

ПРИГОТОВЛЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЁНОК TmTe И ИХ ОПТИЧЕСКИЕ, ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

З. Джабуа, Н. Туркадзе, А. Гигинеишвили

*Грузинский технический университет,
Департамент инженерной физики,
Тбилиси, Грузия*

Поступила в редакцию 29.12.2017

Разработана технология приготовления тонких кристаллических плёнок TmTe методом вакуумно-термического испарения из двух независимых источников — Tm и Te. При комнатной температуре в области энергии фотонов 0,6–3,9 эВ измерен спектр поглощения приготовленных плёнок. Выявлено, что спектр поглощения имеет сложный характер с четырьмя максимумами. В температурной области 95–500 К исследована температурная зависимость удельного электросопротивления, постоянной Холла и термо-ЭДС. Показано, что согласно измерениям постоянной Холла плёнки имеют *n*-тип проводимости, а согласно измерениям термо-ЭДС — *p*-тип проводимости. Методом полного истирания измерена относительная механическая прочность плёнок и установлено, что относительная механическая прочность плёнок зависит от материала подложки.

Ключевые слова: тулия теллурид, термическое испарение, плёнка, оптическое поглощение, электросопротивление, постоянная Холла, термо-ЭДС, механическая прочность.

ПРИГОТУВАННЯ ТОНКИХ ПЛІВОК TmTe І ЇХ ОПТИЧНІ, ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

З. Джабуа, Н. Туркадзе, А. Гігінеішвілі

Розроблено технологію приготування тонких кристалічних плівок TmTe методом вакуумно-термічного випаровування з двох незалежних джерел — Tm і Te. При кімнатній температурі в області енергії фотонів 0,6–3,9 еВ виміряно спектр поглинання виготовлених плівок. Виявлено, що спектр поглинання має складний характер з чотирма максимумами. У температурній області 95–500 К досліджена температурна залежність питомого електроопору, постійної Хола і термо-ЕРС. Показано, що відповідно до вимірів постійної Хола плівки мають *n*-тип провідності, а відповідно до вимірів термо-ЕРС — *p*-тип провідності. Методом повного стирання виміряна відносна механічна міцність плівок і встановлено, що відносна механічна міцність плівок залежить від матеріалу підкладки.

Ключові слова: тулію телурид, термічне випаровування, плівка, оптичне поглинання, електроопір, постійна Хола, термо-ЕРС, механічна міцність.

PREPARATION OF TmTe THIN FILMS AND THEIR OPTICAL, ELECTROPHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES

Z. Jabua, N. Turkadze, A. Giginishvili

A processes has been developed for grown of thin crystalline films by thermal evaporation using Tm and Te separate sources. At room temperature the optical spectra of absorption have been studied at photon energy 0.6–3.9 eV. Temperature dependences of specific resistance, Hall constants and thermo-EMF are measured in temperature area 95–500 K. It is shown that according to measurements of a constant of Hall of a film have conductivity *n*-type, and according to measurements a thermo-EMF — conductivity *p*-type. The method of complete abrasion measured the relative mechanical durability of films. Researches showed that the relative mechanical durability of films depends on substrate material.

Keywords: thulium telluride, thermal evaporation, film, optical absorption, electrical resistance, Hall constant, thermo-EMF, mechanical durability.

