

СПРАВКА
за приносния характер на трудовете
и тяхното значение за развитието на науката в България
на кандидата за участие в конкурс за избор на членове на БАН
член-кореспондент проф. Александър Александров Драйшу

Проф. Драйшу е автор на 270 научни публикации, от които 88 статии в реферирани международни списания с импакт-фактор (1 – изпратена; 63 от квантил Q1 и 24 от квантил Q2), 39 статии в реферирани международни списания с импакт-ранг, 4 статии в Bulgarian Journal of Physics, 1 в Годишника на Софийския университет, 1 в Доклади на БАН, 2 обзора, 135 доклада на международни конференции (12 от тях - публикувани в пълен текст и 123 – с публикувано разширено резюме). Редактирал е 2 тома на Proceedings of SPIE (САЩ) по материали на две международни конференции и един сателитен симпозиум, организирани от него в България. Изнесъл е 37 поканени доклада, 28 от които-пленарни, както и редица популярни лекции за ученици. Публикациите му са цитирани повече от 1974 пъти (автоцитатите-изключени). Н-индексът на публикациите му е $h=22$ (по данни от Web of Science), $h=21$ – по приложения в документите списък на цитиранията.

Проф. Драйшу е специализирал общо над 6 години в Техническия университет на Грац (Грац, Австрия; 1995-1996г.; при проф. Виндхолц), в Институт Макс Планк по квантова оптика (Гархинг, Германия; непрекъснато – в периода 1997-1998г. и ежегодно - в периода 1999-2002г.; като стипендиант на Фондация „Александър фон Хумболт” и на Дружество „Макс Планк”; при проф. Херберт Валтер), в Австралийския национален университет (Канбера, Австралия; трикратно в периода 2004-2007г., при проф. Кившар и проф. Драгомир Нешев – бивш негов дипломант, когото е консултирал като докторант). Понастоящем проф. Драйшу има плодотворно научно сътрудничество с изследователи от Университет „Фридрих Шилер” (Йена, Германия; с проф. Герхард Паулус и проф. Кристиан Шпилман), в чиито лаборатории е работил в осем периода от 2009г. до 2023г.

Проф. Драйшу е създател на първата научна група в България в областта на сингулярната оптика и е създал активна научна школа в тази област. Заедно с проф. И. Христов и доц. И. Стефанов е един от основателите на Лабораторията по фемтосекундна фотоника в Софийския университет – първата и понастоящем функционираща квази-365 дни годишно фемтосекундна лаборатория в България. Тази лаборатория, изградена от 2007г. насам единствено с национално проектно финансиране, понастоящем е обект от проект „ЕЛИ-ЕРИК-БГ”, финансиран от Министерството на образованието и науката по Националната пътна карта на научните инфраструктури 2020-2027г. Водещ партньор в „ЕЛИ-ЕРИК-БГ” е Институт по електроника-БАН. Проф. Драйшу е ръководил 25 научни проекта, 5 от тях – с чуждестранно финансиране. Бил е член на Управителния съвет на Център за върхови постижения „Национален център по мехатроника и чисти технологии” (Договор № BG05M20P001-1.001-0008-C01 в ИСУН), в изпълнението на който, до края на 2023г., участваха 17 партньора, от които 11 – институти на БАН. От месец февруари 2024г. е член на Управителния съвет на официално регистрираното Сдружение с нестопанска цел „Национален център за върхови постижения по Мехатроника и Чисти Технологии”, в който СУ и ТУ-София участват заедно със споменатите 11 института на БАН.

Ръководил е повече от 33 дипломанти, 4 успешно защитили докторанти и 1 – отчислен с право на защита, и е консултирал седем други докторанти. Един от тях (д-р Драгомир Нешев) понастоящем е редовен професор в Австралийския национален университет (Канбера), а друг (д-р Любомир Стоянов) бе удостоен с наградата за най-добър млад учен на Софийския университет за 2020г., бил е стипендиант на Фондация „Александър фон Хумболт” и понастоящем е главен асистент в катедра Квантова електроника на Физически факултет на СУ. Трима други негови докторанти също са главни асистенти във Физически факултет на СУ. Проф. Драйшу стриктно е отдавал дължимото уважение към приноса на своите млади колеги – дипломанти и докторанти, включвайки ги като съавтори на съвместни публикации.

Накратко формулирани, неговите научни интереси и постижения са в областите

/i/ Нелинейна оптика (нелинейни възприемчивости от трети порядък, фазова самомодуляция и индуцирана фазова модулация, четири-вълново смесване на честоти, интерференция на нелинейни процеси, симбиотични лазерни снопове и импулси, напълно-оптични взаимодействия, едномерни и двумерни тъмни солитони, тъмни солитоноподобни вълни, процеси в нелокални и фоторефрактивни нелинейни среди);

/ii/ Оптика на свръхкърсите лазерни импулси (генериране, контрол на дисперсията, характеризиране на импулсите, адаптивен контрол, надпрагова йонизация и генериране на високи хармонични с фемтосекундни импулси, включително носещи фазови сингулярности);

/iii/ Сингулярна линейна и нелинейна оптика (сингулярни снопове, оптични вихри, манипулиране на топологични заряди, нелинейно преобразуване на структурирани лазерни снопове, включително генериране на високи хармонични с тях, пространствено структуриране на лазерни снопове, включително генериране на квази-недифрагиращи Гаус-Беселови снопове, снопове с поляризационни сингулярности);

/iv/ Холография и интерферометрия (компютърно-синтезирани холограми, кодиране на фазови сингулярности, фазова диагностика на сингулярни снопове).

