В частности, учеными Узбекистана получены важнейшие результаты по управляемому синтезу наноструктурированных материалов. Определены их размерные характеристики, а также нелинейно-оптические свойства. В стратегии развития Республики Узбекистан в 2017-2021 годах отмечены следующие задачи [3] «Стимулирование научно-исследовательской и инновационной деятельности, создание эффективных механизмов внедрения научных и инновационных достижений в практику при высших образовательных учреждениях и научно-исследовательских институтах, научно-экспериментальных специализированных лабораториях и центрах высоких технологий». В связи с этим исследование физических механизмов протекания процессов самоорганизации органических макромолекул фуллеренов C_{60}, C_{70}, а также углеродных нанотрубок в растворах, а также в объёме испаряющихся капель растворов имеют важное значение.

Диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в ряде указов и постановлений Президента Республики Узбекистан, в том числе в четвертом направлении из пяти приоритетных направлений, приведённых в Указе Президента №-УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» от 7 февраля 2017 года и № ПП–2789 «О мерах по дальнейшему

[3]Указ Президента Республики Узбекистан № УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017–2021 годы» от 07 февраля 2017 г.

совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности» от 17 февраля 2017 года, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере и изложенных в соответствующих законодательных актах.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетными направлениями развитии науки и технологий Республики Узбекистан – II. «Физика, астрономия, энергетика и машиностроение».

Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации.[4]

Исследования особенностей молекул фуллеренов и углеродных нанотрубок в жидких средах как в изолированном, так и в агрегированном состояниях проводятся в ведущих центрах и в высших образовательных учреждениях, в том числе в: Florida State University (США), Nagoya University (Япония), Hanyang University (Южная Корея), Tsinghua University (Китай), University of Huddersfield (Великобритания), Харьковском национальном университете имени В.Н. Каразина (Украина), Киевском национальном университете им. Тараса Шевченка (Украина), Московском государственном университете (Россия), Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе (Россия), Юго-Западном государственном университете (Россия), Национальном исследовательском центре Курчатовского института (Россия), Институте ионно-плазменных и лазерных технологий Академии Наук Республики Узбекистан и в ряде других научных центрах мира.

К настоящему времени ряд актуальных задач в этой области решены, в частности теоретически исследована кластерная модель растворения фуллеренов, а также переход растворов фуллеренов из молекулярных состояний в коллоидные (Tsinghua University, University of Huddersfield, Национальный исследовательский центр Курчатовский институт). Работы по экспериментальному исследованию поведения углеродных наночастиц в широком диапазоне растворов с различной концентрацией, а также получению на их основе наноразмерных структур ведутся в Харьковском национальном университете имени В. Н. Каразина, в Киевском национальном университете им. Тараса Шевченка, в Московском

[4]Обзор международных научных исследований по теме диссертации проведен на основе Preparation and UV/visible spectra of fullerenes C_{60} and C_{70} // Chemical Physics Letters. 2013. Vol. 589, pp. 57–60, Diameter-Dependent Band Gap Modification of Single-Walled Carbon Nanotubes by Encapsulated Fullerenes // J Phys Chem C. 2009 Vol. 113, pp.571–575, Fullerenes in liquid media: an unsettling intrusion into the solution chemistry // Chemical Reviews. 2013. Vol. 113, pp.5149-5193, Improved spectrophotometric analysis of fullerenes C_{60} and C_{70} in high-solubility organic solvents // Anal. Sci. 2015. Vol. 31, pp. 125-130, Self-assembly and self-organization processes of carbon nanotubes in the colloidal systems // Journal of nano- and electronic physics. 2015. Vol. 7, pp. 04014, On the evaporation kinetics of [60] fullerene in aromatic organic solvents // Phys. Chem. Chem. Phys. 2018. Vol.20, pp.11296-11305 и др. источников.

государственном университете, в Физико-техническом институте им. А.Ф.Иоффе и в Институте ионно-плазменных и лазерных технологий.

Степень изученности проблемы. Активный интерес к изучению структурных особенностей и основных физических свойств фуллеренов, а также углеродных нанотрубок возник после разработки технологии их синтеза в граммовых количествах. Исследование процессов образования кластеров фуллеренов в растворах позволяет получить ряд уникальных и принципиально новых физических свойств микро- и наноструктур, состоящих из более меньших по размерам нанокластеров фуллеренов. Основными высокочувствительными инструментами для изучения протекающих в растворах процессов кластеризации молекул фуллеренов служат хорошо известные методы малоуглового рассеяния нейтронов, сканирующая туннельная микроскопия, атомно-силовая микроскопия, просвечивающая электронная микроскопия, оптическая спектроскопия и др.

В работах Ю.П. Сун и К.Е. Бункера методом абсорбционной спектроскопии впервые было обнаружено явление сольватохромизма в растворах фуллерена C_{70} в смесях ацетонитрила и толуола. Изменение характера спектров электронных поглощений растворов C_{70} в бинарных растворах при незначительном изменении состава растворителей, авторы объясняют как склонностью молекул фуллерена к самоагрегации, так и образованием комплексов между макромолекулой C_{70} и молекулой растворителя. При этом методом динамического рассеяния света было показано, что рост средных геометрических размеров кластеров C_{70} сопровождается увеличением как количества ацетонитрила в смеси, так и концентрации фуллерена в растворе. В последнее время активно исследуется явление сольватохромизма также и в растворах фуллеренов (C_{60}, C_{70}) в различных бинарных растворителях.

В работах авторов В.Н. Безмельницын, А.В. Елецкий и М.В. Окуня постулируется «кластерная структура» фуллеренов в различных органических растворителях. До сих пор изучение состояния молекул фуллеренов в низкополярных растворителях является предметом дискуссий. М.В. Авдеев, Т.В. Тропин и В.Л. Аксенов теоретически показали, что при равновесном растворении фуллеренов в «хороших» растворителях образуются только молекулярные растворы фуллеренов. В рамках теории нуклеации разработано кинетическое описание формирования и роста фуллереновых кластеров в растворах. Предложены модели ограниченного роста фуллереновых кластеров с использованием классической капельной модели.

К настоящему времени основные экспериментальные работы, посвященные изучению поведения углеродных наноразмерных объектов (фуллеренов и нанотрубок) в растворах, ограничивались в основном рассмотрением кластеризация их молекул в насыщенных растворах. Но сравнительно мало работ, в которых рассматривались процессы формирования и роста кластеров фуллеренов в слабо концентрированных растворах, а также в объеме испаряющихся капель растворов. Полученные

экспериментальные результаты формирования как плотноупакованных, так и пористых наноструктурированных кластеров фуллеренов C_{60},C_{70} и ОСУНТ открывают новые возможности для создания новых наноразмерных функциональных материалов, а также тонких пленок для современных технологий.

Связь темы диссертации с научно-исследовательскими работами научно-исследовательского учреждения, в котором выполняется диссертация. Работа выполнена по плану научно-исследовательских работ Института ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз. в рамках фундаментальных научных проектов: № ФА-Ф2-Ф146 «Процессы кластерообразования, самосборки и самоорганизации фуллеренов в растворах» (2012-2016 гг.), № ОТ-Ф2-51 «Фундаментальные основы синтеза новых функциональных наноматериалов для оптоэлектроники и солнечной энергетики на основе фуллеренов и их производных» (2017-2020 гг.).

Цель исследования. Целью данной работы является исследование физических механизмов самоорганизации органических макромолекул фуллеренов C_{60}, C_{70}, а также углеродных нанотрубок в растворах и в объёме испаряющихся капель растворов.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие **задачи исследования:**

экспериментальное исследование характера самоорганизации и самосборки молекул фуллеренов C_{60}, C_{70}, а также в их смесях в различных полярных и слабополярных органических растворителях;

поиск оптимальных методов получения стабильных во времени наноструктурированных кластеров из молекул фуллеренов C_{60} и C_{70} в растворах;

экспериментальное исследование эффекта нелинейного вращения эллипса поляризации (НВЭП) лазерных импульсов в растворах фуллерена C_{70}, а также в смеси C_{60} и C_{70} в ряде органических растворителях;

выявление конкретных физических механизмов самоорганизации частиц дисперсной фазы в объеме испаряющихся капель растворов C_{60} и C_{70} в одно- и двухкомпонентных органических растворителях;

экспериментальное исследование протекания процессов самоорганизации одностенных углеродных нанотрубок (ОСУНТ) как в растворах, так и в объеме испаряющихся капель растворов;

получение наноразмерных органических структур (нановискеров, нанотрубок, нанопленок, нанопокрытий) на основе фуллерена C_{60}.

Объектами исследования являются растворы фуллеренов (C_{60}, C_{70}) и одностенных углеродных нанотрубок в одно- (толуол, бензол, ксилол, N-метилпирролидон, тетрагидрофуран) и двухкомпонентных (толуол+тетрогидрофуран, ксилол+тетрогидрофуран, бензол+ацетонитрил, N-метил-2-пирролидон+ксилол, вода+диметилформамид, этилбензол+изопропиловый спирт) растворителях.

Предметом исследования являются физические закономерности самоорганизации молекул фуллеренов C_{60},C_{70}, а также одностенных

углеродных нанотрубок как в растворах, так и в объёме испаряющихся капель растворов, эффект нелинейного самовращения эллипса поляризации лазерного излучения в растворах фуллерена C_{70} и в смеси «C_{60}+C_{70}».

Методы исследования. В диссертационной работе были использованы следующие высокочуствительные методы исследования: просвечивающая электронная микроскопия, сканирующая электронная микроскопия, атомно-силовая микроскопия, электронная и инфракрасная (ИК) спектроскопия, динамическое рассеяние света, а также нелинейная спектроскопия (самовращение эллипса поляризация лазерного импульса в растворах).

Научная новизна исследования заключается в следующих результатах:

определены физические механизмы формирования и роста как плотноупакованных, так и пористых фрактальных наноструктур фуллеренов (C_{60}, C_{70} и их смесей) в различных полярных и слабополярных растворителях. Экспериментально, показано, что структура и фрактальность полученных нанокластеров mC_{60}, mC_{70} и $mC_{60/70}$ в растворах сильно зависят от способа приготовления исходных растворов (где m – количество молекул фуллеренов в нанокластере);

разработан новый спектроскопический метод диагностики процессов самоорганизации молекул фуллеренов C_{60}, C_{70} и их смесей, а также определения степени устойчивости синтезируюмых нанокластеров (mC_{60}, mC_{70} и $mC_{60/70}$) в растворах;

впервые выявлено, что в растворах $C_{60/70}$ эффект НВЭП наблюдается исключительно при эллиптической поляризации лазерного излучения. Показано, что в растворах фуллеренов $C_{60/70}$ увеличение как степени эллиптичности, так и интенсивности лазерного излучения приводит к росту угла вращения эллипса поляризации;

найдена корреляция между процессами формирования, роста кластеров $mC_{60/70}$ в растворах и величиной углов НВЭП прошедщего через среду лазерного излучения. Показано, что рост концентрации фуллерена $C_{60/70}$ в растворах приводит к заметному уменьшению величины удельного вращения эллипса поляризации лазерного излучения;

впервые предложен и реализован метод ускоренного синтеза как наноструктурированных фрактальных, так и плотноупакованных кластеров фуллеренов mC_{60} и mC_{70} в объеме испаряющихся «капель растворов», находящихся на плоской поверхности подложки;

предложен конкретный физический механизм синтеза кластеров mC_{60} и mC_{70} в объеме испаряющихся капель, а именно, «оствальдовское созревание», согласно которому относительно большие наноструктуры растут за счет меньших;

впервые предложен «капельный метод» получения нано- и микроразмерных органических структур (нановискеров, нанотрубок, нанопленок и нанопокрытий), состоящих из макромолекул фуллерена C_{60}.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработаны и реализованы новые методы получения как мономолекулярных плотноупакованных, так и фрактальных пористых нанокластеров фуллеренов mC_{60}, mC_{70} и $mC_{60/70}$ в объеме испаряющихся капель растворов;

разработаны управляемые селективные методы получения наноразмерных органических структур (нановискеров, нанотрубок, нанопленок и нанопокрытий) на основе фуллерена C_{60} в объеме испаряющихся капель растворов;

выработаны экспериментальные методы диагностики процессов самоорганизации и самосборки макромолекул фуллеренов, а также определение степени устойчивости синтезированных нанокластеров фуллеренов в растворах методами оптической спектроскопии.

