

РЕЦЕНЗИЯ

на дисертационен труд за придобиване на образователната и научна степен „Доктор“, Професионално направление: 4.1 Физически науки, научна специалност : „Електрични, магнитни и оптични свойства на кондензираната материя”

Автор на дисертационния труд: Петър Колев, ИОМТ-БАН

Тема на дисертационния труд: „Сензори, базирани на спектрална поляриметрична детекция”

Рецензент: Вера Маринова Господинова, професор, дфн., ИОМТ- БАН, член на НЖ съгласно Заповед № РД-15-959/16.12.2025 г на Директора на ИОМТ-БАН

1. Кратки биографични данни за докторанта

Петър Колев е завършил бакалавърска и магистърска степен в Технически Университет, гр. София, Енерго-машиностроителен факултет, Специалност Хидравлична и пневматична техника, съответно през 2009г и 2015г. Има опит като инженер конструктор в Хидропневмотехника АД, Казанлък. От началото на 2022г е зачислен като редовен докторант в ИОМТ-БАН.

2. Актуалност на разработвания в дисертационния труд проблем

Дисертационният труд е посветен на спектралния анализ на състоянието на поляризация на светлината и по-конкретно върху проектирането и разработването на Канален Спектрален Поляриметър за приложения в сензори, работещи на основата на повърхностен плазмонен резонанс, както и на основата на магнито-оптичен ефект.

Дисертацията разглежда много актуална тема, тъй като спектралният анализ на състоянието на поляризация на светлината има основна роля в поляриметричните изследвания и е в основата на различни видове сензори. Авторът умело идентифицира основните ограничения на конвенционалните оптични сензори-например стандартните биосензори на основата на Повърхностен плазмонен резонанс, които отчитат промяната в интензитета на светлината или изместването на спектралния минимум, т.е работят на принципа на традиционната амплитудна детекция, които се характеризират с ниско отношение сигнал/шум и имат ограничена чувствителност. В отговор на това предизвикателство, докторантът предлага фазовото измерване като решение за постигане на по-висока чувствителност чрез Метода на каналната спектрална поляриметрия, които позволява извличането на пълната поляризационна информация (параметрите на Стокс) само от един-единствен спектрален запис, което е критично важно например при наблюдение на бързи химични и биологични процеси в реално време.

Несъмнено темата е изключително актуална и интересна, защото съчетава фундаментални физични принципи (поляриметрия и плазмоника) с модерни технологични решения за постигане на по-висока точност, по-бързо действие и по-ниска цена при детекцията на критични биологични и химични агенти.

3. Познаване състоянието на проблема и анализ на литературните данни

Литературният обзор (Глава 1) е написан въз основата на 135 източника и разглежда подробно двата основни подхода за оптично възбуждане на Повърхнинен Плазмонен Резонанс: чрез призма и чрез дифракционна решетка. Дефинирани са основните параметри, описващи сензорите, базирани на Повърхнинен Плазмонен Резонанс, както и Метода на Каналната Поляриметрия. Докторантът демонстрира познаване на съвременното състояние на спектралната поляриметрия. Литературният обзор обхваща фундаментални работи в областта на параметрите на Стокс и матричния апарат на Мюлер и Джоунс, както и основните публикации, свързани с метода на каналната спектрална поляриметрия. Цитирани са ключови автори в спектрополяриметрията.

Анализът на литературните данни по отношение на газовите сензори и магнито-оптичните материали също е задълбочен. Авторът разглежда предимствата и недостатъците на металните оксиди като WO_3 и оптичестката активност на $Bi_{12}SiO_{20}$ (BSO) кристали.

Петър Колев умело доказва, че докато теоретичните основи на Метода на Каналната Поляриметрия са известни, интегрирането им в компактни и моментно действащи био и газови сензори все още е предизвикателство. Така Петър Колев заявява и целта на дисертацията – да оптимизира съществуващата конфигурация и софтуерни алгоритми за извличане на информация за фазата в реално време.

4. Оценка на избраната методика на изследване спрямо поставените цел и задачи на дисертационния труд.

