

Технически университет в Дармщат | Институт по приложна физика | Hochschulstraße 6 | 64289 Дармщат.

Проф. д-р Томас Халфман

Технически университет в Дармщат

Институт по приложна физика

Катедра по нелинейна оптика и квантова оптика.

Hochschulstr. 6. D-64289 Darmstadt.

Тел. +49 6151 16 - 20740. Факс +49 6151 16 - 20327.

[thomas.halfmann@physik.tu-darmstadt.de](mailto:thomas.halfmann@physik.tu-darmstadt.de).

[www.iap.tu-darmstadt.de/nlq](http://www.iap.tu-darmstadt.de/nlq).

Дата: 16.09.2025.

В този документ представям становище във връзка с докторската дисертация „Ефекти на формата на импулса върху динамиката на кубита и отвъд – изследване на квантовия контрол в процесори на IBM Quantum“ на И. С. Михов, научен ръководител проф. д-р Н. В. Витанов, внесена във Физическия факултет на Софийския университет „Св. Климент Охридски“ на 25 юни 2025 г.

Дисертацията разглежда научно релевантни и бързо развиващи се направления в квантовите технологии, а именно квантов контрол на свръхпроводникови кубити. Работата е мотивирана от централната роля на формата на импулса и спектралното инженерство за реализиране на квантови гейтове с висока точност в шумни средноголеми квантови устройства (NISQ). Докторантът се насочва към една особено обещаваща посока: използването на аналитични модели за пренос на населеност, внимателно проектирани форми на импулси и техники за фазова модулация, за постигане на подобрен контрол върху преходните вероятности и ширините на спектралните линии върху реален хардуер на IBM Quantum. Дисертацията адресира няколко взаимосвързани предизвикателства: (i) намаляване на калибрационната грешка чрез аналитично моделиране на динамиката на заселеността на кубита, (ii) експериментална демонстрация на „мощностно свиване“ и „мощностно свръхразширение“, които заедно осигуряват двупосочен контрол върху спектралните ширини на линиите, и (iii) въвеждане на равновероятностни модели чрез управление на времезависимата фаза като нов подход към проектирането на устойчиви гейтове. Тези теми са от голямо значение за квантовите изчисления, квантовата метрология и кохерентния контрол като цяло и допринасят към текущите усилия към намаляване на грешката на кубитите. Подходът на кандидата представлява комбинация от аналитична теория, числено моделиране и експериментална валидация върху свръхпроводникови процесори на IBM Quantum

чрез достъп през облака. Следователно работата е възпроизводима и релевантна за по-широката общност в квантовите изчисления. Предложените техники могат да бъдат интегрирани в квантови компилатори или калибрационни процедури в близко бъдеще.

Дисертацията е добре написана на английски и е структурирана както следва: Глава 1 – Въведение: представя основните концепции за кубити, Раби-осцилации и мотивацията за изследване на формите на импулса. Кандидатът убедително поставя проектирането на импулси като критичен ресурс за квантови гейтове с висока точност. Глава 2 – Преглед на литературата: предлага необичайно изчерпателен преглед на точно и приблизително решими модели с две нива, включително моделите на Розен–Зенер, Демков, LMSZ и АЕН, и поставя работата на кандидата в контекста на темата. Глава 3 – Теоретични основи: извежда времезависимото уравнение на Шрьодингер за системи с две нива, обсъжда адиабатна и суперрадиабатна еволюция и представя кратко въведение в свръхпроводниковите кубити. Тази глава показва солидно боравене както с квантовата оптика, така и с теорията на верижната квантова електродинамика (cQED). Глава 4 – Експериментална постановка: внимателно документира използваните процесори на IBM Quantum, включително времена на кохерентност, грешки при измерване и честоти на кубитите. Тази глава е ценна за възпроизводимостта и демонстрира разбирането на автора за хардуерните ограничения. Глава 5 – Модели за пренос на населеност: представя експериментални профили на детюнинга за пет архетипни форми на импулси и валидира аналитичните решения. Изведени са две нови аналитични приближения за синусоидални импулси, които показват близко съвпадение с експеримента. Спектралният анализ на петте често използвани форми на импулси демонстрира намаляване на калибрационните грешки между 4–7 пъти в сравнение с конвенционалните форми на импулси, дадени в учебника на IBM Qiskit. Тези резултати директно позволяват по-прецизна резонансна калибрация. Глава 6 – Мощностно свиване и свръхразширение: кулминационната глава на дисертацията експериментално демонстрира мощностно свиване, т.е. поразяваща инверсия на парадигмата за разширяване с мощност, и въвежда семейства импулси, които постигат мощностно свръхразширение. Десетократно свиване на спектралната линия е наблюдавано на квантов процесор на IBM. Мощностно свиване до три порядъка може да е възможно с импулси тип степен на лоренцианов профил с по-ниска експонента. В съвкупност тези резултати позволяват безпрецедентен контрол върху спектралните ширини – с релевантност за приложения и отвъд конкретната област на квантовите изчисления, например спектроскопия с висока резолюция. Глава 7 – Равновероятностни модели (т.е. модели с различни форми на Раби-честота и детюнинг, които споделят една и съща следимпулсна вероятност за преход): въвежда концепцията за равновероятностни модели, базирани на еквивалентността на Делос–Торсън, и демонстрира тяхната неразличимост експериментално, използвайки времезависим фазов контрол. Тази глава е концептуално елегантна (поне доколкото може да се съди от позицията на експериментатор). Глава 8 – Заключение: обобщава резултатите, подчертава потенциала за интегриране на техниките в калибрационни и контролни поточни линии, критично обсъжда ограниченията (напр. необходимостта от достатъчно точен инженеринг на формата на импулса) и очертава бъдещи направления за изследване.

