

УДК 539.216:548.735:537.322

Термоэлектрические преобразователи лазерного излучения на наклонно-конденсированных пленочных материалах

В. Н. Вигдорovich

Институт химических проблем микроэлектроники, Москва, Россия

М. А. Каримбеков

Московский энергетический институт (Технический университет), Россия

Развита концепция термоэлектрического эффекта в наклонно-конденсированных пленочных поликристаллических материалах, получаемых вакуумно-термическим испарением и конденсацией на изолирующих теплопроводных подложках. Предложены модели для анализа особенностей термо-ЭДС в анизотропных средах, оценки чувствительности к непрерывному излучению, определения формы выходного сигнала и роли гребенчатости поверхности пленки при действии короткоимпульсного излучения. Приведены основные параметры созданных и исследованных пленочных наклонно-текстурированных термоэлектрических преобразователей различного типа: с "пяточковым" (круглым), "меандровым" и "спиральным" приемно-преобразующим элементами. Наклонное текстурирование микроструктуры пленочных материалов приемно-преобразующих элементов (ось текстуры выполняет роль аналога главной кристаллографической оси монокристалла анизотропного материала) позволило усилить естественную анизотропию и создать искусственную "анизотропию" термо-ЭДС, что расширило возможности выбора исходных материалов, включая высокотемпературные изотропные материалы для увеличения лучевой прочности. Обращено внимание на то, что совершенствование измерительных термоэлектрических преобразовательных устройств сопровождается не привлечением новых материалов, а переходом на материалы более сложного состава и/или более сложные технологии, а наоборот, — возвращением к известным, более простым материалам как по их составу, так и по технологии их применения.

Технологическое освоение лазеров сопровождается поиском эффективных, простых и надежных средств измерения параметров лазерного излучения. Среди таких средств измерения перспективны термоэлектрические преобра-

зователи на косовырезанных пластинках анизотропных монокристаллических полупроводников [1]. Как развитие и решение проблемы перспективны также термоэлектрические преобразователи на наклонно-конденсированных (или косонапыленных) пленках ряда материалов (помимо полупроводников).

Практическое применение наклонно-конденсированных пленок [2—10] имело под собой теоретическим и экспериментальным основанием “эффект поперечной термо-ЭДС — появление электродвижущей силы вдоль пленки на изолирующей массивной или теплопроводной подложке при создании по толщине пленки градиента температуры, например, от падения излучения на поверхность пленки с отводом тепла с противоположной ее поверхности, если главные направления анизотропии физических свойств материала пленки наклонены к направлению падающего лучистого и отводимого теплового потоков. Однако однозначные материаловедческие и технологические рекомендации для реализации этого эффекта в пленочном конструкторском исполнении до сих пор отсутствуют.

Для этих целей перспективны *d*- и *f*-металлы (например, Cr, Co, Ni и Ta), полуметаллы (например, Bi и Sb), полупроводники (например, CdSb, PbTe, Bi₂Te₃, Ge и Te) и безщелевые полупроводники (например, Pb_{1-x}Sn_xTe, Pb_{1-x}Sn_xSe, Zn_xCd_{1-x}Sb и Bi_xSb_{1-x}) [11, 12].

Используемые наклонно-конденсированные пленки могут быть поликристаллическими (не монокристаллическими). На “кристаллографический фактор”, проявляемый в анизотропии монокристалла, в поликристаллической пленке может накладываться “фактор формы кристаллитов”. Тогда анизотропия физических свойств пленочного материала является следствием обоих факторов как наклонная текстура пленки (по современной терминологии — искусственная “анизотропия” или “армированная” структура).

Интересны особенности термоэлектрических преобразователей на наклонно-конденсированных пленочных материалах. Они реагируют на тепловой поток в структуре пленки, а не на температуру, как это имеет место в термопарных термоэлектрических преобразователях (батареях) [1, 13—17], что предполагает независимость термо-ЭДС (и чувствительности) от геометрического размера термоэлектрического преобразователя в направлении теплового потока (принимаемого излучения и теплоотвода) и тем самым снимает ограничения в достижении быстродействия за счет уменьшения толщины и теплового сопротивления (без потери чувствительности). Интересно также, что металлы могут обеспечивать необходимую лучевую прочность термоэлектрического преобразователя, а полуметаллы и полупроводники — быстродействие и чувствительность.