Достоверность результатов исследований обосновывается использованием в работе современных высокоточных методов электронно-микроскопических и спектроскопических исследований особенностей наноразмерных кластеров фуллеренов (C_{60}, C_{70}) и ОСУНТ, а также высокой степенью воспроизводимости полученных в экспериментах результатов.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов диссертационного исследования заключается в том, что они позволяют объяснить конкретные физические механизмы процессов самоорганизации молекул фуллеренов C_{60}, C_{70}, а также углеродных нанотрубок как в растворах, так и в объеме испаряющихся капель растворов.

Практическая значимость результатов исследований диссертации состоит в том, что методы синтеза микро- и наноразмерных органических структур (т.н. нановискеров, нанотрубок, нанопленок, нанопокрытий) на основе фуллерена C_{60} в объеме испаряющихся капель растворов могут быть использованы при получении новых функциональных наноматериалов, а также элементов микро- и наноэлектроники.

Внедрение результатов исследования. На основе результатов исследований конкретных физических механизмов самоорганизации молекул фуллеренов C_{60}, C_{70}, а также углеродных нанотрубок как внутри раствора, так и в объёме испаряющихся капель:

экспериментальные результаты, полученные при исследовании эффекта нелинейного вращения эллипса поляризации высокоинтенсивных лазерных импульсов в растворах фуллерена C_{70}, а также в смеси C_{60} и C_{70}, были использованы в фундаментальном проекте № БФ2-027 «Механизмы формирования и роста металических наночастиц и исследование их нелинейно-оптических свойств» (справка № 02-02/1313 Министерство Инновационного развития Республики Узбекистан от 05 марта 2021 года). Использование научных результатов позволило эффективно проанализировать особенности образования металлических наноразмерных частиц под действием высокоинтенсивного импульсного лазерного излучения и установить вклады нелинейно-оптических параметров среды;

научные результаты, полученные при изучении процессов самоорганизации молекул фуллеренов (C_{60}, C_{70}), были использованы в фундаментальном проекте № ОТ-Ф2-46 «Теоретическое исследование процессов взаимодействия фотонов, атомных частиц и электронов с фуллеренами и углеродными нанотрубками» (справка № 2/1255-569 Академия Наук Республики Узбекистан от 25 февраля 2021 года). Использование полученных нами научных результатов позволило теоретически оценить природу межмолекулярных взаимодействий фуллеренов, а также анализировать процессы взаимодействия молекул фуллеренов с атомами, электронами и фотонами;

экспериментальные результаты, полученные в ходе проведения исследований эффекта нелинейного самоиндуцированного вращения эллипса поляризации лазерных импульсов в растворах фуллерена C_{70}, были использованы при дальнейших исследованиях нелинейности рефракции двухфазных синхронизирующих усилителей, а также для изучения нелинейностей высоких порядков плазмонных композитов, состоящих из металлических наночастиц в зарубежных журналах с высоким импакт-фактором (Advances in optics and photonics 2017, V. 9, Scopus, IF – 22.95; Optics express 2014, V.21, Scopus, IF – 7.2; Optics communications 2014, V.310, Scopus, IF – 3.1). Использование научных результатов позволило развить методы получения различных наноструктурированных оптических переключателей на основе металлло-диэлектрических нанокомпозитов;

экспериментальные результаты, полученные при изучении формирования наноразмерных структур фуллеренов в объеме испаряющихся капель растворов на поверхности подложки, а также эффекта нелинейного вращения эллипса поляризации лазерных импульсов в растворах фуллеренов C_{70}, $C_{60/70}$ были использованы в исследованиях Американского университета Шарджи (Справка от 8 марта 2021 г., Американский университет Шарджи, ОАЭ). Использование научных результатов позволило лучше понять природу образования наночастиц разного размера под действием импульсного лазерного излучения высокой интенсивности и оценить их нелинейно-оптические параметры высокого порядка.

Апробация результатов исследования. Основные результаты работы доложены и обсуждены на 29 конференциях, в том числе на 14 международных и 15 республиканских научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов исследования. Основные результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 50 научных трудах, из которых 21 статья в научных журналах, в том числе 7 в зарубежных и 14 в республиканских журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций.

Структура и объем диссертации. Структура диссертации состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объем диссертации содержит 214 страниц текста, включая 83 рисунков и 4 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснованы актуальность и востребованность темы диссертационной работы в соответствии с исследованиями приоритетных направлений развития науки и технологий Республики Узбекистан, приведены обзор международных научных исследований по теме диссертации, степень изученности проблемы, сформулированы цели и задачи, выявлены объекты, предметы и методы исследования, изложена научная новизна исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта их теоретическая и практическая значимость, представлены краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, а также об объеме и структуре диссертации.

В первой главе диссертации **«Обзор исследований процессов самоорганизации молекул фуллеренов, а также углеродных нанотрубок в различных средах»** приведен обзор современного состояния теоретических и экспериментальных исследований молекул фуллеренов C_{60}, C_{70}, а также одностенных углеродных нанотрубок (ОСУНТ) как в растворителях, так и в объеме испаряющихся капель растворов. Рассмотрены широко используемые методы исследования кластерного состояния наноразмерных углеродсодержащих объектов в различных средах. На основе анализа имеющихся теоретических и экспериментальных данных сформулирована постановка задачи исследования.

Во второй главе «**Использованные методы исследования состояния молекул углеродных наноразмерных частиц в растворах и в объеме высыхающей капли их растворов**» приведено краткое описание использованных методов исследований, а также представлены наиболее важные характеристики объектов исследования. Подробно описаны особенности различных высокочувствительных косвенных (оптическая спектроскопия, динамическое рассеяние света (ДРС) и вискозиметрия) и прямых методов исследований (просвечивающая электронная микроскопия высокого разрешения (ПЭМ ВР), сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), атомно-силовая микроскопия (АСМ) и оптическая микроскопия).

Описаны характеристики разработанной автоматизированной экспериментальной установки, предназначенной для исследования эффекта нелинейного вращения эллипса поляризации (НВЭП) высокоинтенсивных лазерных импульсов в растворах фуллерена C_{70}, а также в смесях фуллеренов C_{60} и C_{70}.

Принципиальная схема экспериментальной установки и автоматизированной системы регистрации представлена на рис. 1. В качестве источника излучения использовался импульсный YAG:Nd–лазер с длительностью световых импульсов ~12÷15 нс. Энергия импульса лазерного излучения после преобразования во вторую гармонику (λ=532 нм) в кристалле KDP была ~50 мДж. Далее излучение второй гармоники пропускалось через призму Глана (ГП) и линейно поляризованное излучение направлялось в ячейку Поккельса (ЯП). ЯП, синхронизованная с управляющим импульсом напряжения на электрооптическом затворе

YAG:Nd–лазера, позволила нам плавно менять степень поляризации прошедшего излучения в широком диапазоне – от линейной, вплоть до круговой.

Диаметр пучка в области взаимодействия излучения с растворами фуллерена составлял ~3.5 мм. В ходе проведенения экспериментов для варьирования энергии излучения использовались наборы откалиброванных нейтральных светофильтров (НФ). Анализ изменения ориентации эллипса поляризации лазерного излучения на выходе кюветы (К) с раствором фуллерена производился по двухканальной схеме с использованием двух взаимно скрещенных анализаторов поляризации (призм Франка-Риттера ФР) и калиброванных фотодиодов ФД-24 (ФД).

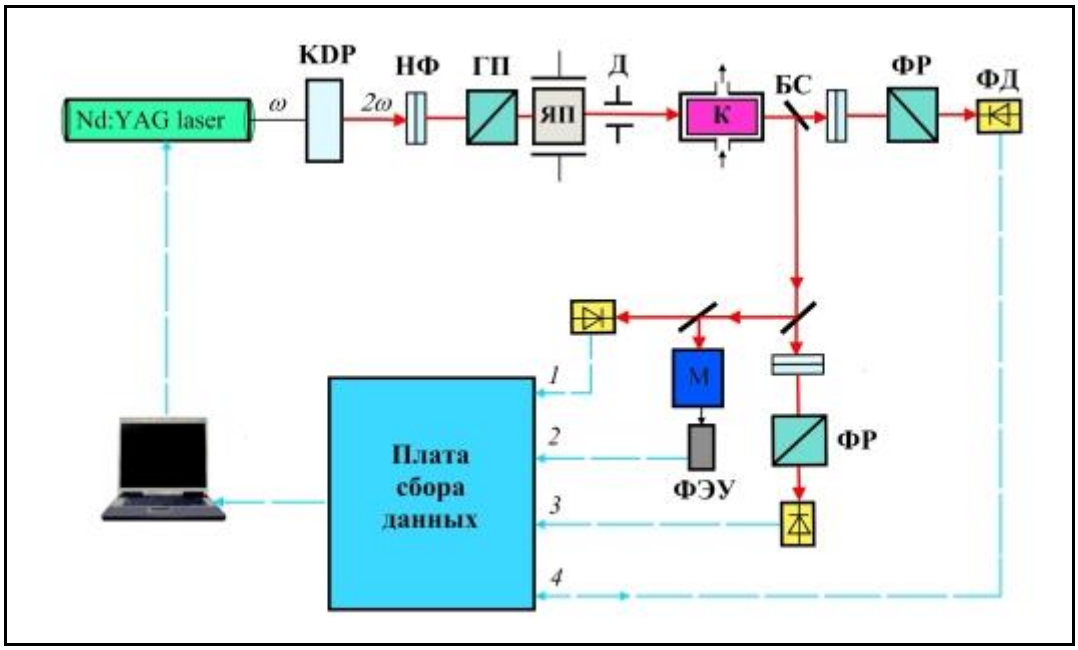


Рис. 1. Общая оптическая схема экспериментальной установки: KDP – нелинейный оптический кристалл (1064 нм → 532 нм); НФ – нейтральные светофильтры; ГП – Глан поляризатор; ЯП – ячейка Поккельса; Д – диафрагма; К – кювета с раствором фуллерена; БС – светоделители; ФР – призма Франка-Риттера; ФД – фотодиоды; ФЭУ - фотоэлектронный умножитель.

Часть лазерного пучка, прошедшего сквозь кювету с раствором фуллерена, при помощи светоделительной пластинки (БС) отводилась для контроля энергетических и спектральных характеристик излучения. Часть этого излучения направлялась на фотодиод, который использовался в качестве датчика в канале измерения и контроля энергетических характеристик лазерной излучении (см. рис. 1, 1-канал системы регистрации). Оставщаяся часть излучения направлялась на входную щель дифракционного монохроматора (М) марки МДР-204 со встроенным шаговым приводом развертки спектра. За выходной щелью монохроматора устанавливался фотоэлектронный умножитель (ФЭУ), сигнал с которого обрабатывался в канале измерения спектральных характеристик излучения (см. рис.1, 2-канал системы регистрации). Для одновременной регистрации поляризационных, энергетических и спектральных характеристик светового излучения в режиме реального времени была использована передвижная

автоматизированная система сбора и обработки экспериментальной информации на базе персонального компьютера (ПК).

