

РЕЦЕНЗИЯ

на дисертационен труд за придобиване на научна степен „доктор на науките“ в професионално направление 4.1. Физически науки, по процедура за защита в Институт по физика на твърдото тяло (ИФТТ) на Българска академия на науките (БАН), изготвена от акад. проф. дн Александър Александров Драйшу от Физически факултет на Софийския университет, в качеството му на член на научното жури съгласно Заповед РД 09-32/31.03.2026г. на Директора на ИФТТ-БАН.

**Тема на дисертационния труд: “Квантов контрол с приложения в квантовите технологии”
Автор на дисертационния труд: доц. д-р Боян Тонев Торосов**

I. Общо описание на представените материали

1. Данни за представените документи

Кандидатът доц. Боян Торосов е представил дисертационен труд (на английски език) и автореферат (на български език). Приемам, че това става след предварително разрешение от Научния съвет (НС) на ИФТТ съгласно Глава 7 (Заклучителни правила) § 1 на документа Изисквания, условия, правила и решения (ИУПР) на НС на ИФТТ в допълнение към Правилника за условията и реда за придобиване на научни степени и за заемане на академични длъжности в БАН. Приложена е изискваната Табл. 3 със сравнителни данни за минималните изисквани точки по групи показатели, съобразно ЗРАС РБ, ЗРАС БАН и изискванията на ИФТТ. Приложен е списък на 4 публикации извън дисертационния труд, осигуряващи 100 точки по група показатели Г, както и списък на цитати на публикациите, включени в дисертационния труд, осигуряващи 954 точки по група показатели Д. Съгласно Чл. 6 от документа Изисквания, условия, правила и решения на Научния съвет на ИФТТ в допълнение към Правилника за условията и реда за придобиване на научни степени и за заемане на академични длъжности в БАН, доц. Торосов декларира, че от петнадесет научни публикации, използвани за написването на дисертационния труд за получаване на научна степен „доктор на науките“, единадесет не са били използвани при предишни процедури (при изискване от поне осем). От списъка на тези 15 публикации, във всички от които е първи автор, ясно се вижда водещата роля на д-р Торосов в изследванията. Останалите изисквания на Чл. 6 от документа ИУПР на НС на ИФТТ също са изпълнени. Дисертантът е представил копие от дипломата си за ОНС „Доктор“. Не намирам данни за негови доклади на международни научни форуми, но, разбира се, негово право е да не представя допълнително такива.

2. Данни за кандидата

През 2005г. колегата Торосов се дипломира като бакалавър, а през 2006г. – като магистър във Физически факултет на Софийския университет „Св. Климент Охридски“ (СУ). През 2010г. от СУ му е присъдена образователната и научна степен „Доктор“. В периода 2010г.-2016г. д-р Торосов е главен асистент, а от 2016г. – доцент в ИФТТ-БАН. От 2022г. е ръководител на звено по квантов контрол в канадската компания 1QBit. На колегата Торосов са присъдени поне две престижни награди - през 2013г. - Награда „Марин Дринов“ за най-добър

млад учен на БАН, и през 2019г. - Награда на ИФТТ на БАН за високи научни постижения.

3. Обща характеристика на научните постижения на кандидата

В периода 2007-2025г. доц. Торосов е публикувал общо 39 статии в престижни научни списания с импакт-фактор (27 във Phys. Rev. A, 2 във Phys. Rev. Lett., 2 във Phys. Rev. Research, 2 в J. Phys. B, 2 – в Opt. Commun., 1 в J. Phys. A и 1 в издание на IEEE – The Institute of Electrical and Electronics Engineers). В конкурса участва с 15 публикации - 1 статия във Physical Review Letters, 1 – във Physical Review Applied, 2 – във Physical Review Research, 10 във Physical Review A и 1 – в Journal of Physics B. Тези 15 статии са привлекли над 477 независими цитирания. Към датата на подаването на документите индексът на Хирш на дисертанта е $h=15$.

Съдейки по съдържанието на дисертацията, интересите на доц. Боян Торосов са в областта на фундаменталните теоретични изследвания, свързани с нови техники за квантов контрол в квантови системи с две и повече състояния и валидирането им за конкретни приложения. Научните публикации, включени в дисертационния труд, отговарят на минималните национални изисквания (по чл. 2б, ал. 2 и 3 на ЗРАСРБ), на Правилника за условията и реда за придобиване на научни степени и за заемане на академични длъжности в БАН и на допълнителните изисквания на Научния съвет на ИФТТ-БАН за придобиване на научната степен „доктор на науките“ по професионално направление 4.1. „Физически науки“. От приложената в документите на дисертанта Таблица 3 става ясно, че тези изисквания са напълно удовлетворени и значително надхвърлени в частта независими цитирания на публикациите му. Всички статии, с които доц. Торосов участва процедурата, са публикувани в престижни международни научни списания, след като са преминали успешни процедури по независими рецензирания. Считаю това за показателно, че публикуваните резултати, както и тези в дисертацията и в автореферата, са оригинални научни приноси на доц. Торосов. С това отхвърлям възможността за плагиатство под каквато и да е форма.

4. Характеристика и оценка на преподавателската дейност на кандидата

Преподавателска дейност на доц. Торосов е свързана с изнасянето на лекции и воденето на упражнения по Квантови компютри и квантови алгоритми за магистърска програма “Квантова информатика“ във Физически факултет на СУ (2022г.-2024г.). Към момента на подаване на документите е съ-ръководител на двама докторанти.