Основните научни приноси и постижения на проф. Драйшу са обобщени по-долу:

1. В поредица работи е изследвано влиянието на резонансните нелинейни възприемчивости от трети порядък на атомарни и йонни среди и ефектите на фазова самомодуляция (ФСМ) и на индуцирана фазова модулация (ИФМ) в процесите на параметрично смесване на честоти и на разширяване на спектъра с цел последващо компресиране на лазерни импулси. Работите от тази група са цитирани 31 пъти.

1.1. Чрез формализма на Файнмановите диаграми, за редица инертни газове и йони, е пресметната дисперсията на нелинейните възприемчивости от трети порядък за процесите на ФСМ и ИФМ в близост до еднофотонни и двуфотонни резонанси [C1]. Установено е, че в близост до двуфотонен резонанс те са на порядъци по-високи и съществува възможност за подбиране на знака им, като в същото време се избягва силното поглъщане на лъчението. В [A1] е изведен аналитичен израз за нелинейната добавка към разстройката на вълновите вектори, модифицираща режима на синхронизъм в нелинейния процес на генериране на сумарна честота, при непренебрежими процеси на ФСМ и ИФМ.

1.2. В публикации [A28,A29] е изследвано влиянието на ФСМ и ИФМ върху процеса на четири-вълново параметрично смесване на честоти с генерация на конична емисия. Подробни

експериментални данни и сравнителни числени симулации са публикувани в обзора [E2]. Експериментално са установени немонотонно ъглово и спектрално пренастройване на жълтата конична емисия около D-линиите на Na при пренастройване на дължината на вълната на възбуждащия лазер през резонанса 3^2S-4^2P [A28]. Аналитичният модел, подкрепен от числените оценки, показва, че немонотонността следва условията, при които (за зададен интензитет на възбуждането) нелинейната добавка към разсъгласуването на вълновите вектори остава минимална [A28]. Наблюдавано е възникването на нестабилности в пространственото разпределение на емисията в близост до резонансите вследствие на флуктуации на концентрацията на парите в кюветата. Получените данни на базата на нелинейното уравнение на Шрьодингер са в добро качествено съгласие с експеримента [A28]. Установено е насищане в зависимостта на ъгъла на коничната емисия от интензитета на възбуждащата вълна. Чрез числени симулации е потвърдено [A29], че то се дължи на нелинейните добавки към вълновите вектори в условията на векторен синхронизъм и в близост до резонанси.

1.3. В [A2] е анализирана възможността за генериране на къси (фемтосекундни) импулси при неколинеарен фазов синхронизъм на четири-вълновия процес на сумиране на честоти. Резултатите доказаха силното влияние на резонансите върху условията на синхронизма и силно изразена интензитетна зависимост на груповата скорост на сигналния импулс, вследствие на която се генерира ударна вълна върху обвивката на този импулс [B1]. В поредица работи [A3,A6,A7] теоретично е анализирана възможността лазерни импулси от късовълновата част на спектъра да бъдат скъсени до пико- и суб-пикосекундната област чрез спектралното им разширяване в резултат на ИФМ от напompващи импулс в близост до двуфотонен резонанс [A3]. Установени са границите на приложимост на метода в суб-пикосекундната област [A7].

1.4. В едно от последните експериментални изследвания в групата на проф. Драйшу снопът на суб-30-фемтосекунден лазер контролирано е модулиран по фаза, при което, във фокалната равнина на леща, е преоформен в 6 пика. След фокалната равнина контролираната фазова модулация е премахната с втора фазова маска и е постигнато кохерентно рекомбиниране на 6-те фокални пика в един Гаусов сноп. Операцията е с цел във фокалната равнина пиковият интензитет на сноповете да бъде понижен, така че спектрите на фемтосекундните импулси да бъдат контролирано разширени вследствие на нелинейни процеси, без загуба на пространствена и времева кохерентност. Крайната цел на подхода е да се демонстрира работоспособността на пространствен аналог на техниката на усиляване на фемтосекундни импулси, които предварително са разширени във времето и впоследствие се скъсват (т.нар. техника chirped pulse amplification (CPA), за която Жерар Муру и Дона Стрикланд получиха своята Нобелова награда). Получените резултати са определено положителни. Доколкото ръкописът по тези резултати е в подготовка, но те все още не са изпратени за публикуване, той не е включен в списъка на публикациите.

Подготвеният текст и графичният материал са в папка „Chast I - Rakopisi w podgotowka“ на приложения информационен носител.

2. Получени са балансни условия между параметрите на сноповете/импулсите и характеристиките на резонансните нелинейни среди, позволяващи формирането на симбиотични двойки лазерни снопове [A8] и на пространствено-времеви симбиотични двойки снопове/импулси [A11]. Под симбиотичен режим се разбира такъв нелинеен режим на разпространение на две вълни, при който еволюцията на всяка една от тях критично зависи от еволюцията на съвместно разпространяващата се втора вълна. Установени са условията за разпространение на пробна вълна в обемна нелинейна среда в режим на „светлинен куршум“ [A5]. Това описателно обозначение е въведено за пространствено-времеви солитонopodobни формирования. Механизмът на анализираният взаимодействие е индуцираната фазова модулация от страна на интензивен сноп/импулс. В аналитичен вид е изведено необходимото балансно условие. Намерени са конкретни нелинейни среди и комбинации от дължини на вълните, за които ефектът може да се наблюдава експериментално. Оценено е влиянието на разсъгласуването в груповите скорости на пробния и напompващия импулс [A5]. В [A4] са изследвани условията за индуцирано водене на пробен сноп и е получен резултат за възможното ефективно нарастване на критичната мощност за индуцирано фокусиране. Физическият механизъм е в по-слабите градиенти на фазата, индуцирани по сечението на пробен сноп, когато той се разпространява заедно с втори интензивен и по-широк сноп. Тези работи са цитирани общо над 145 пъти.