В третьей главе «**Особенности процессов самоорганизации молекул фуллеренов C_{60}, C_{70} и одностенных углеродных нанотрубок в растворах**» приведены основные результаты экспериментальных исследований процессов самоорганизации углеродсодержащих объектов (молекул фуллеренов C_{60}, C_{70} и одностенных углеродных нанотрубок) в однокомпонентных (толуол, бензол, N-метил-2-пирролидон) и двухкомпонентных органических растворителях (толуол+тетрогидрофуран, ксилол+тетрогидрофуран, ксилол+NMП, вода+диметилформамид) методами оптической спектроскопии, динамического рассеяния света, а также электронной и атомно-силовой микроскопии.

На рис.2-А представлен ПЭМ ВР–снимок замороженных кластеров mC_{60}, синтезированных в толуольном растворе фуллерена, приготовленном неравновесным методом (перемешивание раствора C_{60} механическим ротатором). В растворе синтезировались достаточно крупные пористые фрактальные кластерные образовании квазисферической формы с диаметром вплоть до ~250÷300 нм, состоящие из более мелких «дискретных» стабильных кластеров C_{60} с размерами в диаметре ~32÷40 нм (см. рис. 2-А). Точные измерения локальной внутренней структуры фрактальных кластеров с помощью ПЭМ ВР, показали, что кратчайшее расстояние между двумя ближайшими соседними «промежуточными» стабильными кластерами бакминстерфуллерена C_{60}, находящимися внутри крупного фуллеренового кластера, составляет ~1÷1.5 нм.

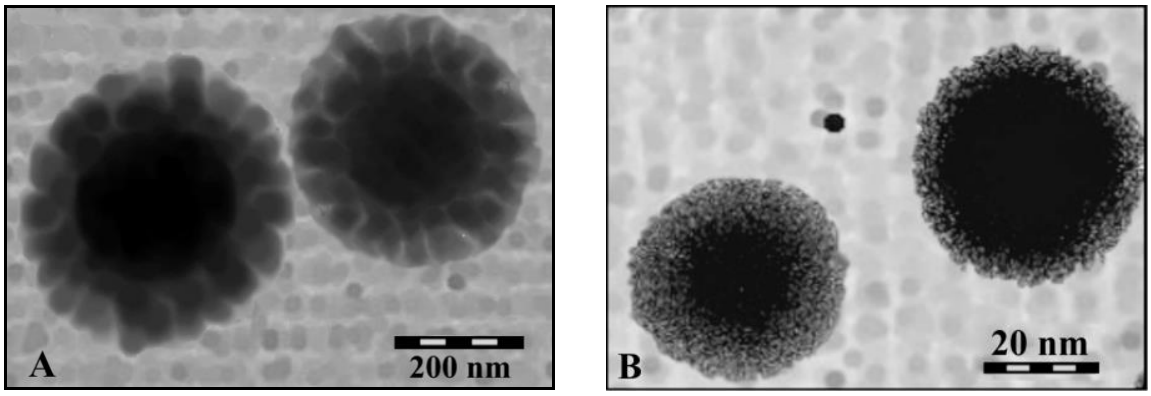


Рис. 2. ПЭМ–снимки кластеров фуллерена C_{60}, синтезированных в толуоле при (А) неравновесном (перемешивание раствора C_{60} механическим ротатором) и (В) равновесном (без использования внешних механических воздействий на раствор) способах приготовления растворов. Исходная концентрация фуллерена C_{60} в растворах ~2.0 г/л.

На рис.2-В показаны ПЭМ–снимок замороженных кластеров бакминстерфуллерена C_{60}, синтезированных в толуоле при равновесном способе приготовления исходного раствора C_{60} в течение первых 10÷15 дней хранения при комнатной температуре (~25 °С). Видно, что при использовании равновесного способа приготовления раствора C_{60} (без использования внешних механических воздействий на раствор) процессы самоорганизации молекул фуллерена во времени протекают по несколько

другому физическому механизму, чем при неравновесном, а именно, синтезируются компактно упакованные кластеры с размерами в диаметре ~38÷40 нм (см. рис.2-В).

Исследование оптического поглощения C_{60} в N-метил-2-пирролидоне (NMП) в зависимости от времени хранения исходного раствора показало, что природа и форма спектров поглощения начинает резко меняться (см. рис. 3).

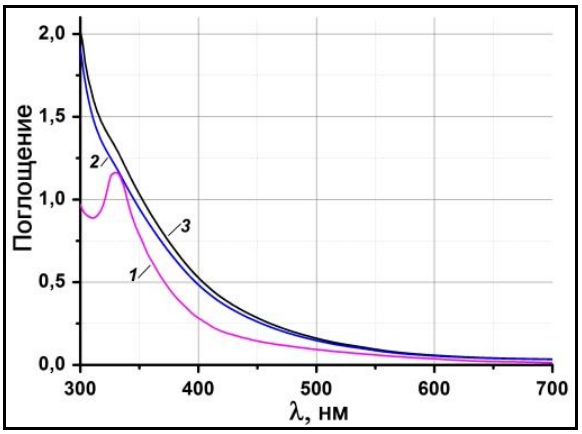


Рис. 3. Изменение во времени оптического спектра поглощения фуллерена C_{60} в NMП при концентрации ~0.015 г/л: *1*– свежеприготовленный раствор, *2*– через 24 часа после растворения и *3* – через 10 дней.

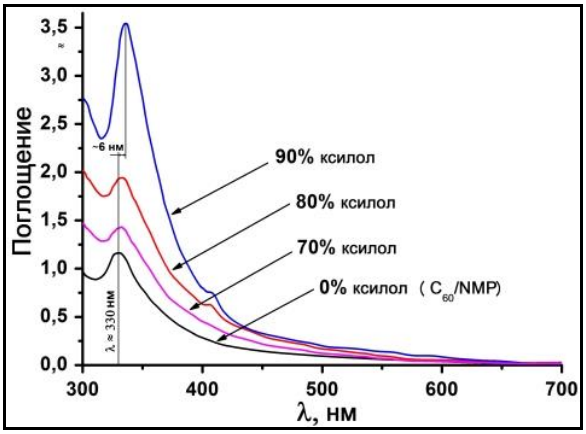


Рис. 4. Эволюция спектров оптического поглощения свежеприготовленного раствора C_{60}/NMП при добавлении ксилола в различных пропорциях. Концентрация C_{60} в растворе ~0.03 г/л.

Наличие ярко выраженного характерного максимума на длине волны λ≈330 нм наблюдается только в спектре свежеприготовленного раствора C_{60} (см. рис.3, спектр *1*). Можно отметить, что характерный для молекулярного C_{60} максимум поглощения на длине волны λ≈330 нм в NMП практически полностью исчезает в течение 1 дня с момента приготовления исходного раствора. Исчезновение максимума на λ≈330 нм и рост интенсивности поглощения при хранении раствора в течение 24 часов (спектр *2*) и 10 дней (спектр *3*) может быть связано с усилением процессов самоорганизации молекул C_{60} в процессе старения растворов, приводящих в конечном итоге, к образованию фрактальных наноразмерных кластеров фуллерена mC_{60}.

Оптические спектры поглощения фуллерена C_{60} в NMП резко меняются при относительно высоких объемных процентов ксилола (≥70 объемных процентов), а именно, наблюдается увеличение амплитуды спектра и сдвиг характерного пика при λ≈330 нм в длинноволновую область спектра, т. н. положительный сольватохромный эффект (см. рис. 4). В этом случае максимальный батохромный сдвиг достигает до ~6 нм при добавлении ~90 об. % ксилола в систему C_{60}/NMП. При этом добавляемая компонента (ксилол) в системе C_{60}/NMП/ксилол, усиливает как селективную сольватацию C_{60} молекулами растворителя (NMП), так и её реорганизацию.

На рис. 5 представлены экспериментальные результаты ДРС растворов C_{60}/NMП и C_{60}/NMП/ксилол. Гидродинамические размеры нанокластеров mC_{60} измеряли на устройстве Zetasizer Nano ZEN3600 (Malvern Instruments

Ltd.). Основная доля светорассеивающих наночастиц фуллерена в 10-дневном растворе C_{60}/NMП распределяется в диапазоне диаметров ~465÷520 нм, а максимальное распределение кластеров C_{60} локализуется в области ~490 нм (рис. 5, гистограмма *1*). Можно отметить, что нанокластеры mC_{60}, синтезированные в 10-дневном растворе C_{60}/NMП, содержат большое количество молекул NMП в виде комплексов молекул C_{60} и NMП. Максимальное значение гидродинамического диаметра светорассеивающей частицы фуллерена в растворе C_{60}/NMП/ксилол уменьшается и сдвигается к ~430 нм, а диапазон гидродинамических размеров нанокластеров mC_{60} соответствует ~410÷450 нм (рис. 5, гистограмма *2*). Добавление ксилола к раствору C_{60}/NMП приводило к процессам реорганизации наночастиц, происходящим с частичным разрушением комплексов молекул C_{60} и NMП. Видно, что после реорганизации наночастиц фуллерена C_{60} в растворе C_{60}/NMП/ксилол геометрические размеры нанокластеров mC_{60} уменьшаются по сравнении в растворе C_{60}/NMП.

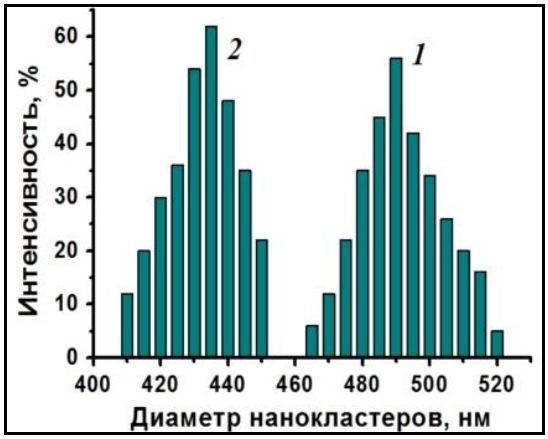


Рис. 5. Распределение по гидродинамическим диаметрам кластеров mC_{60} в растворах C_{60}/NMП (*гистограмма 1*) и C_{60}/NMП/ксилол (*2*). Исходная концентрация C_{60} в растворах была ~0.03 г/л.

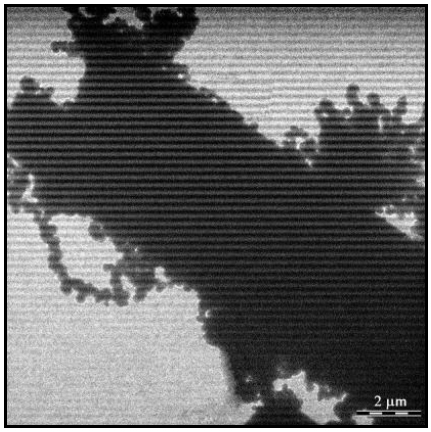


Рис.6. ПЭМ-снимок упорядоченного наноструктурированного агрегата ОСУНТ, синтезированного в коллоидном растворе ОСУНТ. Исходная концентрация ОСУНТ в растворе была ~0.4 мг/мл.