Целта на дисертационния труд е ясно формулирана: да се разработи Канален Спектрален Поляриметър и се изследва приложението му при различни видове сензори. За постигане на целта, докторанта си е поставил следните задачи:

Задача 1. Да проектира и изработи Канален Спектрален Поляриметър чрез:

- оптимизиране на параметрите на основните конструктивни елементи със съществуващата измервателна апаратура;
- изследване и минимизиране на източниците на грешка.

Задача 2. Да установи експериментално предимствата на Метода на Каналната Поляриметрия:

- високо отношение сигнал/шум: чрез детекция на патогени при Повърхнинен Плазмонен Резонанс биосензори, базирани на дифракционна решетка;
- висока чувствителност чрез детекция на H_2 при газ-сензори, базирани на Повърхнинен Плазмонен Резонанс, възбуден в дифракционна решетка;
- чрез пряко измерване на фазова разлика при промени на състоянието на поляризация при магнито-оптични сензори.

Избраната методика на Каналната спектрална поляриметрия позволява едновременно извличане на всички параметри на Стокс ,затова може да се определи като най-точният инструмент за постигане на поставените задачи. Методологията е прецизна, включваща Фурие анализ за извличане на Стоксовите параметри от модулирания спектър. Експерименталните схеми са детайлно описани. Определени са бързите оси на фазовите забавители (retarders) при изграждането на Каналния

спектрален поляриметър, защото от тяхната ориентация зависи директното кодиране на информацията за състоянието на поляризация в спектъра.

Може да се твърди, че избраната методика е напълно адекватна на поставените цели и задачи.

5. Кратка аналитична характеристика на естеството и на достоверността на материала, върху който се градят приносите на дисертационния труд.

Дисертационният труд се състои от 106 страници и включва: Актуалност на тематиката с поставени Цел и задачи на дисертационния труд, Литературен обзор, две Експериментални глави, посветени на конструирането на канален поляриметър и приложението му в 3 вида сензори. Дисертацията завършва със заключение, обобщение на основните приноси, списък на фигурите, списък на публикациите, включени в дисертационния труд и списък на участията в научни форуми, както и списък на литературните източници.

Дисертационният труд е написан на основата на четири статии, индексирани в Web of Science и Scopus, една от тях е в първи квантил Q1, две във втори квантил Q2 и една с импакт ранг SJR.

Дисертацията съдържа 64 фигури, 11 таблици и 135 цитирани литературни източника.

Литературния обзор (Глава 1) е структуриран като теоретична основа. Авторът детайлно разглежда параметрите на Стокс (S_0, S_1, S_2, S_3), които са в същността на количественото описание на частично и напълно поляризирана светлина. Представени са математическите методи за описание на преминаването на светлината през различни оптични елементи.

Обзорът прави и критичен преглед на три основни типа сензорни технологии, които са обект на изследване:

- **Повърхностен плазмонен резонанс (ППР):** Описана е физиката на плазмоните и е обсъдено защо фазовата детекция (чрез поляриметрия) е по-чувствителна от стандартната детекция по интензитет.
- **Метално-оксидни сензори за газ:** Разгледани са свойствата на материали като WO_3 и тяхната реакция при взаимодействие с водородни молекули.
- **Магнито-оптични ефекти:** Анализиран е ефектът на Фарадей в кристали и възможността за прецизно измерване на магнитно поле и електричен ток.

Обзорът завършва с анализ на ограниченията на съществуващите системи. Това логически води до формулирането на целта и задачите на дисертацията, а именно: създаване на по-бърза, по-чувствителна и по-стабилна система чрез спектрална поляриметрия.

В Глава 2 са описани подробно стъпките при Конструирането на Канален Спектрален Поляриметър, като са поставени за разрешаване три задачи (1): Спектрална разделителна способност на модулациите с най-висока спектрална честота (2): Прецизно ориентиране на оптичните елементи в системата, като са приложени две основни техники за минимизиране на систематичните грешки - **поляриметрично ориентиране** (използван е He-Ne лазер и търговски поляриметър (Thorlabs PAX 1000 VIS) за измерване на изходния вектор на Стокс след всеки елемент) и **поляриметрично-спектрално ориентиране** (приложена е фина настройка на азимутите, като са сравнени измерените от Канален Спектрален Поляриметър