5. Анализ на научните и научно-приложните постижения на кандидата, съдържащи се в материалите за участие в процедурата

В дисертацията е отделено значително внимание на теорията и приложението на композитните импулси към системи с две нива (Глава 2) и с повече нива (Глава 3). Въвежда се композитен стимулиран Раманов адиабатен преход (STIRAP) и се анализират устойчиви на грешки квантови гейтове, включително разработване на композитни импулси с гладки времеви профили. Работоспособността на техники, основани на такива композитни импулси, са демонстрирани на квантови процесори на IBM (Глава 4). В Глава 5 се анализира идеята за

неермитов пряк път към адиабатност. Адиабатният преход изисква бавна еволюция на квантовата система. В публикации на дисертанта е показано, че добавянето на подходящ имагинерен член към Хамилтониана може да позволи пренос на заселеност с желаната висока скорост, без да са необходими по-силни контролни полета. Глава 6 е посветена на квантовия контрол на хирални молекули с акцент върху нов метод за детекция на такива молекули, използващ поредици от три импулса, управляващи квантова система с три състояния. В Глава 7 доц. Торосов обобщава основните си научни приноси в публикациите си по дисертацията и очертава виждането си за по-нататъшното развитие на изследванията си.

В Глава 2 е представен модел на квантова система с две състояния, подложена на действието на импулс с форма на хиперболичен секанс и, важното тук, с фазов скок ϕ в пика си. Отстройката от резонанса е моделирана с нейна постоянна част и честотно-модулирана част. Показано е, че ненулев фазов скок ϕ предизвиква съществени промени във вероятността за преход - от пълна инверсия на заселеностите до пълно връщане към началното състояние.

Анализите на доц. Торосов продължават към развиване на техниката на композитните импулси за манипулиране на квантови състояния. При нея единичният импулс се заменя с поредица от импулси с подходящо подобрени фази, които се използват като контролен инструмент за оформяне, по желан начин, на профила на възбуждане. Демонстрирано е конструирането на широкоспектрални, тясноспектрални и правоъгълни композитни импулси, на ефективни π - и частични- π -импулси с желаната гладкост. Представен е и метод за оптимизация на техниката на адиабатен преход между две квантови състояния чрез композитни поредици от честотно модулирани импулси - композитен адиабатен преход (CAP) с цел създаване на профил на възбуждане, който е максимално устойчив на вариации в площта на импулсите. Предположението, че площите на всички суб-импулси от композитния са равни съответства на реално генерираните от импулсно-периодичните лазери. Показано е, че при ултра-широкоспектралните композитни импулси тези с различни площи на съставните импулси превъзхождат тези, съставени от идентични импулси.

Глава 3 на дисертацията е посветена на изследването на композитни импулси, приложими за квантов контрол на системи с повече от две състояния. По-конкретно, композитните импулси са приложени за реализиране на стимулирани Раманов адиабатен преход (Stimulated Raman Adiabatic Passage; STIRAP). STIRAP е техника за квантов контрол, ползвана за прехвърляне на населеност между две състояния, без съществено населване на междинно, което може да внася загуби или да е нестабилно. Чрез използване на композитни поредици от двойки частично отместени във времето импулси с подходящи фази, неадиабатните преходи, които пречат на STIRAP да достигне максимална ефективност, могат да бъдат подтиснати до висок порядък чрез деструктивна интерференция и техниката може да бъде направена „произволно точна“ (в термините на дисертанта). Композитните фази се описват с аналитични формули и не зависят от конкретните форми на импулсите, от

закъснението между тях и от техните площи. Комбинацията от двете техники – на композитните импулси и STIRAP – доц. Торосов и съавтори обозначават като техника композитен STIRAP. Опростено казано, тази техника представлява поредица от нечетен брой обикновени STIRAP преходи „напред и назад“, $|1\rangle \rightarrow |3\rangle \rightarrow |1\rangle \rightarrow |3\rangle \rightarrow \dots \rightarrow |1\rangle \rightarrow |3\rangle$. Показано е, че всеки отделен STIRAP може да бъде относително неточен (с грешка $\sim 20\text{-}30\%$), но в края на процеса се получава пренос на заселеност с натрупана грешка далеч под 10^{-4} . Показано е, че резонансният STIRAP позволява пълен пренос на заселеност от състояние $|1\rangle$ в $|3\rangle$. Ще си позволя кратък коментар: В резонансния случай, както се вижда от горния панел на Фиг. 3.1., импулсите трябва да са с променливи закъснения помежду си, т.е. трудно биха се генерирани директно от импулсно-периодичен лазер. При нерезонансния случай, видимо на долния панел на същата фигура, закъсненията между напмпващите и Стоксовите импулси са постоянни и споменатият проблем не съществува.

Отражение на Хаусхолдър е линейно преобразуване, което описва огледално отражение на вектор спрямо равнина в многомерно пространство. Физически най-просто, то може да се мисли като отражение на светлинен лъч от огледало. Малка стъпка по-точно, но пак интуитивно, в квантовата механика можем да си представим състоянието на системата като вектор. На него отражението на Хаусхолдър действа като „квантово огледало“. В класическата физика отражението обръща посока в реалното пространство. В квантовата физика отражението обръща амплитуди, фази и интерференчни съотношения. Чрез серия от такива отражения квантовият алгоритъм може да потисне населването на нежелани състояния и да усилва „правилния“ отклик на системата. Като пример за това, доц. Торосов разглежда широкоспектрално композитно отражение на Хаусхолдър, устойчиво срещу вариации в площта на импулса. Импулсът е моделиран като съставен от поредица от два широкоспектрални композитни импулса.