3. Механизмът на индуцираното отклонение на пробна вълна от съвместно и несъосно разпространяваща се, интензивна контролна вълна, се състои в индуцирането на асиметрична фазова модулация по сечението на пробния сноп. Аналитично е показано [A9], че индуцирано фокусиране и дефокусиране на снопове в несъосна геометрия може да се наблюдава в една и съща нелинейна среда, в зависимост от геометрията на взаимодействието. Анализът на пространствено-времевата динамика на процеса [A10] показва съществената разлика между отклонение на снопове и отклонение на импулси [A13]. Прогнозирани са два метода за измерване на продължителността на импулси в късовълновата област на спектъра, единият от които може да се разглежда като напълно оптичен аналог на стрийк-камера [A10]. В [A16] е изведен аналитичен израз за разпределението на полето на пробна вълна в далечната зона, когато тя е претърпяла асиметрична индуцирана фазова модулация. Много доброто съгласуване на теоретичния резултат с данните от измервания в термична нелинейна среда [A16] позволиха да се симулира числено [A12] и да се наблюдава експериментално [A24] ефект на едновременно скъсяване и промяна на формата на наносекундни импулси. Подходът се основава на индуцирано отклонение на снопа/импулса и

пространствената му филтрация в далечната зона. Потвърдена бе възможността да се генерират супер-Гаусови импулси и такива, близки по форма до триъгълни, както и поредици от импулси, всеки един от които е по-къс от началния. Оценени са качествата на генерираните снопове, предимствата и границите на приложимост на метода [A24,B11,C4]. Анализирани са потенциалните проблеми за внасяне на наклон във фронта на импулсите при пространствената им филтрация. Очаква се той да е съществен при импулси с продължителност около и под 50 fs. Експериментално е показана възможността за пряко интерферометрично измерване на наклона на фронта на фемтосекундни импулси (НФИ) спрямо вълновия фронт. Предложена е модифицирана интерферометрична автокорелационна техника, позволяваща коректно измерване на продължителността на свръхкъси импулси [B5]. Развита е аналитична теория за интерферометричния автокорелационен сигнал от втори порядък в интерферометър с инвертирано поле [A58] при наличие на НФИ, която е потвърдена експериментално [A68,BB3]. В съосна геометрия, в пикосекундната област, е предложена и експериментално демонстрирана техника за измерване на продължителности на импулси [A20], наричана „Т-скенер“. Тези работи са цитирани общо 42 пъти. Сред съществуващите техники за измерване на продължителността на ултракъси импулси двата класически метода - интерферометричната и интензитетната автокорелация - се отличават със своята относителна простота и висока надеждност. В [84] публикувахме експериментална техника, която позволява без пренастройване на оптичната схема да се превключва между тези два режима на автокорелация. Тя се основава на интерферометър с инвертирано поле, настроен по колинеарна схема, и на фазова пластинка с кодиран еднозаряден оптичен вихър, която се добавя/отстранява пред устройството, за да се сменят режимите. Експериментът и теоретичният модел потвърдиха работоспособността на техниката в диапазона до 10 фемтосекунди.

4. В поредица работи са публикувани теоретични и експериментални резултати, отнасящи се до генерирането и характеристиките на едномерни, квази-двумерни и истински двумерни сингулярни тъмни снопове (оптични вихри), както и на тъмни солитони и солитоноподобни вълни. Последните се формират вследствие на фазова самотуляция в кубични нелинейни среди с отрицателна нелинейност.

4.1. Успешно са генерирани пръстеновидни тъмни солитоноподобни вълни (ПТСВ) от четни начални условия (чрез амплитудни маски [A14,A15,A17]). Показано е, че напречната им скорост превишава тази на разходящата двойка сиви едномерни солитони, генерирани при съпоставими условия [A15,C5]. За първи път са генерирани ПТСВ чрез възпроизвеждане на компютърно-синтезирани холограми [A25,B2]. Показано е, че напречната скорост на ПТСВ, генерирани вследствие на чисто амплитудна модуляция, е по-висока от тази на генерираните чрез

възпроизвеждане на холограми [A23]. Поради същественото значение на амплитудата на фазовия скок за напречната скорост на тъмния пръстен, особено внимание бе отделено на количественото измерване на регистрираните за първи път фазови скокове [A17, A25]. При четни начални условия са измерени резки изменения на фазата с около $\pi/2$, при нечетни начални условия - скокове с амплитуда, близка до π . Числено са моделирани [A23,B7] и са изследвани експериментално [A38] някои от възможните подходи за управление на напречната скорост на тези тъмни вълни. Относително най-простият подход за намаляване на напречната скорост е увеличаването на радиуса и намаляване на ширината на тъмния пръстен [A23]. Най-ефективният подход комбинира независимата фазова модулация във вътрешността и извън ПТСВ и взаимодействието с втори коаксиален тъмен сноп (съосен оптичен вихров солитон или коаксиална ПТСВ с по-голям радиус) [A23,A38,B7]. Резултатите от численото моделиране показаха [A31,C2], че понижаването на напречната скорост на ПТСВ при силно насищане на нелинейността води до по-висока нестабилност и разпадане на множество двойки оптични вихри. Прогнозирана е възможността такива вълни да бъдат генерирани и в среди с квадратична нелинейност [C3]. Статиите от тази група са цитирани над 125 пъти.

