

ХИМИКОТЕХНОЛОГИЧЕН И МЕТАЛУРГИЧЕН УНИВЕРСИТЕТ ДЕПАРТАМЕНТ ПО ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧНИ И ТЕХНИЧЕСКИ НАУКИ

КАТЕДРА "ФИЗИКА"

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

на дисертационния труд на Ала Мохамед Мохамед Адам

на тема:

ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИ Ві₂Se₃-Ві₂Те₃ ТЪНКИ СЛОЕВЕ

за придобиване на образователна и научна степен "доктор" по научна специалност 4.1. "Физични науки" (Електрични, магнитни и оптични свойства на кондензираната материя)

Научен ръководител:

проф. д-р инж. Пламен Петков

Научно жури:

- 1. Доц. д-р Ружа Харизанова председател, рецензент
- 2. Проф. д-р инж. Пламен Петков становище
- 3. Проф. дфн Дориана Малиновска рецензент
- 4. Доц. д-р Димана Назърова становище
- 5. Проф. д-р Бранимир Банов становище

София, 2015

Дисертационният труд е написан на 182 страници, съдържа 46 фигури и 10 таблици.

Цитирани са 203 литературни източника.

Представеният дисертационен труд е обсъден и приет за зашита на заседание на научен съвет на катедра "Физика", състояло се на 18.11.2015 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се проведе на **21.01.2015** г от **14:00** часа в зала **210**, сграда "А" на ХТМУ.

Материалите са на разположение на интересуващитесе на интернет страницата на XTMУ и в отдел "Научни дейности", етаж 4, сграда "А" XTMУ.

УВОД

В световен мащаб енергийният дефицит генерира социално и политическо напрежение. Освен това, все повече нараства негативният ефект върху околната среда от глобалното затопляне на климата, в резултат от изгарянето на полезни изкопаеми. Един от начините за подобряване на енергийната ефективност е използването на термоелектрични генератори за оползотворяване на отпадната топлина. Термоелектричните генератори представляват надеждни твърдотелни апарати, които са безшумни и лесно се мащабират. Това ги прави подходящи за захранване на устройства с ниска електроконсумация [1]. Усилията да се замени автомобилния алтернатор с термоелектричен генератор за отработените газове, с което се цели подобряване на горивната ефективност, са вече на лице [2]. Развитието в областта на термоелектричеството би позволило хладилните компресори да се заменят с твърдотелни охладители с елемент на Пелтие [3].

През изминалите 40 години, термоелектричните генератори успешно преобразуват отпадна топлина в електричество, както на Земята, така и в междузвездното пространство, доказателство за което е използването им в космическите сонди като Voyager. Ключово предимство на термоелектричните системи е тяхната мащабируемост-източниците на отпадна топлина и когенераторните системи могат да бъдат толкова малки, колкото един домашен бойлер или толкова големи, колкото например е един промишлен или геотермален източник.

До момента най-широка употреба в термоелектричните елементи намират сплави от системите Bi₂Te₃ и Sb₂Te₃. За първи път Bi₂Te₃ е изследван като многообещаващ термоелектричен материал през 1950 година [4-8].

Цел на представения дисертационен труд:

Основните цели на представения дисертационен труд са свързани с изследването на нови халкогенидни стъклообразни материали от системата Bi₂Te₃-Bi₂Se₃ и постигането на по-високи стойности на термоелектричната ефективност в температурния интервал от 300 до 500 К.

Изследваните тънки слоеве от системата Bi₂Te₃-Bi₂Se₃, са получени по два различни метода, чрез импулсно лазерно отлагане (PLD) и вакуумно термично изпарение (VTE), с

което се цели освен сравнително разглеждане на техните термоелектрични и оптични свойства, така също и установяване на оптималните условия за получаване на тънкослойни материали от системата Bi₂Te₃-Bi₂Se₃ за приложение в термоелектрични елементи.

I. <u>Експериментална част.</u>

1.Получаване на масивни образци.

Обемните образци със стехиометричен състав Bi_2 (Se_{1-x}Te_x)₃, където x = 0%, 10%, 20% 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% и 100% са получени чрез директен еднотемпературен синтез в затворен обем. За изходни вещества са използвани съответните химични елементи с чистота 5N (99.999%).

