

## **Авторска справка за оригиналните научни приноси**

на **г-р Петър Йорганов**, представени за участие в конкурс за заемане на академична длъжност „**доцент**“ по професионално направление **4.1. Физически науки**, “Електронни свойства на наноразмерни тънкослойни системи” (ДВ бр. 36 от 29. 04. 2025г.), за нуждите на научно направление "Структурна кристалография и материалознание" в Института по Минералогия и Кристалография „Академик Иван Костов“ към Българската Академия на Науките.

### **1. Обобщена информация за оригиналните научни приноси на г-р Петър Йорганов**

Научни публикации, общ брой: **17 бр.**

Участващи в конкурса за заемане на академична длъжност „доцент“: **16 бр.**

Публикации, попадащи в Q1: № 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 17

(Статии № 3 и 8 са представени към дисертационния труд)

Публикации, попадащи в Q2: № 2, 14

Публикации, попадащи в Q3: № 1, 16

(Статия № 16 е включена в справката, но не е включена в изчислението на точките)

Публикации попадащи в други категории не са налични

Водещ автор – 30%

Втори или следващ автор – 70%

*h*-index – 12

Общ брой цитирания - около 400

Публикации отнасящи се до патент или полезен модел: 2 бр.

(Патентите са включени в справката, но не и в изчислението на точките)

В статии [№ 1-8] приносът на г-р Петър Йорданов се състои главно в експериментална работа по снемане на IR-UV-VIS спектри на изучаваните системи – предимно тънки филми върху монокристални подложки и монокристални образци, както и участие в обработката на данните, дискусиите и заключенията. Използвани са различни спектроскопични методи – в режим на отражение, включително в присъствие на външно магнитно поле, спектроскопична елипсометрия, включително на синхротронен източник. Кандидатът има и принос в рентгеноструктурното охарактеризиране на образците, при измерванията на магнетизация и проводимост с постоянен ток в големи температурни диапазони  $T = 4 - 400 K$ .

В статии [№ 9, 11, 12, 14] г-р Петър Йорданов има принос в детайлното измерване на термоелектричните свойства – коефициент на Зиибек  $S$  и специфично електрическо съпротивление  $\rho$ , в температурния диапазон  $T = 300 - 1000 K$ , както и участие в обработката на данните, дискусиите и заключенията.

В статия [№ 10] (B.4) г-р Петър Йорданов има водеща роля и главен принос в: синтеза на поликристален  $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ , нарастването на голям брой тънки филми от  $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$  от поликристалната мишена по метода на импулсно-лазерно отлагане върху различни монокристални подложки, детайлното измерване на  $S$  и  $\rho$  на тънките филми в интервала  $300 - 1000 K$ , снемане на зависимостта на  $S$  и  $\rho$  от дебелината на тънките филми, снемане на зависимостта на  $S$  и  $\rho$  от вида на кристалната подложка, снемане на зависимостта на  $S$  и  $\rho$  от налягането на кислорода в измервателната камера, наблюдение на аномално увеличение на коефициента на Зиибек при температури  $T > 700 K$  при тънки филми нарастнати върху подложки от  $\text{LaAlO}_3$  и  $\text{SrTiO}_3$ , разработка на моделно описание, обобщение на данните и обяснение на наблюдаваното явление.

В статия [№ 13] (B.4), г-р Петър Йорданов има водеща роля и принос в: нарастването на наноразмерни ( $d \approx 10 \text{ nm}$ ) тънки филми от  $\text{PdCoO}_2$  върху подложки от  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с различен ъгъл на инклинация на  $c$ -оста, установяване на оптималните параметри в процеса на импулсно-лазерно отлагане, експериментално измерване на  $S$  и  $\rho$  на тънките филми в интервала  $300 - 1000 K$ , рентгеноструктурно охарактеризиране на образците, включително за степента на насочено нарастване, атомно-силова микроскопия по установяване на морфологията, фит-коригираща процедура и установяване на  $S_{ab}, S_c$  и  $\rho_{ab}, \rho_c$  по главните кристалографски направления на  $\text{PdCoO}_2$ , приблизителна оценка на напрежението, което би се генерирало в тънките филми при проведен експеримент с лазерни импулси, дискусията и заключенията.