4.2. Широко разпространена във физиката е дефиницията на понятието „солитон” като вълна, формирана в резултат на динамичен баланс между дисперсивен и нелинеен процес. Тя адекватно описва факта, че поради дефокусирането на фоновия сноп с крайни размери, тъмните солитони са, в най-добрия случай, метастабилни. За първи път експериментално са генерирани оптични вихрови солитони (ОВС) с топологични заряди $m=1...4$ [A34,A35,B9], с което са потвърдени теоретичните предсказания от предхождащата публикация [A26]. Решаващо за успешния експеримент бе насищането и нелокалността на нелинейността, довели до подтискане на нестабилностите. Установено е, че солитонната константа на m -кратно зареден ОВС е m -пъти по-голяма от тази на еднократно зареден ОВС [A26,A34]. Особено внимание е отделено на ясното разграничаване на многозарядното състояние от това на силно припокриващи се, но разпаднали се до еднократно заредени вихри [A34,A35]. Наблюдаван е частичен разпад на многозаряден оптичен вихър. Хипотезата, че стабилизацията е в резултат на насищането на нелинейността, е мотивирана от аналитичен резултат [A35, B9]. Числено са моделирани различни сценарии на развитие на модулационната нестабилност на многозарядни ОВС [A35]. Теоретично е анализирано взаимодействието на оптични вихрови солитони, формиращи върху различни фонови снопове [A19]. Показано е, че е възможно да се формират векторни ОВС [A19,C5]. Нетривиалният резултат е възможността взаимодействието на несъосни ОВС, формиращи върху различни фонови снопове, да се контролира чрез топологичните им заряди [A19,C5]. Като логична следваща стъпка са анализирани ансамбли от подредени ОВС. Установена е силната зависимост на напречната динамика на ансамбъла от разпределението на топологичните заряди. За първи път са

прогнозирани са схеми за стабилизиране на подредени структури от ОВС [A30,B3]. В пълно съгласие с теоретичните резултати за първи път са получени и експериментални данни за стабилни оптични решетки от ОВС [A40,B13,A47]. Нещо повече: Експериментално е демонстрирана дифракция на пробен лазерен сноп от периодичната фазова решетка (квадратна и хексагонална), формирана от решетка, състояща се от стотици оптични вихри [A40,B13]. Тези работи са цитирани над 181 пъти.

4.3. Група наскоро публикувани [A66,A71-A76] са посветени на манипулирането на топологичните заряди на оптични вихри и промяната на сноповете в далечната зона (еквивалент на фокалната равнина на леща). В [A66] публикувахме експериментални данни, потвърждаващи предсказаната трансформация на топологичния заряд (ТЗ) на входен оптичен вихър (ОВ) след втора компютърно-генерирана холограма: Резултатният ТЗ на ОВ е равен на ТЗ на постъпващия сноп плюс дифракционния порядък (с неговия знак), умножен по ТЗ, кодиран в холограмата. Радиусите на светлите пръстени на трансформирания ОВ в далечната зона бяха измерени да са в много добро съгласие с аналитичната теория. Резултатите са от особена важност в актуалната област на (де)мултиплексирането на информационни потоци по модова структура на полето (т.нар. Mode Division Multiplexing; MDM). В частния случай на пълно изтриване (нулиране) на ТЗ на ОВ, в далечната зона, както предсказва теорията, се възстановява профила на Гаусов сноп с високо качество. Резултати по сходния проблем за манипулиране на фазовите профили на ОВ чрез едномерни и квази-двумерни фазови дислокации са отразени в [A71,A73,A74]. Те могат да се обобщят като теоретично предсказано и експериментално потвърдено генериране на нови ОВ и на подредени структури от ОВ, формиращи стабилни пространствени структури. Мотивирани от резултата в [A66], насочихме значителна част от експерименталната работа и сравнителното числено симулиране и в друга посока - към манипулиране на топологичните заряди на ОВ, структурирани в „кристални решетки” със стотици ОВ, и резултатната контролируема промяна на разпределението на интензитета на снопа в далечната зона. Първите публикувани резултати за квадратна вихрова оптична решетка [A72] и за хексагонална вихрова решетка [A75], както и за дифракцията на квадратна от хексагонална вихрова решетка [A76], показаха драматична промяна на формата на снопа във фокалната равнина. Това позволява контролируем запис на оптични вълноводи в нелинейна (напр. фоторефрактивна) среда. Резултатите от числените симулации, базирани на Фурие-оптиката, са в отлично съгласие с експерименталните данни. Изследванията бяха продължени в посока на двойни [A76,A77] и тройни смесвания [A83] на такива вихрови решетки. Те доведоха до зрелищни резултати за формиране на подредени структури от фокални пикове с контролируема дребномасштабна и едромасштабна структура. Резултатите бяха високо оценени и публикувани в списание Scientific Reports на издателската група Nature [A76]. Демонстрирани бяха методи за допълнително структуриране на всеки от тези фокални пикове чрез

поместване в тях на оптични вихри, на едномерни и на квази-двумерни фазови дислокации. Тук бих отбелязал, че тези и много други собствени резултати (напр. тези от [A83]) бяха включени в обзорна статия (37 страници) с експериментална насоченост, подготвена със съавторството на проф. Драйшу. Обзорът е озаглавен „Optical vortices in brief: introduction for experimentalists,, и е публикуван в режим на отворен достъп от списание The European Physical Journal - *Plus* (EPJ *Plus*) на Европейското физическо дружество (EPS). Тези относително нови резултати са цитирани над 70 пъти. В момента се работи по проект за контролирано структуриране на сноповете на свръхмощни лазери във фокалната равнина, последвано от контролирано генериране на филаменти (и разширяване на спектъра им), след което суб-сноповете да бъдат кохерентно рекомбинирани в пространството, а импулсите – скъсени във времето, с цел постигане на екстремно високи пикови мощности/интензитети. Доколкото ръкописът по тези резултати е в подготовка, но те все още не са изпратени за публикуване, подготвеният текст и графичният материал са в папка „Chast I - Rakopisi w podgotowka“ на приложения информационен носител.