ВВЕДЕНИЕ

Соединения редкоземельных металлов (РЗМ) с элементами VI группы периодической системы привлекают внимание исследователей своими интересными физическими свойствами [1–4]. Но не все соединения такого состава исследованы достаточно полно. Это особенно касается тонких плёнок. Известно, что часто свойства тонких плёнок отличаются от свойств объемного материала, поэтому разработка технологии приготовления тонких плёнок халькогенидов РЗМ и изучение их свойств является интересной задачей. К таким малоизученным соединениям относится монотеллурид тулия. В данной работе разработана технология приготовления тонких кристаллических плёнок TmTe на различных подложках, измерен спектр поглощения, исследованы электрофизические и механические свойства приготовленных плёнок.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Поликристаллические плёнки TmTe толщиной 0,6–1,9 мкм длиной 9 мм и шириной 5 мм приготовлены методом вакуумно-термического испарения из двух независимых источников Tm и Te. Испарение компонентов проводили джоулевыми испарителями. В процессе напыления температуры испарителей Tm и Te соответственно равнялись $\sim 1195 \pm 10$ К и $\sim 790 \pm 10$ К. Расстояния от испарителей Tm и Te до подложки соответственно были равны ~ 50 мм и ~ 40 мм. Угол наклона оси испарителя Tm по отношению к нормали поверхности подложки составлял $\sim 30^\circ$, а для Te $\sim 35^\circ$. Скорость напыления плёнок была равна $\sim 40\text{--}45$ Å/с. В разных экспериментах температуру подложки меняли в пределах 780–1150 К. В качестве исходных материалов служили тулий марки TmM-1 (суммарным содержанием контролируемых примесей La, Ce, Nd $\leq 0,2$ %, Fe $\leq 0,01$ %, Ca $\leq 0,01$ %, Cu $\leq 0,01$ %, Ta $\leq 0,02$ % и теллур марки Т-сЧ с содержанием теллура 99,999 %.

В качестве подложек использовали пластины прямоугольной формы с размерами $15 \times 5 \times 1$ мм из ситалла, монокристаллического кремния и сапфира. Фазовый состав и кристалличность плёнок определяли

рентгеновским и электронографическими методами. Рентгенограммы снимались на установке ДРОН-4 при $\text{CuK}\alpha$ излучении с никелевым фильтром в режиме непрерывной записи со скоростью 0,5–1 град/мин. Идентификацию полученных рентгенограмм проводили путём их сравнения с штрихдиagramмами, построенными на основе рентгенодифрактограмм объемных кристаллов TmTe. Электронограммы снимали на установке марки УЭМВ-100К «на отражение», при ускоряющем напряжении (75–100) кВ. Поверхность приготовленных плёнок снимали во вторичных рентгеновских лучах (установка Camebax-Microbeam). Состав плёнок определяли рентгеновским микрозондовым анализом на той же установке с использованием ЭВМ PDP-11/73. Методом Оже-спектрометрии на установке LAS-200 фирмы «Riber» определяли состав плёнок по толщине. Спектральная зависимость поглощения в области энергии фотонов 0,6–3,9 эВ исследована на установке КСВУ-2.

В области температур 95–500 К измерены температурные зависимости удельного электросопротивления, постоянной Холла и термо-ЭДС. Все измерения проводили на одной и той же серии однофазных плёнок толщиной 1,5 мкм, нанесенных на ситалловую подложку. Удельное электрическое сопротивление измеряли компенсационным методом, постоянную Холла — при постоянном магнитном поле напряженностью $16 \cdot 10^5$ А/м, а термо-ЭДС — абсолютным методом с поправкой на ЭДС меди. Точность измерения удельного электросопротивления и термо-ЭДС была не хуже 3–4 %, а постоянной Холла — 8–10 %.

В последнее время большое внимание уделяется изучению механических свойств тонких плёнок соединений редкоземельных элементов. Это вызвано тем, что часто плёнки, имеющие интересные электрические, оптические и другие свойства, обладают низкими механическими свойствами, что значительно ограничивает их практическое применение в различных приборах. Существуют многие способы изучения механических свойств плёнок. Из них нами выбран метод полного истирания [5]. Сущность метода (рис. 1) заключается