Докторският проект вече е довел до три висококачествени публикации в рецензирани списания, всички с кандидата като първи автор: Phys. Rev. A 108, 042604 (2023): първо систематично експериментално обобщаване на детюнинг-профили за форми на импулси върху хардуер на IBM, установявайки нов еталон за резонансна калибрация. Phys. Rev. Lett. 132, 020802 (2024): значима експериментална демонстрация на мощностно свиване с широки последици за квантовата спектроскопия и контрол. Phys. Rev. A 110, 052609 (2024): въвеждане и експериментална валидация на аналитични решения за импулси с крайна продължителност. Има още две публикации, подготвяни с кандидата като първи автор. Ръкописите вече са налични в arXiv:2506.08748 (2025): разширение към мощностно свръхразширяване, допълвайки картината на спектралния контрол. arXiv:2506.19572 (2025): първа експериментална демонстрация на равновероятностни модели с използване на времезависима фазова модулация. Броят и качеството на публикациите ясно показват повече от адекватен научен принос за успешен докторски проект. Освен това кандидатът е представял своите резултати на приблизително десетина международни срещи и конференции. Всичко това доказва способността на г-н Михов да получава ценни научни резултати и да провежда научни изследвания, конкуриращи се на международно ниво.

Имам следните въпроси за защитата на дисертацията:

1. Ефектът на мощностното свиване е наистина поразителен. Могат ли да се предложат конкретни приложения във високорезолуционната спектроскопия (т.е. конкретни спектроскопични техники, които биха се възползвали от ефекта)?
2. Както правилно е обсъдено в дисертацията, точният контрол върху формата на импулса е задължителен за постигане на квантов контрол. Проверявано ли е доколко получените резултати се изменят (или дали изобщо се запазват) при флуктуации в параметрите на импулса? Каква точност е необходима?
3. Големи площи на импулса (напр.  $7\pi$ ) означават по-дълги времена на гейта. Може ли да се оцени количествено каква част от спектралното свиване се запазва, когато в анализа се включи декохерентност? Има ли практически оптимална площ на импулса, балансираща спектралната селективност и точността на гейта?
4. Обобщаване към многокюбитни устройства: как биха се държали техниките за образуване на форми на импулса в устройство с много едновременно задвижвани кубити? Би ли могло мощностното свиване да намали кръстосаните взаимодействия (crosstalk), или неволно би усилило нежеланите взаимодействия?

В заключение, тази дисертация представя задълбочено, добре структурирано и научно много ценно изследване на ефектите от формата на импулса в динамиката на (свръхпроводниковите) кубити. Резултатите са предмет вече на три публикации в рецензирани списания, както и на още два подготвени ръкописа – което е ясен показател за качеството на получените резултати. Кандидатът демонстрира майсторство в аналитичните и релевантните експериментални техники и представя резултати, които придвижват напред състоянието на знанието в квантовия контрол. Поради това напълно подкрепям допускането на г-н Иво Михов до защита на докторската му дисертация преди края на 2025 г.

Дисертацията, авторефератът и качеството на представените от г-н Иво Михов научни публикации отговарят на изискванията на Физическия факултет на Софийския университет „Св. Климент Охридски“. Съответно подкрепям присъждането на образователната и научна степен „доктор“.

*/подпис/*

Проф. д-р Т. Халфман