Немаловажно, что не все зарекомендовавшие себя материалы обладают естественной кристаллографической анизотропией свойств и не все они технологически удобны для формирования наклонно-текстурированных пленок с искусственной анизотропией.

Цель работы — развитие концепции термоэлектрического эффекта в наклонно-конденсированных пленочных поликристаллических материалах, получаемых вакуумно-термическим испарением и конденсацией на изолирующих теплопроводных подложках, для наклонно-текстурированных термоэлектрических преобразователей различного типа: с “пяточковым” (круглым), “меандровым” и “спектральным” приемно-преобразующим элементами, а также на пленочных анизотропных полуметаллических и полупроводниковых материалах и изотропных тугоплавких металлах.

Особенности термо-ЭДС в анизотропных средах

В общем случае в пластине материала величина термо-ЭДС E_{ij} в направлении i при наличии градиента температуры $\text{grad}_j T$ в направлении j определяется выражением

$$E_{ij} = \oint \alpha_{ij} \text{grad}_j T dl_i, \quad (1)$$

где α_{ij} — компонента тензора коэффициента термо-ЭДС;
 dl_i — элемент длины в направлении i .

Например, выражение (1) для термо-ЭДС в пластине материала в геометрической системе координат $X = \{x_1, x_2, x_3\}$ (рис. 1) вдоль оси x_2 при градиенте температуры вдоль x_3 запишется так:

$$E_{23}^{(X)} = \oint \alpha_{23}^{(X)} \frac{\partial T}{\partial x_3} dx_2. \quad (2)$$

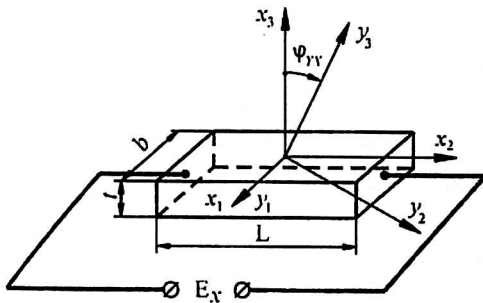


Рис. 1. Схема ориентации главных направлений наклонно-конденсированного пленочного материала

Компоненты тензора свойства в двух различных системах координат связаны соотношением

$$\alpha_{ij}^{(X)} = \alpha_{kl}^{(Y)} a_{ik} a_{jl}.$$

Здесь $i, j, k, l = 1, 2, 3$; a_{ik} и a_{jl} — косинусы углов между соответствующими осями систем координат.

Компонента $\alpha_{23}^{(X)}$ тензора коэффициента термо-ЭДС в пластине выражается через главные компоненты тензора коэффициента термо-ЭДС в кристаллографической системе координат $Y = \{y_1, y_2, y_3\}$, ось y_1 которой в данном случае совпадает с осью x_1 и которая повернута относительно системы координат X на угол φ_{YX} , составляет

$$\alpha_{23}^{(X)} = -\alpha_{22}^{(Y)} \cos \varphi_{YX} \sin \varphi_{YX} + \alpha_{33}^{(Y)} \sin \varphi_{YX} \cos \varphi_{YX},$$

или

$$\alpha_{23}^{(X)} = \frac{1}{2} [\alpha_{23}^{(Y)} - \alpha_{22}^{(Y)}] \sin 2\varphi_{YX}. \quad (3)$$

Подставляя (3) в (2) и имея в виду, что

$$\oint dx_2 = L,$$

где L — длина пластины, получим

$$E_{23}^{(X)} = \frac{1}{2} [\alpha_{23}^{(Y)} - \alpha_{22}^{(Y)}] L \frac{\partial T}{\partial x_3} \sin 2\varphi_{YX}. \quad (4)$$

Таким образом, в однородной анизотропной среде при наличии в ней градиента температуры возможно возникновение термо-ЭДС, причем в направлении, поперечном градиенту температуры. Из (4) видно, что условиями возникновения поперечной термо-ЭДС являются анизотропия коэффициента термо-ЭДС среды и наклоненность осей анизотропии к направлению градиента температуры.

Для измерения энергетических параметров относительно широких пучков непрерывного лазерного излучения целесообразны широкоапертурные термоэлектрические преобразователи, в том числе пленочные и наклонно-конденсированных пленках.

Оценка чувствительности к непрерывному излучению

Приемно-преобразующий элемент термоэлектрического преобразователя характеризуется вольт-ваттной чувствительностью.

