

## Творческа биография

**Образование:** Дипломиран инженер физик, със специалност Квантова Електроника, Софийски Университет „Св. Климент Охридски“, Физически Факултет, Катедра Квантова Електроника

**Диплома** – 1984 г. с общ успех „отличен“ /5.78/ и Държавен изпит „отличен“ /5.50/.

**Дипломна работа:** „Четирифотонна параметрична генерация в натриеви атоми, засилена от натриеви димери“,

ръководител: н.с. к.ф.н. Стоян Г. Динев (СУ, Физически Факултет, Катедра Квантова Електроника)

**Защита на Дипломна работа** (1984 г.): „отличен“ /6.00/

Софийски Университет „Св. Климент Охридски“, Физически Факултет, Катедра Квантова Електроника

**Диплома за научната степен „кандидат на физическите науки“** (к.ф.н. = образователната и научна степен „доктор“) – 1991 г., от Висшата Атестационна Комисия на Република България.

Научна специалност: Физична електроника, вкл. квантова електроника, Физика на вълновите процеси. (нелинейни трептения и вълни – нелинейна оптика и квантова електроника), Шифър 01.03.22

**Защитена дисертация** (1990 г.) на тема: „Нелинейни процеси и лазерна спектроскопия на К и NaK“, ръководител: доц. к.ф.н. Стоян Г. Динев (СУ, Физически Факултет, Катедра Квантова Електроника), Софийски Университет „Св. Климент Охридски“, Физически Факултет, Катедра Квантова Електроника

**Настояща позиция: Доцент** (от 1999 г.) в Лаборатория „Оптика и Спектроскопия“, Направление „Физична Оптика и Оптични Методи“, Институт по Физика на Твърдото Тяло, Българска Академия на Науките

**Специалност** „Физична електроника, вкл. квантова електроника; Физика на вълновите процеси“

**Научно-изследователска област:** Експериментална и Приложна Физика, Експериментална и Приложна Оптика и Спектроскопия. *Физична електроника; Квантова електроника; Вълнови процеси; Нелинейна оптика и лазерна спектроскопия; Материалознание; Наноматериали и наноструктури; Оптични, електронни, електрични, електро-оптични, диелектрични и диелектро-оптични свойства на кондензирана (вкл. пластична) материя; Нови материали за оптика и електро-оптика; Органична електроника, фотоника, сензорика, мехатроника*

### Специализации:

- октомври-ноември 1991 г. – Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern (Germany), Fachbereich Physik, Prof. Dr. Wolfgang Demtröder ; Prof. Dr. Klaas Bergmann
- декември 1991-януари 1992 г. – Max-Born-Institut für Nichtlineare Optik und Kurzzeitspektroskopie, MBI (Berlin, Germany), Prof. Dr. Ingolf Volker Hertel ; Dr. Albrecht Lau (Arbeitsteilung „Nichtlineare Spektroskopie“)
- февруари 1997-май 1998 г. – Institut für Physikalische Chemie der Universität Würzburg, Würzburg (Germany), Prof. Dr. Wolfgang Kiefer

**АВТОРСКА СПРАВКА**  
**за оригиналните научни приноси**  
**на доцент д-р Георги Бориславов Хаджихристов,**  
**Лаборатория “Оптика и Спектроскопия”, ИФТТ-БАН**

В конкурса за Професор (обявен в Държавен Вестник, брой 78 от 04.10.2019 г.) участвам с общо 70 научни публикации. В авторската справка тук те са цитирани съгласно номерацията им в документ ”08-List of publications”. Научните приноси (\*) са представени (в паралел с основните оригинални резултати и техните научно-приложни аспекти) в девет основни направления-раздели, според изследваните материали и приложените методи за изследване:

- I. Нелинейна оптика и нелинейна лазерна спектроскопия на органични полимери и полярни среди
- II. Фотофизика и лазерно-индуцирана луминесценция на нови  $\text{Eu}^{3+}$  метал-органични комплекси при облъчване с къси и ултракъси лазерни импулси
- III. Оптика и спектроскопия на многофункционални структури, базирани на йонно-имплантирани полимери
- IV. Приложение на спектроскопически техники за изследване на нанослойни покрития от диамантено-подобен въглерод
- V. Електро-оптични полимер/течно-кристални композитни материали и тяхното взаимодействие с кохерентна светлина (лазерно лъчение)
- VI. Фотоактивни нематични течно-кристални системи-смеси
- VII. Нематични течно-кристални нанокompозити за електро-оптика
- VIII. Фотофункционални нематични течно-кристални нанокompозити с фотохромни фотоактивни азо-молекули, за фото-контролируема електро-оптика
- IX. Нови йон-полимерни електролитни системи и полимер/течно-кристални електролитни композити

.....

**I. NLO/CARS/POLAR. Нелинейна оптика и нелинейна лазерна спектроскопия на органични полимери и полярни среди [B4.1, B4.2, B4.3, B4.4]**

1. Създадена е оптическа и спектро-анализираща система за мултиплексно и резонансно кохерентно анти-Стоксово Раманово разсейване (КАРР) в кондензирани среди – в Лаборатория Оптика и Спектроскопия на ИФТТ-БАН, където е и понастоящем. Проектирани и разработени са двата пренастройваеми лазера на КАРР-спектрометъра (с органични багрила и с наносекундна продължителност на импулсите. Единият е с тясна спектрална ивица на излъчване, а другият – с широка. КАРР-спектрометърът включва още широкоивичен детектор за регистрация (оптически многоканален анализатор), хардуерни модули за управлението на системата и за автоматизация на експеримента. Всички те, заедно с други детектиращи устройства и електронна измерителна апаратура, аналогово-цифрови/цифрово-аналогови преобразуватели, и персонален компютър, са omрежени по сериен стандарт RS232 и с паралелния интерфейс на компютъра. Разработена е електронната част на приборите/устройствата за детекция и измерване. Разработено е и програмното осигуряване на апаратурата - гъвкав софтуер под DOS за контрол/управление на измерванията и за събиране на данните от тях съобразно типа на заложения експеримент. Системата има потенциал за качествена научно-изследователска експериментална дейност, напр. за измерване на кубична нелинейна оптическа възприемчивост  $\chi^{(3)}$  (кубичната нелинейност, оптическа възприемчивост от трети ред) [B4.1], както и за чувствителна емисионна (флуоресценция/луминесценция) спектроскопия на молекулни среди (в твърдо или в течно състояние) [B4.5].

2. За коректна и пълна интерпретация на спектри на оптическо възбуждане (профил на възбуждане), получавани експериментално чрез резонансно четиривъълново оптическо смесване при Раманов резонанс (т.е., КАРР), осъществяването на което става с два лазерни източника за резонансно оптическо възбуждане на изследваната среда, за първи път е предложено да се прилагат релациите на Крамерс-Крониг по отношение на реалната и имагинерната части на профила на възбуждане, определяни чрез анализ на спектралната линия на кохерентния сигнал – регистрираната анти-Стоксова вълна [B4.1]. Резултатите са полезни за практическото приложение на този тип нелинейна/кохерентна лазерна спектроскопия.

---

\* Научните приноси в хабилитационния труд (показател B.4) са 1–5 в раздел I и 1–3 в раздел II

3. Принос в развитието на методите за цифрова обработка и в анализа на спектри на КАРР и изобщо на четиривълново оптично смесване (ЧВОС) (спектри, получени чрез многофотонна параметрична оптична спектроскопия), е **прилагането на интегрални трансформации за тази цел**. Предложеният числен метод включва **Фурие анализ и интегрална трансформация на Хилберт, в комбинация с релациите на Крамерс-Крониг за дисперсионната зависимост на  $\chi^{(3)}$  в случай на ЧВОС**. Числената процедура се прилага интегрално върху целия спектър на ЧВОС, получен от експеримента, което има определни предимства [B4.1]. Този полезен нов подход с числено бързо Фурие преобразуване (FFT) и числено интегриране на спектри служи за определяне на важни характеристики на кубичната нелинейност  $\chi^{(3)}$  на нелинейно-оптични (НЛО) материали, както и за конструкция на профила на оптично възбуждане при резонансно ЧВОС в молекулни системи. Новото е случая е и, че чрез този метод може да се съотнасят двете части (и реалната и имагинерната) на профила на резонансно възбуждане (в случай на резонансно ЧВОС). Така, ако има информация за реалната част на профила на резонансно възбуждане, може да се получи имагинерната му част, и обратно. Или пък да се проверява верността на двете части (реална и имагинерна) на профила на резонансно възбуждане, в случай, че те са получени с прилагане на различни експериментални техники. Така, с този метод могат ефикасно да се изследват електронни преходи в оптично-поглъщащи НЛО среди [B4.1]. Методът е приложим за различни среди, притежаващи оптична кубическа нелинейност, както и за различни варианти на ЧВОС. За целта е създаден програмен пакет за обработка на комплексни масиви, на езика FORTRAN IV.

Като пример при изследване на кондензирани среди чрез четирифотонно смесване, предложеният метод е демонстриран за експериментални данни (КАРР спектри), получени за фотохромен полимер poly[3-(bromocarbazol-9-yl)propyl]methylsiloxane, който е интересен и ефективен материал за фотониката, фото-контролируемата оптика и оптоелектрониката, както и за НЛО устройства. За този органичен полимер (в разтвор на органичен разтворител), са определени стойностите на Рамановата ( $\chi_R$ ) и на нерезонансната (електронна) ( $\chi_{EL}$ ) компоненти на  $\chi^{(3)}$  [B4.1]. Определената стойност за  $\chi_{EL}$  показва, че изследваният полимер е подходящ за НЛО приложения, а също и за приложения в органичната електроника и фотоника.

