

УДК 539.216

Термоэлектрическая эффективность пленочных наклонно-конденсированных преобразователей из изотропных и анизотропных материалов

А. Б. Опаричев, М. А. Каримбеков

Московский энергетический институт (Технический университет), Москва, Россия

Определены критерии выбора материалов для наклонно-конденсированных пленок, получаемых вакуумно-термическим испарением и конденсацией на изолирующих теплопроводных подложках и используемых как чувствительный (приемно-преобразующий) элемент наклонно-текстурированных пленочных термоэлектрических преобразователей.

Широкое применение и намечающиеся перспективы более широкого использования технологических лазеров сопровождаются поиском эффективных, простых и надежных средств измерения энергетических пространственных (координатно-чувствительных) и временных параметров лазерного излучения [1, 2]. Среди таких средств измерения перспективны термопреобразователи на наклонно-конденсированных или косонапыленных пленках ряда материалов, поэтому актуальными для эффективной работы термопреобразователей на эффекте поперечной термоЭДС являются рациональный выбор и свойства материалов.

Применение наклонно-конденсированных пленок основано на появлении электродвижущей силы вдоль пленки на изолирующей теплопроводной подложке при создании по толщине пленки градиента температуры, например, от падения излучения на поверхность пленки с аккумулярованием тепла или его отводом с противоположной ее поверхности, если главные направления анизотропии физических свойств материала наклонены к направлению падающего лучистого и отводимого теплового потоков.

Цель работы — определение критериев выбора материалов для наклонно-конденсированных пленок, получаемых вакуумно-термическим испарением и конденсацией на изолирующих теплопроводных подложках и используемых как чувствительный (приемно-преобразующий) элемент наклонно-текстурированных термоэлектрических преобразователей.

Материалы, пригодные для изготовления пленочных наклонно-текстурированных термоэлектрических преобразователей, в зависимости от основных факторов, определяющих анизотропию термоэлектрических свойств, наклон главных направлений анизотропии к направлениям облучения и теплоотвода, а также поперечную термоЭДС в наклонно-конденсированных пленках, были подразделены на группы.

К первой группе относятся материалы, обладающие собственной анизотропией коэффици-

ента термоЭДС, которая вносится кристаллитами в пленки, и способностью формирования наклонной кристаллографической текстуры при наклонной конденсации. Материалы второй группы являются изотропными, но способны к формированию при наклонной конденсации пленок с наклонной "волокнистой" микроструктурой, в которой каждое отдельное "волокно" приобретает анизотропию коэффициента термоЭДС вследствие размерного эффекта. Материалы третьей группы также являются изотропными, но образуют при наклонной конденсации пленки с наклонной "волокнистой" микроструктурой и несовершенным контактом между кристаллитами. Наконец, возможны материалы, которые сочетают в себе особенности и способности материалов перечисленных групп. В пленках этих материалов эффекты, определяемые каждым из факторов, налагаются друг на друга.

Отмеченные особенности материалов являются необходимыми и достаточными для возникновения в наклонно-конденсированных пленках анизотропии свойств и поперечной термоЭДС, т. е. являются условиями их пригодности. Однако помимо способности к приобретению той или иной текстуры при наклонной конденсации важными являются и сами свойства материалов. Способность последних к текстурированию пока может быть установлена только экспериментальными исследованиями (см. Bi [3], Sb [4] и Te [5, 6]). Экспериментально найдены условия обеспечения адгезии пленок и их коррозионной защиты [7], поэтому при выборе материалов приходится прежде всего ориентироваться на их свойства и в каждом конкретном случае на такие, которые определяют наиболее важные для применения параметры. При этом параметры наклонно-конденсированных термопреобразователей, так же как и других термоэлектрических преобразователей, зависят не от одного свойства, а от соотношения двух-трех материалов [8]:

• величина удельной поперечной термоЭДС пленок пропорциональна соотношению α_0/κ_0

$$e_{\text{п}} = \frac{1}{2} \frac{r_{\text{к}} \sin 2\varphi_{\text{ZX}}}{(1 + r_{\text{к}} \cos^2 \varphi_{\text{ZX}})^3} \frac{\alpha_0}{\kappa_0},$$

где r_k — сопротивления между кристаллитами;
 φ_{ZX} — наклон кристаллитов к поверхности;
 α_0 — коэффициент термоЭДС;
 κ_0 — удельная теплопроводность;
• эффективность преобразования по мощности пропорциональна соотношению $\alpha_0^2/\rho_0\kappa_0^2$

$$\eta = \frac{\varepsilon^2 q t}{8} \frac{r_k^2 \sin^2 2\varphi_{ZX}}{(1 + r_k \cos^2 \varphi_{ZX})^3} \frac{\alpha_0^2}{\rho_0 \kappa_0^2},$$