4.4. Експериментално доказаната възможност за изтриване на единичните топологичните заряди на оптични вихри [A66] доведе до развиването на аналитичен модел и до първото успешно генериране на квази-недифрагиращи Гаус-Беселови снопове [A79-A81] със средствата на сингулярната линейна оптика. Беселовите снопове (БС) са един от четирите известни типа точни решения на уравнението на Хелмхолц (в случая - в цилиндрични координати). Недифрагиращи означава, че централните пикове на такива снопове са забележително устойчиви към дифракционно разширяване. Прецизно казано, БС имат безкраен брой коаксиални пръстени, носещи безкрайна енергия и, следователно, не могат да бъдат генерирани в точния математичен смисъл. Дурнин и съавтори са показали, че добра тяхна апроксимация може да бъде генерирана с Гаусов сноп, ако в задната фокална равнина на леща се помести кръгов процеп. Цената на това е ниска енергетична ефективност. Ние демонстрирахме експериментално нов директен и високоефективен метод за генериране на Гаус-Беселови снопове (ГБС) от нулев [A79] и от първи порядък [A80], ползвайки отражателни течнокристални фазови модулатори. Методът се състои в (а) генериране на оптични вихри с високи топологични заряди (напр. 20 – 50), които (б) се разпадат и, взаимодействайки си (отблъсквайки се) трансформират снопа в пръстеновиден, последвано от (в) изтриване на топологичните заряди при второ отражение от модулатор и (г) заключително фокусиране на пръстеновидния сноп. След фокуса на лещата се формира Гаус-Беселов сноп с разходимост от по-малко от 40 μrad , доказано разпространяващ се на дължини от над 2.5m [A79,A80] (всъщност – над 15 метра). Експериментално доказахме, че качеството на така генерираните ГБС значително превъзхожда това на ГБС, генерирани с аксикони с малки ъгли (още повече при „дълбочини“ на фокуса под 1 cm, типични за комерсиалните аксикони с големи ъгли). Експериментално бе доказано [A81], че по тази сингулярна техника ГБС могат да се генерират в

полетата на фемтосекундни импулси със само единици цикли на носещата честота под обвивката им. В конкретния експеримент, публикуван в Optics Express (Optica, бивше OSA), това бе постигнато в полета на sub-8-фемтосекундни импулси без забележим ефект върху продължителността им, въпреки повече от 300 nm широкия им спектър. Резултатите от [A79] бяха оценени по достойнство и публикувани също в списание Scientific Reports на издателската група Nature. Тези относително нови резултати са цитирани 59 пъти. Беше постигнато дори повече. Интуитивно, може да се очаква, че за високомощни свръхкъси импулси с широки спектри използването на фазови пластини, произведени за определена дължина на вълната, не е възможно. В [A87] доказахме експериментално, че това ограничение може да бъде преодоляно в много широк спектрален интервал около проектната дължина на вълната на фазовите пластини. Работоспособността на схемата бе доказана както при еднопроходна, така и при двупроходна геометрия, в спектрален интервал с ширина над 350 nm, съответстващ на суб-7-фемтосекундни импулси. Квази-недифрагиращият характер на Бесел-гаусовите снопове веднага повдигна въпроса за фазата на Гуи на тези снопове. Известно е, че свободно разпространяващ се Гаусов сноп изпитва допълнително фазово отместване π в сравнение с плоска вълна. Това фазово отместване, известно като фаза на Гуи, има съществени последици например в нелинейната оптика. В [A85] разработихме аналитичен модел за фазата на Гуи на дългофокусни Бесел-Гаусови снопове, получени чрез анихилиране на високочарядни оптични вихри. Показахме, че тази фаза зависи приблизително линейно от разстоянието на разпространение. Резултатът бе потвърден в собствен експеримент [A85]. Оказа се, че освен за фундаменталния Ермит-Гаусов мод, който всъщност е Гаусов сноп, за по-висшите Ермит-Гаусови модове в литературата липсват експериментални данни, потвърждаващи всеобщо приетия аналитичен резултат: Фазата на Гуи за Ермит-Гаусов мод с модови индекси (m,n) е равна на фазата на Гуи за Гаусов сноп, умножена по $(1+m+n)$. Ползвайки отново интерферометричен подход, експериментално успешно потвърдихме тази привидно проста зависимост [A88].