В статия [№ 15] (B.4), г-р Петър Йорганов има водеща роля и принос в: детайлното измерване на  $S$  и  $\rho$  на поликристалните образци от  $\text{PdCoO}_2$  в интервала 300 – 1000 K, в кислородна и хелиева среда, моделното описание на ефективните стойности на  $S$ ,  $\rho$ , и  $\kappa$ , като съвкупност от голям брой микроскопични анизотропни монокристални частици със съответните стойности  $S_{ab}, S_c, \rho_{ab}, \rho_c$  и  $\kappa_{ab}, \kappa_c$ .

Статия [№ 16] е с обзореен характер, като г-р Петър Йорганов има главен принос в частите отнасящи се до системите с аномално нарастване на коефициента на Зиубек  $S$  при високи температури (направени са нови измервания на тънки филми и хетероструктури на базата на  $\text{LaNiO}_3$  потвърждаващи ефекта от [№ 10]), както и в раздела обобщаващ научната работа по делафосита  $\text{PdCoO}_2$ .

В статия [№ 17] (B.4), г-р Петър Йорганов има водеща роля и принос в: нарастването на наноразмерни ( $d \approx 10 \text{ nm}$ ) тънки филми от  $\text{PdCoO}_2$  върху подложки от  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с различен ъгъл на инклинация на  $c$ -оста, измервания с наносекунден лазер и установяване на амплитудата  $U_x$  и времевите характеристики  $\tau_r$  на генерираното напрежение в резултат от напречния термоелектричен ефект, моделен анализ и фит на експерименталните резултати с наносекунден лазер (резултатите са представени в допълнителните материали на статията), идея и дискусия на механизъм за генериране на терахерцово електромагнитно лъчение на базата на ултрабърз напречен термоелектричен ефект в тънки филми от  $\text{PdCoO}_2$ , анализ и моделно описание на генерираното терахерцово лъчение, разработка и въвеждане на модел на неравновесна термална дифузия, оценка на параметрите имащи най-силно влияние за силата и спектралното разпределение на генерираното излъчване, дискусия, заключения и перспективи на метода. Методът е демонстриран и описан моделно и в друг материал – тънки филми от  $\text{La}_{1.84}\text{Sr}_{0.16}\text{CuO}_4$ . Откритието е запазено като източник и метод за генериране на терахерцово лъчение в два отделни патента – европейски и световен [П1, П2], в които кандидатът е главен изобретател.

## 2. Област на изследванията на г-р Петър Йорганов - Увод

Комплексните оксиди на преходните метали представляват клас съединения притежаващи най-богатата гама от основни електронни състояния, явления, и съпътстващи ефекти изучавани във физиката на твърдото тяло. Примерите са изключително многобройни, като някои от най-емблематичните включват: Мот-изолиращо състояние, високотемпературна свръхпроводимост, магнетизъм и

колосален магниторесистивен ефект. Широката си гама от състояния комплексните оксиди на преходните метали дължат на силните електрон-електрон взаимодействия, възникващи като резултат от пространствените характеристики – големина и анизотропия, на изграждащите се  $d$  - електронни орбитали. Тези взаимодействия, или т.н. корелации, са особено добре изразени при оксидите с участието на преходни метали от трета група на периодичната система, тъй като  $3d$  орбиталите са сравнително малки по размер и не създават условия за съществено припокриване. Съответно, стойността на потенциалната енергия на Кулоново взаимодействие е по-голяма от тази на кинетичната, като този механизъм на локализация води до изолиращо състояние от качествено нов тип - Мот-изолатор. Важно е да се подчертае, че при тези материали, дори при електронно разпределение с един валентен електрон на атом, се наблюдава Мот-изолиращо състояние, което очевидно не подлежи на описание със стандартен зонен модел. При външно въздействие, като например химическо заместване, прилагане на външно магнитно или електрично поле, аксиално или хидростатично налягане, могат да възникнат условия за драстична промяна на съотношението между кинетичната и потенциалната енергии с преход към ново състояние. Именно електронните корелации са в основата на магнитните взаимодействия с близък и далечен порядък, високотемпературната свръхпроводимост, и много други. Съществуват и множество допълнителни фактори които трябва да бъдат отчитани. Това са например структурните фактори, като симетрията на елементарната клетка, която може да е анизотропна и изградена от слоеве с различен химичен състав и електронни свойства. Също така, тъй като при комплексните оксиди, преноса на електрони най-често се осъществява през кислороден атом, всяка допълнителна структурна деформация (характерна за материала или външно предизвикана), както и прецизната стехиометрия, могат да бъдат от решаващо значение за транспортните свойства и основното състояние. Съвкупността от тези фактори правят комплексните оксиди на преходните метали интересни за изследване, но и често изключително трудни за прецизно моделно описание. Електронните системи със силни корелации са, най-общо, задачи за много взаимодействиящи си частици, достатъчно сложни сами по себе си, които често допълнително се усложняват поради наличието на взаимовръзки електричен заряд - спинов момент - орбитален момент - кристална решетка, т.е., с участието на всички възможни степени на свобода [1-4]. Въпреки, че комплексните оксиди се изучават интензивно от времето на откритията на високотемпературната свръхпроводимост и магниторезистивния ефект в перовскитите  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  [5] и  $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$  [6], многообразието от взаимодействия и широкия спектър от състояния в тези системи разкриват на практика неограничен потенциал не само за бъдещи оригинални научни разработки, но и за нови функционалности в различни електронни устройства на базата на тънки наноразмерни филми.