в том, что о механической прочности плёнки и о степени её прилипания к подложке можно судить по той работе, которую нужно затратить для того, чтобы полностью стереть плёнку с поверхности подложки. На исследуемую плёнку (2) опирается стержень (6), на нижнем конце которого закреплён рабочий материал — кусок замши с нанесенной на нее алмазной пастой. На стержень кладётся груз определённого веса. Соответствующим механизмом (7, 8) стержень приводят в поступательное движение взад и вперёд. Нагрузка на плёнку подбирается таким образом, что самая непрочная плёнка стирается с подложки после нескольких десятков прохождений нагрузки (при увеличении числа прохождений ошибка эксперимента увеличивается). Таким образом, прочность плёнки при постоянной нагрузке практически измеряется числом прохождений, которые требуются для полного истирания плёнки с подложки. Поскольку для описанной методики решающим фактором является толщина плёнки, все исследуемые нами плёнки имели одинаковую толщину — 0,9 мкм, а нагрузка также была одинаковой и составляла 230 г. Точность измерения относительной механической прочности составляет 10–12 %.

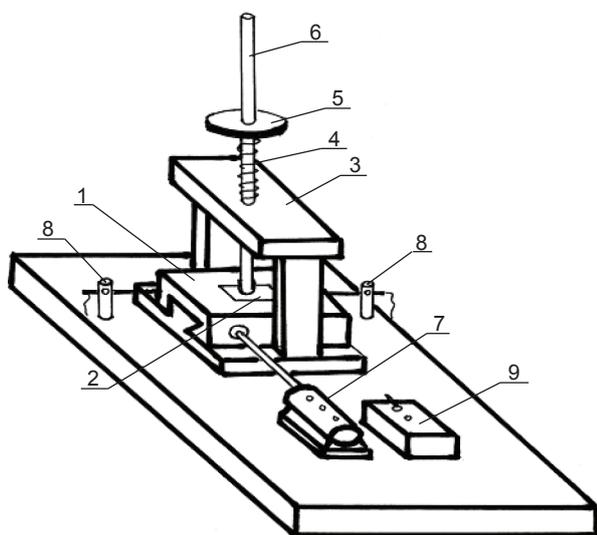


Рис. 1. Схема установки для исследования относительной механической прочности плёнок методом полного истирания: 1 — массивная плита; 2 — исследуемая плёнка; 3 — стойка; 4 — пружина; 5 — диск; 6 — стержень; 7 — электродвигатель; 8 — электрические щупальца; 9 — блок электропитания

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Опыты показали, что оптимальной температурой подложки является 1100 К. При температурах ниже оптимальной верхние слои плёнок содержали металлические включения в виде атомов тулия. При температурах выше 1100 К плёнки были двухфазными: поверхностные слои представляли фазу состава Tm_2Te_3 , а нижние собственно — TmTe. Только при температуре подложки 1100 К плёнки были однофазными состава TmTe. Согласно данным рентгенодифрактометрического анализа плёнки имели кристаллическую структуру типа NaCl с параметром решётки $a = 6,03 \text{ \AA}$, что хорошо согласуется с литературными данными для объемных образцов TmTe [6]. Согласно данным рентгеновского микроанализа пленки содержат $50,1 \pm 0,2$ ат. % Tm и $49,1 \pm 0,2$ ат. % Te и по снимкам поверхности плёнки, снятых во вторичных рентгеновских лучах, Tm и Te распределены достаточно равномерно. Оже-спектральный анализ показал, что состав пленок по толщине в пределах ошибки эксперимента (± 3 ат. %) не изменяется.

На рис. 2 представлен типичный спектр поглощения плёнок монотеллурида тулия, снятый при комнатной температуре. Из рисунка видно, что спектр имеет четыре хорошо выраженных максимума с энергией 1,25; 2,15; 2,76 и 3,51 эВ.

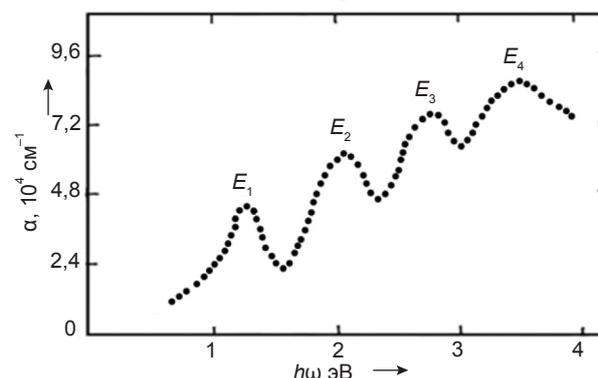


Рис. 2. Спектр поглощения плёнки TmTe

Схема зонного строения монотеллурида тулия не известна. Если воспользуемся методикой, применённой в работе [7] для анализа монохалькогенидов самария, которая основывается на схеме, разработанной Метфесселем [8] для монохалькогенида европия, и спектром поглощения кристаллов