Глава 4 описва експериментална демонстрация на действието на композитни импулси на квантови компютри на IBM. В Раздел 4.1. е обяснено как свръхпроводниковият кубит може да бъде разбран, като се започне от обичаен LC-осцилатор и се стигне до резонатор на базата на Джозефсонов преход с дискретни, нееквидистантни енергетични нива. Показано е, че, за обичаен LC осцилатор, Хамилтонианът на квантовия хармоничен осцилатор включва характерната честота $\omega = 1/\sqrt{LC}$, а енергетичният спектър на този Хамилтониан е еквилистен. Това не е благоприятно, тъй като при резонансното управление на населеността на преход между две от състоянията на осцилатора, избрани да представляват кубита, неизбежно ще се възбудят и други състояния. Така става необходимо да се добави нелинеен елемент. Индуктивността в LC-веригата се заменя с Джозефсонов преход, (два свръхпроводника, разделени от тънка изолационна бариера). Ключовото свойство на Джозефсоновия преход тук е, че неговата индуктивност е нелинейна по ток. Ранна реализация на кубит, произлязла от този Джозефсонов осцилатор, е т.нар. „кутията за Купърски двойки“.

При Джозефсонова енергия, много по-голяма от капацитивната енергия на веригата, се реализира „трансмонен кубит“. В него е възможна селективна манипулация на състоянията на кубита чрез микровълнови импулси, които предизвикват преходи между квантуваните енергетични нива. Чрез настройване на честотата, амплитудата и фазата на микровълновите импулси могат селективно да се управляват преходи между конкретни енергетични нива. Това се разглежда като основата за еднокюбитови гейтове. Освен това, свързването на няколко трансмона позволява реализацията на двукюбитови гейтове.

В Раздел 4.2., ползвайки един от квантовите процесори на IBM с отворен достъп, базиран на свръхпроводникови трансмонни кубити, доц. Торосов описва подробни експериментални тестове на различни композитни импулсни поредици. Ползван е достъп на ниско ниво до хардуера, разрешен от IBM Quantum. Получени са профилите на възбуждане различни широкоспектрални, тясноспектрални и правоъгълни композитни импулси, съответстващи на предварително избрани целеви вероятности за преход (от нула до едно). Във всички експерименти е постигнато отлично съответствие между теоретичните и експерименталните профили на възбуждане.

Непрецизно изказано, трите основни характеристики на Ермитовия хамилтониан са (1) реалните му собствени стойности (т.е. енергиите са винаги реални), (2) собствените състояния, съответстващи на различни енергии, са ортогонални (т.е. квантовите състояния са ясно разграничени и произволно състояние може да бъде разлагано по тях) и (3) квантовата информация не се губи по време на идеализираната им еволюция. Неермитовите хамилтониани описват квантови системи, които обменят енергия или частици с околната среда (т.е. загуби, усилване, разпад или дисипация). Отново непрецизно казано, те (1) имат комплексни собствени стойности (реалната част определя енергията, имагинерната част усилване или затихване) и (2) еволюцията не запазва нормировката (т.к. системата е отворена или има дисипативна динамика). Адиабатните преходи изискват бавна еволюция. Дисертантът е показал, че добавянето на специално подбран имагинерен член към Хамилтониана може да компенсира неадиабатното свързване, което позволява перфектен пренос на заселеност с желаната висока скорост, без да са необходими по-силни контролни полета (т.е. без да се увеличава взаимодействието). В Глава 5 на дисертацията тази идея тази идея е развита чрез въвеждане на „неермитов пряк път към адиабатност“. Разглежданията започват с кратко изложение на теорията на бързия адиабатен преход за Ермитова система с две състояния. Показаната на Фиг. 5.1. еволюция на заселеностите във времето за ермитовия модел на Ландау-Зенер и на този с добавяне на неермитов член сочи, че във втория случай преносът на заселеност винаги е перфектен, независимо от силата на взаимодействието. В Раздел 5.2. теоретично е изследвано неермитово обобщение на STIRAP, което позволява да се анулира неадиабатното взаимодействие и да се увеличи скоростта и ефективността на процеса. За STIRAP с Гаусови импулси, необходимите имагинерни членове на Хамилтониана се оказват независими от

времето. За импулси от тип хиперболически секанс тези имагинерни членове все пак зависят от времето. Методът, оказва се, не е приложим за някои импулси (напр. от тип $\sin^2(\dots)$). Установено е, че техниката е чувствителна към началните условия и работи само за резонансен STIRAP. В Раздел 5.3. са изведени аналитични решения за специален тип псевдоермитово обобщение на проблем с две състояния (Ландау-Зенер-Щюкелберг-Майорана; LZSM) с потенциални приложения във вълноводната оптика и при генерацията на сумарна честота.