где ε — степень черноты поверхности пленок;
 q — плотность потока излучения;
 t — толщина пленки;
 ρ_0 — удельное электросопротивление;
• характеристическое время переходного теплового процесса в наклонно-конденсированных пленках пропорционально c_0/κ_0

$$\tau_{\text{char}} \cong \frac{4}{\pi^2} t^2 \frac{1 + r_k}{1 + r_k \cos^2 \varphi_{ZX}} \frac{c_0}{\kappa_0},$$

где c_0 — удельная теплоемкость;
• амплитуда импульсной реакции (способность пленок реагировать на импульсное излучение) определяется отношением удельной поперечной термоЭДС к характеристическому времени переходного процесса и пропорциональна α_0/c_0

$$A_{\text{imp}} = \frac{e_{\text{п}}}{\tau_{\text{char}}} = \frac{\pi^2}{8t^2} \frac{r_k \sin 2\varphi_{ZX}}{1 + r_k} \frac{\alpha_0}{c_0}.$$

Соотношения α_0/κ_0 , $\alpha_0^2/\rho_0\kappa_0^2$, c_0/κ_0 , α_0/c_0 можно использовать в качестве критериев предпочтительности материалов для пленочных наклонно-текстурированных термоэлектрических преобразователей как измерителей непрерывного излучения (предназначенных для измерения обнаружения, соответственно).
Помимо этих показателей эффективности, при выборе материалов следует принимать во внимание возможность получения их пленок. Технологичность материалов в этом отношении можно оценить по температуре начала испарения (при которой упругость паров равна 1 Па $\approx 1 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст.) и склонности к диспропорционированию при испарении в вакууме.
Сведения по термоэлектрическим свойствам и критериям эффективности материалов (использованы [9–14] и собственные данные) сведены в таблицу (рисунок), их можно использовать для оценки материаловедческой (физической) и технологической (химической) перспективности для пленочных наклонно-текстурированных термоэлектрических преобразователей.

Свойства применяемых материалов
в термоэлектрических преобразователях

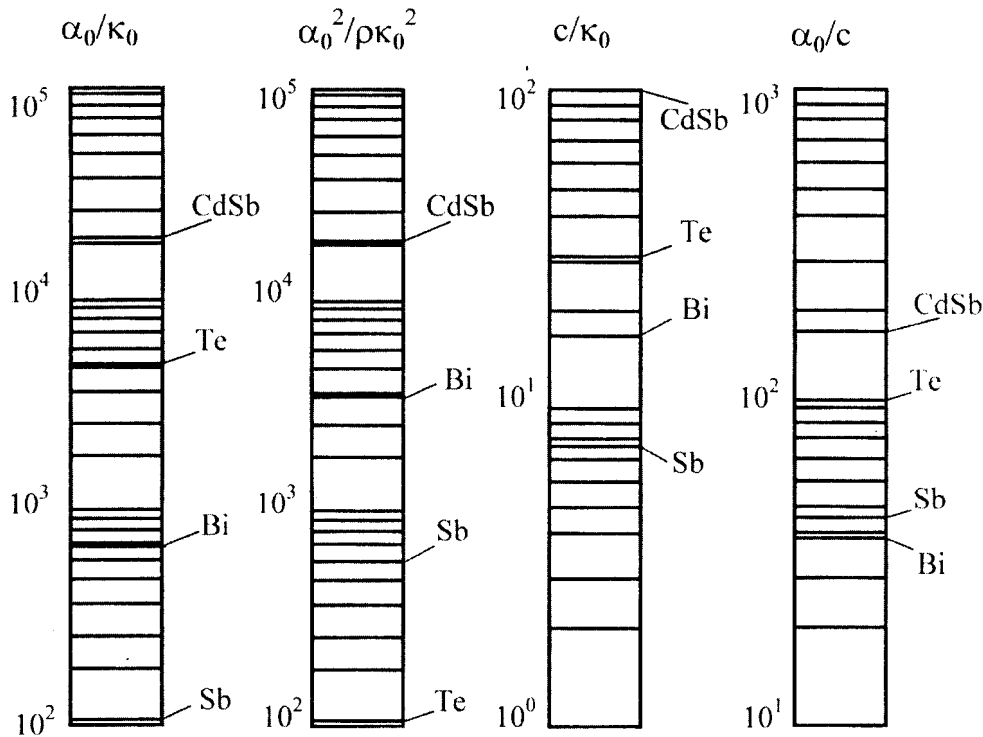
Наименование	α_0 , мкВ/К	κ_0 , Вт/см·К	ρ_0 , Ом·см	c , Дж/см ³ ·К
Анизотропные материалы				
Висмут (Bi)	−48	0,07	$1,2 \cdot 10^{-4}$	1,21
Сурьма (Sb)	+20	0,18	$3,4 \cdot 10^{-5}$	1,37
Теллур (Te)	+140	0,027	0,25	1,18
Антимонид кадмия (CdSb)	+280	0,012	0,025	1,51
Изотропные материалы				
Алюминий (Al)	−6,8	2,1	$2,7 \cdot 10^{-6}$	2,43
Железо (Fe)	+17	0,75	$9,7 \cdot 10^{-6}$	3,63
Никель (Ni)	−12	0,92	$6,8 \cdot 10^{-6}$	3,04
Кобальт (Co)	−32	0,71	$6,2 \cdot 10^{-6}$	6,46
Хром (Cr)	+15	0,67	$1,9 \cdot 10^{-5}$	3,17
Рутений (Ru)	−31	1,1	$6,8 \cdot 10^{-6}$	2,83
Марганец (Mn)	−10	0,09	$7,1 \cdot 10^{-4}$	3,41
Хромель (НХ 9,5)	+28	0,2	$6,6 \cdot 10^{-5}$	4,82
Алюмель (НМцАК 2-2-1)	−13	0,30	$3,3 \cdot 10^{-5}$	3,21
Константан (МНМц 40-1,5)	−35	0,21	$4,7 \cdot 10^{-5}$	2,91
Копель (МНМц 43-0,5)	−41	0,24	$4,1 \cdot 10^{-5}$	3,28