Следователно синтезът, детайлното структурно характеризирание и задълбоченото изучаване на физичните свойства на съединенията от този клас, включително изследвания на съвместимостта им с конвенционалните полупроводникови материали (например Si), са от решаващо значение за бъдещото развитие на електронните технологии. Обхватът на тези цели очевидно предполага силен интердисциплинарен подход с участие на широки области от химията и физиката.

### **3. Област на изследванията на г-р Петър Йорданов**

От гледна точка на електрониката, съществен интерес представляват съединения съчетаващи висока електропроводимост с минимум още едно свойство или параметър, които ще залегнат в основата на една потенциално нова или съществуваща, но подобрена функционалност. Подобни съчетания от две или повече свойства, могат да бъдат реализирани както в рамките на един и същи материал – обикновено чрез химическо заместване или дотиране в кристал с комплексна елементарна клетка, така също и чрез изработката на поликристални композити, тънки епитаксиални филми, хетероструктури и свръхрешетки от два или повече материала нарастнати върху монокристални подложки. Например, комбинациите между висока електропроводимост с висок термоелектричен коефициент на Зиибек в  $\text{Na}_x\text{CoO}_2$  [7], или висока електропроводимост и феромагнетизъм, реализирана в  $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$  [6], са съответно в основата на директното преобразуване на топлинна енергия в електрическа (ефект на Зиибек) и колосалния магниторесистивен ефект. Няма да е пресилено да се каже, че дотирането със свободни *p*-носители чрез контролирана редукция на кислород в  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  [5], съчетано с антиферомагнитни флуктуации, е вид „дизайн“ водещ до високотемпературна свръхпроводимост. Именно механизмите реализирани в тези и други подобни системи, изграждат основите на концепцията на изкуствено създадените тънкослойни наноразмерни структури с участието на два или повече комплексни оксиди [8]. Развитието в тази насока ще изисква и синхронизация с вече утвърдени нанотехнологии на базата на Si, което предполага синтез и изследване на хибридни структури с нови възможности.

Научно-изследователската дейност и интересите на г-р Петър Йорданов са насочени в областите на синтез на поликристални образци, епитаксиално нарастване на наноразмерни тънкослойни системи - филми и хетероструктури върху монокристални подложки, извършване на рентгеноструктурно охарактеризиране, спектроскопски изследвания, изследване на транспортни свойства - електропроводимост (съответно електрическо съпротивление), коефициент на Зиибек (термоелектрични свойства), измерване на времеви

характеристики при ултрабърз напречен термоелектричен ефект, генериране на електромагнитно излъчване в терахерцовата област, моделен анализ, и др.

#### **4. Подробна информация за оригиналните научни приноси в публикациите представени за заемане на академична длъжност „доцент“.**

В периода 2000-2004 г. Петър Йорданов работи като физик в катедра „Полупроводници“ на физическия факултет на СУ „Св. Климент Охридски“, където освен с лабораторни демонстрации на студенти, активно се занимава с научно-изследователска дейност, и в частност - IR и UV-VIS спектроскопия на полупроводникови материали. За периода са публикувани две научни статии [№ 1,2], за които кандидатът извършва спектроскопски измервания на тънки филми от  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> и Mg<sub>2</sub>Si, получени по метода на йонна имплантация и участва в обработката и интерпретацията на резултатите.