Опростено казано, хирална е молекула, чиято огледална форма не може да бъде наложена върху самата нея (както това не е възможно за лявата и дясната човешка ръка). С други думи, някои молекули имат „лява“ или „дясна“ форма, наричани съответно лявовъртящ и дясновъртящ енантиомер (от гръцки: *enantios* - „противоположен“, „на срещен“ и *meros* - „част“, „форма“). Хиралните молекули са важни напр. в биологията и фармацията, защото живите организми често различават двете огледални форми. (Например една форма на лекарство може да е лечебна, а другата – токсична). Ляво- и дясновъртящите енантиомери имат едни и същи оптични свойства (честоти на преходите и диполни моменти на преходите). Единствената разлика е в знака на едно от свързванията. В Раздел 6 на дисертацията си доц. Торосов е представил метод за идентификация на хирални молекули, използващ поредици от три импулса. Методът е основан на квантови системи с по три състояния в затворени контури. Под „идентификация“, условно казано, се разбира следното: Ако в началото системата е в състояние $|1\rangle$, в края на последователността на импулсите целта е единият енантиомер да остане в това състояние, а другият да бъде прехвърлен в състояние $|3\rangle$. Идентифицирани са 12 различни последователности от резонансни импулси, при които се наблюдава хирално разделяне с висок контраст. Всички случаи, които позволяват хирално разделяне, имат общото, че първият и третият импулс са $\pi/2$ -импулси, а средният е π -импулс. Освен това, един от трите импулса трябва да е отместен по фаза на $\pi/2$ спрямо другите два. Въпреки привидната си простота, в практическа ситуация подходът зависи от резонансни импулси с прецизна временна площ. Показано е, че точността и устойчивостта на метода може да се подобри чрез замяна на единичните импулси с последователности от композитни импулси. (Трите единични импулса се заменят с композитен $\pi/2$ -импулс, последван от композитен π -импулс, последван от композитен $\pi/2$ -импулс.) В практически ситуации резонансните взаимодействия също могат да са проблематични. Енергиите на нивата може да се различават за различните молекули в ансамбъла, напр. заради пространствено нехомогенни разпределения на магнитното поле и зависещи от времето отмествания на Щарк поради измененията във времето на интензитета на приложените полета. Това би довело до грешки в отстройките от резонанса, а те би трябвало да бъдат компенсирани едновременно с евентуалните грешки в площите на импулсите. По тази логика се стига до извода, че трябва да се използват два $\pi/2$ -компонентни импулса и един π -компонентен импулс между тях, всички с двойна компенсация и стабилни фази. Във все още непубликуван труд доц. Торосов е показал, че могат да се използват и по-дълги

последователности, за да се постигне още по-добра устойчивост на профила на възбуждане спрямо грешки в честотата на Раби и в отстройката от резонанс (напр. 9-импулсна последователност). В Раздел 6.2. са представени два метода за ефективно идентифициране на хирални молекули, базирани на последователности от единични импулси и двойки Раманови импулси. Единият метод използва последователност от три стъпки на взаимодействие: единичен импулс, Раманов импулс и още един единичен импулс. Другият метод използва последователност от само две стъпки на взаимодействие: Раманов импулс и единичен импулс. Вторият метод е по-прост и по-бърз, но изисква по-сложен Раманов импулс от първия. И в двете техники единичните и Рамановите импулси могат да бъдат заменени с последователности от композитни импулси, с което те да станат по-устойчиви към грешки.

В Раздел 7 доц. Торосов е обобщил основни научни приноси, описани в дисертацията, както и тяхното значение.

Резултатите, описани в дисертацията, с които доц. Торосов участва в процедурата, са публикувани в престижни международни списания - Physical Review Letters (APS, 1бр., IF=9, Q1), Physical Review Applied (APS, 1бр., IF=4.4, Q1), Physical Review Research (APS, 2бр., IF=4.2, Q1), Physical Review A (APS, 10бр., IF=2.9, Q1), Journal of Physics B (IOP, 1бр., IF=1.5, Q2), с което се формира техен сумарен импакт-фактор 52.3, и са цитирани независимо над 477 пъти. Най-цитираните му публикации ([3] - 98 пъти, [2] - 61 пъти, [11] - 65 пъти, [12] - 66 пъти) са посветени на приложението на гладки композитни импулси [2] и на композитни последователности на импулси с чирп [3] за обработване на квантова информация, както и на идеята за неермитов пряк път към адиабатност [11] и прилагането ѝ към стимулиран Раманов адиабатен преход [12].

Научните и научно-приложните приноси на доцент Боян Торосов са убедителни. Бих ги квалифицирал като формулиране на нови хипотези в квантовата оптика, теоретично разработване и, в редица случаи – експериментално доказване на нови или на усъвършенствани съществуващи експериментални подходи на квантов контрол, приложен към системи с повече нива и квантови гейтове, както и валидиране на теоретични разработки чрез практическо прилагане на реални свръхпроводникови квантови процесори. Те дават принос към обогатяване на съществуващите знания и са с определени перспективи за приложения.

6. Критични бележки и въпроси

По обем, съдържателната част на автореферата надхвърля 50% от съдържателната част на дисертацията. Формално, това не е обичайно, но го приемам за смислено. Авторефератът има самостоятелна информативна стойност, включително стойност на материал, който може да бъде предоставян на дипломанти и на докторанти. В този смисъл, относително по-подробното въвеждане на читателя в проблемите и ползваната терминология е желателно и това е направено. Добре би било съкращения на термини винаги да се въвеждат при първото им ползване, но това не представлява реален проблем.

Във връзка с резултатите в Глава 2 бих искал да спомена, че във вълновата оптика фазови скокове в амплитудите на полетата неминуемо водят до модуляции на техните интензитетни профили, до т.нар. тъмни импулси. Те биха могли да се описват с функции $\tanh(t/T)$, умножени напр. с Гаусова обвивка, за да бъде енергията им крайна величина. В публикациите си по темата доц. Торосов използва функция $\text{sech}(t/T)$, която също дава крайна енергия, но висока стойност на амплитудата на полето в позицията на фазовия скок. Може би дисертантът би могъл да обмисли и да потърси решение на този проблем.

Бих препоръчал доц. Торосов да уточни употребата на термина „ултра-теснолентов композитен импулс“ в термини на Фурие-преобразуването (т.е. колко къс може да е един „теснолентов“ импулс). Дисертантът разглежда и композитни полу- π импулси. Резултатите, разбира се, са интересни, но за мен отново възниква въпросът за вътрешната връзка между рязка (скокообразна) фазова и амплитудна модуляция.

7. Лични впечатления за кандидата

Личните ми впечатления са за един високомотивиран и способен млад професионалист, израснал в групата на професор Николай Витанов, за един етичен млад колега, ползващ се с уважението на колегията.