4. На базата на собствено-разработен теоретичен модел и след съответните изчисления, е показано, че **нелинейното оптично отражение при молекулни съединения, макро-молекули и системи със сравнително големи постоянни диполни моменти, може значително да нарастне при определени условия**. Такива среди са силно-спрегнатите системи и полярни кондензирани среди, много от които имат приложение в оптоелектрониката, нелинейната оптика и интегралната оптика. Прилагайки квантово-механичния формализъм на матрицата на плътността, са получени числени резултати за модифицирано ЧВОС (4 взаимодействащи си кохерентни оптични вълни с еднаква дължина/честота на вълната) при двуфотонен резонанс в такива среди, моделирани като молекулни системи с три нива. Чрез изчисленията е показано наличие на поредица резонанси в спектрите на нелинейното отражение на кохерентните оптични вълни [B4.2]. Анализирани е зависимостта на този ефект от големината и знака на постоянните диполни моменти на молекулните състояния, между които е двуфотонният резонанс, както и от енергията на молекулните състояния, между които се осъществява резонансно двуфотонно възбуждане при ЧВОС. Също така, от анализа на числените резултати е констатирано, че усилването в резонансите на нелинейното отражение може да достигне няколко порядъка в сравнение със същата молекулна система, но разглеждана като неполярна [B4.2]. Така е показано, че полярните среди могат да имат огромен потенциал и ефективност за НЛО взаимодействия и съответно за НЛО приложения. Получените резултати са полезни за съответни НЛО приложения и устройства, и са интересни от гледна точка на нелинейната оптика, фото-физиката, физико-химията и молекулния инженеринг на полярни среди – нови НЛО материали, перспективни за активни фотонни устройства.

5. За силно-диполни кондензирани среди, които могат да бъдат моделирани като молекулни системи с 3 нива със смесена четност, по теоретичен път (чрез матрицата на плътността) са изчислени нелинейните коефициенти на оптично поглъщане и пречупване. Показано е, че при облъчване с мощно лазерно лъчение в условията на двуфотонен резонанс, **лазерно-индуцираната нелинейна добавка към поглъщането и към пречупването в такива среди може да е значителна** [B4.3] и затова може да доведе до нежелани последици.

Но пък този ефект при изследваните среди е предложен (за първи път) да се ползва за **практическо приложение** – защитни покрития, служещи за т.нар. **'оптическо ограничаване'** на интензитета на мощно лазерно лъчение, преминаващо през тънки слоеве от силно-диполни кондензирани среди [B4.4], каквито са, напр., полимерът полидиацетилен poly-4VCMU, колагенът, и др. полимери и биополимери. Други приложения на предложения ефект могат да са и различни активни фотонни устройства, като напр., оптични превключватели и логически гейтове.

.....

## II. Laser spectroscopy of Eu<sup>3+</sup> complexes.

### Фотофизика и лазерно-индуцирана луминесценция на нови Eu<sup>3+</sup> метал-органични комплекси при облъчване с къси и ултракъси лазерни импулси [B4.5, B4.6, B4.7]

1. Чрез лазерно-индуцирана луминесценция и оптическа спектроскопия са определени **фото-физични и емисионни характеристики** (като: емисионна ефективност, квантов добив, времена на изсветване/луминесценция), както и фотостабилността на 4 нови координационни комплекса с европиеви йони Eu(III). Комплексите съдържат лиганди на аминокислотни производни, които имат свойство да прикачват определени органични структури от интерес за микробиологията, биохимията, молекулярната биология и биомедицината. Установено е, че силно-разредени (10<sup>-6</sup> M) разтвори на тези комплекси, вкл. и във воден буфер, показват силна луминесценция във видимата област на спектъра, както при резонансно фото-възбуждане, с интензивни фокусирани наносекундни импулси от лазер, излъчващ в ултравиолетовата част от спектъра (337 nm), така и при възбуждане, близко до резонансното (т.нар. пре-резонансно), което бе осъществено във виолетовата област на видимия спектър (~ 400 nm) с фемтосекундни лазерни импулси (втора хармонична на Ti:сапфир фемтосекунден лазер, 40 fs импулси с ултра-висок интензитет до към 10<sup>14</sup> W/cm<sup>2</sup>) [B4.5, B4.6, B4.7]. Характеризирани са и твърдотелни тънки (600 nm) филми на полимери на изследваните комплекси. Демонстрирано е, че с пре-резонансно възбуждане с фокусиран лазерен сноп и ултракъси импулси с ултра-висок интензитет се постига максимална ефективност на изсветване на изследваните макромолекулни съединения-комплекси, подходяща за флуорометрични приложения, напр. като луминесцентни маркери за биологични молекули и др. био-обекти.

2. Анализирани са ефекта от различни диаминални лиганди, включени в изследваните Eu-комплекси, и е определена връзката между емисионните свойства и структурата на тези съединения [B4.5]. Определени са времето на луминесценция за различни температури, термодинамичната стабилност, както и фото-стабилността на изследваните съединения [B4.5]. Резултатите са сравнени с данни, налични за стандартни Eu-комплекси с ароматни системи (като 1,10-Phenanthroline и 2,2'-Bipyridinyl). Определени са оптималните условия за фотоактивиране на комплексите, при които луминесцентният отклик на силно-разредените им водни разтвори е най-подходящ за флуорометрични приложения [B4.6, B4.6, B4.7]. Понеже са водоразтворими, нетоксични и могат да са носители на био-активни вещества, изследваните метало-органични Eu-комплекси-флуорофори и техни производни имат приложно значение като луминесцентни маркери при изследвания на протеини, специфични антители, антигени, хормони, ДНК-съставки, и др., във високо-чувствителни и селективни имуно-био-системи за анализ, контрол и диагностика за определяне на вещества и обекти от биологичен и фармакологичен интерес. Получени са данни за кинетиката на изсветването на тези комплекси [B4.5] и е констатирано, че те са атрактивни за приложение като фотоагенти за изследвания с модерните 2D- and 3D-лазерни сканиращи флуоресцентни микроскопи, и за флуоресцентна микроскопия с микросекундна разделителна способност във времето. Посочено е, че тези специално синтезирани метало-органични координационни комплекси са подходящи за ползване като за чувствителни луминесцентни органични нанопробы, напр. в органичната сензорика, за биомедицинска диагностика и биоанализи за изследване на молекули и структури от биомедицински и фармакологичен интерес, маркирани с такива Eu-комплекси, а също и като луминесцентни материали за компоненти-светлопреобразуватели в разработката и конструирането на системи и устройства за органичната фотоника и био-фотоника.

3. Основен принос, свързан с посочените изследвания на лазерно-индуцирана луминесценция на Eu-комплекси в силно-разредени разтвори, е и демонстрирането на потенциала на пре-резонансното фото-възбуждане с ултракъси (< 100 fs) лазерни импулси, със светлина във видимата област на спектъра (а не с UV), чието предимство е, че не уврежда био-обектите, подложени на облъчване и изследване. Активираната луминесценция е във видимата област на спектъра, интензитетът ѝ е достатъчен за флуориметрични приложения [B4.6, B4.7]. Демонстрирано е, че такава едно-фотонно фото-възбуждане е подходяща алтернатива на резонансно двуфотонно фото-възбуждане, което се осъществява с лазерно лъчение в инфрачервената област на спектъра [B4.6, B4.7].

.....

### III. Si<sup>+</sup>:PMMA. Оптика и спектроскопия на многофункционални структури, базирани на йонно-имплантирани полимери (ЙИП) [Г7.2, Г7.3, Г7.4, Г7.5, Г7.10, Г7.11, Г7.12, Г7.13, Г7.20, Г7.21, Г7.22, Г7.26, Г7.27, Г7.56, Г7.58]

Основните резултати тук се отнасят за твърди полу-прозрачни органични среди на базата на полимери с модифицирани оптични свойства, със значително увеличена отражателна способност и с нано-конфигурирана пространствена структура, за приложения в интегралната оптика, адаптивната оптика, органичната електроника и биомедицината. Разработката е за полимера полиметилметакрилат (ПММА), облъчен с йони на силиций (Si<sup>+</sup>), ускорени до 50 keV, при дози от  $3.2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  до  $10^{17} \text{ cm}^{-2}$ . Получена е систематизирана информация за оптичните и спектрални, структурни и повърхнинни, електронни и електрични характеристики на серии образци.

1. За първи път е установен **оптическият механизъм за увеличената отражателна способност** на такива авангардни многофункционални материали във видимата област на спектъра (увеличение ~ 2 пъти за неполяризирана светлина), и което е особено важно – в близката УВ област (250 – 380 nm) (увеличение ~ 3 пъти за неполяризирана светлина [Г7.2], което е от значение за *вътрешно-очни пластични лещи от ЙИП-и*), а също и в близката ИЧ област (800 nm – 2.5  $\mu\text{m}$ ) (важно за различни *миниатюрни вълноводни и дифракционни оптични структури, елементи и устройства за фотоника, оптична комуникация и оптични компютри*).