Для термоэлектрических преобразователей пяточкового типа (рис. 2, а) вольт-ваттная чувствительность определяется выражением

$$S = \frac{e_{\text{п}}}{D_{\text{пр}}} \frac{4\delta}{F(\delta, f)}, \quad (5)$$

где $e_{\text{п}}$ — удельная поперечная термо-ЭДС;
 $D_{\text{пр}}$ — диаметр приемно-преобразующего элемента;

$$\delta = \frac{\Delta}{D_{\text{пр}}},$$

где Δ — эксцентриситет пучка относительно приемной площадки;

$$f = \frac{d_{\text{обл}}}{D_{\text{пр}}},$$

где $d_{\text{обл}}$ — диаметр облученного участка приемной площадки.

$$F(\delta, f) = \arccos(2\delta - f) + \arccos(2\delta + f) - (2\delta - f)\sqrt{1 - (2\delta - f)^2} + (2\delta + f)\sqrt{1 - (2\delta + f)^2}.$$

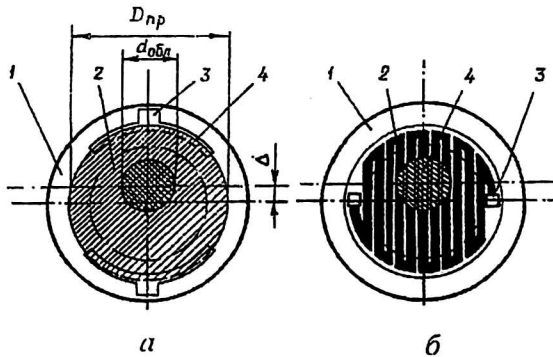


Рис. 2. Схемы топологии пленочных наклонно-конденсированных термоэлектрических приемно-преобразующих элементов: пяточкового (а) и меандрового (б).

Обозначения: штрихпунктирной линией показана проекция отверстия апертурной диафрагмы; 1 — основание; 2 — приемно-преобразующий элемент; 3 — контактные площадки;

4 — облучаемый участок

Как видно из приведенных выражений, чувствительность термоэлектрических преобразователей пяточкового типа обратно пропорциональна диаметру приемно-преобразующего элемента. Кроме того, зонная характеристика приемно-преобразующего элемента неравномерна, что связано с шунтированием облучаемого участка, в котором генерируется термо-ЭДС, необлученными боковыми участками полосы, заключенной между хордами, отстоящими от центра на расстояниях $\Delta - d_{\text{обл}}/2$ и $\Delta + d_{\text{обл}}/2$. Неравномерность зонной характеристики может быть практически устранена установкой апертурной диафрагмы с диаметра окна, не больше половины диаметра приемно-преобразующего элемента.

Для термоэлектрических преобразователей меандрового типа (см. рис. 2, б) вольт-ваттная чувствительность определяется выражением

$$S = \frac{1}{a_M + b_M} e_{\text{П}}, \quad (6)$$

где a_M и b_M — ширина полос и промежутков между полосами меандра.

Сопоставляя (5) и (6), можно видеть, что по сравнению с термоэлектрическими преобразователями пяточкового типа чувствительность меандровых термоэлектрических преобразователей в $D_{\text{пр}}/(a_M + b_M)$ раз выше и практически равномерна. Однако меандровые термоэлектрические преобразователи имеют недостаток — относительно высокое электросопротивление, равное

$$R = \frac{\pi}{4} \frac{D_{\text{пр}}}{(a_M + b_M)a_M} \rho_s,$$

где ρ_s — удельное поверхностное электросопротивление пленки.

Электросопротивление меандрового термоэлектрического преобразователя превышает электросопротивление пяточковых термоэлектрических преобразователей в $D_{\text{пр}}/[a_M(a_M + b_M)]$ раз, что повышает уровень собственных тепловых шумов и снижает помехоустойчивость системы излучения в целом.

Определение формы выходного сигнала и роли гребенчатости поверхности пленки при действии короткоимпульсного излучения

Для измерения энергетических параметров короткоимпульсного излучения требуется оценить быстродействие приемно-преобразующего элемента. Быстродействие термоэлектрических преобразователей пяточкового типа практически должно определяться характеристическим временем переходного теплового процесса самой пленки, так как нет других очевидных факторов, влияющих на их быстродействие. В то же время быстродействие меандровых термоэлектрических преобразователей может лимитироваться скоростью переходного электрического процесса, определяемой межполосковой емкостью и индуктивностью меандра.