От 2004 до края на 2009 година, Петър Йорданов продължава научно-изследователската си дейност с работа по дисертационен труд “Spectroscopic study of CaMnO<sub>3</sub>/CaRuO<sub>3</sub> superlattices and YTiO<sub>3</sub> single crystals”, в института Макс Планк по Физика на Твърдото Тяло – Щутгарт, Германия, свързан с изграждане на лаборатория по спектроскопски изследвания на комплексни оксиди на преходните метали, включително в приложено външно магнитно поле. Лабораторията е изградена успешно, и са изследвани две системи: монокристален феромагнитен изолиращ YTiO<sub>3</sub>, и свръхрешетки състоящи се от тънки слоеве от парамагнитния метал CaRuO<sub>3</sub> и антиферомагнитния изолиращ CaMnO<sub>3</sub>. В случая на YTiO<sub>3</sub>, са изучени подробно IR (50 – 700 cm<sup>-1</sup>) и UV-VIS (1 – 5.5 eV) диапазона, включващи фононния спектър и високоенергетичните преходи, като функция от температурата, кристалографското направление, и силата на приложеното магнитно поле. При свръхрешетките CaRuO<sub>3</sub>/CaMnO<sub>3</sub>, е извършено детайлно спектроскопско изследване за установяване на профилите на преразпределение на свободни електронни носители и магнитното състояние. Използвани са поредица от методи, като; IR-спектроскопия, рентгеново-абсорбционна спектроскопия и разсейване, както и дихроизъм с кръгова поляризация, като кандидатът участва активно в снемането на спектрите, обработката и анализа на данните. Резултатите от изследванията на тези две системи са публикувани в няколко научни труда [№ 3,5,7,8], като тези в които Петър Йорданов има съществен принос, и съответно са представени в дисертационния труд са [№ 3,8]. Направените подробни изследвания на магнетизацията на YTiO<sub>3</sub>, спомогнаха за допълнително изясняване на магнитната анизотропия и структурните деформации съпътстващи прехода към феромагнитно състояние (с  $T_c = 27 K$ ) в

YTiO<sub>3</sub> [№ 6]. Кандидатът участва активно в изследвания и на други системи, като прилага успешно различни експериментални оптични методи. В статия [№ 4], е представено детайлно изследване на оптичната проводимост  $\sigma(\omega)$  (70 – 4000  $cm^{-1}$ ) по *c*-остта на серия от монокристали от непълно дотирани високотемпературни свръхпроводници RBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7- $\delta$</sub>  (R=Y, Nd, La). Резултатите са получени с помощта на спектроскопична елипсометрия, като диапазона отговарящ далечната IR област е смет със спектрометър базиран на синхротронен източник.

От 2011 г. до 2023г., г-р Петър Йорданов продължава научната си кариера в института Макс Планк – Щутгарт като постдокторант. Областите на изследвания включват: 1. Синтез на комплексни оксиди на преходните метали под формата на поликристални образци, тънки филми и хетероструктури израствани върху монокристални подложки. 2. Измерване и моделен анализ на термоелектрични свойства – коефициент на Зиибек  $S$ , и електрическа проводимост с постоянен ток  $\sigma$  (специфично електрическо съпротивление  $\rho = 1/\sigma$ ), и 3. Измерване на амплитудни и времеви характеристики – големина на генерирано напрежение  $U$  и време за генерация  $\tau$ , на тънки наноразмерни системи ( $d \approx 10 - 100 nm$ ) за реализация на ултрабърз напречен термоелектричен ефект. Извършена е голяма по обем научно-изследователска дейност, като част от изпълнението на два проекта – един с участие на частна индустриална компания, имаща за цел разработката на ултрабързи (наносекундни), термично устойчиви детектори на лазерно лъчение, и друг – на националната немска фондация за наука, имащ за цел идентифициране на фундаментални механизми приложими в устройства с нови функционалности. И двата проекта са успешни, като първия завършва с реализиран на пазара продукт, а работата по втория – с публикации в престижни научни списания, откритие и патенти. Резултатите са публикувани в общо девет научни статии, а откритието е запазено с два отделни патента – европейски и световен. Необходимо да се отбележи, че спецификата на работа по първия проект (~2012-2017г.), не позволи публикуването на доста от резултатите. В статия [№ 9], е проведено изследване на термоелектричните свойства – коефициент на Зиибек  $S$ , електрическа  $\sigma$ , и термална проводимост  $\kappa$ , съставляващи т.нар. “figure of merit”  $ZT = S^2\sigma T/\kappa$  – мярка за ефективността на преобразуване, на композитни системи SiAlON и SiC, с добавени съответно 5 и 10 обемни % TiCN. Приносът на Петър Йорданов в този труд се изразява в измерване на  $S$  и  $\rho$ , на образците в температурния диапазон 300 – 1000 K, както и в активно участие в дискусиите. Статия [№ 10], е един от трудовете представени в група **B.4.**, и представлява изследване на термоелектричните свойства  $S$  и  $\rho$ , съставляващи т.нар. мощностен фактор  $P = S^2/\rho = S^2\sigma$ , на тънки филми от Ca<sub>3</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub> нараствани епитаксиално върху различни монокристални подложки, като SrTiO<sub>3</sub>, LaAlO<sub>3</sub>, [LaAlO<sub>3</sub>]<sub>0.3</sub>[Sr<sub>2</sub>AlTaO<sub>6</sub>]<sub>0.7</sub>, LaSrAlO<sub>4</sub>, MgO, и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Направен е и