Установено е, че промяната на оптичните свойства на изследвания ЙИП се основава на промяната на величината на стойността на комплексния показател на пречупване, както и на неговото пространствено разпределение в дълбочина на ЙИП, което се дължи на създаването на комплексна двуслойна структура от два йонно-модифицирани нано-размерни слоя (с дебелина < 100 nm, и с обща дебелина ~ 150 nm) в резултат на йонната имплантация [Г7.3]. В резултат на подходящи измервания е констатирано, че двата съседни нанослоя са наноструктурирани – в този, който е веднага под повърхността, има наноканали, създадени от преминалите през него Si<sup>+</sup> йони, а другият нанослой под него е йонно-имплантиран, като в него се формират въглеродни нанокластери [Г7.2, Г7.3].

2. Посредством анализ на данни, получени с микро-Раманова спектроскопия и интерпретация на фотолуминесцентни спектри, е **оценен средният размер (около 2–3 nm) на йонно-формираните в ЙИП ПММА компактни въглеродни нанокластери с преобладаващо sp<sup>2</sup> свързване** [Г7.2, Г7.3, Г7.20]. Размерът на кластерите корелира с електричната проводимост на имплантирания слой и с широчината на забранената зона на формируения карбонизиран материал [Г7.3].

3. При различни йонни дози е определен какъв ефект има наноструктурната модификация на ПММА след облъчване със Si<sup>+</sup> йони, за оптическите характеристики на ЙИП ПММА (пропускане, поглъщане и отражателна способност), определени чрез оптическа спектроскопия [Г7.2, Г7.4]. За серии образци на ПММА, йонно-имплантирани със Si<sup>+</sup> йони с 30 keV и 50 keV, е установено колко е **оптималната повърхнинна плътност на интензитета на йонния сноп за получаване на максимално увеличение на отражателната способност** на ЙИП ПММА в различните спектрални области [Г7.2, Г7.4]. *Това е важно за технологията за производство на вътрешно-очни лещи от прозрачни ЙИП за офталмологията.*

4. Предложен е оригинален оптичен метод за структурно характеризиране на модифицирания повърхностен слой на йонно-имплантиран оптически прозрачен полимер. За целта се анализира отражението му в средната инфрачервена област (~ 10  $\mu\text{m}$ ). Така, за първи път е приложена оптическа спектроскопия на диференциално отражение за структурни изследвания на ЙИП [Г7.5]. Теоретичната интерпретация включва модела на Лоренцови осцилатори, комбиниран с терията на комплексната диференциална отражателна спектроскопия. С тази методика е определена **дължината на зоната на локално химическо преструктуриране на органичния материал в ПММА**, в резултат на облъчване с 50 keV Si<sup>+</sup> йони. От анализа на степента на нарушаване на специфични химически връзки (C=O, C–O–C, C–H) в ПММА, е определено как тази зона (дебелината на конфигурацията от два йонно-модифицирани слоя) зависи от дозата на Si<sup>+</sup> йони [Г7.5].

5. На базата на експериментални резултати за коефициентите на насоченото отражение (за *s*- и *p*-поляризация) на светлинен сноп от He-Ne лазер (дължина на вълната = 632.8 nm) от йонно-имплантираната повърхност на ЙИП ПММА в зависимост от ъгъла на падане на лазерното лъчение, са определени **пространствените профили на реалната и имагинерна части на неговия комплексен показател на пречупване в дълбочина** (по направление на лазерния лъч). Тези макроскопически характеристики са изчислени посредством приложение на дискретен многослоен модел на изследвания йонно-модифициран слой в ЙИП ПММА, разглеждан като оптична система с множество нано-тънки (по 5 nm) слоеве [Г7.21]. Резултатите от численото моделиране са сравнени с експериментални данни за пространствения профил на комплексния показател на пречупване, получени за ЙИП ПММА чрез оптическа елипсометрия [Г7.26, Г7.58], и са съпоставени с резултатите от Монте-Карло теоретични изчисления на пространствения профил на йонно-модифицирания слой (в дълбочина) [Г7.3]. Изследван е ефекта от дозата на имплантация върху пространствените профили на реалната и имагинерна части на комплексния показател на пречупване на ЙИП ПММА. Тези две характеристики определят цялостния оптичен отклик на изследвания ЙИП и оптичните му приложения. Това характеризираше е с цел да се установи ефекта от йонната имплантация върху оптическите свойства на изследвания нано-структуриран йонно-имплантиран оптически прозрачен полимер, което е важно за *оптическите и био-медицинските му приложения (за вътрешно-очни лещи, подобрени с йонна имплантация, както и в разнообразни оптически устройства)*.

Получената информация за пространствения профил на комплексния показател на пречупване на ЙИП ПММА е съпоставена със спектри на отражение на ЙИП ПММА в спектралната област 250 – 1500 nm, както и с данни за структурата в дълбочина в ЙИП ПММА, получени чрез рентгенова фото-електронна спектроскопия (XPS) – техниката на XPS с разпръскване на материала в дълбочина [Г7.26]. По този начин е определено и разпределението на съдържанието на  $sp^2$  въглеродните атоми в материала, формиран в  $Si^+$  йонно-модифицирания ПММА [Г7.26].

6. Като оптично устройство за практиката, базирано на изследвания ЙИП ПММА, е предложен **ултра-тънък делител на лазерно лъчение с дължина на вълната 1.55  $\mu m$ , който едновременно може и да съвместява/комбинира снопове на лазерно лъчение (laser beam splitter/coupler) в близката инфрачервена област на спектъра**. Определени са параметрите на такъв оптичен елемент, в зависимост от дозата на  $Si^+$  йони, с които е имплантиран полимера ПММА, както и неговата ефективност в зависимост от поляризацията и ъгъла на падане на входното лазерно лъчение [Г7.13]. Те показват, че структурата и конфигурацията на йонно-модифицирания слой на изследвания ЙИП ПММА е подходяща за *практическо приложение в диапазоните O и C за оптическа комуникация (в оптичния прозорец 1.25 – 1.3  $\mu m$  и 1.53 – 1.565  $\mu m$ , съответно - оптични канали за телекомуникации), за свръх-тънки рутери, превключватели, мултиплексори/демултиплексори, микро-оптични матрични лещи с дву-размерна дифракционна фазова оптика, рефлективни и рефрактивни оптични компоненти, и др.* Експерименталните резултати за оптичния отклик на ЙИП ПММА са интерпретирани на базата на нано-структурата на органичния интерфейс, формиран под повърхността на ПММА [Г7.13]. Изтъкнати са предимствата на последния [Г7.13]. *Получените резултати са от значение за нано-фотонни приложения на йонно-имплантирани прозрачни полимери.*

7. За първи път е определен **нелокалният нелинеен отклик на ЙИП**, облъчен с лазерен източник с непрекъснато действие (в случая - с дължина на вълната във видимата област на спектъра). Конкретно, определена е пространствената функция на нелокален отклик на ЙИП ПММА (разглеждан като термична нелинейна оптична среда) вследствие на лазерно-индуцирана промяна в показателя на пречупване на йонно-имплантирания слой. За целта, за първи път е приложен **кохерентно-оптичен метод – лазерна интерферометрия за изследване на ЙИП в отражение** [Г7.22]. По този начин е определена пространствената функция на нелокален отклик на термичната нелинейна оптична среда при органичния интерфейс, формиран в свръхтънък диелектричен слой с дебелина около 100 nm, намиращ се на дълбочина  $\sim 100$  nm в ЙИП ПММА. Така е оценена **топлинната нелинейност** в йонно-имплантирания слой на ПММА, както и важни оптични характеристики на ЙИП ПММА, като **лазерно-индуцираната промяна на оптичната фаза при отражение**, вследствие на лазерно-индуцираната промяна на пространственото разпределение на показателя на пречупване на свръхтънкия йонно-имплантиран слой около преминаващия през ЙИП лазерен лъч. ЙИП ПММА е изследван с двулъчева pump-probe техника, прилагайки съответно излъчването на два лазера: втора хармонична на диодно-напомпван Nd:YAG лазер ( $\lambda = 532$  nm, оптическа мощност 3 mW) като pump, и He-Ne лазер ( $\lambda = 632$  nm, оптическа мощност 0.3 mW) като probe. Нелокалният отклик на нелинейната среда е анализиран при различни дози на йонно имплантиране. За изследвания ЙИП ПММА е установено, че промяната, дължаща се на оптическо поглъщане на лазерното лъчение, е значителна в определена зона с размерност от порядъка на милиметри, поради сравнително силни процеси на топлинна дифузия [Г7.22]. *Тази информация е от значение за всички разнообразни нелинейно-оптични, интегрално-оптични, нано-фотонни и термо-оптични приложения на йонно-имплантирани прозрачни полимери.*

8. За първи път е приложен метода на оптическа (лазерно-индуцирана) топлинна леща (ЛИТЛ), наблюдавана в отражение от ЙИП при облъчването му с непрекъснато лазерно лъчение (дължина на вълната = 532 nm) [Г7.4, Г7.56]. Установена е **ролята на интерфейса между двата йонно-модифицирани слоя в ЙИП за отражението на колимиран кохерентен светлинен сноп**. С прилагане на този метод за ЙИП-образци, получени при облъчване на ПММА с различни дози на имплантиране с Si<sup>+</sup> йони, са определени оптични характеристики на ЛИТЛ в ЙИП ПММА за различните йонни дози, а от тях и **лазерно-индуцираната промяна на оптичната фаза при отражение в зависимост от дозата на Si<sup>+</sup> йони**. Това е важно за *практическото приложение на ЙИП-и в интегралната и адаптивната оптика, фотониката и нелинейната оптика (по принцип, ЛИТЛ е негативен процес, ограничаващ оптичните и фотонни приложения)*.