В общем случае при воздействии на пленку толщиной t импульса излучения прямоугольной формы длительностью τ_n распределение температуры по толщине пленки x_3 в момент времени τ при допущениях, что тепловой контакт пленки с подложкой идеален и поглощение излучения происходит в бесконечно тонком приповерхностном слое, описывается следующими выражениями:

$$T^*(x_3, \tau) = \frac{2q\sqrt{a\tau}}{\kappa_{33}^{(X)}} \left[i\Phi^* \left(\frac{x_3}{2\sqrt{a\tau}} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} (-g) \times \right. \\ \left. \times \left[i\Phi^* \left(\frac{2nt + x_3}{2\sqrt{a\tau}} \right) + i\Phi^* \left(\frac{2nt - x_3}{2\sqrt{a\tau}} \right) \right] \right], \tau \leq \tau_n;$$

$$T^{**}(x_3, \tau) = T^*(x_3, \tau) - \frac{2q\sqrt{a(\tau - \tau_n)}}{\kappa_{33}^{(X)}} \left[i\Phi^* \left(\frac{x_3}{2\sqrt{a(\tau - \tau_n)}} \right) + \right. \\ \left. + \sum_{n=1}^{\infty} (-g)^n \left[i\Phi^* \left(\frac{2nt + x_3}{2\sqrt{f(\tau - \tau_n)}} \right) + i\Phi^* \left(\frac{2nt - x_3}{2\sqrt{f(\tau - \tau_n)}} \right) \right] \right], \tau > \tau_n;$$

$$g = \frac{\alpha\kappa_{\Pi} - \kappa_{33}^{(X)}}{\alpha\kappa_{\Pi} + \kappa_{33}^{(X)}}, \quad \alpha = \sqrt{\frac{a}{a_{\Pi}}},$$

где κ_{Π} и a_{Π} — коэффициенты теплопроводности и температуропроводности подложки вдоль нормали поверхности, соответственно;

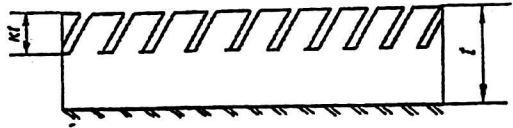
Φ^* — интеграл дополнительной функции ошибок.

Средний эффективный градиент температуры по толщине пленки в момент τ будет равен

$$\frac{\partial T(\tau)}{\partial x_3} = \frac{1}{t} \int_0^t \frac{\partial T(\tau)}{\partial x_3} dx_3 = \frac{T(0, \tau) - T(t, \tau)}{t}.$$

При наклонной конденсации поверхность пленок оказывается гребенчатой. Такую пленку схематически можно представить состоящей из двух разнородных слоев (рис. 3): верхнего гребенчатого слоя толщиной κt ($\kappa < 1$), в котором кристаллиты разобщены и электрически не коммутируют друг с другом, и нижнего сплошного электропроводящего слоя. В связи с этим планарная термо-ЭДС, действующая в верхнем гребенчатом слое пленки, не передается на контактные площадки. Электрический сигнал с пленки появляется только тогда, когда фронт тепловой волны достигает нижнего слоя. Время, необходимое для протекания тепла от гребней к сплошному слою, определяет задержку отклика относительно момента начала действия импульса излучения. Таким образом, верхний гребенчатый слой является пассивным, играет роль аккумулятора энергии импульса и демпфирует реакцию пленки на импульс.

Рис. 3. Схема наклонно-конденсированных пленок с гребенчатой поверхностью



Гребенчатость пленки учитывается заменой нижнего предела интегрирования в выражении (3) на κt . В этом случае выражение для мгновенного среднего градиента температуры в нижнем слое имеет вид

$$\frac{\partial T(\tau)}{\partial x_3} = \frac{T(\kappa t, \tau) - T(t, \tau)}{t}.$$

Определяя $T(\kappa t, \tau)$ и $T(t, \tau)$, можно рассчитать средний эффективный градиент температуры в нижнем активном слое, а по нему в соответствии с выражением (4) — величину выходного сигнала с пленки в различные моменты времени, по которым затем можно построить и форму выходного сигнала (рис. 4).