Среди материалов, обладающих собственной анизотропией коэффициента термоЭДС, можно выделить висмут и теллур. Природная анизотропия антимонида кадмия делает его наиболее эффективным для пленочных наклонно-текстурированных термоэлектрических преобразователей. Для изготовления высокочувствительных наклонно-текстурированных термоэлектрических преобразователей практически более подходящим является теллур (полупроводник), а для малошумящих и помехоустойчивых — висмут (полуметалл).
Из изотропных материалов для изготовления пленочных наклонно-текстурированных термоэлектрических преобразователей перспективны d-металлы (хром, никель, кобальт, тантал), а также термоэлектродные, они же резистивные, сплавы (хромель, алюмель, константан и копель). Металлы и металлические сплавы являются наиболее подходящими для изготовления быстродействующих пленочных наклонно-текстурированных термоэлектрических преобразователей излучения. Однако применение сплавов технологически более сложно из-за необходимости обеспечивать воспроизводимость их состава и свойства в пленках, получаемых при испарении и конденсации в вакууме.
Заслуживает внимание то, что совершенствование параметров термоэлектрических преобразователей измерительных устройств (для обнаружения и регистрации излучений) и конструкторско-технологическое их совершенствование (за счет использования группового пленочного производства) сопровождается не привлечением новых материалов, не переходом на материалы более сложного состава и/или более сложной технологии, а наоборот — возвращением к известным более простым материалам как по составу, так и по технологии.

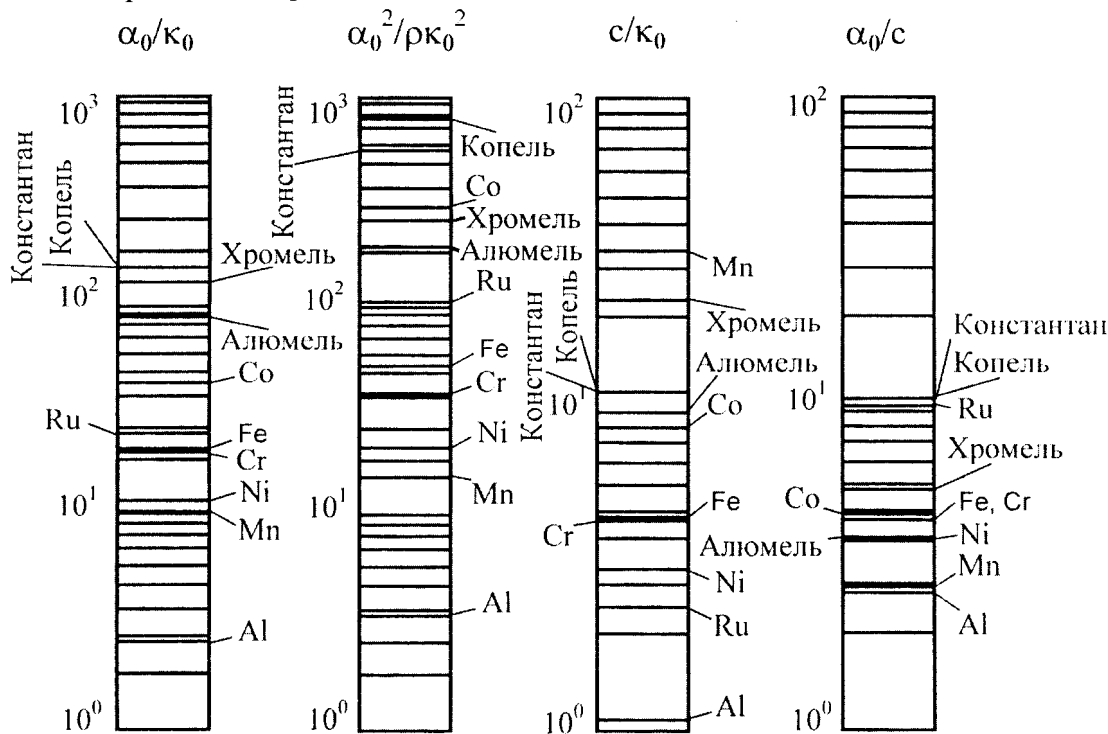
Таким образом, необходимыми и достаточными факторами при выборе материалов для наклонно-текстурированных пленок, преобразующих мощность принимаемого пленкой излучения в электрическую мощность, являются: собственная анизотропия коэффициента термо-