На практика, ЛИТЛ е приложена за изследване на органичния интерфейс в ЙИП ПММА. Освен като функция на дозата на йонно имплантиране, ефектът е изследван в зависимост от мощността на лазерното лъчение и от ъгъла на падане на лазерния лъч. От анализа на пространственото разпределение на отразеното лазерно лъчение е установено, че промяната на характеристиките на отразеното лазерно лъчение се дължи на оптическо поглъщане от йонно-имплантирания слой с дебелина около 100 nm, намиращ се на дълбочина ~ 100 nm, и впоследствие на лазерно-индуцирана промяна в показателя на пречупване на ЙИП ПММА.

9. За изследвания ЙИП ПММА е установено, че вследствие имплантацията му със Si<sup>+</sup> йони, **електрическата му проводимост нараства невероятно много – с 11 порядъка, в сравнение с проводимостта на неимплантиран ПММА [Г7.3, Г7.12]**. Електрическите характеристики на йонно-имплантирания слой, както и транс-проводимостта на този слой, разглеждан като проводящ канал на подобие на органичен транзистор [Г7.3, Г7.10, Г7.12], показват, че изследваният ЙИП има потенциал за създаване на ефективен органичен полеви транзистор (field-effect transistor, FET), обусловен от наличието на нано-размерна конфигурация от два съседни наноструктурирани йонно-модифицирани слоя и електро-проводяща система (мрежа) от въглеродни нанокластери [Г7.3, Г7.27]. Установен е полеви ефект в сандвич-структурата от типа диелектрик/полупроводник/изолатор, формирана в ЙИП ПММА [Г7.3]. Така, за първи път за органична транзисторна електроника е предложен ЙИП. Неговата материална структура съвместява функциите на проводящ транзисторен канал (в него ЙИП замества органичните полупроводници), както и на диелектричен слой под/над него [Г7.3].

При определени условия, формираната в ЙИП ПММА пространствената конфигурация и нанокластерна структура могат да функционират като електронна памет, базирана на полеви ефект с органичен диелектрик с дебелина 80 nm и дифузен интерфейс [Г7.11]. *Интересното в случая е, че величината на записващото електрическо поле е доста ниска, което прави подобни нано-структури и устройства интересни за полимерната наноелектроника.*

*Получените резултати за създадената с контролирано въздействие със Si<sup>+</sup> йони локализирана примерна въглеродна нанокластерна структура вътре във въглеводороден полимер (в случая, ПММА) в дълбочина 150 – 200 nm, са от принципен интерес за полимерната микро- и наноелектроника. Такава структура и двуслойна пространствена конфигурация от два йонно-модифицирани нанослоя имат потенциал и за био-сензорно и биомедицинско приложение, основано на полеви ефект, индуциран под повърхността на ЙИП ПММА, на чиято повърхност предварително са захванати електрически-заредени молекули от биологичен интерес.*

.....

#### **IV. DLC. Приложение на спектроскопически техники за изследване на нанослойни покрития от диамантено-подобен въглерод [Г8.1]**

1. Посредством оптическа (UV-VIS, Раманова), електронна спектроскопия – Оже електронна спектроскопия (Auger electron spectroscopy, AES) и рентгенова фотоелектронна спектроскопия (X-ray photo-electron spectroscopy, XPS) са характеризирани и количествено анализирани двуслойни покрития от титан (Ti) и диамантоподобен въглерод (DLC), нанесени върху корозио-устойчива стомана (типове AISI 304 and AISI 316L) чрез импулсно магнетронно разпрашване на Ti и графит при вариране на технологичните параметри (мощност на разпрашване, парциално налягане, температура на подложката) [Г8.1]. Целта е да се оптимизира технологията за нанасянето на покритията нанослой-след-нанослой. Получените данни за структурата на изследваните DLC слоеве, предназначени за нанасяне върху *медицинска стомана с цел подобряване на конкретни нейни характеристики*, са съпоставени с физическите свойства на слоевете.

2. Чрез прилагане на XPS техника с разпрашване на материала в дълбочина, е установено, че отношението  $sp^3:sp^2$  за хибридизираните въглеродни атоми в нанесените нанослойни покрития, контролирано посредством технологичните

параметри, може така да се композира, че да бъде градиентно по дебелината на нанослоеве. В нанесените DLC нанослоеве с дебелина около 100 nm, отношението  $sp^3:sp^2$  постепенно намаля от повърността в дълбочина [Г8.1]. – Това е и оптималният вариант за такива покрития, понеже им осигурява най-добри свойства, като здравина и якост, здраво захващане (адхезия) за метала (Ti), минимален механичен стрес и стабилност, необходими за биомедицинските и медицинските им приложения. Получените резултати са полезни за нанасянето на качествени и функционални много тънки (~ 100 nm) био-съвместими покрития върху стендове и други медицински импланти от стомана.

.....

## V. PDLС. Електро-оптични полимер/течно-кристални композитни материали и тяхното взаимодействие с кохерентна светлина (лазерно лъчение) [Г7.1, Г7.6, Г7.7, Г7.8, Г7.9, Г7.14, Г7.15, Г7.17, Г7.24, Г7.25, Г7.55 Г7.57, Г7.59]

(Микро-размерни полимер/течно-кристални композити за пренастройваеми фотонни устройства)

1. За първи път са създадени тънки (до 25  $\mu\text{m}$ ) слоеве (филми) от полимерно-диспергиран течно-кристален материал (ПДТК) посредством разделяне на двете фази (полимер и течен кристал (ТК)), индуцирано чрез **фотополимеризация посредством облъчване с УВ кохерентен светлинен сноп** – лазерно лъчение с дължина на вълната 337.1 nm и с наносекундна (2.5 ns) продължителност на имулса. По този иновативен способ са формирани хомогенни и подредени тънки еднослойни филми от такъв композитен твърдо-мек материал, съдържащи доста еднакви и ориентирани сферични микроскопични капчици от нематичен ТК Е7, равномерно диспергирани в оптически-прозрачна твърда матрица на полимера NOA65 [Г7.1]. Обяснен е физико-химичния механизъм на процеса на формиране на ПДТК материал по този нов метод [Г7.1, Г7.6]. Същественото в случая е, че **електро-оптиката на така създадените ПДТК филми се управлява с изключително ниски (~ 5 V) напрежения на приложеното променливо (АС) електрично поле** [Г7.1, Г7.57].

По същия начин са създадени градиентни Е7/NOA65 ПДТК филми с клиновидни форми, с дебелина от 2 до 25  $\mu\text{m}$ , в които диаметърът на ТК капчици се променя линейно по дължината на клина и е два пъти по-голям от дебелината на филма [Г7.1, Г7.6]. Тъй като електро-оптичните (ЕО) свойства на ПДТК филмите, както и дифракцията от тях като отклик на облъчването им с кохерентна светлина, се определят от големината на ТК капчици, то за **ЕО характеристики на филмите е получено плавно пренастройване чрез големината на ТК капчици**, през и около които преминава лазерното лъчение [Г7.1, Г7.6, Г7.7, Г7.57]. *Ето защо, тези еднослойни градиентни ПДТК филми представляват практически интерес за съвременната електро-оптика, адаптивна оптика, 'интелигентни прозорци' и активни фотонни устройства.*

2. От анализа на ЕО отклик (електрически-управляемото пропускане на колимирано лазерно лъчение във видимата област на спектъра) на формираните еднослойни микроразмерни Е7/NOA65 ПДТК филми е установено, че причината за ниските управляващи напрежения, много атрактивни за ЕО контрол, са **оптически интерференчни ефекти** поради електрически-индуцираната оптична фаза на кохерентните вълни, преминаващи през ПДТК филмите [Г7.8, Г7.9, Г7.17]. Разгледани са различните аспекти на оптичната интерференция, породена от взаимодействието на кохерентна светлина с разработените иновативни еднослойни ПДТК филми с плътно-разположени една до друга микро-размерни ТК капчици. На практика, тези ПДТК филми представляват **отлични оптични фазови решетки** [Г7.8, Г7.14]. Благодарение на електрически-индуцираната промяна на оптичната фаза в тях (оптическо закъснение), е получено ефективно модулиране на интензитета и на фазата [Г7.8, Г7.14, Г7.17] на преминаващите през ПДТК филмите кохерентни оптични вълни.

*Понеже кохерентните оптични ефекти определят и изключително големия оптичен контраст, характерен за разработените ПДТК филми [Г7.9], тези филми са ефективни ЕО амплитудно-честотни и фазово-честотни модулатори [Г7.17, Г7.59], наред със стандартното им приложение като ЕО ключове и атенюатори [Г7.7].*

3. Като идея за приложение в ЕО микро-устройства, освен ефективно модулиране на преминалото лазерно лъчение, е получено и **отражението му в два оптически лъча, чийто интензитет се контролира** благодарение на електрически-индуцираното оптично фазово закъснение, вследствие на взаимодействието на кохерентна светлина с ПДТК филмите [Г7.15]. Представено е електрически-контролируемо двулъчево отражение на кохерентна светлина, двойно-преминаваща през микро-размерен единичен слой от Е7/NOA65 ПДТК. Посредством ПДТК средата, интензитетите на два отразени от нея светлинни лъча могат да бъдат променени реципрочно при прилагане на подходящо напрежение в областта 0–100 V. Електрически-индуцираното отместване на оптичната фаза за кохерентната светлина, преминаваща два пъти през еднослойния ПДТК филм, прави възможно електрически-контролираното отражение в двойка лъчи с реципрочни зависимости на интензитетите им от приложеното напрежение.