Стоксови параметри с референтните стойности от търговски поляриметър (3) Определяне на бързите оси на фазови забавители. Тук авторът провежда серия от тестове, обобщени в Таблица 11 от дисертацията, като установява, че при Вариант 3 се постига най-добро съвпадение между измереното състояние на поляризация от референтния поляриметър и демодулираното състояние. Извършена е и допълнителна проверка с входяща елиптична поляризация. В резултат е представена изработка на два фазови забавителя при отношение на дебелините 1:2 и 1:3, както и е описано ориентирането на всички оптични елементи в системата, което спомага за минимизиране систематичните грешки. Направени са изводи, че конфигурацията с отношение 1:3 е по-ефективна, тъй като осигурява допълнителен канал за по-точно извличане на параметрите на Стокс S_2 и S_3 .

Глава 3 е експериментална и е посветена на сензори на базата на повърхностен плазмонен резонанс. В нея авторът демонстрира практическото приложение на разработения от него метод за канална спектрална поляриметрия за високочувствителна биологична детекция, като по-подробно са представени приложенията в три типа сензори, първите два от които са сензори, базирани на дифракционна решетка: биосензор и газов сензор; а третия - сензор на магнитно поле.

В обобщение Глава 3 потвърждава приложно теоретичните разработки, представени в Глава 2, доказвайки, че спектралната поляриметрия може успешно да се използва за диагностични цели с чувствителност, превъзхождаща традиционните оптични методи.

6. Научни и научно-приложни приноси на дисертационния труд:

Съгласна съм с така формулираните приноси на дисертационния труд, които могат да се класифицират като научно-приложни и обобщени както следва:

Проектиран и експериментално е разработен метод на канална спектрална поляриметрия, който включва изработване на конструктивните елементи с оптимални параметри, съобразени със съпътстващата измервателна апаратура.

Изработени са фазови забавители с предварително изчислени дебелини и съотношения между тях, като са реализирани два конструктивни варианта: при съотношение на дебелините 1:2 ($R1 = 4.4 \text{ nm}$ и $R2 = 8.8 \text{ nm}$) и при съотношение 1:3 ($R1 = 3.4 \text{ nm}$ и $R2 = 10.2 \text{ nm}$). За тяхното проектиране и изработка са използвани стойности, получени чрез пресмятания съобразени с разделителната способност на спектрометър AvaSpec-ULS2048-CL-EVO.

Експериментално е доказана ефективността на метод на канална спектрална поляриметрия при:

- Биосензори- Успешно е демонстрирана детекция на бактерията *Helicobacter pylori*, като чрез фазово измерване е постигнато подобрене с около 35% спрямо амплитудния метод.

- Газова детекция- Разработен е сензор за водород (H_2) с използване на WO_3 , при който чувствителността при фазово измерване е с два порядъка по-висока от тази при конвенционалното амплитудно измерване.

- Методът на каналната поляриметрия за първи път е приложен и при магнито-оптични сензори, базирани на BSO кристал, което позволява температурно независимо пряко измерване на фазовата разлика, генерирана от ефекта на Фарадей.

Приносите на дисертационния труд представляват завършен цикъл – от фундаменталното разбиране за фазовата информация, извлечена чрез спектрална поляриметрия до създаването на прототипи на сензори с реално приложение в медицината, екологията и енергетиката.

Представените в дисертационния труд резултати са оригинални и достоверни.

7. Преценка на личния принос на докторанта

Познавам Петър Колев от началото на неговата докторантура в ИОМТ-БАН през 2022г. По-късно, Петър Колев премина успешно воденият от мен курс "Основи на фотониката", като се справи отлично и с поставените му практически задачи към курса, свързани с построяване на различни оптични схеми, както и проявяваше силна заинтересованост, докато сам не разреши всеки възникнал практически проблем. За годините, в които го познавам, мога да споделя, че съм впечатлена от неговото професионално израстване. Това ми дава основание да смятам, че извършените дейности по дисертацията основно са негово лично дело.

Тук искам да отбележа, че през годините Петър Колев много активно участва в различни научни проекти към Фонд за научни изследвания. Също така, съгласно приложените документи, Петър Колев участва и в център по Биофотоника.