8. Заключение

След като се запознах с представените дисертационен труд, автореферат и с другите материали, въз основа на направения анализ на тяхната значимост и съдържащи се в тях научни приноси, **потвърждавам, че научните постижения отговарят на изискванията** на ЗРАСРБ и Правилника за приложението му, на съответния Правилник на БАН и на документа Изисквания, условия, правила и решения на Научния съвет на ИФТТ за **придобиване на научната степен „доктор на физическите науки“**. В частност, кандидатът напълно отговаря и, в определени отношения, значително надхвърля минималните национални изисквания в професионално направление 4.1. Физически науки. Не установявам плагиатство в представените по конкурса дисертационен труд, автореферат и научни трудове. Давам своята **положителна** оценка на дисертационния труд.

II. ОБЩО ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Въз основа на гореизложеното, препоръчвам на научното жури да присъди на доц. д-р Боян Тонев Торосов научната степен „доктор на науките“ в професионално направление 4.1. Физически науки (Лазерна физика, физика на атомите, молекулите и плазмата и физика на вълновите процеси).

19.05.2026 г.

Изготвил рецензията:

(акад. проф. Александър Драйшу)

REVIEWER'S REPORT

of a thesis submitted for awarding the scientific degree „Doctor of Sciences“ in Physical sciences according to the ongoing procedure in Institute of Solid State Physics (ISSP) of the Bulgarian Academy of Sciences (BAS) prepared by Acad. Prof. Dr.Sci. Alexander Alexandrov Dreischuh from Faculty of Physics of Sofia University “St. Kliment Ohridski” in his capacity of a member of the jury according to order ПД 09-32/31.03.2026 of the Director of ISSP-BAS.

Title of the Thesis: Quantum Control with Applications in Quantum Technologies

Author of the Thesis: Assoc. Prof. Dr. Boyan Tonev Torosov

I. General description of the submitted documents

1. Data for the submitted documents

The applicant Assoc. Prof. Dr. Boyan Torosov has submitted a Dissertation (in English) and an Abstract (in Bulgaria). I accept that this is subject to the prior approval of the Scientific Council (SC) of the Institute of Solid State Physics (ISSP) according to Chapter 7 (Final Regulations) § 1 of the document Requirements, Conditions, Regulations and Decisions (RCRD) of the SC of the ISSP, in addition to the Regulations on the Conditions and Procedures for the Awarding of Scientific Degrees and for the Occupation of Academic Positions in the BAS. Attached is the required Table 3, which contains a comparison of the minimum number of points required for each group of indicators with these of the applicant, in accordance with the laws ZRAS RB, ZRAS BAS, and the requirements of the ISSP. Attached is a list of 4 publications outside the dissertation, which provide 100 points according to group of indicators G, as well as a list of citations of the publications included in the dissertation, which ensure 954 points according to group of indicators D. According to Article 6 of the document “Requirements, Conditions, Rules, and Decisions of the Scientific Council of the Institute of Solid State Physics (ISSP), in addition to the Regulations on the Conditions and Procedures for the Award of Academic Degrees and the Holding of Academic Positions at the Bulgarian Academy of Sciences (BAS),” Assoc. Prof. Torosov declares that of the fifteen scientific publications used in his dissertation for the award of the degree of “Doctor of Science,” eleven have not been used in previous procedures (where a minimum of eight is required). From the list of these 15 publications, in all of which he is the first author, Dr. Torosov’s leading role in the research is clearly evident. The remaining requirements of Article 6 of the RCRD document of the Scientific Council of the ISSP have also been met. The doctoral candidate has submitted a copy of his “Doctor” degree certificate. I did not find any records of his presentations at international scientific events, however, he has the right not to submit such additional information.

2. Data for the applicant

In 2005, Dr. Torosov received his bachelor's degree, and in 2006, his master's degree from the Faculty of Physics at Sofia University "St. Kliment Ohridski" (SU). In 2010, SU awarded him the academic and scientific degree of “Doctor.” From 2010 to 2016, Dr. Torosov served as a Head Assistant Professor, and since 2016, he is an Associate Professor at the Institute of Solid State Physics (ISSP) at the Bulgarian Academy of Sciences (BAS). Since 2022, he is the Head of the Quantum

Control Unit at the Canadian company IQBit. Dr. Torosov has received at least two prestigious awards: in 2013, the “Marin Drinov” Award for the best young scientist at the Bulgarian Academy of Sciences, and in 2019, the ISSP Award of the Bulgarian Academy of Sciences for outstanding scientific achievements.

3. General evaluation of the scientific achievements of the applicant

Between 2007 and 2025, Assoc. Prof. Torosov published a total of 39 articles in highly-reputed scientific journals with impact factors (27 in Phys. Rev. A, 2 in Phys. Rev. Lett., 2 in Phys. Rev. Research, 2 in J. Phys. B, 2 in Opt. Commun., 1 in J. Phys. A, and 1 in an IEEE publication - The Institute of Electrical and Electronics Engineers). He is participating in the present procedure with 15 publications - 1 article in Physical Review Letters, 1 in Physical Review Applied, 2 in Physical Review Research, 10 in Physical Review A, and 1 in the Journal of Physics B. These 15 articles have attracted more than 477 independent citations. As of the date of submission of the documents, the candidate’s Hirsch index is $h=15$.