CaF₂ и SrCl, в которые в качестве примеси введён двухвалентный ион самария [9, 10], можно предположить, что край поглощения и первый максимум связаны с переходом 4f электронов в нижнюю подзону 5d(t_{2g}), которая имеет два максимума плотности состояния, а полоса с максимумом энергии E₃ связана с переходом электронов на верхнюю подзону 5d(e_g), которая, в свою очередь, имеет также два максимума плотности состояний из-за спин-орбитального рассеяния. Существует иная интерпретация спектра поглощения SmX [11]. Полный гамильтониан для возбуждённого состояния двухвалентного иона самария 4f⁵5d записывается так: $H = H(0) + H_{\text{КП}}(d) + H_{\text{ЭО}}(f) + H_{\text{СО}}(f) + H_{\text{ЭО}}(f, d) + H_{\text{СО}}(d) + H_{\text{КП}}(f)$, где $H_{\text{КП}}$, $H_{\text{ЭО}}$, $H_{\text{СО}}$ в гамильтониане обозначают соответственно вклад пар взаимодействия кристаллического поля, электростатического отталкивания и спин-орбитального взаимодействия. Если пренебречь последними тремя членами, в первом приближении также можно пренебречь членом $H_{\text{СО}}(f)$ поскольку спин-орбитальная связь f-электронов слаба [11]. Кулоновское взаимодействие частично объясняет перерождение 4f кулоновского взаимодействия, создавая секстеты ⁶H, ⁶F, ⁶P. На рис. 3. приведена схема расположения энергетических уровней двухвалентного иона самария в монохалькогенидах самария.

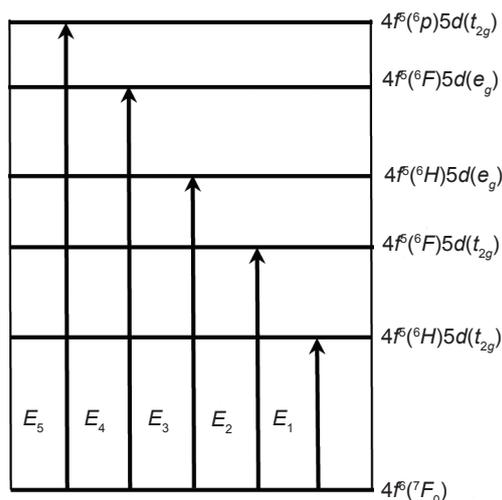


Рис. 3. Схема расположения энергетических уровней иона Sm²⁺ в монохалькогенидах

Учитывая всё это спектры поглощения TmTe можно интерпретировать следующими электронными переходами из основного

4f⁶(⁷F₀) состояния: E₁ — 4f⁶(⁶H)5d(t_{2g}), E₂ — 4f⁵(⁶F)5d(t_{2g}), E₃ — 4f⁵(⁶H)5d(e_g), E₄ — 4f⁵(⁶F)5d(e_g). В интервале температур 95–500 К изучены температурные зависимости постоянной Холла, удельного электросопротивления и термо-ЭДС (рис. 4–6). Все измерения проведены на одних и те же однофазных плёнках состава TmTe, приготовленных на сапфировой подложке. Постоянная Холла измерена на постоянном электрическом токе и при постоянном магнитном поле напряженностью 20000 Эрстед, а удельное электросопротивление — компенсационным методом. Термо-ЭДС измерена абсолютным методом с внесением поправки на термо-ЭДС меди. Точность измерения постоянной Холла была не меньше 8–10 %, удельного электросопротивления — 4–5 %, а термо-ЭДС — 5–6 %.