2. Получаване на тънки слоеве.

2.1.Получаване на тънки слоеве чрез VTE.

Отлагането на тънките филми от системата $Bi_2(Se_{1-x}Te_x)_3$, където x=0.00÷1.00, се осъществява с помощта на вакуумна инсталация "В 30.2 Носhvakuum". Условията на отлагане са следните: остатъчно налягане в камерата 10^{-6} torr, разстояние между източника на изпарение и подложката – 0.12 m, температура на изпарение между 600 и 700 K, в зависимост от състава на материала. За изпарител е използван индуктивно нагряван танталов изпарител. Конструкцията на изпарителя осигурява получаването на тънки слоеве без тримерни нарушения от рода на пори. Дебелината на тънките слоеве е определена по интерференчен метод и чрез атомно-силова микроскопия.

2.2.Получаване на тънки слоеве чрез PLD.

Импулсно лазерното отлагане на слоевете от системата Bi₂ (Se_{1-x}Te_x)₃, където x=0.00÷1.00, е проведено във високовакуумна камера за отлагане на слоеве, използвайки ултравиолетов лазер KrF* (λ =248 nm, τ_{FWHM} =25 ns), при честота на повтаряне от 2 Hz и падащ поток от 3.3 J/cm². Отлагането е проведено при стайна температура и работно налягане от 4.10⁻⁴ Pa. Подложките са разположени паралелно на мишената на разстояние 3 ст. За изследване на повърхността на получените тънки слоеве и определяне на тяхната дебелина е използвана атомно-силова микроскопия.

II. <u>Резултати и дискусия.</u>

1.Анализ на получените обемни образци.

1.1. Рентгенова дифракция (XRD).

За снемане на рентгеновите спектри е използван рентгенов дифрактометър Philips Xpert с CuK_α лъчение с дължина на вълната λ =1.5406 Å. На фиг. 1 (В) е показана дифрактограма на образци със състав Bi₂(Se_{1-x}Te_x)₃, x=0.60, 0.70, 0.80, 0.90 и 1.00. Всички наблюдавани пикове могат да бъдат идентифицирани със стандартните карти и JCPDS данните за дифракция на прахообразен Bi₂Te₃ и Bi₂Se₃.



Фиг. 1 (В): Дифрактограма на образци със състав $Bi_2(Se_{1-x}Te_x)_3$, x=0.60, 0.70, 0.80, 0.90 и 1.00.

1.2. Термичен анализ на обемните образци от системата Bi₂(Se_{1-x}Te_x)₃, x=0.00÷1.00.

Термичният анализ е проведен с термоанализатор STA, при който диференциално сканиращите (DSC) и термогравиметричните (TG) криви се записват едновременно при едни същи условия. Скоростта на нагряване е 10 °C min⁻¹, а масата на прахообразните проби от 12.30 до 12.50 mg.

Получените стойности за температурата на кристализация T_c и температурата на топене T_m на изследваните състави са обобщени в таблица 1.

Темпер	ратура
1	21

Табл.1:			
на	Състав	$T_{c}(^{\circ}C)$	$T_m(^{\circ}C)$
	Bi ₂ Se ₃	411	578
	$Bi_2Se_{2.7}Te_{0.3}$	378	600
	$Bi_2Se_{2.4}Te_{0.6}$	412	585.6
	$Bi_2Se_{2.1}Te_{0.9}$	385	618.5
	$Bi_2Se_{1.8}Te_{1.2}$	415.5	593
	$Bi_2Se_{1.5}Te_{1.5}$	408	629
	$Bi_2Se_{1.2}Te_{1.8}$	426.7	583
	$Bi_2Se_{0.9}Te_{2.1}$	428.5	589
	$Bi_2Se_{0.6}Te_{2.4}$	418	607
	$Bi_2Se_{0.3}Te_{2.7}$	500	582
	Bi ₂ Te ₃	551.5	623.3

кристализация и топене на образци със състав $Bi_2(Se_{1-x}Te_x)_3$, където x=0.00÷1.00.