In view of the content of the dissertation, Assoc. the research interests of Prof. Boyan Torosov’s lie in the field of fundamental theoretical studies related to new techniques for quantum control in quantum systems with two or more states and their validation for specific applications. The scientific publications included in the dissertation meet the minimum national requirements (under Article 2b, paragraphs 2 and 3 of the Law ZRASRB), of the Regulations on the Conditions and Procedures for the Award of Academic Degrees and the Occupation of Academic Positions at the Bulgarian Academy of Sciences (BAS), and the additional requirements of the Scientific Council of the Institute of Solid State Physics (ISSP-BAS) for the award of the academic degree “Doctor of Science” in professional field 4.1. “Physical Sciences”. Table 3, attached to the candidate’s documents, clearly shows that these requirements are fully met and significantly exceeded in terms of independent citations of his publications. All articles with which Assoc. Prof. Torosov participates in the procedure have been published in highly-reputed international scientific journals after successfully passing independent peer-review procedures. I consider this to be indicative that the published results, as well as those in the dissertation and the abstract, are original scientific contributions by Assoc. Prof. Torosov. I therefore reject the possibility of plagiarism in any form.

4. Characterization and evaluation of the teaching activity of the candidate

Assoc. Prof. Torosov’s teaching activities include holding lectures and seminars on Quantum Computers and Quantum Algorithms for the “Quantum Informatics” master’s program at the Faculty of Physics, Sofia University (2022–2024). At the time of submitting the documents, he has been co-advisor to two doctoral students.

5. Analysis of the basic and applied scientific achievements of the candidate as evident from the documents for participation in the procedure

The dissertation devotes considerable attention to the theory and application of composite pulses to two-level systems (Chapter 2) and multi-level systems (Chapter 3). A stimulated Raman

adiabatic passage (STIRAP) is introduced, and error-resilient quantum gates are analyzed, including the development of composite pulses with smooth time profiles. The feasibility of techniques based on such composite pulses has been demonstrated on IBM quantum processors (Chapter 4). Chapter 5 analyzes the idea of a non-Hermitian shortcut to adiabaticity. The adiabatic transition requires slow evolution of the quantum system. In the author's publications, it has been shown that adding a suitable imaginary term to the Hamiltonian can allow for population transfer at the desired high speed without the need for stronger control fields. Chapter 6 is devoted to the quantum control of chiral molecules, with an emphasis on a new method for detecting such molecules using sequences of three pulses that control a three-state quantum system. In Chapter 7, Assoc. Prof. Torosov summarizes his main scientific contributions in his dissertation and outlines his vision for the further development of his research.

Chapter 2 presents a model of a two-state quantum system affected by a pulse in the form of a hyperbolic secant and, importantly, with a phase jump ϕ at its peak. The detuning from resonance is modeled with a constant component and a frequency-modulated component. It is shown that a nonzero phase jump ϕ causes significant changes in the transition probability - ranging from complete population inversion to a complete return to the initial state.

Assoc. Prof. Torosov's research is further focused on developing the technique of composite pulses for manipulating quantum states. In this technique, a single pulse is replaced by a sequence of pulses with appropriately selected phases, which are used to control and shape the excitation profile in the desired way. The construction of broadband, narrowband, and rectangular composite pulses, as well as effective π - and partial- π -pulses with the desired smoothness, has been demonstrated. A method is also presented for optimizing the technique of adiabatic passage between two quantum states using composite sequences of frequency-modulated pulses - composite adiabatic passage (CAP) - with the aim of creating an excitation profile that is maximally resistant to variations in pulse area. The assumption that the areas of all sub-pulses in the composite pulse are equal corresponds to those actually generated by lasers emitting pulse trains. It is shown that, for ultra-broadband composite pulses, those with different areas of the constituent pulses outperform those composed of identical pulses.

Chapter 3 of the dissertation is devoted to the study of composite pulses applicable to the quantum control of systems with more than two states. More specifically, composite pulses are used to implement Stimulated Raman Adiabatic Passage (STIRAP). STIRAP is a quantum control technique used to transfer population between two states without significant population in an intermediate state, which could introduce losses or be unstable. By using composite sequences of pairs of partially time-shifted pulses with appropriate phases, the non-adiabatic transitions that prevent STIRAP from achieving maximum efficiency can be suppressed to a high order through destructive interference, and the technique can be made "arbitrarily precise" (in the author's terms). Composite phases are described by analytical formulas and do not depend on the specific shapes of

the pulses, the delay between them, or their areas. Assoc. Prof. Torosov and his co-authors refer to the combination of the two techniques—composite pulses and STIRAP - as the composite STIRAP technique. Simply put, this technique consists of a sequence of an odd number of ordinary STIRAP “back-and-forth” transitions, $|1\rangle \rightarrow |3\rangle \rightarrow |1\rangle \rightarrow |3\rangle \rightarrow \dots \rightarrow |1\rangle \rightarrow |3\rangle$. It has been shown that each individual STIRAP can be relatively inaccurate (with an error of $\sim 20\text{--}30\%$), but at the end of the process, a population transfer is achieved with a cumulative error well below 10^{-4} . It has been shown that the resonant STIRAP allows for a complete population transfer from state $|1\rangle$ to state $|3\rangle$. I will allow myself a brief comment: In the resonant case, as seen in the top panel of Fig. 3.1, the pulses must have variable delays between them, i.e., they would be difficult to generate directly from a laser emitting trains of pulse. In the non-resonant case, as shown in the lower panel of the same figure, the delays between the pumping and Stokes pulses are constant, and the aforementioned problem does not exist.

The Householder reflection is a linear transformation that describes the mirror reflection of a vector with respect to a plane in multidimensional space. In the simplest physical terms, it can be thought of as the reflection of a light ray off a mirror. Taking a small step further, but still intuitively, in quantum mechanics we can imagine the state of a system as a vector. On this vector, the Householder reflection acts as a “quantum mirror.” In classical physics, the reflection reverses direction in real space. In quantum physics, reflection reverses amplitudes, phases, and interference ratios. Through a series of such reflections, the quantum algorithm can suppress the population of undesirable states and amplify the “correct” response of the system. As an example of this, Assoc. Prof. Torosov studies a broad-spectrum composite Hausholder reflection that is robust against variations in the pulse area. The pulse is modeled as composed of a sequence of two broad-bandwidth composite pulses.