Опыты показали, что знак постоянной Холла соответствует n-типу проводимости и ее величина с температурой не изменяется (рис. 4), что говорит о том, что с изменением

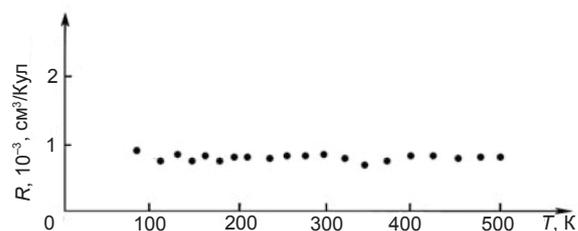


Рис. 4. Зависимость постоянной Холла от температуры плёнки TmTe

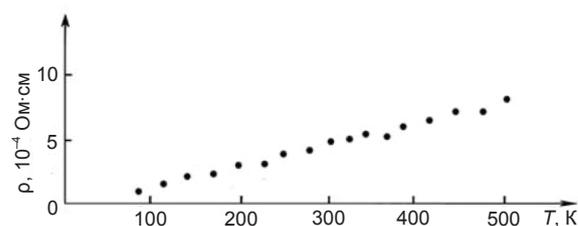


Рис. 5. Зависимость удельного электросопротивления от температуры плёнки TmTe

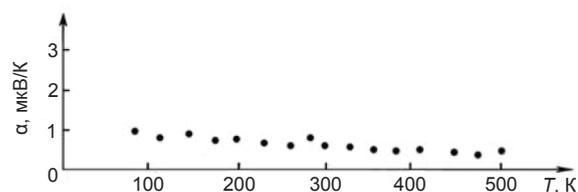


Рис. 6. Зависимость термо-ЭДС от температуры плёнки TmTe

температуры концентрация электронов не изменяется. Из рис. 5 видно, что удельное электросопротивление с температурой почти линейно увеличивается. Всё это свидетельствует о том, что при описании трёхвалентных теллуридов может быть использована модель одновалентного металла.

Термо-ЭДС плёнок TmTe имеет положительный знак и её зависимость от температуры носит сложный характер (рис. 6).

На основе измеренных данных постоянной Холла и удельного электросопротивления вычислены температурные зависимости концентрации и подвижности электронов (рис. 7, 8).

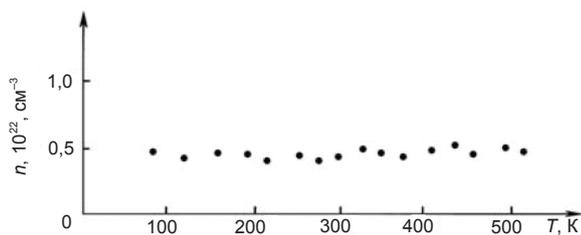


Рис. 7. Зависимость концентрации электронов от температуры плёнки TmTe

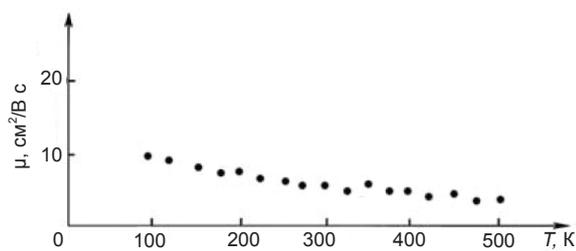


Рис. 8. Зависимость подвижности электронов от температуры плёнки TmTe

Как видно из рисунков, концентрация электронов составляет порядка 10^{22} см^{-2} и она почти не изменяется, а подвижность электронов с увеличением температуры уменьшается.

Термо-ЭДС с увеличением температуры сначала увеличивается, а потом уменьшается, как было отмечено выше, и имеет положительный знак.