На рис. 6 представлен ПЭМ-снимок упорядоченного агрегата ОСУНТ, синтезированного в растворе в смеси растворителей «вода+диметилформамид» с объемной долей 0.9:0.1, соответственно. При этом наблюдалось слипание нанотрубок между собой и склонность к образованию агрегатов в растворе. Видно, что в растворе ОСУНТ преимущественно формируются упорядоченные агрегаты, состоящие из взаимно параллельных укладок нанотрубок. При этом длина агрегата ОСУНТ составляла ~16 мкм, а его диаметр ~5.2 мкм.

В четвертой главе диссертации «**Исследование процессов самоагрегации молекул фуллеренов в смеси $C_{60/70}$ в различных растворителях**» сообщаются результаты исследования основных закономерностей синтеза и роста размеров кластеров фуллеренов $C_{60/70}$ (C_{70} –95 масс. % и C_{60}– 5 масс. %) в органических растворителей методами оптической спектроскопии, ДРС, а также ПЭМ-микроскопии. Даны

результаты влияния кластерообразования в растворах на эволюцию как электронных, так и ИК спектров поглощения растворов фуллеренов $C_{60/70}$. Исследованы нелинейно-оптические свойства растворов как чистого фуллерена C_{70}, так и смесей фуллеренов $C_{60/70}$ в различных растворителях.

На рис. 7 приведены разностные ИК–спектры пропускания раствора $C_{60/70}$ в толуоле в спектральном диапазоне ~400÷1600 $см^{-1}$: сразу после его приготовления (спектр *a*) и через 60 суток хранения раствора при комнатной температуре (спектр *b*). В ИК-диапазоне полос поглощения наблюдались только две наиболее интенсивные линии пропускания C_{60} (1432 и 578 $см^{-1}$) с симметрией F_{1u} (см. рис. 7*a*). В спектрах растворов $C_{60/70}$ проявляются все 12 ИК-линий фуллерена C_{70}, а именно 1459.6, 1432, 1414.2, 1135, 1088, 794, 672, 645, 578, 564, 532 и 455 $см^{-1}$ (см. рис. 7*a*).

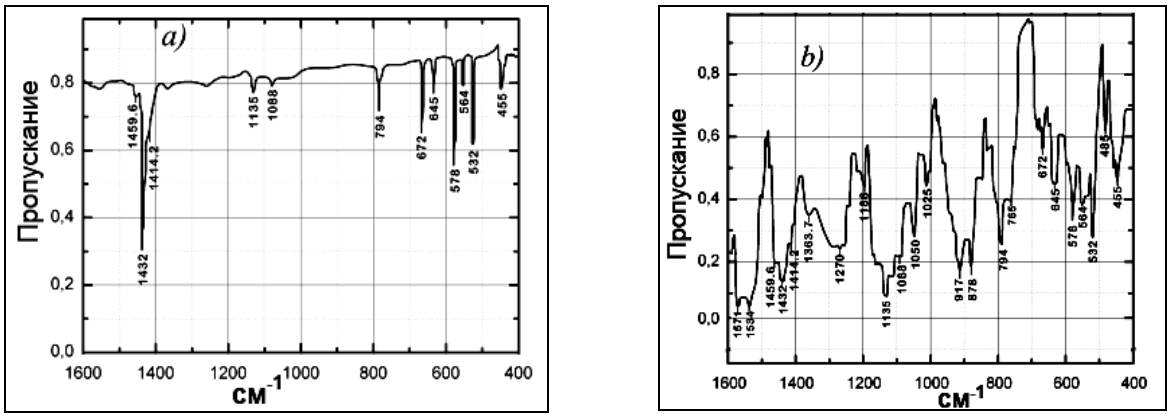


Рис. 7. ИК спектры пропускания фуллерена $C_{60/70}$ (C_{70} –95 масс. % и C_{60}– 5 масс. %) в толуоле при концентрации ~0.15 г/л: (*a*) сразу после приготовления раствора; (*b*) через 60-ти суток его хранения при комнатной температуре.

После 60-ти суточного хранения толуольного раствора $C_{60/70}$, его ИК-спектры поглощения претерпевают существенные изменения по сравнению со спектром исходного раствора (см. рис. 7*b*), а именно:

(iii) возникают 11 новых уширенных полос поглощения на частотах ~1571, ~1534, ~1363.7, ~1270, ~1186, ~1050, ~1025, ~917, ~878, ~765 и ~485 $см^{-1}$, из которых только одна линия (~1186 $см^{-1}$) относится к колебаниям молекулы C_{60}, а все оставшиеся линии принадлежать кластерным образованиям фуллерена $mC_{60/70}$ в растворе;

(iv) значительная часть линий поглощения (~1459.6, ~1432, ~1414.2, ~1135, ~1088, ~794, ~645, ~578, ~564 и ~455 $см^{-1}$), наблюдавшихся также и в свежеприготовленном растворе, уширены.

На рис. 8 представлены кривые изменения величины удельного вращения поляризации ($\varphi_{уд.}$) лазерного излучения, прошедшего через растворы фуллеренов $C_{60/70}$ в толуоле в зависимости от степени эллиптичности (θ) излучения при концентрации фуллеренов ~0.15 г/л. В экспериментах интенсивность лазерного излучения была $I \approx 520$ $кВт/см^2$.

На рис. 9 приведены кривые зависимости удельного вращения поляризации ($\varphi_{уд.}$) лазерного излучения, прошедшего через растворы чистого фуллерена C_{70} в толуоле и бензоле от степени эллиптичности излучения (θ)

при концентрациях фуллерена ~0.48 г/л в толуоле и ~0.585 г/л в бензоле. Как можно видеть из рис. 8 и рис. 9, в растворах C_{70} и $C_{60/70}$, эффект нелинейного вращения эллипса поляризации (НВЭП) наблюдается при эллиптической поляризации лазерного излучения и отсутствует при линейной. Взаимодействие интенсивного ($I \approx 5.2 \cdot 10^5$ Вт/см^2) эллиптически поляризованного лазерного излучения с изотропной средой (раствором фуллеренов) обусловливает возникновение нелинейного эффекта в растворе. Увеличение степени эллиптичности приводит к росту величины удельного вращения поляризации, и кривые зависимости $\varphi_{уд.}(\theta)$ выходят на насыщение по мере вырождения эллипса поляризации в круг.

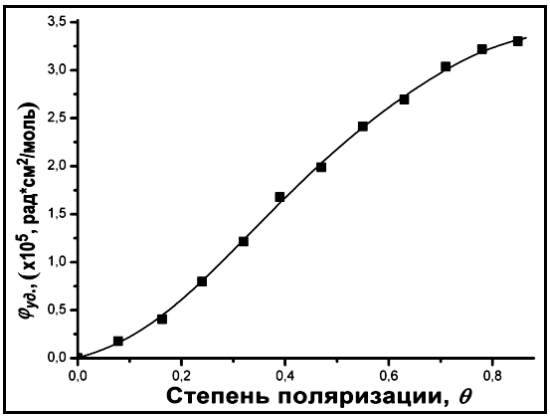


Рис.8. Зависимость удельного вращение поляризации $\varphi_{уд.}$ от степени эллиптичности поляризации θ лазерного излучения в растворе $C_{60/70}$ в толуоле при концентрации фуллеренов ~0.15 г/л.

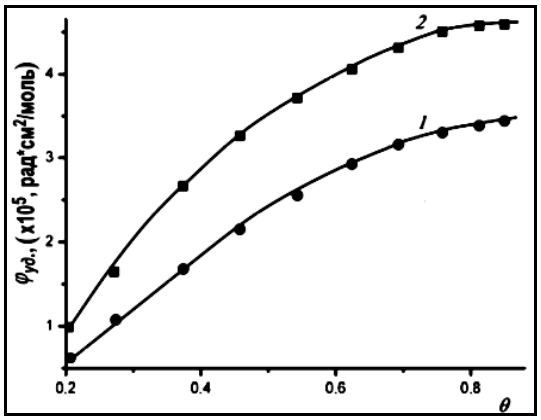


Рис.9. Зависимость удельного вращение поляризации $\varphi_{уд.}$ от степени эллиптичности поляризации θ лазерного излучения в растворе C_{70} в толуоле (кривая *1*) и бензоле (кривая *2*).

Отметим, что при фиксированной интенсивности и степени эллиптичности лазерного излучения, постепенное увеличение концентрации $C_{60/70}$ в растворе сопровождается уменьшением величины удельного вращения эллипса поляризации. Последнее может быть связано с тенденцией молекул фуллерена $C_{60/70}$ в растворе к синтезу нанокластеров $mC_{60/70}$ различных форм и размеров. Процесс самоагрегации молекул фуллеренов также влияет на нелинейно-оптические свойства раствора $C_{60/70}$, а именно на величину удельного вращения эллипса поляризации лазерного излучения, проходящего через раствор.

Таблица 1.

Значения нелинейно-оптических параметров (n_2 и $\chi^{(3)}(\omega;\omega,\omega,-\omega)$) растворов фуллеренов $C_{60/70}$ в толуоле при различных степенях эллиптичности (θ) поляризации лазерного излучения (λ=532 нм).

θ	0.1	0.2	0.3	0.4	0.45	0.55	0.6	0.7	0.8
$-n_2$, ($\times 10^{-21}$, СГСЭ)	6.28	9.2	11.5	13.9	14.9	16.4	17.1	18.3	19.1
$-\chi^{(3)}(\omega;\omega,\omega,-\omega)$, ($\times 10^{-12}$, СГСЭ)	3.52	5.2	6.4	7.8	8.3	9.2	9.6	10.2	10.7

Путем аппроксимации кривой экспериментальной зависимости НВЭП от степени эллиптичности лазерного излучения (см. рис. 9) были определены значения нелинейного коэффициента Керра n_2 и нелинейной восприимчивости третьего порядка $\chi^{(3)}(\omega;\omega,\omega,-\omega)$ для растворов фуллерена $C_{60/70}$ в толуоле (см. табл. 1).

В пятой главе **«Исследование процессов самоорганизации молекул фуллеренов C_{60} и C_{70}, а также одностенных углеродных нанотрубок в объеме испаряющихся капель растворов»** сообщаются результаты исследований основных физических закономерностей и механизмов теплового испарения капель растворов наноразмерных углерод содержащих частиц, а именно фуллеренов C_{60} и C_{70}, а также ОСУНТ. Предложены конкретные высокоэффективные селективные методы получения микро- и наноструктур, а также нанопленок на их основе в объеме испаряющихся капель растворов фуллеренов на гидрофильной поверхности подложки.

При испарении смесей органических растворителей (бензола и ацетонитрила) из капли раствора C_{60}, сидящей на поверхности слюды, происходила самоорганизация молекул C_{60} и образовывались характерные кольца (см. рис. 10), содержащие нанокластеры фуллерена mC_{60} в четырех различных размерных диапазонах.