4. Като активно ЕО устройство за практиката, базирано на формираните еднослойни E7/NOA65 ПДТК филми с микроразмерни ТК капчици с линеен градиент, е предложен **пренастройваем амплитуден и фазов ЕО модулатор на лазерно лъчение** [Г7.17]. ЕО управляемия му динамичен диапазон, ЕО превключване, времето за ЕО реакция и електрически-индуцираната (електрически-командвана) промяна на оптичната фаза за това устройство са характеризирани като функция на интензитета на приложеното променливо (АС) електрично поле, както и в зависимост от дебелината на ПДТК филма и размера на ТК капчици. Ценното в случая е, че когато лазерен сноп преминава през съдържащите се във ПДТК филма ТК капчици, които имат големи размери, с това ЕО устройство може да се постигне стойност  $\pi/2$  на електрически-индуцирано отместване на оптичната фаза, а тази стойност е много подходяща за ефективна фазова модулация. *От специален интерес за приложни устройства е това, че посредством вариране на дебелината на предложените еднослойни градиентни ПДТК филми с клиновидна форма, се постига управление на ЕО амплитудна и фазова модулация, при това с ниско управляващо АС напрежение. Всички тези свойства са полезни за конструиране на качествени пренастройваеми микро-устройства, базирани на ПДТК, като светлинни модулатори, устройства за адаптивна оптика и др. практични устройства и сензори, работещи при видео честоти (30 – 80 Hz).*

*Освен като високо-ефективни пренастройваеми ЕО амплитудни и фазови модулатори на лазерно лъчение, разработените E7/NOA65 ПДТК филми (2D еднослойни фазови решетки (ЕФР) с пространствен градиент) функционират и като пространствени ЕО модулатори, а също могат да се ползват и за/в други устройства за активен контрол на лазерно лъчение. Тъй като е значителна и добре контролирана, промяната във времето за реакция на еднослойното ПДТК, съдържащо ТК капчици с пространствен градиент, може да бъде прилагано в пространствено-селективни и пространствено-пренастройваеми фотонни линии за променлива задръжка във времето, и то в единично миниатюрно устройство. Микрометричната пространствена разделителна способност, която може да се постигне по този начин, е полезна за дискриминиране на мултиплексирани сигнали в оптични и ЕО микро-устройства, базирани на ПДТК.*

5. За еднослойни E7/NOA65 ПДТК филми с микроразмерни ТК капчици с линеен градиент е получена **ефективна електрически- и пространствено-управляема дифракция на колимирано лазерно лъчение** (във видимата област на спектъра, дължина на вълната 633 nm), преминаващо през тях. Така е постигнато контролируемо пространствено преразпределение на интензитета на дифрактиралата светлина [Г7.6, Г7.14, Г7.55]. Чрез поляризационна оптическа микроскопия е установено, че дифракционното разцепване на лъча, а именно появата на дифракционни пикове с хексагонална симетрия в преминалото през изследваните ПДТК филми лазерно лъчение, се дължи на еднослойната организация и на подреждане на приблизително еднакви и преференциално ориентирани ТК капчици в тях, както и на компактната им опаковка в ПДТК структурата [Г7.6, Г7.8, Г7.14]. На практика, дифракцията на кохерентни оптични вълни, преминаващи през изследваните ПДТК филми се обуславя от кохерентното оптично взаимодействие на тези вълни със средата (ПДТК), дефинирано от електрически- или пространствено-индуцираната оптична фазова разлика (физически на интерфейса между ТК и полимера) [Г7.6, Г7.8, Г7.14]. *Дифракционните характеристики на изследваните линейно-градиентни ПДТК филми ги определят като перспективни за приложение в дифракционната и дифракционно-адаптивната оптика. Освен за пренастройваеми рефлексивни и рефрактивни оптични компоненти, такива 2D ПДТК структури са подходящи за микро-оптични матрични лещи с 2D дифракционна фазова оптика, и др. дифракционни оптични елементи и структури.*

6. За градиентните еднослойни 2D ПДТК еднослойни фазови решетки (ЕФР) е установено свойство, представляващо интерес за приложни фотонни устройства. То е характерно за тънки еднослойни клиновидни ПДТК филми с променлива дебелина (варираща от 2 до 25 микрометра) и с линеен градиент на размера на ТК капчици по дължината на клина. Показано е, че вследствие на оптично кохерентно взаимодействие на насочено кохерентно лъчение (монохроматично лазерно лъчение) с такива ПДТК ЕФР и съответно електрически- и пространствено зависимите: (i) дифракция; (ii) ЕО фазова модулация; и (iii) амплитудно-честотна ЕО модулация на преминаващ през тях лазерен сноп, в честотните спектри на ЕО модулация с тези ПДТК филми могат да се явят **поредици от тесни резонанси (многократни остри и дълбоки минимума)** за определени честоти на приложеното на ПДТК ЕФР променливо (АС) електрическо поле [Г7.59]. Те се дължат на диелектричната реакция на нематичния ТК в капчиците на ПДТК филмите. *Този кохерентно-оптичен ефект е приложим за получаване на пренастройваема многочестотна ЕО модулация на лазерно лъчение, както и за честотно-разпределени режежционни филтри за голям брой дискретни ниски честоти (< 100 Hz), много полезни за приложение в обичайните или в специални ЕО модулатори или дискриминатори.*

7. За първи път е показано, че амплитудно-честотните характеристики на еднослойни микро-размерни ПДТК филми, които имат сравнително големи ( $\sim 20 \mu\text{m}$ ) ТК капчици, ориентирани чрез тефлонови нанослоеви на двете гранични повърхности на филмите, фино натрити (набраздени) перпендикулярни един на друг, са такива, че тези ПДТК филми могат да се прилагат практически като **електрически- и температурно-пренастройваеми ивични честотни ЕО филтри/дискриминатори с голям динамичен диапазон (контраст), достигащ 3 порядъка [Г7.24]**. В Е7/NOA65 ПДТК филмите – обект на изследванията, ТК микро-капчиците са ориентирани чрез нано-слой ( $\sim 4 \text{ nm}$  дебелина) от тефлон. Тефлоновият слой е нано-структуриран (паралелни нано-бразди с ширина  $\sim 20 \text{ nm}$ , на разстояние  $\sim 100 \text{ nm}$ ). Установено е, че амплитудно-честотните ЕО характеристики на изследваните ПДТК филми не зависят от поляризацията на лазерното лъчение, преминаващото през филмите [Г7.24]. Изяснен е физическия принцип/механизъм, по който се осъществява **контролируемата селективна амплитудно-честотна модулация на преминаващо през тях лазерно лъчение [Г7.25]**.

Установената възможност за честотна филтрация на ЕО модулация може да намери приложение за ПДТК-базиран пренастройваеми амплитудно-честотни модулатори на лазерно лъчение, опериращи при ниски честоти, включително в инфра-звукния честотен диапазон. Затова тези спектрални особености на изследваните ПДТК са от голям практически интерес и за сензориката, тъй като могат да служат за чувствителна ЕО детекция и контрол., напр., във военното дело, гео-акустичен и биомедицински мониторинг, и др.

.....

## **VI. Photoactive NLC systems-mixtures. Фотоактивни нематични течено-кристални системи-смеси [Г7.16, Г7.18, Г7.19, Г7.23, Г7.28]**

**(Нематици с чувствителен фотохромен агент)**

**(Нематични течни кристали с добавка на фоточувствителен нематичен течен кристал)**

**(Нематични течено-кристални смеси от типа 'гост-домакин', чиято функция се базира на *trans-cis* фотоизомеризация, с приложение за фото-контролируема електро-оптика и фотоника)**

1. За фото-функционални системи, които представляват течено-кристални смеси от т.нар. тип 'гост-домакин', в които 'домакин' е химически, термално и фото-стабилен стаино-температурен нематичен течен кристал (в случая СМ80 или MBVA), а 'гост' – малко количество (1 wt.%) от фотоактивно азо-съединение, което е също нематичен течен кристал (изследвани са три типа азо-съдържащи мезогени с различна структура, различна молекулна симетрия и притежаващи една или две азо-връзки), са определени условията за **осъществяване на ефективен фото-индуциран електро-оптичен отклик от тях при облъчване със светлина от ултравиолетовата (УВ) област на спектъра**, която води до *trans-cis* фотоизомеризация на молекулите на 'госта'-нематик, а оттук следва и промяна (огъване) на молекулната ориентация в нематичната смес. Посредством анализ на експериментални данни, получени чрез оптическа и диелектро-оптична спектроскопия, поляризационна оптическа микроскопия и термо-оптични измервания на тънки слоеве от такива фотоактивни нематични смеси, е установено, че значителен фото-индуциран диелектро-оптичен ефект в тях (повече от 100 % увеличение на интензитета на диелектро-оптичния отклик, което всъщност е практически интересно) става в случая на 'гост-молекули, които имат асиметрична молекулна структура и надлъжен диполен момент [Г7.16, Г7.18, Г7.19, Г7.23, Г7.28]. Определено е, че фото-индуцираният диелектро-оптичен ефект при тях се дължи на повърхностна поляризация [Г7.16, Г7.18, Г7.19, Г7.23, Г7.28]. Показано е, че дори при относително малката концентрация от 1 wt.% на фотоактивния агент – 'гост' и при облъчване с относително слаба непрекъсната светлина, *trans-cis* фотоизомеризацията на молекулите му е достатъчен фактор, определящ електро-оптичната функция на тънки нематични слоеве от системата-смес 'гост-домакин', т.е., модулирането на интензитета на светлината, преминаваща през тях [Г7.16, Г7.18, Г7.19, Г7.23, Г7.28].