Нужно отметить, что термо-ЭДС является самым чувствительным кинетическим параметром электрических свойств материала. Как известно, для однозонных металлов

с одним типом носителей заряда термо-ЭДС можно записать так:

$$\alpha = \frac{\pi^2 k_{0T}^2}{3e} \left[\frac{\delta \ln \sigma(\epsilon)}{\delta \epsilon} \right]_{\epsilon=\zeta},$$

где e — заряд электрона, T — абсолютная температура, σ — электропроводность. Из теории известно, что для вычисления электропроводности нужно знать характер изменения $\sigma(\epsilon)$ в зависимости от положения уровня Ферми, после этого следует вычислить производную $\sigma(\epsilon)$ по ϵ для $\epsilon = \zeta$, где ζ — фиктивный уровень Ферми. В этом случае величина $\sigma(\epsilon)$ зависит как от изменения знака носителей заряда, так и от длины свободного пробега в зависимости от квазиимпульса:

$$\alpha = \frac{\pi^2 k_{0T}^2}{3e} \left[\frac{\delta \ln \lambda}{\delta \epsilon} + \frac{\delta \ln S}{\delta \epsilon} \right]_{\epsilon=\zeta},$$

где S — площадь поверхности Ферми.

Таким образом, термо-ЭДС является суммой двух членов: первый из них зависит от рассеяния носителей заряда, а второй — от особенности строения зоны Бриллюэна. Комбинация этих двух факторов определяет знак носителей заряда. Известно, что термо-ЭДС таких одновалентных металлов, какими являются Cu, Ag, Au и др. имеет положительный знак, в то время как постоянная Холла имеет отрицательный знак [7]. Такой же эффект наблюдается и для TbS [12].

С другой стороны, в работе [13] отмечено, что и для модели свободных электронов $\lambda(\epsilon)$ может иметь отрицательный знак в члене $\frac{\delta \ln \lambda}{\delta \epsilon}$, или положительный знак термо-ЭДС.

Таким образом, можно заключить, что поведение трёхвалентного иона РЗМ в монокристаллах не противоречит модели, принятой для одновалентных металлов.

В табл. 1 приведены результаты исследования относительной механической прочности плёнок TmTe.

Как видно из табл. 1, относительная механическая прочность плёнок, напыленных на ситалловой и сапфировой подложках, в пределах ошибки эксперимента

Относительная механическая прочность плёнки TmTe

Число проходов для полного истирания пленки на различных подложках		
Монокристаллический кремний	Ситалл	Сапфир
42–47	68–76	71–78

совпадают, а относительная механическая прочность плёнок, напыленных на монокристаллической подложке кремния, ниже. Этот факт может быть связан с тем, что коэффициент теплового расширения ситалла и сапфира ближе к коэффициенту теплового расширения TmTe, а коэффициент теплового расширения монокристаллического кремния резко отличается от коэффициента теплового расширения TmTe, как это видно из табл. 2. Чем больше разность коэффициентов теплового расширения подложки и плёнки, тем большее механическое напряжение возникает в плёнке, что в конечном счёте уменьшает механическую прочность.

Это хорошо согласуется с данными, полученными в работе [16] для плёнок Tm₂S₂ на подложках из монокристаллического кремния, ситалла и сапфира.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика синтеза тонких поликристаллических плёнок монотеллурида тулия на различных подложках (монокристаллический кремний, ситалл, сапфир) методом вакуумно-термического испарения из двух независимых источников — тулия и теллура. При температуре 300 К в области энергии фотонов 0,6–3,9 эВ измерен спектр поглощения приготовленных плёнок. Показано, что спектр поглощения имеет четыре хорошо выявленных максимума. Приведена возможная интерпретация полученного спектра.

В широкой температурной области 95–500 К измерены температурные зависимости коэффициента Холла, удельного электросопротивления и термо-ЭДС. Обнаружено, что согласно измерениям постоянной Холла плёнки имеют *n*-тип проводимости,

Значения коэффициентов теплового расширения

Соединение	Коэффициент теплового расширения $\alpha \cdot 10^{-6}$ град ⁻¹	Среднее значение для температурного интервала, К	Литература
TmTe	6,96	300–660	[14]
Кремний	2,54	300–1050	[15]
Ситалл	4,1	298–573	[15]
Лейкосапфир	8,1	298–573	[15]

а согласно измерениям терм-ЭДС — *p*-тип проводимости. Приводится объяснение такого расхождения по аналогии с одновалентными металлами Cu, Ag, Au и TbS.