рентгенов анализ на степента на деформация на тънкия филм. Данните включват температурна зависимост на  $S$  и  $\rho$  от  $T$  в диапазона  $300 - 1000\text{ K}$ , зависимост от дебелината на филмите  $d$ , и от налягането на кислород в средата. Наблюдаваната аномалия – екстремно увеличение на коефициента на Зиибек  $S$  при  $T > 700\text{ K}$ , при филми върху подложки от  $\text{SrTiO}_3$  и  $\text{LaAlO}_3$ , е обяснено с включването на паралелен механизъм на генерация на термоелектрично напрежение с изключително висок коефициент ( $S \approx 1200 - 1600\ \mu\text{V/K}$ ) в тези кристални подложки. Резултатите са описани качествено и количествено с паралелен електричен модел. д-р Петър Йорданов има водеща роля и принос във всички представени резултати, включващо синтеза на поликристалния материал  $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ , нарастването на тънките филми от  $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$  с лазерно-импулсно депозиране върху различните подложки, експерименталните измервания на  $S$  и  $\rho$ , моделното описание, и направените изводи и заключения. В статия [\[№ 11\]](#), е представено пълно експериментално и теоретично описание на термоелектричните свойства на поликристални образци на съединението  $\text{Ag}_6\text{Ge}_{10}\text{P}_{12}$ , което поради своите специфични електронни и структурни характеристики, показва изключително ниска термална проводимост  $\kappa$ , и съответно висока стойност на  $ZT = S^2\sigma T/\kappa$ . Приносът на кандидата е в детайлното измерване на параметрите  $S$  и  $\rho$  в широк температурен диапазон, както и в активното участие в направените дискусия и изводи. Статии [\[№ 12, 14\]](#), засягат установяване на зависимостта между термоелектричните свойства на хетероструктури от типа  $\text{LaNiO}_3 / \text{La}_2\text{CuO}_4$ , с дебелината на изграждащите слоеве и прецизния химичен състав на границите между двата материала. Направени са измервания на параметрите  $S$  и  $\rho$ , в които кандидата има водещ принос, както и сканиращо електронно микроскопско изследване. В статия [\[№ 13\]](#) (представена в група **B.4.**), е извършен значителен по обем работа, свързан със синтеза и измерването на термоелектричните параметри  $S$  и  $\rho$  на наноразмерни тънки филми от силно анизотропния гелафосит  $\text{PdCoO}_2$ , израстнат върху монокристални подложки от  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с различни ъгли на вициналните равнини. Целта е установяване на степента на пространствена анизотропия в коефициента на Зиибек  $S_{ab}/S_c$ , както и сравнение с теоретично получените резултати. С изключение на теоретичната част - оценка на параметъра на електрон-електронно взаимодействие, и трансмисионния микроскопски анализ, д-р Петър Йорданов има водеща роля и принос в този труд, включително при синтеза на наноразмерните филми, снемане на термоелектрични параметри, рентгеноструктурен анализ, фит-коригиращата процедура, изчислението на потенциалната амплитуда на генерирано напрежение при лазерно-индуциран ултрабърз термоелектричен ефект, дискусията и изводите. Работата се явява първото публикувано експериментално потвърждение на теоретичните предвиждания за силно