1.3. Сканираща електронна микроскопия (SEM) на масивни образци със състав Bi₂(Se_{1-x}Te_x)₃, където x=0.00÷1.00.

Информация за морфологията и състава на синтезираните обемни образци е получена от проведения SEM анализ, комбиниран с EDAX (енергийно дисперсионна рентгенова спектроскопия).



Фиг. 2: SEM снимки на Bi₂Se₃ (A), Bi₂Se_{0.6}Te_{2.4} (D).

Резултатите от количествения анализ на образците със състав Bi₂Se₃, Bi₂Se_{2.4}Te_{0.6}, Bi₂Se_{1.5}Te_{1.5}, Bi₂Se_{0.6}Te_{2.4} и Bi₂Te₃, проведен чрез EDAX, е даден в таблица 2.

Табл.2. Количествен анализ на елементите Bi, Se и Te в Bi_2Se_3 , $Bi_2Se_{2.4}Te_{0.6}$, $Bi_2Se_{1.5}Te_{1.5}$, $Bi_2Se_{0.6}Te_{2.4}$ и Bi_2Te_3 , проведен чрез EDAX.

Compound	Element	At%
Bi ₂ Se ₃	Bi	40.14
t i i i i i i i i i i i i i i i i i i i	Se	59.59
	Bi	40.16
BisertTeac	Se	48.89
D 20 024 2 000	Te	10.95
	Bi	40.05
Bi ₂ Se _{1.5} Te _{1.5}	Se	22.98
ľ	Te	36.97
	Bi	40.12
Bi ₂ Se _{0.6} Te _{2.4}	Se	17.45
	Te	42.43
Bi ₂ Te ₃	Bi	40.07
Ť	Te	59.93

2. Физико-химични свойства на масивни образци от системата Bi₂Te₃-Bi₂Se₃.

Определени са физико-химични свойства като плътност, компактност, моларен обем и свободен обем на образците със състав Bi₂(Se_{1-x}Te_x)₃, където x=0.00÷1.00. Добавянето на телур към Bi₂Se₃ води до нарастване на плътността на образците, както и на

всички останали физико-химични характеристики. Това увеличаване на стойностите може да се свърже с по-големия атомен радиус и обем на телура.

Плътностите (р) на всички образци са измерени пикнометрично, използвайки закона на Архимед. Точността на измерване на масата е ± 0.0001 kg, а точността на измерването ± 0.01 kg/m³. Измерванията са проведени в среда на дестилирана вода при стайна температура. Определените стойности за плътността са в интервала между $6.75 \div 9,00.10^3$ kg/m³. Въпреки значителната разлика в плътностите на телура и селена, е установено, че плътността на получените образци от системата $Bi_2(Se_{1-x}Te_x)_3$, където x=0.00÷1.00, зависи от състава им, както това се вижда от фиг. 4.



Фиг. 3: Зависимост на плътността от съдържанието на телур при образци със състав Bi₂(Se_{1-x}Te_x)₃, където x=0.00÷1.00.

Характеристика на тънките слоеве, получени чрез VTE:

Тънките слоеве, получени чрез вакуумно термично изпарение от съответните обемни образци със състав $Bi_2(Se_{1-x}Te_x)_3$, където x=0.00÷1.00 са анализирани, като е използван рентгеново дифракционен анализ (XRD), сканираща електронна микроскопия (CEM) и трансмисионна електронна микроскопия (TEM).

Резултатите от проведените анализи на състава и структурата на отложените тънки слоеве, показват, че те са аналогични с тези на съответните обемни образци. На изображенията, получени от SEM, не се наблюдават нееднородности, а само формирането на малки зрънца при слоеве с по-малка дебелина (около 50 nm).



Фиг. 4: SEM изображения на тънки филми от системата Bi₂(Se_{1-x}Te_x)₃, x=0.30; 0.50.

ТЕМ анализът показва, че слоевете като цяло са кристални, въпреки че на отделни места се регистрират и аморфни фази. Освен това ТЕМ анализът показва, че няма значителна разлика в структурата на слоевете от Bi₂Se₃ и тези от Bi₂Te₃, но въпреки това тънките слоеве от Bi₂Te₃ по-лесно кристализират.



