

РЕЦЕНЗИЯ

на дисертационен труд за придобиване на
научна степен „ Доктор на науките“

Направление: Физически науки

Специалност: Лазерна физика, физика на атомите, молекулите и плазмата и физика на вълновите процеси

Автор на дисертационния труд: доц. д-р Боян Тонев Торосов ИФТТ БАН

Тема на дисертационния труд: КВАНТОВ КОНТРОЛ С ПРИЛОЖЕНИЯ В КВАНТОВИТЕ ТЕХНОЛОГИИ

Рецензент: доц. д-р Наум Иванов Карчев
Физически факултет СУ “Климент Охридски”

I. Актуалност.

Изследванията в квантовата механика достигнаха до нови резултати които доведоха до разработване на нови технологии. Верификацията на тези технологии е от особено значение за тяхното възприемане в обществото. От тук следва актуалността на разработване на теорията и приложението на квантовия контрол.

Общото в дисертацията са разработените протоколи за контрол отличаващи се с точност, устойчивост и приложимост.

II. Познаване на състоянието на проблема

Литературата посветена на квантовата физика и квантовите технологии е огромна. Дисертанта познава добре тази литература и това е демонстрирано с обсъжданията на вече получените резултати и сравнението им с новите резултати представени в дисертацията.

III. Дисертантът основно изследва теоретични модели на квантов контрол на различни системи с две нива и тяхното обобщение на системи с много нива, като се отделя внимание на квантовата обработка на информацията.

Разглеждат се модели с неермитови Хамилтониани като се изследва неермитов път към адиабатност. Важно приложение на резултатите е демонстрацията на устойчиво разделяне на хирални молекули.

IV. Научни приноси

Глава 2.1 Теорията на композитни импулси. Тази глава е уводна. Тези импулси заменят единичния импулс с поредица от импулси с подбрани относителни фази. Поредица от N

импулса всеки с площ A_k и фаза ϕ_k създава пропагатор който е произведение от пропагаторите на всеки един от импулсите.

Глава 2.2 на дисертацията обсъжда композитни импулси за системи с две нива. Новото е че се разглежда модел в който е въведен скок на фазата който е нов контролен параметър в системата.

Традиционните контролни параметри са площта на импулса, статичния детюнинг и честотната модулация. В дисертацията е показано, че вероятността на преход може да се контролира чрез фазов скок на амплитудата на преход.

В началото се разглеждат точно решими модела с известни решения. Те се модифицират като се въвежда фазово отместване. При това се наблюдават важни различия в решенията: например в адиабатна граница вероятността на преход при нулево фазово отместване е 0 за модела на Розен-Зенер (PЗ), 1 за модела на Алън-Ебърли (АЕ) и 0.5 за модела на Бамбини –Берман (ББ). При фазово отместване $\phi = +(-)\pi/2$ вероятността е 1 за (PЗ) модела, 0 за (АЕ) модела и 0.5 за (ББ). В заключение точните решения показват че фазовия скок може да се използва като ефективен контролен параметър при приготвяне на квантови състояния.

В глава 2.2.4 се обсъжда възможността за оптимизация на адиабатния преход.

Предложеният метод използва композитна поредица от импулси – композитен адиабатен преход (САР). По този начин се достига по-висока точност, тъй като поредиците могат да бъдат направени точни до произволен порядък при достатъчен брой съставни импулси. Заключение е, че САР техниката е много подходящ инструмент за квантова обработка на информация с висока точност.

Глава 2.3 Гладки композитни импулси.

Съществуващите методи за създаване на композитни импулси, водят до импулси с правоъгълна форма като функция на времето. Целта е да се създадат композитни импулси чиято зависимост от времето води до импулси с произволни гладки форми. Методът който се предлага в дисертацията използва $SU(2)$ представяне на пропагатора на система с две нива, вместо често използваното $SO(3)$ представянето.

Обобщавайки, може да кажем че е създаден общ метод за проектиране на различни композитни импулси с гладка зависимост от времето. Това позволява за лазерни импулси, които не могат да бъдат правоъгълни, да се използват за квантов контрол.

Глава 2.4 Композитни импулси за ултра-широколентово и ултра-тясно лентово възбуждане

В тази глава се разглеждат ултра-широколентови композитни импулси, които за сметка на краен толеранс на грешката обхващат максимална площ на импулса. Използвайки същия подход на толеранс на грешката се проектира ултра-тесен композитен импулс. Ултра-

ширококоленовия CP е интересен за ускоряване охлаждането на страничната лента на заловените йони. Възможно е едновременно възбуждане на много преходи с почти единица вероятност. Друго приложение е в оптичното изпомпване на атоми и молекули.

Глава 2.5 изучава поредици от композитни импулси които създават предварително зададени ротации на система с две състояния под ъгъл „тета“ върху сферата на Блох.