2. Предложена е оригинална прецизна методика за изследване на фото-индуцирания ефект в такива фотоактивни нематични течено-кристални бинарни системи-смеси, базирана на оцифряване на коноскопични изображения чрез броене на пиксели, която дава възможност да се получи адекватна информация за размера на фото-индуцираните деформации на ориентацията на нематичния директор [Г7.16].

3. Чрез анализ на спектро-оптичните характеристики на изследваните фотоактивни нематични течено-кристални бинарни системи-смеси посредством UV-VIS абсорбционна спектроскопия, както и на тяхната промяна при осветяването на системите с УВ светлина, а след това и със светлина в синята област на спектъра, е определена **величината (степената) на *trans-cis* фото-преобразуването и фото-индуцирания електро-оптичен и диелектро-оптичен ефект** за различни типове 'гости' – фотоактивни азо-съединения-нематогени [Г7.19]. Установено е, че съществена причина за получаване на силен фото-индуциран отклик на такива 'гост-домакин' системи е пре-

**резонансното оптическо възбуждане** на 'гост'-молекулите в сместа. То се осъществява в УВ-видимата спектрална област, което е най-подходящо за тяхната ефективна *trans-cis* фотоизомеризация, понеже се избягват оптическите загуби, породени от оптическото поглъщане от страна на молекулите на 'домакина' [Г7.28]. Така за първи път е показано, че по отношение на ефективна фото-контролируема електро-оптична модулация при тънки нематични слоеве от фотоактивни смеси 'гост-домакин', пре-резонансното фото-възбуждане на фоточувствителния агент е удачната алтернатива на резонансното му възбуждане (в конкретния случай: извън пика на оптическото поглъщане на азо-бензолните течни кристали – 'гости' в изследваната система-смес).

4. Друг съществен принос в изследването на фото-индуциран електро-оптичен и диелектро-оптичен отклик на фотоактивни нематични течено-кристални системи-смеси с азо-молекулен фото-агент, е установяването на **негативен ефект на 'закотвяне', индуциран от *trans-cis* фотоизомеризацията на фотоактивния агент**, който при голям интензитет на облъчване би могъл да ограничи обратимия фото-индуциран отклик на тези системи [Г7.23]. За обяснение на наблюдавания ефект е включена и интерпретацията на експериментални резултати, получени чрез оптическа спектроскопия на поглъщане и отражение в УВ и видима области на спектъра. *Отчитането на влиянието на такъв вреден ефект е особено важно за лазерно-базираните приложения на нематичните ТК материали, дотиран с чувствителен фотоактивен агент-абсорбер. С такива фотоактивни нематичи могат да са различни фотонни и сензорни устройства (напр., оптични ключове и модулатори на светлина), за които трябва да се избере оптимален интензитет на осветяване (особено за фото-контролируемите устройства).*

*Изследванията в тази област по т. VI (1 – 4) дават допълнителна светлина върху механизмите на *trans-cis* фото-индуцирани ефекти във фотоактивни нематични течено-кристални системи-смеси от тип 'гост-домакин', които са важни за практическо им приложение, включващо, напр., нови типове опто-оптични и опто-електрооптични устройства и дисплеи.*

.....  
**VII. NLC nanocomposites. Нематични течено-кристални нанокomпозити (НТКНК) за електро-оптика [Г7.29, Г7.30, Г7.31, Г7.32, Г7.33, Г7.34, Г7.46, Г7.47, Г7.60] (Наноструктурирани НТК за пренастройваеми фотонни устройства) с 2 раздела и 4 подраздела:**

**- НТКНК с метални наночастици**

*VII.1. Нанокomпозити от НТК 5CB и наносфери от Au [Г7.29, Г7.30, Г7.32]*

*VII.2. Нанокomпозити от НТК 5CB и наносфери от Ag [Г7.33]*

**- НТКНК с неметални наночастици**

*VII.3. Нанокomпозити от НТК 7CB и наносфери от SiO<sub>2</sub> [Г7.31, Г7.34]*

*VII.4. Нанокomпозити от НТК E7 и Graphene [Г7.46, Г7.47, Г7.60]*

.....  
**VII.1. НТКНК AuNPs/5CB**

1. **Демонстриран е принципно нов електро-оптичен (ЕО) ефект** в нематичен течен кристал (НТК), наноструктуриран с метални наночастици. С тънки (25 μm) планарни филми от НТК pentylcyanobiphenyl (5CB), в който са добавени (диспергирани) малко количество (0.5 wt.%) наносфери от злато (Au) с диаметър 12 nm, обвити с полимер с дебелина 6 nm, е получено ЕО пропускане на кохерентна светлина, което е с много голям контраст (> 1000) [Г7.29, Г7.30], недостижим за обичайните ЕО устройства, базирани на НТК-и. Постигнат е специфичен V-образен ЕО отклик (електрическо-управляемо пропускане на насочен кохерентен светлинен сноп) на изследвания НТКНК, а с това и ефикасен ЕО контрол на интензитета на лазерно лъчение, преминаващо през НТКНК филм-система, съдържаща Au наносфери. Ефектът представлява пространствено ъглово разпръскване на лазерния сноп настрани от посоката на разпространението му, под въздействие на постоянно (DC) електрическо поле, приложено на НТКНК филм, което индуцира фини надлъжни стационарни текстурни ивици във филма. Ефектът е стабилен, наблюдаван бе при стайна температура, осъществява се със сравнително ниско напрежение (около 5 V) и зависи от поляризацията на лазерното лъчение (във видимата област на спектъра), преминаващо през НТКНК филм (ефектът е най-силен, когато лъчението е линейно поляризирано по направление на електрически-индуцираните текстурни ивици). Така е постигнато драстично **намаляване на интензитета на преминалото лазерно лъчение (с порядъци) в тесен диапазон (~ 1 V) от приложеното постоянно напрежение.**

**2. Наблюдаваният в НТКНК Au/5CB нов EO ефект е обяснен** – той се дължи на кохерентно взаимодействие на лазерното лъчение и НТКНК. Определен е главния механизъм на ефекта, а именно - **кохерентно разсейване на входящата кохерентна светлина, придружено с нейна пространствено-разпределена дифузна дифракция** [Г7.29, Г7.30].

Посредством поляризационна микроскопия, UV-VIS спектроскопия на оптично пропускане, както и диелектро-оптическа спектроскопия, е установено е, че наблюдаваният ефект се дължи на активирането на микро-периодична EO фазова решетка, формирана от фини (**тесни**) стационарни надлъжни микро-размерни паралелни текстурни ивици в такива планарни слоеве от НТКНК като следствие от присъствието на диспергираните метални наносфери [Г7.29, Г7.30]. Наличието на полимерното покритие на металните наносфери в НТК води до захват на свободните носители на заряд в обема на НТК, т.е. до тяхното изчерпване, с което се предотвратява формирането на широки надлъжни текстурни ивици в планарния НТК слой под въздействие на приложеното постоянно (DC) електрично поле, както и свързаната с тях съвсем друг тип дифракция на светлина.

*Изследването на новия EO ефект и на такива НТКНК-и е с фундаментален и с научно-приложен характер, и е пряко ориентирано към приложения за контрол и детекция на сигнали (сензорика) с помощта на ефективни НТК устройства, работещи при стабилни температури и лесно настройваеми и контролируеми със слаби постоянни електрически полета (в случая е достатъчно напрежение ~ 5 V) [Г7.29].*

**3. Специално е направено сравнение** между наблюдавания в НТКНК Au/5CB нов EO ефект и конвенционалната EO-управляема дифракция на лазерно лъчение при тънки филми от чист НТК 5CB, при същите експериментални условия. В резултат е установено, че механизмът на дифракционното разцепване на лазерно лъчение, преминаващо през 5CB филми, както и EO управление на преразпределянето на интензитета на дифракцирания лъч под въздействие на постоянно (DC) електрическо поле [Г7.32], е съвсем друг – дължи се на формирането на електрически-индуцирани пространствено-периодични текстури във вид на **широки** стационарни надлъжни паралелни текстурни ивици в НТК филмите, функциониращи като EO фазови решетки.

**4.** С оглед на практическото им приложение, оптичките и EO характеристики (вкл. честотни и времеви) на тънки филми от AuNPs/5CB НТКНК са определени в зависимост от интензитета, поляризацията и дължината на вълната на лазерното лъчение, с което те взаимодействат, както и от интензитета на подаденото им (относително слабо) електрично поле – постоянно (DC) или променливо (AC), или в комбинация DC/AC [Г7.29, Г7.30]. Получената **стръмна характеристика на пропускане** на насочен кохерентен светлинен сноп в зависимост от приложеното DC напрежение (която притежава **екстремално голям динамичен диапазон**), както и **бързото 'изтриване'** на DC-индуцираните в НТКНК филм фини надлъжни текстурни ивици чрез едновременно прилагане на сравнително слабо AC електрическо поле (осигуряващо бързо превключване между две стабилни състояния-нива на оптично пропускане), дават възможност при едновременното комбинирано въздействие на DC и AC електрични полета наблюдаваният ефект и изследваните НТКНК материали да намерят *приложение за чувствителен EO контрол и стабилизиране на процеси, както и за регистриране на слаби динамични полета* [Г7.29]. *Откритият ефект има потенциал за приложение и за поляризационно-чувствителни бързи детектори, функциониращи на EO принцип, електрически-контролируеми и поляризационно-активни бързи атенюатори, светлинни ключове, модулатори на светлина с голям контраст и др. активни фотонни устройства, базирани на наноструктурирани НТК.*

За работите [Г7.29] и [Г7.30], екипът, ръководен от Г.Хаджихристов, е награден за най-важно и ярко научно-приложно постижение за 2014 г. в ИФТТ-БАН (Г.Б. Хаджихристов, Й.Г. Маринов, А.Г. Петров, Е. Бруно, Л. Марино, Н. Скарамуца: “ЕЛЕКТРО-ОПТИЧНО-ЧУВСТВИТЕЛНИ КОМПОЗИТИ ОТ ЗЛАТНИ НАНОСФЕРИ В ТЕЧЕН КРИСТАЛ 5CB ПОД ЕДНОВРЕМЕННОТО ДЕЙСТВИЕ НА ПОСТОЯННО И ПРОМЕНЛИВО ЕЛЕКТРИЧНИ ПОЛЕТА“).