Фиг. 5: HRTEM (a, b, c) и SAED (d) снимка на тънък слой от Bi_2Te_3 .

3.Измерване на коефициента на Зеебек.

Термоелектричната мощност или термомощността са измерени по двусондов метод. Сондите се фиксират с помощта на паста от колоидно сребро по повърхността на тънкия

филм в права линия и се усилват с епоксид. Полученото индуцирано термоелектрично напрежение E_{th} е пропорционално на температурната разлика $\Delta T = T_2 - T_1$ и се измерва с електрометър KEITHLEY 6514.

Коефициентът на Зеебек (α) може да се изчисли по формулата:

$$\alpha = \frac{E_{th}}{\Delta T},$$

където E_{th} е индуцираното термоелектрично напрежение, а Δ T-температурната разлика.

Изчисляването на коефициента на Зеебек (S) като функция от температурата дава възможност да се определи енергията на активация на термомощността (E_s).

Функционалната зависимост на коефициентът на Зеебек е определена в широк температурен интервал от 300 до 500 К за тънки филми със състав $Bi_2(Se_{1-x}Te_x)_3$, x=0.00÷1.00, като обстойно е изследван ефектът от добавянето на Те.



Фиг. 6: Температурна зависимост на коефициента на Зеебек за тънки слоеве от системата Bi₂(Se_{1-x}T_x)₃, , където x=0.00÷1.00, получени чрез VTE.

Абсолютната стойност на коефициента на Зеебек намалява с увеличаване на температурата, като достига минимална стойност при определена температура (T_m), след която постоянно расте с увеличаване на температурата. Тази температурна зависимост на коефициента на Зеебек при всички проби е индикатор за преход полупроводник-метал (SMT), което съответства на данните, получени за електропроводимостта. За всички проби е установено добро съответствие на резултатите за температурната зависимост на

коефициента на Зеебек в целия температурен интервал, под и над температурата на преход, с получените съгласно по-долу представеното уравнение:

$$S = \pm \frac{K_B}{e} (\frac{E_S}{K_B T} + A)$$

Е_s-енергия на активация на термомощността;

А-безразмерен параметър, свързан с механизма на разсейване или мярка за кинетичната енергия на токовите носители.

Както се вижда от фиг. 12, графиката на зависимостта (-S) от 1000/Т е с три линейни участъка. В нискотемпературния участък, стойностите на коефициента на Зеебек драстично намаляват, което може де се свърже със създаване на заредени дефекти, водещи до проводимост от р-тип. Дупчестата проводимост на образците нараства, но все още не е преобладаваща, като изключение правят само образци със състав x=0.40 и x=0.70. При по-високи температури е характерно плавно изменение на коефициента на Зеебек от температурата, свързана с плавно намаляване на подвижността на токовите носители с нарастване на температурата, което води отново до преобладаваща проводимост от п-тип.





Фиг. 7: Графично представяне на зависимостта на коефициента на Зеебек от температурата за тънки филми от системата $Bi_2(se_{1-x}T_x)_3$, където x=0.00÷1.00.

Получените данни са обобщени в таблица 3.

Табл. 3: Температура на преход T_m и енергия на активация на термомощността E_{s1} , E_{s2} и E_{s3} на тънки филми от системата $Bi_2(Se_{1-x}Te_x)_3$, където $x=0 \div 1.00$.

Образец	Температура на преход (К)	Енергия на активация (Ev)		
	T_{m}	E _{S1}	E _{S2}	E _{S3}
X=0.00	345	-5.7519	-0.484	0.1246
X=0.10	345	-1.7286	-0.4519	0.17321
X=0.20	340	-0.1099	0.0372	
X=0.30	330	-0.155	-0.0805	0.047
X=0.40	430	-1.016	0.383	0.0804
X=0.50	385	-2.164	0.439	0.069
X=0.60	315	-0.259	-0.208	0.0599
X=0.70	350	-0.40925	0.10005	
X=0.80	390	-0.397	0.229	0.24189
X=0.90	325	-0.4928	-0.625	0.0924
X=1.00	340	-0.3579	0.128	

4.Измерване на електропроводимостта.