Създаването на последователностите става по аналогичен начин.

Вероятността за преход на всяка композитна поредица се дава от проста формула, което позволява да се оцени точността. Резултатите са интересни за изследвания в които е от значение стойността на вероятността на преход.

Глава 3 на дисертацията описва как техниката на композитните импулси, доразвита с фазовите скокове, въведени в дисертацията за системи с две нива, може да се използва за контрол на състояния с различна популация в системи с много състояния.

Фокусът е върху физически значими системи в квантовата информатика. В тази глава са разглежда хибридна техника която комбинира композитните импулси и стимулиран Раманов адиабатен преход (STIRAP). Тя се нарича в дисертацията *композилен* STIRAP.

Разгледани са два случая: резонансен STIRAP с нулев детюнинг и

нерезонансен STIRAP с ненулев детюнинг. Въпреки значимото различие в математиката която се използва общото е че композитния STIRAP значително превъзхожда единичния STIRAP по отношение на точност и устойчивост. Например устойчива реализация на квантовото отражение на Хаусхолдер или високо точни композитни квантови гейтове на Раманови кубити.

Глава 4. Експериментална демонстрация на композитни импулси на квантови компютри на IBM. В тази глава са представени експериментални тестове на различни композитни импулсни поредици. Използват се процесори на IBM базирани на свръхпроводникови кубити. Целта е да се реализира импулсен контрол на кубита. Авторите получават профилите на възбуждане на голямо разнообразие от композитни импулси. Това се реализира като получават достъп до хардуера на IBM Quantum. Във всички експерименти се получава съответствие между теоретичните и експерименталните резултати (профили на възбуждане).

Глава 5. Неермитов квантов контрол.

Неермитовата физика е нововъзникваща област на физиката която се пресича с физика на кондензираната материя, с квантовата физика, с атомната и молекулярната физика и с оптиката. Тя дава теоретична рамка за отворени системи, които взаимодействат с тяхната околна среда и претърпяват неунитарна еволюция. Тази рамка включва математически структури, като например комплексни собствени стойности, изключителни точки и

неортогонални собствени вектори, фундаментално различни от ермитовите теории. Важен резултат получиха Бендер и Бьотчер. Те показаха, че някои неермитови хамилтониани могат да имат напълно реални спектри, ако притежават симетрия на четност-време (PT). Това засили интереса към тези теории.

Централна тема на дисертацията е неермитов пряк път към адиабатност. Показано е, че добавянето на подходящ имагинерен член към Хамилтониана позволява перфектен преход на заселеност с произволна скорост, докато конвенционалният адиабатен преход изисква бавна еволюция, за да се избегнат грешки.

В тази глава дисертанта е демонстрирал аналитични решения за специален тип псевдоермитово обобщение на модели с две нива: модел на Ландау-Зенер и модел на Алън-Ебърли.

Разгледани са няколко приложения, а именно във вълноводна оптика и генерация на сумарна честота.

Глава 6 Квантов контрол в хирални молекули. Хиралните молекули са стереохимични структури, които не могат да бъдат наложени върху своя огледален образ, подобно на лявата и дясната ръка. Те съществуват под формата на двойка огледални изомери, наречени енантиомери, които имат еднакви физични свойства, но различно взаимодействие с поляризирана светлина и биологични системи.

Поредица от три композитни импулса разработена по-горе, управляващи квантова система с три състояния в затворен контур, се прилага в първия подход (6.2) за хирално разделяне на молекула и е демонстрирано устойчивото различие между енантиомери.

Втория подход (6.3), който използва Раманови импулси, използва два метода. В единият от тях се следват три стъпки на взаимодействие: единичен импулс, Раманов импулс и още един единичен импулс. Другият метод използва последователност от две взаимодействия: Раманов импулс и единичен импулс. Демонстрира се, че импулси с фазова компенсация и такива с фазова деформация могат да се използват, като първият е по-точен а вторият е по-бърз.

Работата би имала значително практическо въздействие във фармакологията и материалознанието.

V. Научният принос на дисертанта.

В работите, които са посочени, че са основа на дисертацията, дисертанта е поставен на първо място. Това означава че той има значителен принос в тези работи.

VI. Оценка на външни автори.

Работите които са използвани в дисертацията са публикувани в много реномирани списания: Physical Review Letters (1), Physical Review Applied (1), Physical Review Research (2), Physical Review A (10), Journal of Physics B (1)

Те са цитирани 477 пъти, като цитатите са независими.

h-фактор на дисертанта е 15.

Данните по-горе показват висока независима оценка на дисертанта.

VII. Документи

На мен не са ми известни представени документи резултатите да са използвани в практиката.

VIII. Бъдещо приложение

В текста по-горе са посочени много предложения за приложение на получените резултати, като са посочени конкретните области.