4.5. Необходимо условие за формиране на тъмен пространствен Шрьодингеров солитон е отрицателна нелинейност на оптичната среда. Сравнителен анализ на динамиката на взаимодействието на оптични вихри в условията на положителна и на отрицателна нелинейност от трети порядък публикувахме в [A55,A60]. Основният резултат е, че сценариите на взаимодействията (привличане/отблъскване, трансляция/ротация по отношение на фоновия сноп) са едни и същи и в двете среди при едни и същи начални разпределения на топологичните заряди, но в условията на самофокусиране динамиката на взаимодействието се влияе силно от промяната на структурата на фоновия сноп. В експеримент във фоторефрактивна самофокусираща нелинейна среда [A64] недвусмислено, с три типа сингулярни снопа, доказахме, че наличието на тъмен сингулярен сноп върху фона може да инициира самофокусиране на светлия фоно сноп в

подлежащи на контролиране пространствени структури. Физическата причина за това е във факта, че положителната нелинейност може да фокусира светли структури, но нелинейно засилва дифракционното разширяване на тъмните структури, което, в крайна сметка, локално повишава интензитета на полето и може да доведе до самофокусиране. Отново във фоторефрактивна нелинейна среда успешно бяха генерирани азимутони и снопове от тип „necklace” [A70]. По същество те са сингулярни снопове с азимутална модулация на фоновия сноп. В резултат на нелинейното самофокусиране на тези оптични снопове и на записа на оптични вълноводи в кристала, бе експериментално доказано паралелно напълно-оптично водене на пробни снопове/импулси от титан-сапфиров лазер и преконфигуриране на вълноводната структура. Тези относително скорошни работи са цитирани над 22 пъти.

4.6. Формирането на сингулярни снопове в полетата на ултракъси импулси е нетривиален проблем, решението на който ние за първи път посочихме: Компютърно-синтезираната холограма (двоична амплитудна или възпроизвеждана от течнокристален фазов модулатор) с кодирания в нея сингулярен сноп трябва да се настрои като елемент от бездисперсна система [A44,BB2] (4f или 2f-2f) или като елемент от външнорезонаторен компресор на свръхкъси импулси [A45,BB2]. След публикуването им, тези резултати бяха избрани в препечатани във *Vitruual Journal of Ultrafast Science*. Веднъж формиран, оптичните вихри в свръхкъси импулси позволиха да изследваме процесите на генериране на втора хармонична [A52] и, за първи път, генерирането на суперконтинуум [A54, отново *Vitruual J. Ultrafast Sci.*, A57, A59] и на високи хармонични (19-та, 21-ва, 23-та) с фемтосекундни оптични вихрови снопове [A62]. Резултатите от експеримента в [A62] бяха публикувани в *Nature Physics* през 2012г. и предизвикаха силен интерес, не на последно място и заради разкриваните нови проблеми, свързани с умножаването на топологичния заряд в порядъка на хармоничната. Данни от първия в България експеримент, довел до успешно генериране на високи хармонични в екстремния ултравиолет (от 13-та до 31-ва хармонична) на лъчението от фемтосекунден титан-сапфиров лазер, са публикувани в [BB4]. Конфигурацията на експеримента включваше капиляра, пълна с инертен газ (Ar). В достъпния към момента на експеримента режим на относително ниски интензитети ($I \sim 10^{14} \text{ W/cm}^2$) установихме оптималното налягане на газа за генериране в тази система - 36 mbar Ar. За постигане на по-високи интензитети чрез по-къси импулси на основното лъчение бяха анализирани методи за подходящ контрол на дисперсията на в резонатора на фемтосекундния лазер [B36]. В [A65], в пълно съответствие с обстояитни предшестващи числени симулации, за първи път доказахме, че в каскаден (до трети порядък) параметричен процес на четири-вълново смесване правилата за трансформация на топологичните заряди следват тези за трансформации на честотите на импулсите. Ползваната нелинейна среда бе кварцова пластинка с дебелина 3 mm. Допълнителен теоретичен и експериментален анализ,

потвърждаващ казаното, е публикувам в [A69]. Работите от тази група са цитирани досега над 350 пъти.

4.7. Кръстосаните под прав ъгъл едномерни тъмни пространствени солитони (ТПС) се разпространяват практически независимо един от друг и формират квази-двумерен ТПС. Сравнителното измерване на солитонните константи на едномерен, квази-двумерен и еднократно зареден оптичен вихров солитон (ОВС) показва [A33], че константата на квази-двумерния е равна на тази на двумерния ОВС, но динамиката на формирането ѝ съответствува на едномерния случай. Модулационната нестабилност в едномерната част на тъмния сноп позволи да се наблюдава характерна интерференчна картина. Численият анализ показва, за първи път, наличието на фазова дислокация от смесен тип, генерирана в резултат на модулационна нестабилност [A33,B6]. Понататък в литературата се установи термина "дипол с дробен топологичен заряд".

4.8. Групата работи [A48,A50,B8,A53] са посветени на изследвания на дискретни пространствени солитони. Такива солитони се формират в дискретни структури от вълноводи с нелинеен отклик. Характерно е, че „солитонна” е само обвивката на полето, обхващаща няколко дискретни вълновода. В [A48] е изследвано поведението на полихроматична кохерентна светлина в близост до края на периодична структура от вълноводи. За първи път е установено експериментално, в съответствие с предхождащи анализи, че се формират нелинейни модове на повърхността на структурата. В [A50] за първи път доказахме възможността за пространствен и спектрален контрол и локализиране на оптичен суперконтинуум чрез нелинейно взаимодействие на спектралните компоненти с дълги матрици от паралелни дискретни вълноводи. Списание Optics and Photonics News покани авторския колектив да публикува резюме на данните в секция Solitons на списанието [B8]. В [A53] доказахме теоретично и експериментално съществуване на полихроматични солитони от забранената зона, генерирайки ги от оптичен суперконтинуум в матрица от оптични вълноводи. Солитоните се формират вследствие на рязък преход от дифракционно разширяване и разделяне на спектралните компоненти към едновременно спектрално-пространствена локализация на суперконтинуума в забранената зона на фотонната структура и формиране на фазови скокове в полихроматичното светлинно поле между всеки два вълновода. Тези работи са цитирани над 50 пъти.