изразена и амбиполярна пространствена анизотропия в PdCoO<sub>2</sub>. Разработеният протокол за измерване на коефициента на Зиубек по главните кристалографски направления на PdCoO<sub>2</sub>, посредством тънки филми с различен ъгъл на инклинация, е универсален и може да се използва и при гуги анизотропни материали, при които не са налични достатъчно големи монокристали. Статия [\[№ 15\]](#) (представена в група **В.4.**), представлява допълнение на изследването по установяване на пространствена анизотропия в коефициента на Зиубек в PdCoO<sub>2</sub>. В този труд, на базата получените резултати от тънките филми, моделно е описан температурния ход на  $S(T)$  и  $\rho(T)$  в диапазона  $T = 300 - 1000\text{ K}$  на поликристални образци получени чрез оптимизиран синтез позволяващ изключително чиста фаза. Проведени са също така и детайлен рентгеноструктурен анализ, микроскопски снимки за потвърждение на морфологията, измерена е и термалната проводимост, което позволи оценка на  $ZT$ . Приносите на г-р Петър Йорданов са в снемане на термоелектричните характеристики и моделното описание на измерените ефективни стойности на  $S(T)$ ,  $\rho(T)$  и  $\kappa(T)$ . Моделното описание в този случай е нетривиално, тъй като е резултат от хаотично пространствено разпределение на голям брой силно анизотропни микроскопични монокристални частици изграждащи поликристалните образци. Резултатите от изследването се съгласуват в пълна степен с голямо по стойност и амбиполярно съотношение  $S_{ab}/S_c$ . Установена е и пределната температура на стабилност на PdCoO<sub>2</sub> в инертна (хелиева) атмосфера. Статия [\[№ 16\]](#), представлява обзор на научния труд извършен в изпълнение на проект „TRR 80: From Electronic Correlations to Functionality“, като приносът на г-р Петър Йорданов е отчетен с работите в две направления. Първото се отнася до механизма на ефективно увеличение на коефициента на Зиубек  $S$ , и съответно на мощностния фактор  $P = S^2/\rho = S^2\sigma$ , на тънки филми отложени върху кристални подложки от материали с йонна подвижност при високи температури. В подобен тип подложки протича генериране на малък брой подвижни  $p$ -носители чрез процес на обратима рекомбинация на кислородни атоми в кристалните дефекти – кислородни ваканции. От своя страна, тези малък на брой носители генерират гигантски стойности  $S_{substrate}$ , които драстично променят  $S_{film}$ . Демонстриран е пример с тънкослойна система на базата на LaNiO<sub>3</sub>, който има метален характер и негативен  $S_{film}$ , но в следствие на влиянието на подложката при  $T > 700\text{ K}$ ,  $S_{film}$  променя драстично своята стойност и знак от около  $-30\text{ }\mu\text{V/K}$  до  $90\text{ }\mu\text{V/K}$ . Необходимо е да се спомене, че този механизъм не е напълно изучен, и предоставя възможности за бъдещи оригинални научни разработки, практически приложения и патенти, включително за ефективно рециклиране на топлинна енергия, изработка на бързи и прецизни сензори за кислород, и др. Към обзора на статията са включени и резултатите от изследванията на анизотропния метален делафосит PdCoO<sub>2</sub>, подробно описани по-горе. Работите по този изключително

интересен материал, бележат сериозен прогрес с експериментите по установяване на времето за реакция при генерирането на напрежение  $\tau_r$  в наноразмерни ( $d \approx 10 \text{ nm}$ ) тънки филми от  $\text{PdCoO}_2$  нарастнати върху вицинални повърхнини на монокристални  $\text{Al}_2\text{O}_3$  подложки с различен ъгъл на инклинация  $\theta$  - статия [\[№ 17\]](#) (представена в група **В.4.**). Наклоненото нарастване на слоест материал със силна пространствена анизотропия на коефициента на Зиибек  $\Delta S = S_{ab} - S_c$ , води до появата на специален термоелектричен ефект – т. нар. напречен термоелектричен ефект, при който посоките на температурния градиент и генерираното напрежение са перпендикулярни  $U_x = l \sin 2\theta \Delta S \Delta T_z / 2d$ . Ефектът не само прави възможно използването на тънки филми, но и въвежда параметър (време за реакция) принципно нехарактерен за термоелектричния ефект. Времето за реакция тук зависи от дебелината на тънкия филм на степен втора и е обратнопропорционално на термалната дифузия на материала  $\tau_r \approx 0.4 d^2 / D_z$ . При това положение, при наноразмерни филми и прецизен подбор на материал, времена за реакция от порядъка на  $\tau_r \approx 10^{-1} \text{ s}$ , стават напълно постижими. Обикновено времето за реакция се тества с къси наносекундни ( $10^{-9} \text{ s}$ ) лазерни импулси насочени към тънкия филм, а формата и големината на напрежението се измерват с осцилоскоп. Изследване отива по-далеч, като показва, че електроните в тънките филми от  $\text{PdCoO}_2$  са толкова подвижни, че успяват да реагират и на фемтосекундни лазерни импулси ( $10^{-15} \text{ s}$ ), чрез генерирането на ултрабърз токов импулс водещо от своя страна до излъчване на електромагнитно лъчение в терахерцовата област. С изключение на физическото провеждане на експеримента по детекция на генерираното терахерцово излъчване, д-р Петър Йорданов има водеща роля и главен принос във всички представени концепции, резултати, моделно описание, дискусии и изводи в този труд. Освен публикация в престижно научно списание, откритието доведе и до регистрация на европейски и световен патент [\[П1,П2\]](#), в които кандидата е главен изобретател.