Chapter 4 describes an experimental demonstration of the operation of composite pulses on IBM quantum computers. Section 4.1 explains how the superconducting qubit can be understood, starting from a conventional LC oscillator and extending this concept to a resonator based on a Josephson junction with discrete, non-equidistant energy levels. It is shown that, for a standard LC oscillator, the Hamiltonian of the quantum harmonic oscillator includes the characteristic frequency $\omega = 1/\sqrt{LC}$, and the energy spectrum of this Hamiltonian is equidistant. This is undesirable, since during resonant control of the population of the transition between two of the oscillator’s states, chosen to represent the qubits, other states will inevitably be excited. Thus, it becomes necessary to add a nonlinear element. The inductance in the LC circuit is replaced by a Josephson junction (two superconductors separated by a thin insulating barrier). The key property of the Josephson junction here is that its inductance is nonlinear with respect to current. An early implementation of a qubit derived from this Josephson oscillator is the so-called “Cooper pair box”. With Josephson energy, which is much higher than the capacitive energy of the circuit, a “transmon qubit” is realized. In it, selective manipulation of the qubit’s states is possible via microwave pulses that induce transitions

between quantized energy levels. By adjusting the frequency, amplitude, and phase of the microwave pulses, transitions between specific energy levels can be selectively controlled. This is considered the basis for single-qubit gates. Furthermore, the coupling of several transmons allows for the realization of two-qubit gates.

In Section 4.2, using one of open-access quantum processors of IBM based on superconducting transmon qubits, Assoc. Prof. Torosov describes detailed experimental tests with various composite pulse sequences. Low-level access to the hardware, granted by IBM Quantum, was utilized. Excitation profiles were obtained for various broadband, narrowband, and rectangular composite pulses corresponding to pre-selected target transition probabilities (from zero to one). In all experiments, excellent agreement was achieved between the theoretical and experimental excitation profiles.

To put it simply, the three main characteristics of the Hermitian Hamiltonian are (1) its real eigenvalues (i.e., the energies are always real), (2) the eigenstates corresponding to different energies are orthogonal (i.e., the quantum states are clearly distinct, and any state can be decomposed into them), and (3) quantum information is not lost during their idealized evolution. Non-Hermitian Hamiltonians describe quantum systems that exchange energy or particles with the environment (i.e., losses, amplification, decay, or dissipation). Again, roughly speaking, they (1) have complex eigenvalues (the real part determines the energy, the imaginary part determines amplification or damping) and (2) the evolution does not preserve normalization (since the system is open or has dissipative dynamics). Adiabatic transitions require slow evolution. The author has shown that adding a suitably chosen imaginary term to the Hamiltonian can compensate for the non-adiabatic coupling, allowing for perfect population transfer at the desired high speed without the need for stronger control fields (i.e., without increasing the interaction). In Chapter 5 of the dissertation, this idea is developed by introducing a “non-Hermitian shortcut to adiabaticity.” The discussion begins with a brief overview of the theory of fast adiabatic transition for a two-state Hermitian system. The evolution of the population densities in time, shown in Fig. 5.1, for the Hermitian Landau-Zener model and for the model with the addition of a non-Hermitian term indicates that, in the latter case, population transport is always perfect, regardless of the strength of the interaction. In Section 5.2, a non-Hermitian generalization of the STIRAP is theoretically investigated, which allows the non-adiabatic interaction to be canceled out and the speed and efficiency of the process to be increased. For STIRAP with Gaussian pulses, the required imaginary terms of the Hamiltonian turn out to be time-independent. For hyperbolic secant-type pulses, however, these imaginary terms do depend on time. The method, however, is not applicable to certain pulses (e.g., of the $\sin^2(\dots)$ type). It is found that the technique is sensitive to the initial conditions and works only for resonant STIRAP. In Section 5.3, analytical solutions are derived for a special type of pseudo-Hermitian generalization of a two-state problem (Landau-Zener-Stückelberg-Majorana; LZSM) with potential applications in waveguide optics and in nonlinear sum-frequency generation.