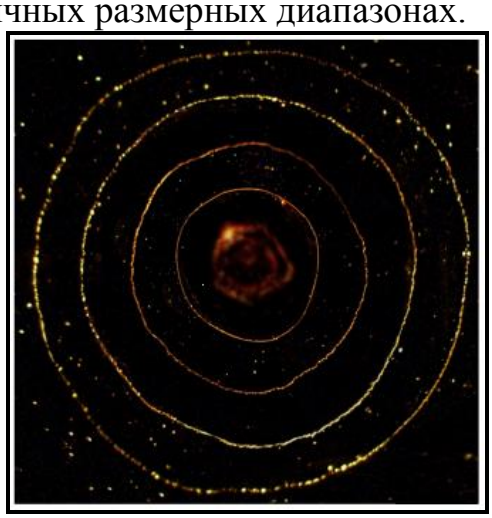


Рис.10. Финальное распределение частиц твердой фазы на поверхности слюды, осажденной из капли раствора фуллерена C_{60} в смеси растворителей – бензола и ацетонитрила после полного термического испарения растворителей**.**

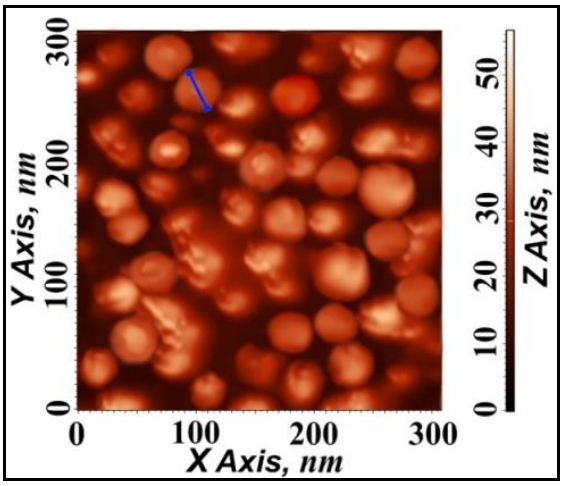


Рис. 11. АСМ-снимок плотноупакованных кластеров mC_{60}, синтезированных в испаряющейся капле раствора C_{60} в смеси «бензол+ацетонитрил», находящейся на поверхности слюды при комнатной температуре

В этом случае начальная концентрация C_{60} в капле была ~0.36 г/л, радиус капли R≈3.0 мм, высота капли h≈1.9 мм. Время полного испарения смесей растворителей (бензола и ацетонитрила) из объема капли при комнатной температуре составило $\Delta t \approx 395$ сек. При этом молекулы C_{60}, не участвовавшие в синтезе кластеров mC_{60}, продвигаются дальше по поверхности подложки вместе с используемом растворителям, и в конечном итоге накапливались в центральной части «высохшей капли» в виде сплошного круглого диска (см. рис. 10).

На рис. 11 представлено АСМ-изображение нанокластеров mC_{60}, синтезированных в объеме испаряющихся капель растворов фуллерена в смеси «бензол+ацетонитрил», приготовленных равновесным способом. Видно, что синтезированные кластеры mC_{60} являются мономолекулярными и плотноупакованными с размерами в диаметре ~25÷50 нм.

На рисунке 12 показано СЭМ-изображение наноструктурированных кластеров mC_{60}, синтезированных внутри кольца после полного испарения органического растворителя (ксилола) из объема капли раствора фуллерена C_{60} на плоской поверхности стеклянной подложки. В этом случае, исходный раствор готовили неравновесным способом. Видно, что после полного испарения ксилола из капли раствора C_{60} на поверхности подложки синтезируются крупные пористые кластеры mC_{60} как квазисферической, так и удлиненной сферической (т.е. эллипсоидальной) формы (см. рис. 12, *а*). Длина большой и малой осей эллипсоидальных кластеров mC_{60}, хаотически ориентированных относительно кольца, составляют ~1900 нм и ~1250 нм соответственно (см. рис. 12, *в*). Хорошо видно, что синтезированные крупные наноструктурированные пористые кластеры mC_{60} состоят из более мелких промежуточных дискретных кластерных образований C_{60} с размерами в диаметре ~80÷220 нм.

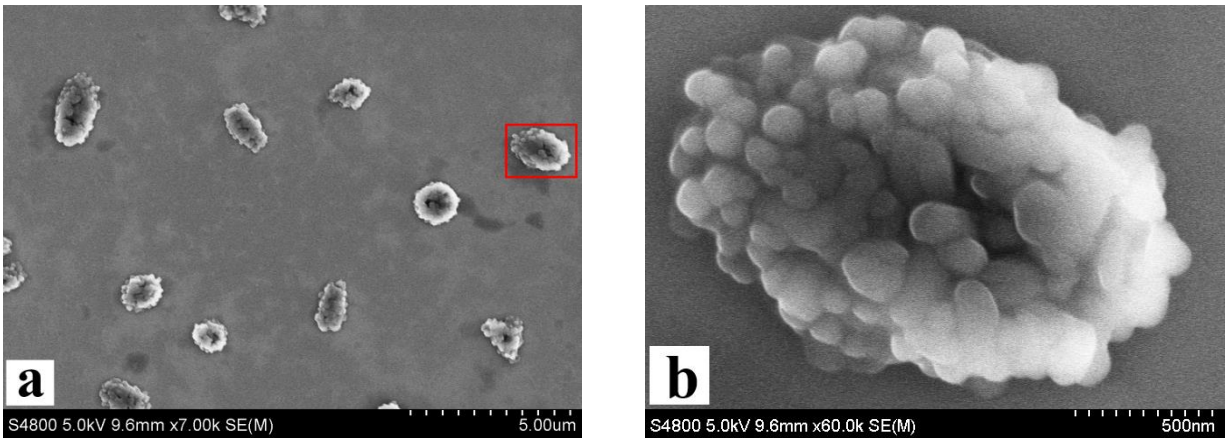


Рис. 12. (*а*) СЭМ-изображение наноструктурированных кластеров mC_{60}, синтезированных внутри кольца после полного испарения органического растворителя (ксилола) из объема капли раствора фуллерена C_{60} на плоской поверхности стеклянной подложки; (*в*) увеличенное СЭМ-изображение области внутри рамки на рис. (*а*). Исходная концентрация фуллерена C_{60} в растворе составляла ~0.24 г/л.

В результате многократных микроскопических исследований особенностей испарения капель растворов фуллерена C_{60} (или C_{70}, ОСУНТ) в одно- и многокомпонентных растворителях, находящихся на плоской поверхности горизонтально установленной стеклянной подложки, были выявлены следующие закономерности:

– капли чистых органических растворителей (бензола, толуола, сероуглерода, …), при тепловом испарении сохраняют величину краевого угла α (см. рис. 13–b). Однако происходит постепенное сужение площади основания контакта «капля–подложка» вплоть до полного исчезновения капли;

– если капля растворителя содержит в себе молекулярные или коллоидные частицы растворенного вещества (см. рис. 12-*a*), например фуллерена C_{60} (или C_{70}, ОСУНТ), то реализуется, принципиально иная картина – по мере теплового испарения растворителя из капли сохраняется постоянной площадь основания капли. В этом случае реализуется т.н. режим «пиннинга контактной линии». При этом величина краевого угла капли α постепенно уменьшается вплоть до $\alpha \approx 0°$.

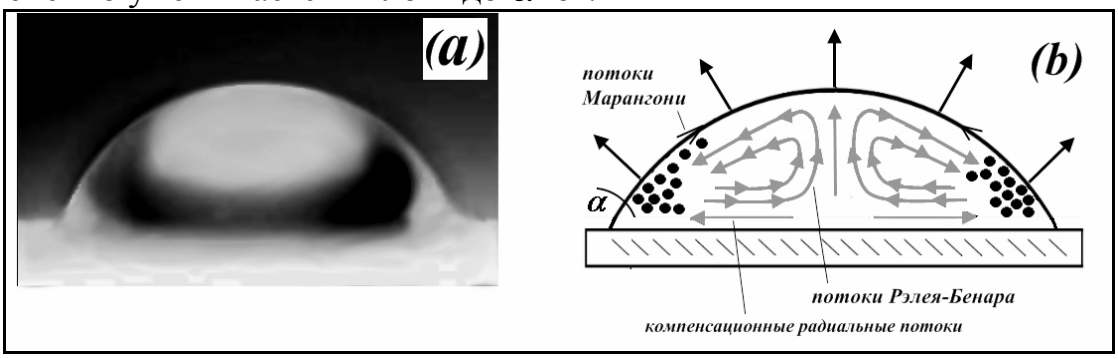


Рис. 13. Фотоснимок капли раствора C_{60} с диаметром основания $d_0 \approx 9.2$ мм на поверхности стеклянной подложки (*a*); схема течений и самосборки молекул фуллерена C_{60} (или C_{70}, ОСУНТ) внутри испаряющейся капли (*b*).

В процессе испарения капель раствора фуллерена C_{60} (или C_{70}), из-за совместного влияния эффектов Релея–Бенара и Марангони, как в объеме, так и в приповерхностных слоях испаряющейся капли раствора фуллерена C_{60} (или C_{70}) возникают сильные капиллярные течения (т.н. потоки Рэлея–Бенара и потоки Марангони). Последние инициируют взаимное сближение молекул C_{60} (или C_{70}) и приводят к синтезу кластеров mC_{60} (или mC_{70}) из молекул растворенного вещества по схеме $C_{60}+C_{60}+ \cdots +C_{60} \rightarrow mC_{60}$ (или $C_{70}+C_{70}+ \cdots +C_{70} \rightarrow mC_{70}$). Данная закономерность поведения капли раствора фуллеренов на поверхности подложки при комнатной температуре сохраняется от начала испарения растворителя до его полного исчезновения.

На рис. 14 показано СЭМ-изображение нитевидных кристаллических нановискеров mC_{60}, полученных в процессе испарения орто-ксилола из объёма одной «изолированной» капли молекулярного раствора фуллерена C_{60}, находящейся на гладкой поверхности горизонтально расположенной стеклянной подложки, нагретой до $T \approx 35°C$. Заметим, что при фиксированной концентрации C_{60} в капле рабочего раствора, повышение температуры подложки приводило не только к более ускоренному зарождению и росту кристаллических нановискеров, но также и к заметному увеличению конечных геометрических размеров синтезируемых нановискеров mC_{60}. В условиях наших экспериментов, максимальная длина и ширина полученных нитевидных кристаллических *«вискеров»* достигали значений ~80 мкм и ~7.0 мкм, соответственно (см. рис. 14).

На рис. 15 приведено СЭМ-изображение полученного нами в экспериментах тонкого полупроводникового покрытия толщиной ~10 мкм, состоящего из плотно расположенных друг к другу нитевидных кристаллов (вискеров) mC_{60} и молекулярного слоя фуллерена C_{60}. В этом случае

концентрация фуллерена C_{60} в исходной капле раствора была ~3.86 г/л и температура подложки ~28°C.

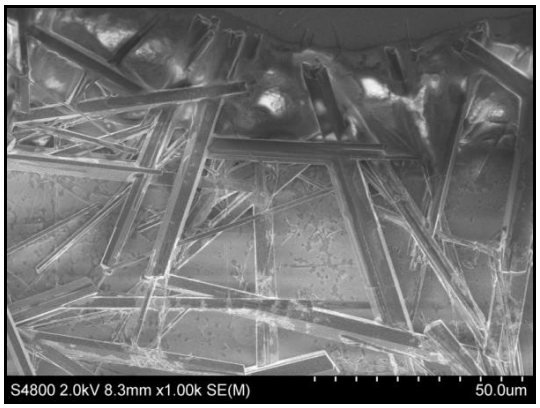


Рис. 14. СЭМ-изображение нитевидной структур (whiskers) фуллерена C_{60}. Концентрация фуллерена в исходной капле раствора была ~2.84 г/л.