Изследването на електричните свойства на тънките филми от системата $Bi_2(Se_{1-x}Te_x)_3$ (x=0.00-1.00) е проведено, за да се установи температурната зависимост на електропроводимостта, механизмът на проводимост и типа проводимост на материала. За целта е определена температурната зависимост на електропроводимостта на тънките слоеве в интервала 300÷500 К. Използван е четири сондов метод. Наблюдава се намаляване на електропроводимостта с нарастване на температурата. Обикновено стойностите за електропроводимостта на тънките филми са различни от тези на съответните обемни образци, поради по-високите стойности на електричното съпротивление на тънките слоеве, свързани с образуване на много малки по размер клъстери, което от своя страна въздейства върху вътрешното разсейване на токовите носители. Наличието на дефекти може да доведе до образуването на йонизирани състояния при повишаване на температурата, които предоставят свободни електрони и водят до намаляване на абсолютната стойност на електричното съпротивление.



Фиг. 8: Температурна зависимост на електропроводността за тънки слоеве от системата Bi_2 (Se_{1-x}Te_x)₃ (x=0.00, 0.50), получени чрез VTE.

5. Термоелектрична ефективност.

За увеличаване на термоелектричната ефективност (ZT) на даден материал се изисква висока термомощност, висока електропроводимост и малка термична проводимост.

Зависимостта на коефициента на термична проводимост от електропроводимостта се дава от закона на Wiedemann–Franz:

$$K_{eL} = L\sigma T$$
,

където L е число на Лоренц, К_{еL}-коефициент на електронна термична проводимост.

В поликристални стопилки К_{ph} има ниски стойности и в сравнение с K_{eL} може да се пренебрегне [9]. При повечето термоелектрични материали коефициентът на термична проводимост се пренебрегва в температурния интервал между 300 и 500 К [10].

Термоелектричната ефективност (ZT) на тънки филми от системата Bi₂ (Se_{1-x}Te_x)₃, където x=0.00÷1.00, е определена на базата на измерения коефициент на Зеебек и

електропроводимостта и изчислената електронна термична проводимост. На фиг. 9 е представена графично зависимостта на термолектричната ефективност от температурата. С увеличаване на температурата се наблюдава значително нарастване на ZT при всички изследвани образци.



Фиг. 9: Функционална зависимост на ZT от температурата на околната среда.

6.Оптични свойства на тънки слоеве, получени чрез VTE.

Спектрите на пропускане и отражение на отложените тънките филми са получени при стайна температура, като е използван двуканален спектрофотометър UV-VIS-NIR модел V-670, при дължина на вълната в интервала между 400 nm и 2700 nm.



Фиг. 10: Спектри на пропускане на тънки филми от системата $Bi_2(Se_{1-x}Te_x)_3$, (x=0.00-1.00), с дебелина 75nm.



Фиг. 11: Зависимост на коефициента на пропускане от състава при λ=550 и 900 nm.

От получените спектри на пропускане и отражение е изчислен коефициентът на абсорбция, с помощта на който е определен и коефициентът на екстинкция.



Фиг. 13: Коефициент на абсорбция и коефициент на екстинкция на тънки филми от системата $Bi_2(Se_{1-x}Te_x)_3$, (x=0.00÷1.00).

От коефициента на екстинкция и коефициента на отражение съгласно по-долу дадената формула е определен показателят на пречупване на тънките слоеве.

$$n = \frac{1+R}{1-R} + \left[\left(\frac{R+1}{R-1} \right)^2 - \left(1+k^2 \right) \right]^{1/2}$$



Фиг. 12: Зависимост на показателя на пречупване от дължината на вълната на тънки филми от системата Bi₂ (Se_{1-x}Te_x), получени чрез VTE.

Определена е оптична ширина на забранената зона чрез процедурата на Таис.



Фиг. 13: Зависимост на $(\alpha hv)^2$ от енергията на фотона при тънки филми от системата $Bi_2(Se_{1-x}Te_x)_3$, получени чрез VTE.

Както се вижда от графиката по-долу, добавянето на Те води до забележимо намаляване на оптичната ширина на забранената зона, което може да се свърже с поголемия коефициент на абсорбция на тънките филми дотирани с телур.