Simplified, a chiral molecule is one whose mirror image cannot be superimposed onto itself (just as this is not possible for a person's left and right hands). In other words, some molecules have a "left" or "right" form, called left-handed and right-handed enantiomers, respectively (from the Greek: *enantios*—"opposite," "opposite" and *meros*—"part," "form"). Chiral molecules are important, for example, in biology and pharmacy, because living organisms often distinguish between the two mirror images. (For example, one form of a drug may be therapeutic, while the other is toxic.) The left-handed and right-handed enantiomers have the same optical properties (transition frequencies and dipole moments of the transitions). The only difference is in the sign of one of the bonds. In Section 6 of his dissertation, Assoc. Prof. Torosov presented a method for identifying chiral molecules using sequences of three pulses. The method is based on quantum systems with three states in closed loops. By "identification," generally speaking, the following is meant: If the system is initially in state $|1\rangle$, the goal at the end of the pulse sequence is for one enantiomer to remain in that state, while the other is transferred to state $|3\rangle$. Twelve different sequences of resonant pulses have been identified in which high-contrast chiral separation is observed. All cases that allow chiral separation have in common that the first and third pulses are $\pi/2$ -pulses, while the middle one is a π -pulse. Furthermore, one of the three pulses must be phase-shifted by $\pi/2$ relative to the other two. Despite its apparent simplicity, in a practical setting the approach relies on resonance pulses with a precise temporal width. It is shown that the accuracy and robustness of the method can be improved by replacing the single pulses with sequences of composite pulses. (The three single pulses are replaced by a composite $\pi/2$ -pulse, followed by a composite π -pulse, followed by a composite $\pi/2$ -pulse.) In practical situations, resonant interactions can also be problematic. The energies of the levels may differ for different molecules in the ensemble, e.g., due to spatially inhomogeneous distributions of the magnetic field and time-dependent Stark shifts caused by time-dependent changes in the intensity of the applied fields. This would lead to errors in the detunings from resonance, and these would need to be compensated for simultaneously with any errors in the pulse areas. Following this logic, one concludes that two $\pi/2$ -composite pulses and one π -composite pulse between them should be used, all of them with double compensation and stable phases. In a still unpublished paper, Assoc. Prof. Torosov has shown that longer sequences can also be used to achieve even better robustness of the excitation profile against errors in the Rabi frequency and in the resonance detuning (e.g., a 9-pulse sequence). Section 6.2 presents two methods for the effective identification of chiral molecules based on sequences of single pulses and pairs of Raman pulses. One of the methods uses a three-step interaction sequence: a single pulse, a Raman pulse, and another single pulse. The other method employs a sequence of just two interaction steps: a Raman pulse and a single pulse. The second method is simpler and faster, but requires a more complex Raman pulse than the first. In both techniques, the single and Raman pulses can be replaced with sequences of composite pulses, making the approach more error-resistant.

In Chapter 7, Assoc. Prof. Torosov summarizes the main scientific contributions described in his dissertation, as well as their significance.

The results described in the dissertation, with which Assoc. Prof. Torosov is participating in the procedure, have been published in highly-reputed international journals - Physical Review Letters (APS, 1 paper, IF=9, Q1), Physical Review Applied (APS, 1 paper, IF=4.4, Q1), Physical Review Research (APS, 2 papers, IF=4.2, Q1), Physical Review A (APS, 10 issues, IF=2.9, Q1), Journal of Physics B (IOP, 1 issue, IF=1.5, Q2), resulting in an overall impact factor of 52.3, and have been cited independently more than 477 times. His most cited publications ([3]—98 times, [2]—61 times, [11]—65 times, [12]—66 times) are devoted to the application of smooth composite pulses [2] and composite sequences of chirped pulses [3] for processing quantum information, as well as to the idea of a non-Hermitian direct path to adiabaticity [11] and its application to stimulated Raman adiabatic passage [12].

The scientific and applied scientific contributions of Associate Professor Boyan Torosov are convincing. I would describe them as formulation of new hypotheses in quantum optics, theoretical development, and, in a number of cases – experimental verification of new or improved existing experimental approaches to quantum control applied to multi-level systems and quantum gates, as well as the validation of theoretical developments through the practical application of real superconducting quantum processors. These contribute to the enrichment of existing knowledge and hold definite prospects for applications.

6. Critical remarks and questions

In terms of length, the main body of the abstract exceeds 50% of the main body of the dissertation. Formally, this is not standard practice, but I consider it reasonable. The abstract has an independent informational value, including material that can be provided to master's and doctoral students. In this sense, a relatively more detailed introduction for the reader to the issues and the used terminology is desirable, and this has been done. It would be good to always introduce abbreviations before their first use, however this does not pose a real problem.

In connection with the results in Chapter 2, I would like to mention that in wave optics, phase jumps in the field amplitudes inevitably lead to modulations in their intensity profiles, resulting in so-called dark pulses. These could be described by $\tanh(t/T)$ functions, multiplied, for example, by a Gaussian envelope, so that their energy is a finite quantity. In his publications on the subject, Assoc. Prof. Torosov uses $\text{sech}(t/T)$ function, which also yields finite energy but a high value for the field amplitude at the position of the phase jump. Perhaps the Dr. Torosov could consider and seek a solution to this problem.

I would recommend that Assoc. Prof. Torosov clarify the use of the term “ultra-narrowband composite pulse” in terms of the Fourier transform (i.e., how short a “narrowband” pulse can be). The author also examines composite half- π pulses. The results are, of course, interesting, but for me the question arises again regarding the intrinsic relationship between abrupt (step-like) phase modulation and amplitude modulation.

7. Personal impressions of the candidate

My personal impression is of a highly motivated and capable young scientist who grew up in the research group of Academician Professor Nikolay Vitanov, and of an ethical young colleague who is highly respected by his colleagues.

8. Conclusion

After getting acquainted with the presented dissertation, abstract and other documents, based on the analysis of their significance and scientific and applied scientific contributions, **herewith I confirm that the scientific achievements meet the requirements** of the law (ЗПАСРБ) and of the Regulations for its application and the relevant Regulations of BAS and the document “Requirements, Conditions, Rules, and Decisions of the Scientific Council of the Institute of Solid State Physics (ISSP) for **the award of the degree of “Doctor of Physical Sciences”**. In particular, the candidate fully meets and, in certain respects, significantly exceeds the minimum national requirements in professional field 4.1, Physical Sciences. I find no evidence of plagiarism in the dissertation, abstract, and scientific papers submitted for the competition.

Herewith, I give my positive assessment of the Dissertation.

II. GENERAL CONCLUSION

Based on the above, I recommend the scientific jury to award Assoc. Prof. Dr. Boyan Tonev Torosov the scientific degree "Doctor of Science" in professional field 4.1. Physical Sciences (Laser physics, Physics of atoms, molecules, and plasma and Physics of wave phenomena).

19.05.2026

Reviewer's report prepared by:

(Acad. Prof. Alexander Dreischuh)