## Литература

- [1] Basic aspects of the quantum theory of solids by D. Khomskii, Cambridge University Press (2010).
- [2] Orbital physics in transition metal compounds: new trends by S. Streltsov and D. Khomskii (2017).
- [3] Metal-insulator transitions, M. Imada *et al.* *Rev.Mod.Phys.* **70**, 1039 (1998).
- [4] Localized to itinerant electronic transition in perovskite oxides by J.B. Goodenough, Springer (2001).
- [5] From quantum matter to high-temperature superconductivity in copper oxides, B. Keimer *et al.* *Nature* **518**, 179 (2015).

- [6] Colossal magnetoresistive manganites, T. Chatterji, Kluwer Academic (2004).
- [7] Thermopower in cobalt oxides, Koshibae *et al.* *PRB* **62** (2000).
- [8] Emergent phenomena at oxide interfaces, H. Y. Hwang *et al.* *Nat. Mater.* **11** 103 (2012).

**Списък на статиите, представени от г-р Петър Йорданов за участие в конкурса**

**[№ 1] Influence of grain size on the optical conductivity of  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> layers**

M. Baleva, E. Goranova, V. Darakchieva, S. Kossionides, M. Kokkosis, P. Jordanov  
*Vacuum* **69**, 425–429 (2003).

**[№ 2] Ion beam synthesis of Mg<sub>2</sub>Si**

E. Goranova, B. Amov, M. Baleva, E. Trifonova, P. Yordanov  
*J. Materials Science* **39**, 1857–1859 (2004).

**[№ 3] Optical response of ferromagnetic YTiO<sub>3</sub> studied by spectral ellipsometry**

N. N. Kovaleva, A. V. Boris, P. Yordanov, A. Maljuk, E. Brücher, J. Stremper, M. Konuma, I. Zegkinoglou, C. Bernhard, A. M. Stoneham and B. Keimer  
*Phys.Rev. B* **76**, 155125 (2007).

**[№ 4] Evidence for Two Separate Energy Gaps in Underdoped High Temperature Cuprate Superconductors from Broadband Infrared Ellipsometry**

Li Yu, D. Munzar, A.V. Boris, P. Yordanov, J. Chaloupka, Th. Wolf, C.T. Lin, B. Keimer and C. Bernhard  
*Phys.Rev.Lett.* **100**, 177004 (2008).

**[№ 5] Dipole-active optical phonons in YTiO<sub>3</sub>: Ellipsometry study and lattice-dynamics calculations**

N. N. Kovaleva, A. V. Boris, L. Capogna, J. L. Gavartin, P. Popovich, P. Yordanov, A. Maljuk, A. M. Stoneham, and B. Keimer

*Phys.Rev. B* **79**, 045114 (2009).

**[Nº 6] Ferromagnetism and lattice distortions in the perovskite  $\text{YTiO}_3$**

W. Knafo, C. Meingast, A.V. Boris, P. Popovich, N.N. Kovaleva, P. Yordanov, A. Maljuk, R.K. Kremer, H. v. Löhneysen and B. Keimer

*Phys.Rev. B* **79**, 054431 (2009).

**[Nº 7] Charge transport and magnetization profile at the interface between the correlated metal  $\text{CaRuO}_3$  and the antiferromagnetic insulator  $\text{CaMnO}_3$**

J. W. Freeland, J. Chakhalian, A. V. Boris, J.-M. Tonnerre, J. J. Kavich, P. Yordanov, S. Grenier, P. Zschack, E. Karapetrova, P. Popovich, H. N. Lee, and B. Keimer

*Phys.Rev. B* **81**, 094414 (2010).

**[Nº 8] Far-infrared and dc magnetotransport of  $\text{CaMnO}_3$ - $\text{CaRuO}_3$  superlattices**

P. Yordanov, A. V. Boris, J. W. Freeland, J. J. Kavich, J. Chakhalian, H. N. Lee, and B. Keimer

*Phys. Rev. B* **84**, 045108 (2011).