Методом полного истирания измерена относительная механическая прочность плёнок. Исследования показали, что относительная механическая прочность плёнок зависит от материала подложки и увеличивается в следующей последовательности: монокристаллический кремний – ситалл – сапфир. Приводится возможный механизм такой зависимости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ярембаш Е. И., Елисеев А. А. Халькогениды редкоземельных элементов. — М.: «Наука», 1975. — 258 с.
2. Gasgnier M. Rare Earth Compounds (Oxides, Sulfides, Silicides, Boron,..) as Thin Films and Crystals // Phys. Status Solidi A. — 1989. — Vol. 114, № 11. — P. 11–71.
3. Сидоров В. А., Степанов Н. Н., Хвостиков О. Б., Циок А. В., Голубков В. С., Оскотский В. С., Смирнов И. А. Исследование электросопротивления и термоэдс монотеллурида самария в диапазоне давления до 12 ГПа // ФТТ. — 2001. — Т. 29, № 9. — С. 2616–2621.
4. Митаров Р. Г., Теплофизические свойства халькогенидов редкоземельных элементов переменного состава: диссертация на соискание учёной степени доктора физико-математических наук. — Махачкала, 2002. — 235 с.
5. Джабуа З. У., Гигинеишвили А. В., Илуридзе Г. Н., Минашвили Т. А., Купреишвили И. Приготовление и механические свойства плёнок GdSb // Физико-химические основы формирования и модификации микро- и наноструктур: материалы пятой международной конференции. — Харьков, 2011. — Т. 1. — С. 32–35.
6. Ярембаш Е. И., Елисеев А. А. Халькогениды редкоземельных элементов. — М.: «Наука», 1975. — 258 с.
7. Голубков А. В., Гончарова Е. В., Жузе В. П., Логинов Г. М., Сергеева В. М., Смирнов И. А. Физические свойства халькогенидов редкоземельных элементов. — Л.: «На-

ука», 1973. — 304 с.

8. Methfessel S., Holtzberg F., McGuire T. R. Electronic structure of REE monohalcogenides // IEEE Trans. Magnetics. Mag. 2. — 1996. — P. 305–310.
9. Каплянскй А. А., Феофилов П. П. Опт. и спектр. Спектр поглощения иона самария в CaF₂. — 1992. — Т. 13. — С. 129–134.
10. Сергеева В. М., Внешний фотоэффект с полупроводников и диэлектриков. — М.: «Наука», 1997. — 157 с.
11. Голубков А. В., Гончарова Е. В., Жузе В. П., Логинов Г. М., Сергеева В. М., Смирнов И. А. Физические свойства халькогенидов редкоземельных элементов. — Л.: «Наука», 1073. — 260 с.
12. Jabua Z. U., Kupreishvili I. L., Gigineishvili A. V. Preparation and electrical and optical properties of TbS Films // Inorganic Materials. — 2014. — Vol. 50, No. 4, P. 330–333.
13. Robinson J. E. Thermoelectricity in some metals // Phys. Rev. — 1986. — Vol. 161. — P. 533–536.
14. Абдусалямова М. Н., Рахматов О. И. Термическое расширение TmSb, TmTe и их твердых растворов TmSb_{1-x}Te_x // Теплофизика Высоких Температур (ТВТ). — 2002. — Т. 40, вып. 4. — С. 683–684.
15. Новикова С. И. Тепловое расширение твёрдых тел. — Москва: «Наука», 1974. — 292 с.
16. Jabua Z., Teteloshvili M., Gigineishvili A., Illuridze G., Minashvili T., Davitadze K. Production of thulium sesquisulfide thin films by discrete evaporation and their mechanical properties // International Conference. Nanosensory systems and nanomaterials. Programe & Abstracts. — Tbilisi, 2013. — 74 p.