4.9. В [A46] е публикуван основният ми принос в областта на едномерните тъмни пространствени солитони (1D ТПС) : Нелокалността на самодифракциращата нелинейна среда може да доведе до драматичен обрат при взаимодействието между 1D ТПС, променяйки го от отблъскване към привличане. В [A46] е публикувано първото експериментално доказателство за това, получено в термична нелинейна среда. Резултатите бяха оценени, избрани и препечатани във Vitruvian Journal of Ultrafast Science. В последващи публикации [A48,A52,A55] формулирахме и демонстрирахме метод за измерване на функцията на отклик на нелокалността [A52] и създадохме

вариационни модели на влиянието на слабата нелокалност на положителна нелинейност върху светли лазерни снопове [A48,A55]. Работите от тази група са цитирани досега над 299 пъти.

4.10. Теоретично е анализирана високата напречна динамика на едномерни тъмни снопове със смесени фазови дислокации от стъпално-спирален тип или от тип „ръб-спирала“ [A32], обозначавани общо като вихрови диполи с дробен топологичен заряд. С помощта на компютърно-синтезирани холограми, при контролирани начални условия, за първи път експериментално са генерирани тъмни снопове със спирално-стъпален тип фазова дислокация [A36]. Показано е, че напречната им скорост нараства с намаляване на дължината на тъмния сноп и с понижаване на височината на фазовия скок. Данните, получени по експериментален път и чрез числени симулации, са в много добро съгласие. Едномерните тъмни снопове с дислокация от тип „ръб-спирала“ имат по-висока напречна скорост, дължаща се на градиентите на фазата в направление, перпендикулярно на едномерната част на дислокацията. И за двата типа е валидна тенденцията на понижаване на динамиката при повишаване на насищането на нелинейността [A36]. В [A56] публикувахме първите експериментални и сравнителни числени резултати, доказващи, че вихрови диполи с дробен топологичен заряд могат да водят и пренасочват информационни пробни снопове. Резултатите бяха избрани и препечатани във *Virtual Journal of Ultrafast Science*, което е оценка за качеството им. В две последващи работи [A61,A63] моделирането на еволюцията на подредени структури от полу-безкрайни вихрови диполи показва формиране на вълноводни структури, подходящи за създаване на вълноводни съединители и разклонители, локализирани в рамките на сечението на един лазерен сноп. Тези резултати са цитирани над 25 пъти.

4.11. Като следващо ниво на мултиплексиране на сигналите в оптичните комуникации, надграждащо сега ползваното мултиплексиране по дължини на вълните (техника WDM; Wavelength Division Multiplexing) в момента се изследва мултиплексиране по модова структура (техника MDM; Mode Division Multiplexing). При демултиплексирането на сигнала критично важно е идентифицирането на топологичните заряди на мултиплексираните снопове. В една от последните ни работи [A78] публикувахме техника, базирана на интерферометър с инвертирано поле, при която може да се идентифицира както абсолютната стойност, така и знакът на топологичния заряд на вихров сноп. Като допълнителен ефект, без никаква промяна на схемата, устройството може да бъде приложено за контрол на отместването между фемтосекундни импулси в пространството с разделителна способност от единици нанометри. Методът разглеждаме като особено полезен за прецизни pump-probe-експерименти с висока разделителна способност във времето. Три години след публикуването им, резултатите са цитирани над 10 пъти.

4.12. Преобразуването на инфрачервени изображения до видимата област е важна техника за множество приложения, включително за прибори за нощно виждане, за автономна навигация на превозни средства, за оптична томография и за контрол на качеството на храните. В [A82], като

част от голям международен колектив, демонстрирахме компактна напълнооптична алтернатива за такова преобразуване, ползвайки метаповърхност, съставена от полупроводникови наноантени на базата на GaAs, и използвайки нелинеен параметричен процес на генериране на сумарна честота. Така изображението бе пренесено от инфрачервения спектър към видимия, и то в ултратънко наноразмерно устройство за визуализация. Около три години след публикуването на резултата, той е цитиран поне 34 пъти.

5. Числено са моделиране на напълно-оптични схеми за паралелно водене, превключване и разклоняване на сигнални снопове. Физическият механизъм на процесите е индуцираната фазова модулация.

5.1. Показана е възможността за генериране на допълващи се двойки от светли и тъмни импулси чрез нарушаване на пълното вътрешно отражение на границата между линейна и нелинейна среда [A18]. Схемата е привлекателна с това, че къси импулси на една дължина на вълната относително просто могат да се използват за генериране на двойки от светъл и тъмен импулс на друга дължина на вълната, евентуално с понижена продължителност и енергетична ефективност.

5.2. Показано е теоретично [A21], че пръстеновидни тъмни солитоноподобни вълни могат да провеждат паралелно няколко сигнални снопа без прехвърляне на шумов сигнал между тях. Устройство, изградено на този принцип, би могло да се разглежда като „напълно оптичен кабел“ с потенциално приложение за високоскоростно паралелно предаване на данни на къси разстояния.

5.3. Теоретично е показано [A22], че е възможен паралелен режим на разпространение на сигнални импулси в градиентни, нелинейни вълноводи, формирани между светли снопове. Тези контролни снопове се разпространяват паралелно, в режим на невзаимодействащи си едномерни пространствени солитони. Схемата проявява значителна стабилност по отношение на флуктуации в интензитета на контролните снопове ($\pm 10\%$) и към отклонения на сигналните снопове от съосността ($\pm 25\%$).