Фиг. 14: Функционална зависимост на оптичната ширина на забранената зона от концентрацията на Те в тънки филми от системата Bi₂(Se_{1-x}Te_x)₃, където x=0.00÷1.00, получени чрез VTE.

7.Анализ на тънките слоеве, получени чрез PLD.

7.1.XRD анализ.

Проведен е XRD анализ на тънките филми от системата $Bi_2(Se_{1-x}Te_x)_3$, където x=0.00, 0.50 и 1.00. Кристалната структура на слоевете получени чрез PLD е различна от структурата на филмите, получени чрез VTE. При PLD слоевете се наблюдават допълнителни фази като BiTe и Bi₃Te₄.



Фиг. 15: Дифрактограми на тънки слоеве от системата Bi₂(Se_{1-x}Te_x)₃ x=0.00 и 1.00, получени чрез PLD.

7.2.Атомно-силова микроскопия (AFM).

Морфологията и структурата на получените тънки слоеве е изследвана чрез атомносилова микроскопия. От 3D изображенията се вижда, че повърхностната грапавост на слоевете, получени чрез PLD намалява при добавяне на телур, което може да се свърже с добрата адхезивност на телура към подложката и образуването на Bi₂Te₃.





Фиг. 16: 2D и 3D изображения от повърхността на тънките слоеве, получени чрез AFM.

От представените изображения се вижда, че чрез PLD се получават слоеве с пореста повърхност, чиято структура наподобява "рибарска мрежа".

8.

Оптични свойства на тънки филми от системата Bi₂(Se_{1-x}Te_x)₃, получени чрез PLD.

Спектрите на пропускане и отражение на тънките филми, получени чрез PLD са снети с помощта на спектрофотометъра, използван при слоевете, отложени чрез вакуумно термично изпарени. По аналогичен начин е определен коефициентът на абсорбция, коефициентът на екстинкция и показателят на пречупване.



Фиг. 17: Спектри на пропускане (а), коефициент на абсорбция (б), коефициент на екстинкция (к) и зависимост на оптичната ширина на забранената зона от съдържанието на телур (г) на тънки филми от системата Bi_2 ($Se_{1-x}Te_x$)₃, където x=0.00, 0.50 и 1.00, получени чрез PLD.

В таблицата по-долу е представено сравнително разглеждане на стойностите на коефициента на абсорбция на тънките слоеве със съответните състави, получени по двата различни метода.

a)

	Коефициент на абсорбция x10 ⁶ (m ⁻¹) при 1000 nm		
Състав	VTE	PLD	
X=0.00	6.758	7.835	
X=0.50	12.824	55.011	
X=1.00	21.550	41.221	
	Коефициент на абсорбция х1	0 ⁶ (m ⁻¹) при 1500 nm	
X=0.00	2.391	5.904	
X=0.50	7.7125	19.342	
X=1.00	15.1561	14.740	
	Коефициент на абсорбция х1	0 ⁶ (m ⁻¹) при 2000 nm	
X=0.00	1.720	5.161	
X=0.50	5.805	14.499	
X=1.00	11.035	10.128	
	Коефициент на абсорбция x10 ⁶ (m ⁻¹) при 2500 nm		
X=0.00	1.468	4.750	
X=0.50	5.072	12.526	
X=1.00	8.778	8.630	

Табл. 4: Коефициент на абсорбция при различни дължини на вълната на тънки слоеве от системата Bi₂ (Se_{1-x}Te_x)₃, получени чрез PLD и VTE.

III Изводи:

Получени са обемни образци от системата Bi₂ (Se_{1-x}Te_x)₃, където x= 0.00÷1.00, чрез директен еднотемпературен синтез в затворен обем от съответните изходни елементи.

Структурата и състава на получените обемни образци са анализирани с XRD и SEM. Проведено е и термично охарактеризиране на образците с комбиниран TG–DSC метод. Структурата на обемните образци от системата Bi₂Te₃-Bi₂Se₃ е обяснена от гледна точка на строежа на кристалнния Bi₂X₃, представляващ подредени в реда X–Bi–X–Bi–X, или Te–Bi–Se–Bi–Te, петслойни структурни единици от Bi и X хексагонални равнини, формиращи ромбоедрична решетка, в която единичните клетки се състоят от три слоя, свързани със слаби вандерваалсови връзки.