## VII.2. НТКНК AgNPs/5CB

1. Посредством електрични измервания е характеризирани наноконкомпозитен материал, формиран от НТК pentylcupylophenyl (5CB) с добавка на сребърни (Ag) наносфери с диаметър 10 nm, при концентрация 0.5 wt.%. За тънки филми (25 μm) от този наноструктуриран нематик е определено (с комплексна електрическа импедансна спектроскопия и диелектрична спектроскопия в диапазона от 1 mHz до 100 kHz) **как и защо се променят честотните спектри на диелектричната му функция и диелектричните му загуби** вследствие наличието на диспергираните Ag наносфери [Г7.33]. Установено е, че **Ag наночастици увеличават значително йонната проводимост на Ag/5CB НТКНК**. *Получените резултати за ключовите характеристики на изследвания Ag/5CB НТКНК позволяват да се оцени практическата приложимост на този нематичен наноматериал за оптични и електро-оптични устройства, както и за мулти-сегментни тънкослойни електронни устройства за органичната електроника, работещи с НТКНК с метални наночастици, при стабилни температури.*

### VII.3. НТКНК Aerosil/7CB

За електро-оптическия (ЕО) отклик на тънки (25  $\mu\text{m}$ ) филми от нанокомпозитен нематичен гел, формиран от нематичен течен кристал (НТК) heptylcyanobiphenyl (7CB) и 3 wt.% SiO<sub>2</sub> наносфери (Aerosil 300) с размер около 7 nm, са установени следните два интересни ефекта с приложен аспект:

1. Посредством Фурие-преобразуване [Г7.31] и хистограми на светлинния интензитет [Г7.34] на образи на морфологията на такива НТКНК филми, наблюдавани чрез оптическа микроскопия на пропускане, е анализирано пропускането и разсейването на светлина от тези филми в зависимост от интензитета на приложеното електрично поле и поляризацията на светлината, с която взаимодействат филмите. Установено е, че при прилагане на променливо-токово (АС) електрическо поле, филми на такъв наноструктуриран нематичен материал имат обратими ЕО характеристики (амплитудни, честотни и времеви) и тяхното оптическо пропускане се увеличава с увеличаване на интензитета на полето [Г7.31, Г7.34], т.е., **те функционират подобно на nano-PDLC (но се приготвят много по-лесно)**.

2. При преминаване на лазерно лъчение през SiO<sub>2</sub>-наноструктурирани филми от 7CB е регистриран специфичен ЕО ефект – **плато в честотната област до 1 kHz (и малко над 1 kHz) на амплитудно-честотна ЕО модулация на двойната честота на приложеното електрическо поле [Г7.34]**. Наклонът на тази ЕО характеристика е лесно контролируем чрез напрежението на приложеното АС електрическо поле – *факт, който е важен за практически приложения*. ЕО отклик на изследваните филми е интерпретиран на базата на наноструктурата на материала в тях (формираната пространствена структурна мрежа вследствие наличието на наночастици в НТК) [Г7.31, Г7.34]. *Получените резултати са от принципно значение за електро-оптиката на НТКНК материали. Демонстрирано е, че изследваният наноструктуриран гел е интересен като материал за ЕО модулация и за съответни приложения в НТК устройства, работещи при стайни температури и удобно контролирани с АС електрични полета.*

Статиите [Г7.31] и [Г7.34] са от цикъла статии, с които екипът, ръководен от Г.Хаджихристов, е награден за най-важно и ярко научно-приложно постижение за 2016 г. в ИФТТ-БАН (Г.Б. Хаджихристов, Й.Г. Маринов, А.Г. Петров, S.K. Prasad: "НАНОКОМПОЗИТИ С НЕМАТИЧЕН ТЕЧЕН КРИСТАЛ 7CB И SiO<sub>2</sub> НАНОСФЕРИ ЗА ФОТО-КОНТРОЛИРУЕМА ЕЛЕКТРО-ОПТИКА").

### VII.4. НТКНК Graphene/E7

1. Чрез оптическа спектроскопия на пропускане/поглъщане в близката УВ-видима-близка ИЧ области, електро-оптически (ЕО) измервания, а също и с комплексна електрична импедансна спектроскопия и комплексна диелектрична спектроскопия, са определени специфични особености на оптическите, електрическите, ЕО и диелектрични свойства на тънки планарно-ориентирани филми с дебелина 7  $\mu\text{m}$  от нематичен течен кристал (НТК) E7, дотиран с наночастици от графен при концентрация 10<sup>-3</sup> wt%. Промяната на електрическия импеданс, йонната им проводимост, мобилността на свободните йони и диелектричната им функция са анализирани в зависимост от честотата на приложеното електрическо поле (в диапазона от 0.5 Hz до 1 MHz), както и от температурата (в диапазона от 15°C до 60°C) [Г7.46, Г7.47, Г7.60].

Съответните стойности и характеристики са сравнени с тези на филми от чист НТК E7, измерени при същите експериментални условия. **В резултат на дотирането с графен се наблюдава значително намаляване на йонната проводимост.** *Този ефект се проявява в широк честотен и температурен диапазон и е важен за ЕО функционалност на тънките филми от НТК-и, напр. за тяхното практическо приложение за НТК дисплеи и ЕО модулатори. Изследванията показват, че изследваните филми с графен/E7 ще имат по-добри ЕО характеристики, в сравнение с тези на чист НТК E7. Получените резултати са от практическо значение за ЕО устройства, базирани на НТК-и, работещи при стайни температури.*

**VIII. Photoactive nematic LC nanocomposites. Фотофункционални нематични течнокристални нанокomпозити с фотохромни фотоактивни азо-молекули, за фото-контролируема електро-оптика [Г7.35, Г7.36, Г7.37, Г7.38, Г7.42, Г7.43, Г7.48, Г7.49, Г7.50] (Нанокomпозити с нематичен течен кристал 7CB, SiO<sub>2</sub> наносфери и фотохромни азо-молекули, за фото-контролируема електро-оптика) (Фотоактивен НТКНК Aerosil/7CB/EPH)**

1. Предложен е стабилен фотоактивен нанокomпозитен материал-гел, базиран на нано-напълнен нематик, дотиран с 3 wt.% фотоактивен течен кристал 4-(4'-ethoxyphenylazo)phenyl hexanoate (EPH). Базовият материал (нано-напълненият нематик) не е фоточувствителен и предствлява гел, формиран от нематик 4-*n*-heptyl cyanobiphenyl (7CB) и 3 wt.% кварцови наносфери SiO<sub>2</sub> (Aerosil 300) с размери около 7 nm. Добавката на фотоактивния агент EPH дава възможност за **ефикасен фото-контрол на електро-оптичните (ЕО) характеристики (статични и динамични)** на така получената фоточувствителна трикомпонентна нематична система. Това става при облъчване със светлина в ултравиолетовата (УВ) или в синята области на спектъра, което предизвиква *trans-cis* конформация на фотохромните молекули на EPH, или обратния процес, съответно. За изследвания фотоактивен НТКНК Aerosil/7CB/EPH, тези процеси са подробно анализирани посредством UV-VIS оптическа спектроскопия на пропускане [Г7.42].

2. Установено е, че при прилагане на променливо (AC) електрическо поле, оптичкото пропускане на тънки филми (с дебелина 25 μm) от наноструктуриран фотоактивен нематик Aerosil/7CB/EPH нараства с увеличаване на напрежението, приложено на филмите. Това нарастване е още по-голямо при осветяване на Aerosil/7CB/EPH филмите с УВ светлина, т.е., **те добиват фото-функционалност. Тази ЕО характеристика е обратима** [Г7.35, Г7.42, Г7.48].

3. В практически план, оптичките и ЕО характеристики (вкл. честотни и времеви) на тънки филми от EPH/Aerosil/7CB нанокomпозити са изследвани в зависимост от интензитета на светлината, с която те взаимодействат, както и от честотата и интензитета на подаденото им променливо (AC) електрично поле [Г7.42, Г7.49]. Показано е, че **УВ осветяване може силно да стимулира ЕО отклик на фоточувствителните EPH/Aerosil/7CB нанокomпозити**, както и **значително да понижи праговото напрежение за техния ЕО отклик** [Г7.42, Г7.49], *което е изключително важно и полезно от практическа гледна точка*. Анализирано е **ефективното фото-превключване** на фотоактивния НТКНК Aerosil/7CB/EPH, разглеждан като система с две стабилни фото-контролируеми състояния [Г7.42, Г7.49].