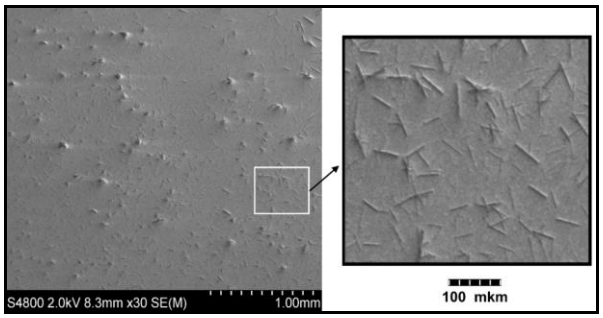


Рис. 15. СЭМ-изображение полученной тонкой фуллереновой плёнки (слева) и увеличенное изображение фрагмента тонкой плёнки (справа).

На рис. 16 приведен СЭМ-снимок нанотрубок фуллерена C_{60}, полученные в процессе теплового испарения органических растворителей («этилбензол+изопропиловый спирт» в объёмной фракции 0.8:0.2) из объёма изолированной капли раствора C_{60}, находящейся на гладкой поверхности кремниевой подложки.

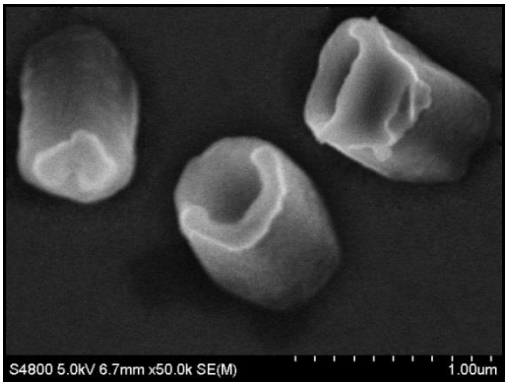


Рис. 16. СЭМ-снимок нанотрубок фуллерена C_{60}, полученных в объеме испаряющейся капли раствора C_{60}, находящейся на плоской поверхности кремниевой подложки. Концентрация фуллерена в исходной капле была ~2.2 г/л .

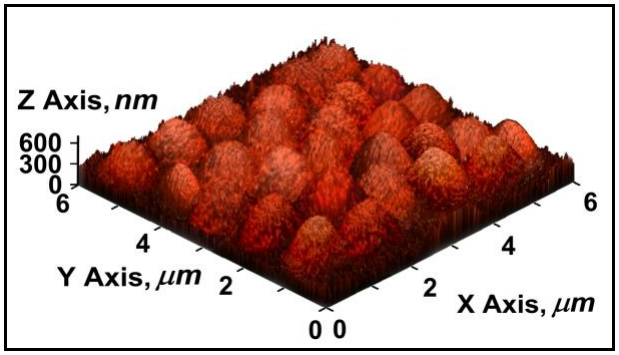


Рис. 17. АСМ-изображение топографии нанопокрытий, состоящих из одного слоя пористых фрактальных кластеров mC_{60}, синтезированных в объеме испаряющихся капель коллоидного раствора C_{60} в смеси «толуол+тетрагидрофуран».

Из рис.16 видно, что внешний и внутренний диаметры нанотрубок составляют $d_1 \approx 600\pm5$ нм и $d_2 \approx 410\pm5$ нм, соответственно. Средняя длина полученных нами нанотрубок составляла $l\approx790\pm10$ нм. Следует отметить, что один «зародышевый» конец полученных нанотрубок, откуда начинается формирование, и дальнейший рост нанотрубок закрыт (см. рис. 16). Последнее делает нанотрубки C_{60} функциональными и удобными для использования в качестве нанокапилляров, нанореакторов, а также наносорбентов.

На рис.17 показано АСМ-изображение полностью органического нанопокрытия размерами $X\times Y\times Z=6\times6\times0.6$ мкм^3, полученного путем

переноса всего 4-х капель насыщенного коллоидного раствора фуллерена C_{60} (~1.2 г/л) общим объемом V≈400 мкл на гладкую поверхность оптического стекла, содержащего пористые фрактальные кластеры mC_{60}. Изображение на рис. 17 было получено сразу после полного термического испарения органических растворителей (толуола и тетрагидрофурана в объёмной фракции 0.8:0.2) из объема перенесенных капель коллоидного раствора C_{60}. Видно, что полученное трехмерное нанопокрытие на поверхности оптического стекла состоит только из одного слоя плотно расположенных друг к другу фрактальных кластеров mC_{60} с размерами в диаметре ~700÷1200 нм.

ВЫВОДЫ

1. Методом ПЭМ-высокого разрешения установлено, что в толуольном растворе C_{60}, приготовленном равновесным способом, преимущественно синтезируются плотноупакованные мономолекулярные кластеры mC_{60} квазисферической формы с размерами в диаметре ~30÷60 нм. В растворах C_{60}, приготовленных неравновесным способом, в основном синтезируются крупные фрактальные кластеры mC_{60} квазисферической формы с размерами в диаметре ~280÷350 нм.
2. Предложены физические механизмы формирования и роста как плотноупакованных, так и фракталных наноструктур фуллеренов (C_{60}, C_{70} и их смесей) в полярных и слабополярных растворителях.
3. Предложен новый спектроскопический метод диагностики процессов самоорганизации молекул фуллеренов C_{60}, C_{70} и их смесей, а также определения степени устойчивости синтезируюмых нанокластеров (mC_{60}, mC_{70} и $mC_{60/70}$) в растворах.
4. Методом оптической спектроскопии показано, что добавление ксилола в раствор C_{60}/NMП приводит к реорганизации кластеров mC_{60} из-за разрушения комплексов «C_{60}–NMП» в растворе. Методами ДРС и ПЭМ было обнаружено, что после реорганизации нанокластеров в растворе C_{60}/NMП/ксилол наблюдается уменьшение геометрических размеров синтезируюмых пористых нанокластеров mC_{60}.
5. Впервые установлено, что в растворе ОСУНТ в смеси растворителей «вода+диметилформамид» в пропорции 0.9:0.1, соответственно, преимущественно формируются упорядоченные агрегаты нанотрубок, состоящие из параллельно уложенных индивидуальных нанотрубок. При этом длина полученных агрегатов ОСУНТ достигает до ~16 мкм, а их диаметр составляет ~5.2 мкм.
6. Методом ИК-спектроскопии впервые показано, что при длительном (~60 суток) хранении толуольного раствора $C_{60/70}$ при комнатной температуре наблюдается возникновении 11-ти новых, уширенных ИК-полос поглощения с максимумами при ~1571, ~1534, ~1363.7, ~1270, ~1186, ~1050, ~1025, ~917, ~878, ~765 и ~485 $см^{-1}$. Значительная часть наблюдавщихся линий ИК-поглощений исходного свежеприготовленного

раствора (~1459.6, ~1432, ~1414.2, ~1135, ~1088, ~794, ~645, ~578, ~564 и ~455 $см^{-1}$) также претерпевают значительные уширения.

7. Впервые установлено, что в растворах $C_{60/70}$ в толуоле и ксилоле эффект НВЭП наблюдается исключительно при эллиптической поляризации лазерного излучения, и исчезает при линейной. Показано, что в растворах фуллеренов $C_{60/70}$ увеличение как степени эллиптичности, так и интенсивности лазерного излучения приводит к увеличению угла вращения эллипса поляризации. Кроме того, рост концентрации фуллерена $C_{60/70}$ в растворах приводит к заметному уменьшению величины удельного вращения эллипса поляризации прошедшего через среду лазерного излучения.

8. Впервые предложен и реализован метод ускоренного синтеза как наноструктурированных фрактальных, так и плотноупакованных кластеров фуллеренов mC_{60} и mC_{70} в объеме испаряющихся «капель растворов», находящихся на плоской поверхности подложки.

9. Установлено, что капли чистых органических растворителей (бензола, толуола, ксилола и др.) и их смесей в любых объемных пропорциях, по мере теплового испарения при комнатной температуре сохраняют краевой угол (α), однако наблюдается постепенное уменьшение площади основания контакта «капля−подложка» вплоть до её полного исчезновения. В случае теплового испарения капли растворов фуллеренов C_{60} и C_{70}, а также нанотрубок, находящихся на поверхности плоской подложки, сохраняют площадь основания контакта «капля−подложка», а значение краевого угла капли постепенно уменьшается вплоть полного исчезновения (α=0°).

10. Предложен конкретный физический механизм синтеза кластеров mC_{60} и mC_{70} в объеме испаряюўихся капель, а именно, «оствальдовское созревание», согласно которому относительно большие наноструктуры растут за счет меньших.

11. Впервые предложен новый «капельный метод» получения нановискеров, а также нанотрубок, состоящих из макромолекул фуллерена C_{60}.

12. Получено наноструктурированное органическое полупроводниковое покрытие толщиной ~10 мкм, состоящее из плотно расположенных друг к другу нановискеров mC_{60} и молекулярного слоя фуллерена C_{60} на гладкой поверхности кремниевой подложки.

13. Показано, что внешняя стенка полученной многостенной нанотрубки фуллерена C_{60} с шириной ~100÷120 нм является мономолекулярной и гладкой, а внутренняя стенка нанотрубки с шириной ~70÷90 нм является пористой.

14. На поверхности подложки впервые получены органические покрытия, состоящие всего из одного слоя плотно расположенных друг к другу фрактальных кластеров mC_{60} субмикронных размеров толщиной ~700÷1200 нм.

SCIENTIFIC COUNCIL No. DSc.02/30.12.2019.FM.65.01 ON AWARD OF SCIENTIFIC DEGREES AT THE INSTITUTE OF ION-PLASMA AND LASER TECHNOLOGIES

INSTITUTE OF ION-PLASMA AND LAZER TECHNOLOGIES

MAKHMANOV UROL KUDRATOVICH

THE MECHANISMS OF SELF-ORGANIZATION OF ORGANIC MACROMOLECULES OF FULLERENES C_{60}, C_{70}, AS WELL AS CARBON NANOTUBES IN SOLUTIONS AND IN THE VOLUME OF EVAPORATING DROPLETS

01.04.05 –Optics

ABSTRACT OF DOCTORAL DISSERTATION (DSc) ON PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

TASHKENT – 2021

The theme of doctoral dissertation (DSc) was registered by the Supreme Attestation Commission of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2020.4.DSc/FM169.

The dissertation has been prepared at the Institute of ion-plasma and lazer technologies.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the website of Scientific council (http://iplt.uz/) and on Information and educational portal «ZiyoNet» (http://www.ziyonet.uz/).

Scientific consultant:	**Kokhkharov Abdulmutallib Mamadjanovich** Doctor of physical and mathematical sciences
Official opponents:	**Nematov Sherzod Kalandarovich** Doctor of physical and mathematical sciences, Professor
	Payziev Shermukhammad Dalievich Doctor of physical and mathematical sciences
	Rakhmatullaev Ilyos Arzimurodovich Doctor of physical and mathematical sciences
Leading organization:	**National University of Uzbekistan**

The defense will take place on «28» May 2021 at 14^{00} at the meeting of the Scientific Council number DSc.02/30.12.2019.FM.65.01 at the Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies (Address: 100125, Uzbekistan, Tashkent city, 33, Durmon yuli str., Phone: (99871) 262-42-54, e-mail: info@iplt.uz.).

The doctoral dissertation is cab be looked through in the Information-resource centre of the Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies (is registered № 5) (Address: 100125, Uzbekistan, Tashkent city, 33, Durmon yuli str., Phone: (99871) 262-32-54.)

The abstract of dissertation is sent out on «12» May 2021.

(Mailing report № 5 on «12» May 2021).