REFERENCES

1. Yarembash E. I., Eliseev A. A. Hal'kogenidy redkozemel'nyh elementov. — M.: «Nauka», 1975. — 258 p.
2. Gasgnier M. Rare Earth Compounds (Oxides, Sulfides, Silicides, Boron,..) as Thin Films and Crystals // Phys. Status Solidi A. — 1989. — Vol. 114, No. 11. — P. 11–71.
3. Sidorov V. A., Stepanov N. N., Hvostikov O. B., Ciok A. V., Golubkov V. S., Oskotskij V. S., Smirnov I. A. Issledovanie elektrosoprotivleniya

- i termoeds monotellurida samariya v diapazone davleniya do 12 GPa // FTT. — 2001. — Vol. 29, No. 9. — P. 2616–2621.
4. Mitarov R. G., Teplofizicheskie svojstva hal'kogenidov redkozemel'nyh elementov peremennogo sostava: dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni doktora fiziko-matematicheskikh nauk. — Mahachkala, 2002. — 235 p.
 5. Dzhabua Z. U., Gigineishvili A. V., Illuridze G. N., Minashvili T. A., Kupreishvili I. Prigotovlenie i mehanicheskie svojstva plenok GdSb // Fiziko-himicheskie osnovy formirovaniya i modifikacii mikro- i nanostruktur: materialy pyatoy mezhdunarodnoj konferencii. — Har'kov, 2011. — Vol. 1. — P. 32–35.
 6. Yarembash E. I., Eliseev A. A. Hal'kogenidy redkozemel'nyh elementov. — M.: «Nauka», 1975. — 258 p.
 7. Golubkov A. V., Goncharova E. V., Zhuze V. P., Loginov G. M., Sergeeva V. M., Smirnov I. A. Fizicheskie svojstva hal'kogenidov redkozemel'nyh elementov. — L.: «Nauka», 1973. — 304 p.
 8. Methfessel S., Holtzberg F., McGuire T. R. Electronic structure of REE monohalcogenides // IEEE Trans. Magnetics. Mag. 2. — 1996. — P. 305–310.
 9. Kaplyanskij A. A., Feofilov P. P. Opt. i spektr. Spektr pogloscheniya iona samariya v CaF₂. — 1992. — Vol. 13. — P. 129–134.
 10. Sergeeva V. M., Vneshnij fotoeffekt s poluprovodnikov i dielektrikov. — M.: «Nauka», 1997. — 157 p.
 11. Golubkov A. V., Goncharova E. V., Zhuze V. P., Loginov G. M., Sergeeva V. M., Smirnov I. A. Fizicheskie svojstva hal'kogenidov redkozemel'nyh elementov. — L.: «Nauka», 1073. — 260 p.
 12. Jabua Z. U., Kupreishvili I. L., Gigineishvili A. V. Preparation and electrical and optical properties of TbS Films // Inorganic Materials. — 2014. — Vol. 50, No. 4, P. 330–333.
 13. Robinson J. E. Thermoelectricity in some metals // Phys. Rev. — 1986. — Vol. 161. — P. 533–536.
 14. Abdusalyamova M. N., Rahmatov O. I. Termicheskoe rasshirenie TmSb, TmTe i ih tverdyh rastvorov TmSb_{1-x}Te_x // Teplofizika Vysokih Temperatur (TVT). — 2002. — Vol. 40, vyp. 4. — P. 683–684.
 15. Novikova S. I. Teplovoe rasshirenie tverdyh tel. — Moskva: «Nauka», 1974. — 292 p.
 16. Jabua Z., Teteloshvili M., Gigineishvili A., Illuridze G., Minashvili T., Davitadze K. Production of thulium sesquisulfide thin films by discrete evaporation and their mechanical properties // International Conference. Nanosensory systems and nanomaterials. Programe & Abstracts. — Tbilisi, 2013. — 74 p.