IX. Авторефератът

Автореферата е изготвен съгласно изискванията и правилно отразява основните положения и научните приноси представени в дисертацията.

X. Забележки

Основната ми забележка е, че в много от случаите не е отбелязано в коя статия от списъка е обсъждания в дисертацията материал. Не са отбелязани статиите в които са публикувани новите резултати.

XI. Становище

След като се запознах с представеният дисертационен труд, Автореферат и другите материали, и въз основа на направения анализ на тяхната значимост и съдържащи се в тях научни и научно-приложни приноси, давам своята **положителна** оценка на дисертационния труд. Въз основа на гореизложеното, **препоръчвам** на научното жури да присъди **научната степен „доктор на физическите науки“** в професионално направление **Физически науки** на **доц. д-р Боян Тонев Торосов**.

08.05.2026

Рецензент: доцент доктор Наум Иванов Карчев

REVIEW

of a dissertation for the award of the academic degree
“**Doctor of Sciences**”

Field: Physical Sciences

Specialty: Laser Physics, Physics of Atoms, Molecules and Plasma, and Physics of Wave Processes

Author of the dissertation: Assoc. Prof. Dr. Boyan Tonev Torosov, Institute of Solid State Physics, Bulgarian Academy of Sciences

Title of the dissertation:

QUANTUM CONTROL WITH APPLICATIONS IN QUANTUM TECHNOLOGIES

Reviewer: Assoc. Prof. Dr. Naoum Ivanov Karchev
Faculty of Physics, Sofia University “St. Kliment Ohridski”

I. Relevance

Research in quantum mechanics has achieved new results that have led to the development of new technologies. The verification of these technologies is of particular importance for their acceptance by society. Hence follows the relevance of developing the theory and applications of quantum control.

The common thread in the dissertation is the development of control protocols distinguished by precision, robustness, and applicability.

II. Knowledge of the State of the Problem

The literature devoted to quantum physics and quantum technologies is enormous. In the dissertation author demonstrates a very good knowledge of this literature through discussions of previously obtained results and comparisons with the new results presented in the dissertation.

III. The dissertation mainly investigates theoretical models of quantum control of various two-level systems and their generalization to multilevel systems, with particular attention given to quantum information processing.

Models with non-Hermitian Hamiltonians are considered, including investigations of non-Hermitian shortcuts to adiabaticity. An important application of the results is the demonstration of robust separation of chiral molecules.

IV. Scientific Contributions

Chapter 2.1 — Theory of Composite Pulses

This chapter is introductory. Composite pulses replace a single pulse with a sequence of pulses having selected relative phases. A sequence of NNN pulses, each with area A_k and phase ϕ_k , creates a propagator equal to the product of the propagators of each individual pulse.

Chapter 2.2 - Composite Pulses for Two-Level Systems

This chapter discusses composite pulses for two-level systems. The novelty lies in considering a model in which a phase jump is introduced as a new control parameter.

Traditional control parameters are pulse area, static detuning, and frequency modulation. The dissertation demonstrates that the transition probability can be controlled through a phase jump in the transition amplitude.

Initially, exactly solvable models with known solutions are considered. These are modified by introducing a phase shift. Important differences in the solutions are observed. For example, in the adiabatic limit, the transition probability for zero phase shift is 0 for the Rosen–Zener (RZ) model, 1 for the Allen–Eberly (AE) model, and 0.5 for the Bambini–Berman (BB) model. For a phase shift $\phi = \pm\pi/2$, the probability becomes 1 for the RZ model, 0 for the AE model, and 0.5 for the BB model.

In conclusion, the exact solutions demonstrate that the phase jump can be used as an effective control parameter in quantum-state preparation.

Section 2.2.4 discusses the possibility of optimizing adiabatic transfer. The proposed method uses a composite sequence of pulses — composite adiabatic passage (CAP). In this way, higher precision is achieved, since the sequences can be made exact to arbitrary order given a sufficient number of constituent pulses.

The conclusion is that the CAP technique is a highly suitable tool for high-precision quantum information processing.

Chapter 2.3 — Smooth Composite Pulses

Existing methods for creating composite pulses lead to pulses with rectangular time dependence. The goal here is to create composite pulses with arbitrary smooth temporal profiles.

The method proposed in the dissertation uses the $SU(2)$ representation of the propagator of a two-level system instead of the more commonly used $SU(3)$ representation.

In summary, a general method has been developed for designing various composite pulses with smooth time dependence. This allows laser pulses that cannot be rectangular to be used for quantum control.

Chapter 2.4 — Composite Pulses for Ultra-Broadband and Ultra-Narrowband Excitation

This chapter considers ultra-broadband composite pulses, which, at the expense of finite error tolerance, cover a maximal pulse area. Using the same error-tolerance approach, an ultra-narrow composite pulse is designed.