K.B.Ashurov
Chairman of the Scientific Council on award of Scientific Degrees, Doctor of Technical Sciences, Professor

I.D.Yadgarov
Scientific Secretary of Scientific Council on Award of Scientific Degrees, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, senior resercher

B.E. Umirzaqov
Chairman of scientific Seminar under Scientific Council on Award of Scientific Degrees, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

INTRODUCTION (abstract of DSc dissertation)

Topicality and necessity of the thesis. Today in the world, there is a continuous increase in interest in the study of the physical features of new nanosized allotropic forms of carbon, in particular, to fullerenes C_{60}, C_{70} and carbon nanotubes in solutions. Nanoclusters and nanostructures obtained as a result of the self-organization of fullerene molecules, as well as carbon nanotubes in solutions, are unique promising nanoobjects necessary for obtaining new nanostructured functional materials. In this regard, the study of the processes of self-organization and self-assembly of nanoscale carbon based objects in liquid systems is one of the most important problems of modern physics.

The goal of the research is to study the physical mechanisms of self-organization of organic macromolecules of fullerenes C_{60}, C_{70}, as well as carbon nanotubes in solutions and in the volume of evaporating drops of solutions.

The objects of the research are solutions of fullerenes (C_{60}, C_{70}) and single-wall carbon nanotubes in one- and two-component solvents.

The scientific novelty of the research is as follows.

The physical mechanisms of the formation and growth of both close-packed and porous fractal nanostructures of fullerenes (C_{60}, C_{70} and their mixtures) in various polar and weakly polar solvents have been determined.

A new spectroscopic method has been developed for diagnosing the processes of self-organization of molecules of fullerenes C_{60}, C_{70} and their mixtures, as well as for determining the degree of stability of synthesized nanoclusters (mC_{60}, mC_{70} and $mC_{60/70}$) in solutions.

For the first time it was revealed that in solutions of $C_{60/70}$ the effect of nonlinear rotation of the ellipse of polarization of laser radiation is observed exclusively with elliptical polarization. It was shown that in solutions of $C_{60/70}$ fullerenes, an increase in both the degree of ellipticity and the intensity of laser radiation leads to an increase in the angle of rotation of the polarization ellipse.

For the first time proposed and implemented a method for accelerated synthesis of both nanostructured fractal and close-packed clusters of fullerenes mC_{60} and mC_{70} in the volume of evaporating "drops of solutions" located on the flat surface of the substrate.

Fr the first time a new “drop method” was proposed for obtaining nano- and microsized organic structures (nanowhiskers, nanotubes, nanofilms and nanocoatings) consisting of fullerene C_{60} molecules.

Implementation of the research results. On the basis of the results of studies of specific physical mechanisms of self-organization of molecules of fullerenes C_{60}, C_{70}, as well as carbon nanotubes both inside the solution and in the volume of evaporating droplets:

the experimental results obtained in the study of the effect of nonlinear rotation of the polarization ellipse of high-intensity laser pulses in solutions of fullerene C_{70}, as well as in a mixture of C_{60} and C_{70}, were used in the fundamental project No. BF2-027 «Mechanisms of the formation and growth of metal nanoparticles and the study of their nonlinear optical properties» (Reference of Ministry of Innovative Development of the Republic of Uzbekistan No. 02-

02/1313 of March 5, 2021). The scientific results used make it possible to effectively analyze the features of the formation of metallic nanosized particles under the action of high-intensity pulsed laser radiation and to establish the contributions of the nonlinear optical parameters of the medium;

the scientific results obtained in the study of the processes of self-organization of fullerene molecules (C_{60}, C_{70}), have been applied in the fundamental grant No. OT-F2-46 « Theoretical study of the processes of interaction of photons, atomic particles and electrons with fullerenes and carbon nanotubes» (Reference of Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan No. 2/1255-569 of February 25, 2021). The scientific results used make it possible to theoretically evaluate the nature of intermolecular interactions of fullerenes, as well as to analyze the processes of interaction of fullerene molecules with atoms, electrons and photons;

the experimental results obtained during the research of the effect of nonlinear rotation of the polarization ellipse of laser pulses in solutions of fullerene C_{70} were used in further studies of the refraction nonlinearity of two-phase locking amplifiers, as well as to study the high-order nonlinearities of plasmonic composites consisting of metal nanoparticles in foreign journals with high impact factor (Advances in optics and photonics 2017, V. 9, Scopus, IF – 22.95; Optics express 2014, V.21, Scopus, IF – 7.2; Optics communications 2014, V.310, Scopus, IF – 3.1). The scientific results used make it possible to develop methods for obtaining various nanostructured optical switches based on metal-dielectric nanocomposites;

the experimental results obtained in the study of the formation of nanoscale structures of fullerenes in the volume of evaporating drops of solutions on the substrate surface, as well as the effect of nonlinear rotation of the polarization ellipse of laser pulses in solutions of C_{70}, $C_{60/70}$ fullerenes, were used in studies of the American University of Sharjah (Certificate of American University of Sharjah, 8 March 2021). The scientific results used make it possible to better understand the nature of the formation of nanoparticles of different sizes under the action of high-intensity pulsed laser radiation and to estimate their high-order nonlinear optical parameters.

Structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of introduction, five chapters, conclusion, references and appendix. The text of the dissertation is printed in 214 pages, including 83 figures and 4 tables.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (часть I, part I)

1. Makhmanov U.K., Kokhkharov A.M., Bakhramov S.A., Erts D. The formation of self-assembled structures of C_{60} in solution and in the volume of an evaporating drop of a colloidal solution // Lithuanian Journal of Physics, – Lithuania, 2020, – Vol. 60, No. 3, – P. 194–204. (№.3. Scopus, IF=1.5; https://www.scopus.com/sourceid/19700174657).
2. Makhmanov U.K., Kokhkharov A.M., Bakhramov S.A., Erts D. Self-aggregation of C_{60} particles in a volume of evaporating droplets on a flat surface // Bulletin of National University of Uzbekistan: Mathematics and Natural Sciences, – Tashkent, 2020, –Vol. 3, Iss. 3, Article 4, – P. 332-343. (01.00.00, №8, https://uzjournals.edu.uz/mns_nuu/vol3/iss3/4).
3. Махманов У.К. Синтез нанотрубок фуллерена C_{60} в объеме испаряющейся капли раствора // Узбекский физический журнал, – Ташкент, 2020, – Т.22 (№3), – С. 144-150 (01.00.00; № 5).
4. Махманов У.К., Коххаров А.М., Эртс Д., Бахрамов С.А. Оптические и структурные особенности наноразмерных кластеров фуллерена C_{60} в бинарных растворителях // Доклады академии наук РУз., –Ташкент, 2020, №3, –С. 28-35 (01.00.00; № 7).
5. Makhmanov U.K., Kokhkharov A.M., Bakhramov S.A. Organic fractal nano-dimensional structures based on fullerene C_{60} // Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures, – USA, 2019, –Vol. 27, Issue: 03, –P. 273-278. (№.3. Scopus, IF=2.6; https://www.scopus.com/sourceid/26900).
6. Махманов У.К., Коххаров А.М., Бахрамов С.А. Тонкие органические пленки на основе фрактальных наноразмерных агрегатов фуллерена C_{60} на поверхности подложки // Узбекский физический журнал, –Ташкент, 2019, –Vol.21(№6), –С. 362-369. (01.00.00; № 5).
7. Махманов У.К., Коххаров А.М., Гаипов Ж.Н. Получение фрактальных структур на основе фуллерена C_{60} в полярном растворителе // Доклады академии наук РУз., –Ташкент, 2019, №3, –С. 32-37. (01.00.00; № 7).
8. Бахрамов С.А., Махманов У.К., Коххаров А.М., Захидов Э.А., Каххаров М.М., Эртс Д. Синтез и исследование морфологических особенностей нанопористых структур на основе фуллерена C_{60} // Доклады академии наук РУз., –Ташкент, 2019, №3, –С. 38-42. (01.00.00; № 7).
9. Makhmanov U.K., Kokhkharov A.M. Synthesis of nanoscale fullerene C_{60} filaments in the volume of an evaporating drop of a molecular solution and preparation of thin nanostructured coatings on their basis // Applied Solar Energy, 2019, –Vol. 55, No. 5, –P. 309–314. (№.3. Scopus, IF=1.5; https://www.scopus.com/sourceid/13320).

10. Бахрамов С.А., Коххаров А.М., Махманов У.К., Исмаилова О.Б., Гофуров Ш.П. Исследование спектральных и морфометрических характеристик фрактальных наноагрегатов фуллерена C_{70} в органическом растворителе // Доклады академии наук РУз., 2018, –№1, –С. 36–40. (01.00.00; № 7).
11. Bakhramov S.A., Kokhkharov A.M., Makhmanov U.K. Thin semiconductor films of fullerene C_{70} nanoaggregates on the surface of a plane glass substrate // Applied Solar Energy, 2018, –Vol. 54, No. 3, –P. 164–167. (№.3. Scopus, IF=1.5; https://www.scopus.com/sourceid/13320).
12. Коххаров А.М., Бахрамов С.А., Махманов У.К. Оптические свойства и морфометрических характеристики фрактальных наноагрегатов фуллерена C_{60} в растворах // Узбекский физический журнал, 2018, –Т.20, №2, –С. 99-105. (01.00.00; № 5).
13. Makhmanov U.K., Kokhkharov A.M., Bakhramov S.A. Self-organization of fullerene C_{60} molecules in volume of evaporating droplets // Узбекский физический журнал, 2018, Т.20 (№5), –С. 309-314. (01.00.00; № 5).
14. Makhmanov U.K., Ismailova O.B., Kokhkharov A.M., Bakhramov S.A. Analysis of clusterization of C_{70} molecules in benzene solutions prepared by various methods // Bulletin of National University of Uzbekistan: Mathematics and Natural Sciences,– Ташкент, 2018, –Vol. 1: Iss. 2, Article 4, –P. 66–72. (01.00.00, №8, https://uzjournals.edu.uz/mns_nuu/vol1/iss2/4).
15. Коххаров А.М., Махманов У.К., Исмаилова О.Б., Захидов Э.А., Бахрамов С.А., Гофуров Ш.П., Кутлимуротов Б.Р. Самосборка молекул фуллерена C_{60} в объеме высыхающей капли органического растворителя // Узбекский физический журнал, 2017, –Т. 9, №1, –С. 39-46. (01.00.00; № 5).
16. Коххаров А.М., Бахрамов С.А., Захидов Э.А., Махманов У.К., Гофуров Ш.П., Кутлимуродов Б.Р. Исследование морфологических особенностей кластеров бакминстерфуллерена C_{60} в толуоле при различных способах приготовления растворов // Узбекский физический журнал, 2015. Vol.17 (№6), –P. 372–376. (01.00.00; № 5).
17. Kokhkharov A.M., Bakhramov S.A., Zakhidov E.A., Makhmanov U.K., Gofurov Sh.P. Clusterization of fullerene $C_{60/70}$ molecules in solutions and its influence to optical and nonlinear optical properties of solutions // Journal of the Korean Physical Society (JKPS), 2014, –Vol. 64, No.10, –P. 1494–1499. (№.3. Scopus, IF=1.0; https://www.scopus.com/sourceid/28637).
18. Kokhkharov A.M., Bakhramov S.A., Zakhidov E.A., Makhmanov U.K., Gofurov Sh.P., Bolobernikov A.V. Study of molecular-colloidal solutions of C_{70} fullerene: structural features, optical and nonlinear-optical properties // Uzbek Journal of Physics, 2014, –Vol.16 (№2), –P. 114–125. (01.00.00; № 5).
19. Kokhkharov A.M., Bakhramov S.A., Makhmanov U.K., Zakhidov E.A. Self-induced polarization rotation of laser beam in fullerene (C_{70}) solutions // Optics Communications, 2012, –Vol. 285, No 12, –P. 2947–2951. (№.3. Scopus, IF=4.1; https://www.scopus.com/sourceid/12352).