**[Nº 9] An alternative composite approach to tailor the thermoelectric performance in  $\text{SiAlON}$  and  $\text{SiC}$**

Pinar Kaya, Giuliano Gregori, Petar Yordanov, Erhan Ayas, Hanns-Ulrich Habermeier, Joachim Maier, Servet Turan

*Journal of the European Ceramic Society* **37** 3367–3373 (2017).

**[Nº 10] Perovskite substrates boost the thermopower of cobaltate thin films at high temperatures**

P. Yordanov, P. Wochner, S. Ibrahimkuty, C. Dietl, F. Wrobel, R. Felici, G. Gregori, J. Maier, B. Keimer, and H.-U. Habermeier

*Appl. Phys. Lett.* **110**, 253101 (2017).

**[Nº 11] Phosphide–Tetrahedrite  $\text{Ag}_6\text{Ge}_{10}\text{P}_{12}$ : Thermoelectric Performance of a Long-Forgotten Silver-Cluster Compound**

Jürgen Nuss, Ulrich Wedig, Wenjie Xie, Petar Yordanov, Jan Bruin, Ralph Hübner, Anke Weidenkaff, and Hidenori Takagi

*Chem. Mater.* **29**, 6956–6965, (2017).

**[Nº 12] High-Temperature Thermoelectricity in  $\text{LaNiO}_3$  –  $\text{La}_2\text{CuO}_4$  Heterostructures**

Pinar Kaya, Giuliano Gregori, Federico Baiutti, Petar Yordanov, Y. Eren Suyolcu, Georg Cristiani, Friederike Wrobel, Eva Benckiser, Bernhard Keimer, Peter A. van Aken, Hanns-Ulrich Habermeier, Gennady Logvenov, Joachim Maier

*ACS Applied Materials & Interfaces*, acsami.8b02153 (2018).

**[Nº 13] Large thermopower anisotropy in  $\text{PdCoO}_2$  thin films**

P. Yordanov, W. Sigle, P. Kaya, M. E. Gruner, R. Pentcheva, B. Keimer, and H.-U. Habermeier

*Phys. Rev. Materials* **3**, 085403 (2019).

**[Nº 14] Atomic-scale Considerations on  $\text{LaNiO}_3$ - $\text{La}_2\text{CuO}_4$  Heterostructures: Interface—thermoelectricity Relationship**

Pinar Kaya, Y Eren Suyolcu, Federico Baiutti, Petar Yordanov, Georg Christiani, Friederike Wrobel, Eva Benckiser, Bernhard Keimer, Hanns-Ulrich Habermeier, Giuliano Gregori, Gennady Logvenov, Peter van Aken, Joachim Maier

*Microscopy and Microanalysis* **26**, 2626 (2020).

**[Nº 15] High-temperature electrical and thermal transport properties of polycrystalline  $\text{PdCoO}_2$**

P. Yordanov, A. S. Gibbs, P. Kaya, S. Bette, W. Xie, X. Xiao, A. Weidenkaff, H. Takagi, and B. Keimer

*Phys. Rev. Materials* **5**, 015404 (2021).

**[Nº 16] Tuning the thermoelectric properties of transition-metal oxide thin films and superlattices on the quantum scale**

Benjamin Geisler, Petar Yordanov, Markus Ernst Gruner, Bernhard Keimer, Rossitza Pentcheva

*Phys. Status Solidi B*, 2100270 (2021).

**[Nº 17] Generation of terahertz radiation via the transverse thermoelectric effect**

Petar Yordanov, Tim Priessnitz, Min-Jae Kim, Georg Cristiani, Gennady Logvenov, Bernhard Keimer, Stefan Kaiser

*Adv. Mater.* **35**, 2305622 (2023).

**Π1. World patent: WO2022233677A1**

“AN ELECTROMAGNETIC RADIATION SOURCE AND METHOD FOR THE GENERATION OF TERAHERTZ RADIATION BASED ON THE TRANSVERSE THERMOELECTRIC EFFECT”.

YORDANOV, Petar; PRIESSNITZ, Tim; KIM, Min-Jae; KAISER, Stefan; KEIMER, Bernhard

**Π2. European patent: EP4086699A1**

“AN ELECTROMAGNETIC RADIATION SOURCE AND METHOD FOR THE GENERATION OF TERAHERTZ RADIATION BASED ON THE TRANSVERSE THERMOELECTRIC EFFECT”.

YORDANOV, Petar; PRIESSNITZ, Tim; KIM, Min-Jae; KAISER, Stefan; KEIMER, Bernhard