The ultra-broadband composite pulse is of interest for accelerating sideband cooling of trapped ions. Simultaneous excitation of many transitions with nearly unit probability becomes possible. Another application is optical pumping of atoms and molecules.

Chapter 2.5

This chapter studies sequences of composite pulses that create predefined rotations of a two-state system by an angle θ on the Bloch sphere.

The sequences are generated in an analogous way. The transition probability for each composite sequence is given by a simple formula, allowing the precision to be evaluated.

These results are important for studies where the exact value of the transition probability is significant.

Chapter 3

Chapter 3 describes how the composite-pulse technique, further developed using the phase jumps introduced in the dissertation for two-level systems, can be used to control states with different populations in multistate systems.

The focus is on physically significant systems in quantum informatics. A hybrid technique combining composite pulses and stimulated Raman adiabatic passage (STIRAP) is considered. This technique is referred to in the dissertation as composite STIRAP.

Two cases are considered: resonant STIRAP with zero detuning and nonresonant STIRAP with nonzero detuning.

Despite significant differences in the mathematics employed, the common conclusion is that composite STIRAP significantly outperforms single STIRAP in terms of precision and

robustness. Examples include robust implementation of the Householder quantum reflection and highly accurate composite quantum gates for Raman qubits.

Chapter 4 — Experimental Demonstration of Composite Pulses on IBM Quantum Computers

This chapter presents experimental tests of various composite pulse sequences using IBM processors based on superconducting qubits.

The goal is to realize pulse control of the qubit. The authors obtain excitation profiles for a wide variety of composite pulses. This is achieved through access to IBM Quantum hardware.

In all experiments, agreement is obtained between theoretical and experimental results (excitation profiles).

Chapter 5 — Non-Hermitian Quantum Control

Non-Hermitian physics is an emerging field intersecting condensed matter physics, quantum physics, atomic and molecular physics, and optics. It provides a theoretical framework for open systems interacting with their environment and undergoing nonunitary evolution.

This framework includes mathematical structures such as complex eigenvalues, exceptional points, and nonorthogonal eigenvectors, fundamentally different from Hermitian theories.

An important result was obtained by Bender and Boettcher, who showed that some non-Hermitian Hamiltonians may possess entirely real spectra if they exhibit parity-time (PT) symmetry. This significantly increased interest in these theories.

A central topic of the dissertation is the non-Hermitian shortcut to adiabaticity. It is shown that adding an appropriate imaginary term to the Hamiltonian enables perfect population transfer at arbitrary speed, whereas conventional adiabatic transfer requires slow evolution to avoid errors.

The dissertation presents analytical solutions for a special type of pseudo-Hermitian generalization of two-level models: the Landau–Zener model and the Allen–Eberly model.

Several applications are discussed, including waveguide optics and sum-frequency generation.

Chapter 6 — Quantum Control in Chiral Molecules

Chiral molecules are stereochemical structures that cannot be superimposed on their mirror image, similarly to the left and right hand. They exist as pairs of mirror isomers called

enantiomers, which possess identical physical properties but interact differently with polarized light and biological systems.

A sequence of three composite pulses developed earlier for controlling a three-state quantum system in a closed loop is applied in the first approach (6.2) for chiral molecular separation, demonstrating robust discrimination between enantiomers.

The second approach (6.3), using Raman pulses, employs two methods. One follows three interaction steps: a single pulse, a Raman pulse, and another single pulse. The other method uses a sequence of two interactions: a Raman pulse and a single pulse.

It is demonstrated that phase-compensated pulses and phase-distorted pulses can both be used, with the former being more accurate and the latter faster.

This work could have significant practical impact in pharmacology and materials science.

V. Scientific Contribution of the Dissertation Author

In the works serving as the basis of the dissertation, the dissertation author is listed first. This indicates a significant contribution to these works.

VI. Evaluation by External Authors

The works used in the dissertation have been published in highly prestigious journals:

- *Physical Review Letters* (1)
- *Physical Review Applied* (1)
- *Physical Review Research* (2)
- *Physical Review A* (10)
- *Journal of Physics B* (1)

They have been cited 477 times, with the citations being independent.

The dissertation author's h-index is 15.

These data demonstrate a high independent evaluation of the dissertation author's work.

XI. Opinion

After reviewing the submitted dissertation, abstract, and accompanying materials, and based on the analysis of their significance and the scientific and applied-scientific contributions contained therein, I give my positive evaluation of the dissertation.

Based on the above, I recommend that the scientific jury award the academic degree “**Doctor of Physical Sciences**” in the professional field of Physical Sciences to Assoc. Prof. Dr. Boyan Tonev Torosov.

08.05.2026

Reviewer:
Assoc. Prof. Dr. Naoum Ivanov Karchev