20. Bakhramov S.A., Zakhidov E.A., Kokhkharov A.M., Makhmanov U.K., Gapdulhakov I.R., Bolobernikov A.V., Kokhkharov R. Clusterization of fullerene C_{70} molecules in solutions and its influence on optical and nonlinear optical properties of solutions // Uzbek Journal of Physics, –Tashkent, 2011. –Vol.13 (№3), –P. 185–194. (01.00.00; № 5).
21. Bakhramov S.A., Kokhkharov A.M.,Parpiev O.R., Makhmanov U.K. Photoinduced optical activity of C_{70} fullerene in organic solvents // J.Applied Spectroscopy, 2009, –Vol. 76, No.1, –P. 82–88. (№.11. Springer, IF=0.710; https://www.springer.com/journal/10812).

II бўлим (часть II, part II)

22. Коххаров А.М., Махманов У.К., Исмаилова О.Б., Бахрамов С.А., Курбанов С.С. Синтез молекулярных наноразмерных кристаллических агрегатов фуллерена C_{70} в объеме испаряющейся капли раствора на поверхности стеклянной подложки // Журнал химия и химическая технология, 2017, –Т. 58, №4, –С. 3-9.
23. Bakhramov S.A., Kokhkharov A.M., Zakhidov E.A., Makhmanov U.K., Gofurov Sh.P. C_{70} -clusters formation in solutions // Труды международной конференции посвященной 70-летию физико-технического института НПО «Физика-Солнце». –2013. Ноябрь, Ташкент, –С. 109-111.
24. Коххаров А.М., Бахрамов С.А., Махманов У.К., Гафуров Ш.П. Влияние кластеризации молекул фуллерена C_{70} на оптические и нелинейно-оптические свойства растворов // Сборник тезисов докладов республиканской конференции, посвященной 100-летию академика С.А.Азимова. –2014. Ноябрь. – Ташкент, – С. 87–89.
25. Махманов У.К., Коххаров А.М., Бахрамов С.А., Исмаилова О.Б., Гофуров Ш.П. Самосборка молекул фуллерена C_{70} в бензольном растворе // “Физиканинг долзарб муаммолари” илмий конференцияси. – 2017. 14 октябрь, – Тошкент ЎзМУ, –С. 6-7.
26. Коххаров А.М., Бахрамов С.А., Махманов У.К., Исмаилова О.Б. Тонкие полупроводниковые пленки из наноагрегатов фуллерена C_{70} на поверхности плоской стеклянной подложки в процессе испарения растворителя // Труды международной конференции фундаментальные и прикладные вопросы физики. – 2017. 13 - 14 июня, – Ташкент, – С. 55-59.
27. Коххаров А.М., Махманов У.К., Бахрамов С.А. Получение тонких плёнок из наноагрегатов фуллерена C_{70} и возможности их использования в качестве преобразователей солнечной энергетики // “Яримўтказгичлар физикасининг ва қайта тикланувчи энергия манбаларини ривожлантиришнинг замонавий муаммолари” Республика илмий-амалий анжумани материаллари, – 2018. 20-21 апрель, Андижон, –С. 100-101.
28. Kokhkharov A.M., Makhmanov U.K., Gofurov Sh.P., Akromova F.M., Bakhramov S.A. Clusterization of fullerene C_{70} molecules in mixture of

organic solvents // VII- International Conference on Physical Electronics IPEC-7, –2018. 18-19 May, –Tashkent, –pp. 116.
29. Kokhkharov A.M., Makhmanov U.K., Gofurov Sh.P., Ismailova O.B., Bakhramov S.A. Self-organization of fullerene C_{60} molecules in volume of evaporating droplets // VII- International Conference on Physical Electronics IPEC-7, – 2018. May 18-19, – Tashkent, – pp. 140.
30. Коххаров А.М., Бахрамов С.А., Махманов У.К. Морфометрических характеристики фрактальных кластеров фуллерена C_{60} в растворах // Сборник материалов конференции «Роль одаренной молодежи в развитии физики». –2018. 11-12 мая –Ташкент НУУз, –С. 104-105.
31. Коххаров А.М.,.Бахрамов С.А,. Махманов У.К,. Гафуров Ш.П., Боборахимов А. Исследование процессов кластеризации молекул фуллерена C_{60} в растворах // Сборник материалов конференции «Роль одаренной молодежи в развитии физики» – 2018. 11-12 мая –Ташкент НУУз, –С. 105-107.
32. Bakhramov S.A., Kokhkharov A.M., Makhmanov U.K. Thin films based on semiconducting C_{70} fullerene on the surface of a glass substrate // Materials of the II International Conference "Optical and photoelectrical phenomenas in semiconductive micro- and nanostructures", – 2018. May 25-6, – Ferghana, – pp. 20-24.
33. Bakhramov S.A., Kokhkharov A.M., Shaynurova K.G., Makhmanov U.K. Propagation and nonlinear optical transformation of the spectrum femtosecond laser pulses in a gas and liquid - filled microcapillary // Materials of the International Conference “Nonlinear Phenomena in Bose Condensates and Optical Systems”, –2018. 14-17 August, – Tashkent, – pp. 12.
34. Bakhramov S.A., Makhmanov U.K., Kokhkharov A.M. Nanocoating of semiconducting C_{60} fullerene on the surface of a flat substrate // Сборник материалов конференции «Актуальные проблемы физики полупроводников». – 2018. 26-27 октября, – Ташкент НУУз, – С. 138-141.
35. Махманов У.К., Коххаров А.М. Образование фрактальных наноразмерных кластеров фуллерена C_{60} в объеме испаряющейся капли раствора // Сборник материалов конференции «Актуальные проблемы физики полупроводников». – 2018. 26-27 октября, – Ташкент НУУз., – С. 149-151.
36. Махманов У.К., Коххаров А.М. Образование фрактальных наноразмерных кластеров фуллерена C_{60} в объеме испаряющейся капли раствора // Сборник материалов конференции «Роль молодых ученых в развитии Академии наук Республики Узбекистан». – 2018. 23 ноября, – Ташкент АН РУз, – С. 33-35.
37. Makhmanov U., Gofurov S., Kokhkharov A., Bakhramov S., Erts D. C_{60} molecule self-assembling in a volume of evaporating droplets // The 77^{th} International Scientific Conference of the University of Latvia, Analytical and Physical Chemistry section, Latvia, Riga, – 2019. 08 February, – University of Latvia, – pp. 22.

38. Makhmanov U., Gofurov S., Kokhkharov A., Bakhramov S., Erts D. Nano-coating of semiconducting C_{60} fullerene on the surface of a substrate // 62nd International Conference “Open Readings 2019”, – 2019. March 19-22, – Lithuania, Vilnius, University of Vilnius. –pp. 216.
39. Махманов У.К., Коххаров А.М., Гаипов Ж.Н., Бахриддинов А.Х. Формирование фрактальных нанокластеров фуллерена C_{60} в объеме испаряющейся капли раствора // “XXI аср - интеллектуал ёшлар асри” Республика илмий ва илмий-амалий конференция материаллари, – 2019. 29 март, Ўз РФА, – С.112-113.
40. Махманов У.К., Коххаров А.М., Боборахимов А.Б. Тонкие плёнки фуллерена C_{70} и возможности их использования в качестве преобразователей солнечной энергетики // Сборник материалов конференции «Физика возобновляемых источников энергии и устойчивой окружающей среды». – 2019. 24-25 апреля, – Карши, – С. 48-49.
41. Махманов У.К., Коххаров А.М. Морфометрические характеристики и оптические свойства фрактальных наноагрегатов фуллерена C_{70} в растворах // Сборник материалов международной конференции «Наука и инновации». – 2019 г. 1 ноябрь, – Ташкент, Центр передовых технологий, – С. 236-237.
42. Махманов У.К., Коххаров А.М. Особенности формирования нанопористых структур фуллерена C_{70} // VIII Международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов», – 2019. 19-22 ноября, – Москва, – С. 108-109.
43. Махманов У.К., Коххаров А.М. Получение тонких пленок из микрокапель фуллерена C_{70} методом центрифугирования // Сборник материалов Республиканской конференции «Наука и инновации в современных условиях Узбекистана», – 2020. 20 май, – Каракалпакского отделения Академии наук Республики Узбекистан, г. Нукус. – С. 26.
44. Makhmanov U.K., Kokhkharov A.M., Boboraximov A.B., Tojiyeva N.N. Synthesis of thin films based on nanowhiskers of fullerene C_{60} // Сборник материалов Республиканской конференции “Интеграция образования, науки и производства”, – 2020. 22-23 сентябр, – Карши, – С. 234-235.
45. Махманов У.К., Коххаров А.М. Формирование наноразмерных агрегатов фуллерена $C_{60/70}$ в неравновесном растворе // Илм-фан ва таълимнинг ривожланиш истиқболлари биринчи илмий конференцияси тўплами, – 2020. 27 апрель, – Тошкент, – С. 567-572 бетлар.
46. Махманов У.К., Коххаров А.М., Бахрамов С.А. Получение фуллеренсодержащих тонких пленок из наночастиц C_{70} // Сборник материалов конференции международной научной рецензируемой онлайн-конференции «Современные тенденции развития физики полупроводников: достижения, проблемы и перспективы», – 2020. 28 май, – Ташкент, – С. 195-200.
47. Makhmanov U.K., Kokhkharov A.M. Thin films based on semiconducting carbon nanotubes on the surface of a glass substrate // Сборник материалов

международной конференции "Тенденции и перспективы развития науки и образования в условиях глобализации", – 2020. 31 августа, – Украина, – С. 157-159.
48. Махманов У.К., Коххаров А.М., Бахрамов С.А. Синтез фрактальных наноструктур на основе фуллерена C_{70} // Шестой междисциплинарный научный форум с международным участием «Новые материалы и перспективные технологии», – 2020. 23-27 ноября, – Россия, Москва, – С. 660-663.
49. Bakhramov S.A., Kokhkharov A.M., Makhmanov U.K. Self-organization of fullerene $C_{60/70}$ molecules in solutions and in the volume of drying drop // Сборник материалов V международной научной конференции «Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниковых микро - и наноструктурах», – 2020. 13-14 ноября, – Фергана, – С.18-20.
50. Махманов У.К., Коххаров А.М. Самоорганизация углеродных нанотрубок в растворах // Сборник материалов международной конференции «Наука и инновации». – 2020. 26 ноябрь, – Ташкент, Центр передовых технологий, – С.238-241.

Автореферат «Til va adabiyot ta’limi» журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилиб, ўзбек, рус ва инглиз тилидаги матнлар ўзаро мувофиқлаштирилди.

Босишга рухсат этилди: 05.05.2021 йил
Бичими 60x84 $^{1}/_{8}$, «Times New Roman»
гарнитурада рақамли босма усулида босилди.
Шартли босма табоғи 4,3. Адади: 100. Буюртма: № 05.05

Тел.: (99) 832 99 79; (97) 815 44 54
«IMPRESS MEDIA» МЧЖ босмахонасида чоп этилди.
Манзил: Тошкент ш., Яккасарой ткмани, Қушбеги кўчаси, 6 уй.