Определени са някои физико-химични свойства на обемните образци, като е изяснен ефектът от добавянето на Те към Bi₂Se₃ върху плътността, компактността, моларния обем и свободния обем на масивните образци.

По два различни метода, чрез вакуумно термично изпарение и импулсно лазерно отлагане, са получени тънки слоеве от съответните обемни образци от системата Bi_2 (Se_{1-x}Te_x)₃, където x = 0.00÷1.00. За анализ на филмите са използвани методите XRD, SEM, TEM и AFM. Резултатите показват, че тънките слоеве, получени и по двата метода, са хомогенни, с добра повърхностна грапавост и добра повърхностна морфология.

Възможността за употреба на получените тънки слоеве като термоелектрични материали е проверена, като е измерен коефициентът на Зеебек (S), електропроводимостта (σ) и термичната проводимост (k) на слоевете получени чрез (VTE). Електричната и термичната проводимост на получените слоеве са изключително ниски поради наличието на наноразмерни клъстери по повърхността на филмите. Коефициенът на Зеебек се характеризира с високи стойности при високи температури. Стойностите на ZT при високи температури са изключително благоприятни и показват възможност за употребата на тези материали в термоелектрични елементи.

Изучени са оптичните свойства на тънките филми от системата Bi_2 (Se_{1-x}Te_x)₃, където x = 0.00÷1.00, получени по двата различни метода. Определен е коефициентът на абсорбция, коефициентът на екстинкция, показателят на пречупване, както и ширината на забранената зона на тънките филми. Изяснен е ефектът от добавянето на Те към системата

Bi₂Se₃ върху оптичните свойства на тънкослойните материали. Получените резултати показват възможност за употребата им в оптични записващи устройства.

Публикации:

<u>1.</u> A.M. Adam, E. Lilov, P. Petkov, Advances in Natural Science: Theory & Applications, 4 (2015) 17-27.

<u>2.</u> A. Adam, E. Lilov and P. Petkov, Nanoscience Advances in CBRN Agents Detection, Information and Energy Security, (2015) 339-344.

Участия в научни форуми:

- **<u>1.</u>** Vth National crystallographic symposium, Sofia, Bulgaria 2014.
- Nanoscience Advances in CBRN Agents Detection, Information and Energy Security, Sozopol, Bulgaria 2014.
- **<u>3.</u>** 2nd international conference on new horizons in basic and applied science, Hurghada, Egypt 2015.

<u>Литература</u>

[1] Rowe, D. M. (ed.) CRC Handbook of &ermoelectrics (CRC, Boca Raton, 1995).

[2] Matsubara, K. in International Conference on &ermoelectrics 418-423 (2002).

[3] DiSalvo, F. J. Thermoelectric cooling and power generation. Science 285, 703–706 (1999).

[4] Heikes, R. R. & Ure, R. W. & ermoelectricity: Science and Engineering (Interscience, New York, 1961).

[5] Koumoto, K., Terasaki, I. & Funahashi, R. Complex oxide materials for potential thermoelectric applications. Mater. Res. Soc. Bull. 31, 206–210 (2006).

[6] Mahan, G. D. in Solid State Physics Vol. 51 (eds Ehrenreich, H. & Spaepen, F.) 81–157 (Elsevier, 1998).

[7] Rosi, F. D. Thermoelectricity and thermoelectric power generation. Solid-State Electron. 11, 833–848 (1968).

[8] Goldsmid, H. J. & Douglas, R. W. The use of semiconductors in thermoelectric refrigeration. Brit. J. Appl. Phys. 5, 386–390 (1954).

[9] L.I. Soliman, M.M. Nassary, H.T. Shaban, A.S. Salwa, Vacuum 85, 358-364(2010).

[10] A.J. Minnish, M.S. Dresselhause, Z.F. Ren, G. Chen, Energy Envirom. Sci, 2009, 2,466.