5.4. На основата на числени симулации е показано, че квази-двумерните тъмни пространствени солитони могат да предизвикат разцепване на входни пробни снопове в контролиран брой вторични снопове (от 1:1 до 1:9), евентуално с регулируема ефективност [A27]. Контролирането на режима се извършва чрез промяна на разпределението на фазата на тъмните снопове и чрез интензитета на фоновия сноп [B4].

5.5. В [A37,B10] числено е моделирано превключването на един входен оптичен канал към избран изходен канал чрез промяна на типа на фазовата дислокация и управление на динамиката на индуцирания от тъмния сноп вълновод. Преконфигурирането на схемата се извършва чрез

промяна на типа на фазовата дислокация, възпроизвеждана от синтезирана холограма. Изходните канали, съосни с входните, се адресират с еднократно заредени оптични вихрови солитони, а несъосните – с едномерни тъмни снопове с крайна дължина и фазови дислокации от съответния смесен тип (т.е. с оптични вихрови диполи с дробен топологичен заряд). Оценената енергетична ефективност е висока (над 56% в едномерна конфигурация и над 47% в двумерна) при приемливо ниво на прехвърляния паразитен сигнал между каналите.

6. В Макс Планк Института по квантова оптика (Гархинг, Германия) участвах в разработката на фемтосекундна система генератор-регенеративен усилвател, излъчваща трансформационно-ограничени 35-фемтосекундни импулси с честота на повторение 100kHz и енергия от над 6μJ в импулс [A41,B11]. Реализацията на проекта обедини усилията на изследователска група от 4 човека, за период от над три години. Личният ми принос в проекта се състои в (а) оптимизиране на фемтосекундния генератор до рутинно постигане на спектрална ширина от 32nm в режим на синхронизация на модовете и скъсяване на импулсите до 24fs, (б) анализ на дисперсията до четвърти порядък в регенеративния усилвател и в последващия призммен компресор и подбор на оптичния материал за изработване на призмите, (в) пускане в действие на бездисперсна (в трети порядък) 4f-система с течнокристален фазов модулатор във Фурие-равнината и разработване на генетичен алгоритъм за адаптивен контрол на продължителността на компресираните импулси, (г) разработване на автокорелатор и на схема за дълговременно стабилизиране на позицията на лазерния сноп в пространството (на базата на CCD-камери и огледала, монтирани върху пиезокерамични преобразуватели). С тази уникална за времето си система, в експерименти с мое участие, са получени следните резултати, цитирани общо над 371 пъти:

6.1. Измерено е ъгловото разпределение на фотоелектроните, генерирани в резултат на надпрагова йонизация, в областта на платото. При елиптична поляризация електроните се генерират под ненулев ъгъл спрямо дългата ос на елипсата. Установен е ясно изразен ефект на формиране на второ плато, при постоянен ъгъл от приблизително 30° спрямо първото плато [A39]. Предложено е обяснение на базата на интерференция между два канала на надпрагова йонизация. Изследването на спектрите на директните електрони показва осцилации, дължащи се на интерференция на траектории на тунелиране, когато няма разсейване от потенциала на атомния остатък [A40].

6.2. В мащабен експеримент с тази лазерна система и с установка от Институт “Макс Борн” (Берлин), позволяваща пространствена регистрация на продуктите на йонизацията и, впоследствие, пълен кинематичен анализ (COLTRIMS – cold target recoil ion momentum spectroscopy) бе изследвана непоследователната двойна йонизация на Ar и Ne. Измерванията бяха проведени при интензитети, при които моделът на разсейването на електроните и механизмът на ударна

йонизация на еднократно заредения йон се очаква да са забранени от енергетични съображения. Получените данни показаха [A43, A44] протичането на процес на директна ударна йонизация. В рамките на класическия модел това бе обяснено с понижаването на моментната стойност на йонизационния потенциал на еднократно заредения йон от страна на интензивния светлинен импулс.

6.3. В [A67], в сътрудничество с немски екип, в мащабен експеримент, въведохме нов метод за пряко и точно измерване на дисперсията на показателя на пречупване. Методът се основава на регистриране на промяната на абсолютната фаза на свръхкъс фемтосекунден импулс вследствие на разликата между фазова и групова скорост в дисперсивна оптична среда. Използвана бе установка, наподобяваща интерферометър, изграден с два фазови измерителя на абсолютна фаза, всеки един работещ на базата на надпрагова йонизация. Всеки от двата фазови измерителя е в състояние да регистрира изменението на фазата на образец, като единият измерител бе ползван за опорен, вторият – за измерване на влиянието на образца. В този експеримент [A67] директно е достигната относителна грешка от 10^{-4} . Очертани са пътищата за по-нататъшно развитие на метода, което ще позволи безпрецедентно увеличаване на точността му.

7. В [E1] експериментално са изследвани процесите на ударно предаване на енергия в пари на Sr с висока плътност, при резонансно Раманово лазерно възбуждане. Изследвано е времевото поведение на редица емисии в областта от 300 nm до 800 nm. Установени са микросекундни закъснения на максимумите на емисиите при възбуждане с наносекундни импулси. Числените симулации показаха, че вероятният механизъм е формирането на дългоживеещ молекулярен йон Sr_2^+ . Освен ударния механизъм на възбуждане на около 30 нива на Sr, разработеният числен модел включва процесите на захващане на лъчението, асоциативна йонизация и дисоциативна рекомбинация на Sr_2^+ .

София, 27.05.2024г.

/ проф. Александър Драйшу /