8. Публикации по дисертационния труд

Дисертационният труд е написан на основата на 4 публикации в списания, от които 3 с импакт фактор (напр. *Optics Communications, Sensors*) и 1 с SJR. Независимо, че Петър Колев не е първи автор в публикациите с квартали, са приложени разделителни протоколи от първите автори, с които те удостоверяват, че основният принос, свързан с разработването и конструирането на каналния спектрален поляриметър, създаването на модул за прецизен контрол на температурата в условия на магнитно поле, провеждането на измерванията, установяването на експерименталните грешки, както и интерпретацията на резултатите, са дело на докторанта. Също така, Петър Колев е кореспондиращ автор в една от статиите.

По темата на дисертацията са забелязани 11 цитата, като 9 от тях са на публикацията в *Optics Communications* от 2023г.

Резултатите по дисертацията са представени и под формата на доклади (16рой) или постерни съобщения (8) на научни форуми. Високата публикационна активност на докторанта, както и броят на забелязаните 11 цитата, са показател за високо ниво на научната продукция, актуалност на научния проблем и значимостта на постигнатите резултати. Липсват данни за плагиатство.

9. Оценка на автореферата

Авторефератът е добре оформен и отговаря на изискванията за обем и съдържание. Отразени са основните дейности, получените резултати и приносите в дисертацията.

10. Критични бележки и въпроси

Имам следните въпроси:

1. Как различавате фазовия сигнал, породен от водорода, от този на водните пари в атмосферата (известно е, че WO_3 се свързва с чувствителност към влага)?

Наблюдава ли се хистерезисна зависимост след премахване на водорода и доколко стабилен е този процес при многократни цикли?

2. Относно магнитно-оптичния сензор- В BSO кристала има суперпозиция от два ефекта: естествена оптична активност (собствена дисперсия) и индуциран ефект на Фарадей (числото на Верде като функция на λ). Как Вашият модел разграничава натрупващия се ефект от дисперсията на естествената оптична активност и тази на числото на Верде в BSO кристала, за да осигури инвариантност на измерваното магнитно поле спрямо широкия спектър на източника?

3. Като се има предвид, че фазовата чувствителност е изключително висока само в тесен диапазон около точката на резонанс, как спектрално-поляриметричната система гарантира точност на измерването при биологични проби, които имат променлива мътност? Как алгоритъмът разграничава фазовия сигнал от промените в амплитудата и контраста на ивиците, породени от нехомогенност на пробата?

Технически коментари:

--Липсват обозначения на оптичните елементи на фиг. 21 и 22, докато същите са поставени на фиг 20.

--Фигура 45, AFM снимка на отложения WO₃ наноструктуриран слой върху дифракционна решетка –какво са а) и б)?

На места текстът на дисертацията е написан прекалено технически или в "телеграфен" стил, много често липсват очаквани физични обяснения или последваща дискусия. Също така, се забелязват много граматически неточности и грешки.

Техническите забележки по-горе не омаловажават приносите на дисертацията.

11. Мотивирано и ясно формулирано заключение

Представеният дисертационен труд е оригинален, като приносите имат научно-приложен характер. Постигнати са важни резултати, публикувани в списания с квартали Q1 и Q2. Част от резултатите са представени и на научни форуми. До момента има забелязани 11 цитата, което доказва актуалността на разработваната тема. Несъмнено приносът на Петър Колев е значителен.

Представеният ми за рецензия дисертационен труд и наукометричните данни на Петър Колев отговарят и дори надвишават националните изисквания за присъждане на ОНС „доктор“ в Закона за развитие на научния състав в Република България, както и изискванията за защита на дисертационен труд в Правилника за условията и реда за придобиване на научни степени и за заемане на академични длъжности в ИОМТ-БАН.

В заключение, заявявам своето съгласие и препоръчвам на уважаваното Научно Жури да присъди образователната и научна степен „**доктор**“ в професионално направление 4.1 Физически науки, научна специалност: „Електрични, магнитни и оптични свойства на кондензираната материя“ на **Петър Колев**.

27.02.2026 г.

изготвил рецензията:

/проф. дфн Вера Маринова /