4. Допълнително изследване (чрез оптическа спектроскопия, електрически и ЕО измервания) е фокусирано върху ролята, която имат слоевете от натрит полиимид (PI-2555), с които са ориентирани изследваните тънки филми от НТКНК Aerosil/7CB/EPH, за фото-стимулирането на техните ЕО свойства [Г7.36]. Анализирана е и ролята на концентрацията на фотохромния агент EPH за наблюдаваните ефекти [Г7.37].

5. Посредством диелектрична спектроскопия е определено как се променят диелектричните свойства на фоточувствителен НТКНК Aerosil/7CB/EPH при облъчването му с УВ светлина. С оглед на практически приложения за фото-контролируема електро-оптика, промяната на диелектричната проницаемост на Aerosil/7CB/EPH (тясно свързана с неговите ЕО свойства) е определена като функция на интензитета на УВ светлина [Г7.38, Г7.43, Г7.50]. Установено е обстоятелството, че **при увеличаване на интензитета на УВ светлина, и реалната, и имагинерната части на комплексната диелектрична функция на Aerosil/7CB/EPH нарастват**, което се свързва със съответното увеличаване на диполния момент на азобензолната структурна група на фото-чувствителното азо-бензолно съединение-НТК EPH, от 0 (за *trans*) до 3 D (за *cis* конформерите), индуцирано от УВ светлина [Г7.38, Г7.43].

*Резултатите VIII (1 – 5) от тази разработка, са от принципно значение за електро-оптиката на нано-напълнени НТК среди. Те показват и че композираният наноматериал и наблюдаваните специфични ефекти представляват интерес за фото-контролируеми ЕО приложения (напр., ефективни оптични ключове, амплитудно-честотни ЕО модулатори, ЕО атенюатори и др. устройства за активен контрол на светлина, както и сензори, функциониращи на ЕО принцип).*

Статията [Г7.35] е от цикъла статии, с които екипът, ръководен от Г.Хаджихристов, е награден за най-важно и ярко научно-приложно постижение за 2016 г. в ИФТТ-БАН (Г.Б. Хаджихристов, Й.Г. Маринов, А.Г. Петров, S.K. Prasad: "НАНОКОМПОЗИТИ С НЕМАТИЧЕН ТЕЧЕН КРИСТАЛ 7CB И SiO<sub>2</sub> НАНОСФЕРИ ЗА ФОТО-КОНТРОЛИРУЕМА ЕЛЕКТРО-ОПТИКА").

.....  
**IX. Novel SPE systems. Нови йон-полимерни електролитни системи и полимер/течно-кристални електролитни композити [Г7.39, Г7.40, Г7.41, Г7.44, Г7.45, Г7.51, Г7.52, Г7.53, Г7.54, Г7.61, Г8.2]**

По тази тематика са изследвани 3 класа материали:

**(А)- Нови  $\text{Na}^+$  йон-полимерни електролитни системи:** полимерни комплекси на базата на полиетиленов окис (PEO), поливинил пиридон (PVP) или поливинил алкохол (PVA), и подходящото неорганично йонно съединение  $\text{NaIO}_4$

(PEO/PVP): $\text{NaIO}_4$

и

(PEO/PVA): $\text{NaIO}_4$

**(В)- Нанокompозитни електролити от (А), с добавка на наночастици: GO и  $\text{TiO}_2$**

[(PEO/PVP): $\text{NaIO}_4$ ]- $\text{TiO}_2$

и

[(PEO/PVP): $\text{NaIO}_4$ ]-GO

или

[(PEO/PVA): $\text{NaIO}_4$ ]-GO

**(С)- Нови гъвкави полимер/течно-кристални електролитни композити PEO/E8LC**

Основните приноси в тази област са свързани главно с характеризиране на свойствата на тези йон-полимерни електролитни системи посредством оптическа спектроскопия, комплексна електрическа импедансна и диелектрична спектроскопия (в честотната област 0.1 Hz – 1 MHz), както и с рентгено-структурни методи XPS и XRD.

.....  
1. Посредством оптическа спектроскопия на дифузно отражение във видимата и близката ИЧ области са характеризирани образци (във форма на стабилни тънки филми с дебелина 100–150  $\mu\text{m}$ ) от (PEO/PVP): $\text{NaIO}_4$ . Предложен е (за първи път за твърд електролит с полимерни компоненти) **оригинален метод за определяне на степента на кристаличност**, чрез анализ на спектрите на дифузното отражение от повърхността на електролитния материал [Г7.51].

2. Посредством циклична волтаметрия и импулсна хроноамперометрия са изпитани електростатичните и електрополяризационни свойства на (PEO/PVP): $\text{NaIO}_4$ . Основен резултат от тези изследвания е установяването на **липсата на захват на йоните** в този твърд йонно-проводящ електролит под постоянно електрично поле, за разлика от главния му съставен компонент – полимерът PEO [Г7.51]. Това е важно е за  $\text{Na}^+$  електролитната функция на (PEO/PVP)- $\text{NaIO}_4$ .

3. Чрез комплексна електро-импедансна спектроскопия е определена йонната проводимост на електролитите (PEO/PVP): $\text{NaIO}_4$  и (PEO/PVA): $\text{NaIO}_4$  в зависимост от концентрацията на  $\text{NaIO}_4$  [Г7.39, Г7.52], а също и когато тези електролити са наноструктурирани с добавка-пълнеж от наночастици, като  $\text{TiO}_2$  [Г7.40] и GO [Г7.44]. Установено е **значително нарастване на йонната проводимост на нанокompозитите**: [(PEO/PVP): $\text{NaIO}_4$ ]- $\text{TiO}_2$  (~ 60 пъти, с 3 wt%  $\text{TiO}_2$ ) [Г7.40], [(PEO/PVP): $\text{NaIO}_4$ ]-GO (~ 12 пъти, с 0.6 wt% GO) [Г7.44] и [(PEO/PVA): $\text{NaIO}_4$ ]-GO (~ 10 пъти, с 0.9 wt% GO) [Г7.52], което ги прави перспективни като твърди йон-полимерни електролити, а също и за приложения в полимерната електроника. Обяснена е физическата природа на наблюдаваните ефекти на увеличение на йонната проводимост [Г7.39, Г7.40, Г7.44, Г7.52].

4. Посредством комплексна диелектрична спектроскопия са анализирани честотните спектри на диелектричен отклик на  $\text{Na}^+$  йон-полимерните електролити (PEO/PVP): $\text{NaIO}_4$  [Г7.39, Г7.41], [(PEO/PVP): $\text{NaIO}_4$ ]- $\text{TiO}_2$  [Г7.40] и [(PEO/PVA): $\text{NaIO}_4$ ]-GO [Г7.52]. Установено е, че присъствието на съединението  $\text{NaIO}_4$  и нано-добавките **подобряват значително диелектричните свойства** на изследваните полимерни комплекси-електролити, *атраaktivни за мултифункционални приложения*.

5. Чрез комплексна електро-импедансна спектроскопия е анализирана йонната проводимост на гъвкави композити PEO/E8LC в зависимост от концентрацията на течния кристал E8 [Г7.45, Г7.53, Г8.2]. Установено е **значително нарастване (до ~ 240 пъти) на йонната проводимост на тези композити** при стайна температура и при концентрация 30 wt% на E8LC [Г7.61], което е с около два порядъка повече от докладваните (от други автори) до момента стойности при сравними условия. Този факт показва, че *изследваните полимер/течно-кристални композити са перспективни като платформа за полимерни електролити за органичната електроника и мехатроника, и дори електро-оптика и оптоелектроника (напр. за гъвкави твърдотелни йонно-проводящи електрохромни устройства), други електро-приложения, и електро-химични клетки*.

6. Чрез комплексна диелектрична спектроскопия е определена променливо-токовата (AC) проводимост на композити PEO/E8LC. Установено е, че тя **нараства значително при ниски честоти (< 100 Hz, до 0.1 Hz) на приложеното AC електрическо поле [Г7.61]**. Тази особеност е изключително полезна за различни приложения в областта на молекулната електроника и сензорика.

7. Наред с оптична спектроскопия, структурните свойства на изследваните електролитни филми са характеризирани и с рентгено-структурен анализ: рентгенова фото-електронна спектроскопия (XPS) и рентгенова дифракция (XRD). С тези експериментални техники е доказано **формирането на йон-полимерните комплекси (PEO/PVP):NaIO<sub>4</sub>, [(PEO/PVP):NaIO<sub>4</sub>]-TiO<sub>2</sub> и [(PEO/PVP):NaIO<sub>4</sub>]-GO**, както и нарастването на хомогенността и на аморфността на материала им с добавянето на NaIO<sub>4</sub> (а също и с TiO<sub>2</sub>, и с GO), което е много важно за работата им като ефективни твърди йонни електролити [Г7.39, Г7.40, Г7.41, Г7.44].

*Резултати IX (1-7), получени за различна концентрация на добавките (NaIO<sub>4</sub>, и наночастици GO или TiO<sub>2</sub>) в полимерната матрица PEO/PVP са полезни за оптимизиране синтеза на достъпни Na<sup>+</sup>-йонни полимерни електролити за презареждаеми мини-батерии и др. практически приложения (напр. в многообещаващата технология за следващото поколение електромобилни акумулаторни батерии), предвид на известните проблеми с литиевите презареждаеми батерии.*

8. Посредством XRD и XPS е установено и анализирано **формирането на между-молекулен комплекс в електролитната система PEO-E8LC**, за пръв път за такъв тип полимер/течно-кристални композитни йонни електролити [Г7.54, Г8.2].

.....