ЭДС ("кристаллографический вклад" кристаллитов в пленку); способность образовывать волокнистую микроструктуру ("формразмерный вклад" кристаллитов в пленку при собственной изотропности и несовершенстве контакта между кристаллитами).

Анизотропные материалы:



Изотропные материалы:



Ранжирование материалов по критериям термоэлектрической эффективности

Указанием на предпочтительность материала для наклонно-текстурированных пленок, преобразующих мощность излучения в электрическую мощность, являются наибольшие значения критериев (α_0 — коэффициент термоЭДС, ρ_0 — удельное электросопротивление; κ_0 — коэффициент теплопроводности и c_0 — удельная теплоемкость): удельная поперечная термоЭДС пропорциональна α_0/κ_0 , эффективность преобразования по мощности пропорциональна $\alpha_0^2/\rho_0\kappa_0^2$ (для измерения и обнаружения) или α_0/c_0 (для измерения импульсного излучения).

Литература

1. Абилюиштов Г. А., Голубев В. С., Гонтарь В. Г. и др. Технологические лазеры: Справочник: В 2-х т./Под общ. ред. Г. А. Абилюиштова. — М.: Машиностроение, 1991. Т. 1 — 432 с; Т. 2. — 544 с.
2. Справочник по лазерной технике: Пер. с нем./Под ред. А. П. Напортовича. — М.: Энергоиздат, 1991. — 544 с.
3. Вигдорович В. Н., Ухлинов Г. А., Шварц Б. А., Андропова Е. Н.//Известия АН СССР. Сер. Неорганические материалы. 1985. Т. 21. № 6. С. 905—909.

4. Бондарчук Н. Ф., Вигдорович В. Н., Ухлинов Г. А.//Там же. 1988. Т. 24. № 11. С. 1805—1810.
5. Вигдорович В. Н., Ухлинов Г. А., Чиботару Н. И.//Там же. 1979. Т. 15. № 1. С. 49—55.
6. Бондарчук Н. Ф., Вигдорович В. Н., Ухлинов Г. А.//Там же. 1989. Т. 25. № 2. С. 189—194.
7. Арешикин А. А., Афанасьев А. А., Вигдорович В. Н., Пинчук В. Н.//Доклады АН СССР. 1985. Т. 280. № 3. С. 610—613.
8. Вигдорович В. Н., Каримбеков М. А.//Конденсированные среды и межфазные границы. 2001. Т. 3. № 1. С. 5—13.
9. Таблицы физических величин: Справочник/Под ред. И. К. Кикоина. — М.: Атомиздат, 1976. — 1006 с.
10. Справочник по электротехническим материалам/Под ред. В. В. Пасынкова. — М.: Энергия, 1976. Т. 3. — 896 с.
11. Анатыхук Л. И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник. — Киев: Наука, 1979. — 768 с.
12. Термоэлектрическая сила металлов: Пер. с англ./Под ред. Д. К. Белашенко. — М.: Металлургия, 1980. — 248 с.
13. Теплопроводность твердых тел: Справочник/А. С. Охотин, Р. П. Боровикова, Т. В. Нечаев, А. С. Пушкарский. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 320 с.
14. Приборы для измерения температуры контактным способом: Справочник/Р. В. Бычковский, В. Н. Вигдорович, Е. А. Колесник, Р. С. Моспанченко, Г. А. Ухлинов, Б. А. Шварц/Под ред. Р. В. Бычковского. — Львов: Вища школа, 1978. — 208 с.

Статья поступила в редакцию 1 октября 2003 г.

Thermoelectric efficiency of the inclination-condensed film converters from isotropic and anisotropic materials

A. B. Oparichev, M. A. Karimbekov

Moscow Power Engineering Institute (Technical University), Moscow, Russia

The criteria of a choice of materials for inclination-condensed films, received by vacuum-thermal evaporation and condensation on the isolated heat conduction substrates, and used as sensitive (input-converter) an element inclination-texture film thermoelectrical of converters are determined.

* * *