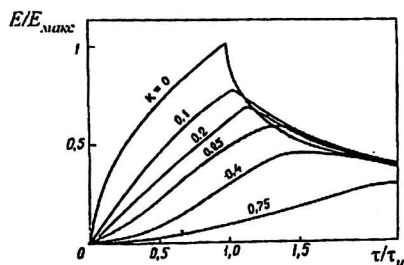


Рис. 4. Расчетная форма выходного сигнала при воздействии прямоугольного импульса излучения при различной относительной высоте гребней на поверхности наклонно-конденсированной пленки

Таким образом, гребенчатый характер поверхности наклонно-конденсированных пленок может обусловить следующие особенности выходного сигнала пленочных наклонно-текстурированных термоэлектрических преобразователей: задержку отклика, линеаризацию переднего фронта, сглаживание и смещение амплитуды относительно момента окончания действия импульса излучения.

Материаловедческий и конструкторско-технологический аспект пленочных наклонно-текстурированных термоэлектрических преобразователей

С 1988 г. расчеты и оценки практически подтверждаются практикой предприятий ООО “ЭкоИнформСистема” (“ЭИС”) и ЗАО “Новые информационные технологии” (“НИТ”).

Осуществлено сравнение с термоэлектрическими преобразователями на вырезанных монокристаллических пластинах (CdSb — по литературным данным [1] и Bi — экспериментально; главные кристаллографические оси располагались под оптимальными углами), закрепляемых с помощью электроизолирующей теплопроводной клеящей прослойки (паста КПТ-8) на массивном основании — тепловом приемнике (окись бериллия или анодированный алюминий). Имели место пределы измеряемых лучистых потоков ($\leq 10 \text{ Вт/см}^2$) и быстродействия ($\geq 0,1-0,01 \text{ с}$), по-видимому, из-за невозможности большего утонения пластины (менее $0,1-0,2 \text{ мм}$; абразивная и электрохимическая шлифовка) и некачественности клеевого и припойного контактов (осуществляют вручную). Выраженная спайность монокристаллов не позволяла получать качественные пластины (большие трудозатраты и малый выход годных). Как экспериментально выяснилось, поперечная термо-ЭДС пленочных наклонно-конденсированных приемно-преобразующих элементов оказалась в $1,5-1,7$ раза больше, чем поперечная термо-ЭДС приемно-преобразующих монокристаллических вырезанных пластин (по соответственным литературным и собственным данным).

Макетные и опытные образцы пленочных термоэлектрических преобразователей излучения были изготовлены вакуумно-термическим испарением

исходного материала (висмут, теллур, никель, хром или тантал) и его наклонной конденсацией в виде пленок на поверхность электроизолирующей теплопроводной подложки (или на поверхность массивного теплоприемного основания) из анодированного сплава АМг-3, оксида бериллия, нитрида алюминия или алмазной керамики. Контактные площадки выполнялись из меди на подслое хрома.

Пленке, воспринимающей излучение, приданы три вида топологии: "пяточковая" (диаметр 30 мм), "меандровая" (только для висмутовых пленок) (ширина полос 1—2 мм, межполосковый промежуток — 0,5 мм, общая длина четных и нечетных полос — 760 мм; толщина пленки — 0,5 мкм) и дополнительно "спиральная".

Для создания пленочного меандра использовались две полосковые трафаретные маски (рис. 5, а—в), причем нечетные полосы осаждают через одну маску (под положительным углом к испарителю), а четные — через другую (под отрицательным углом). Для создания пленочной спирали используются две совмещенные центрами маски, вращающиеся относительно оси, перпендикулярной к подложке (см. рис. 5, г—е), одна из которых имеет спиральную прорезь, закреплена на подложке и вращается вместе с ней, а другая имеет секторный вырез и относительно испарителя неподвижна.

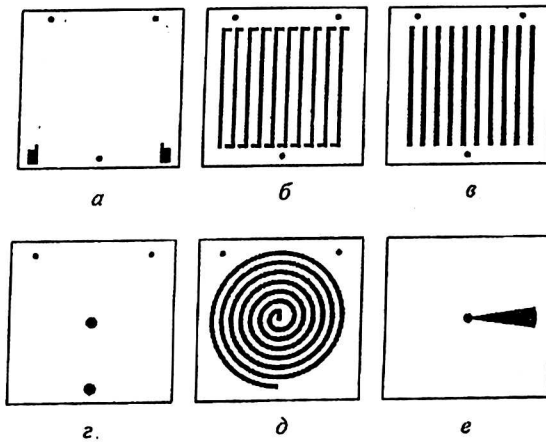


Рис. 5. Виды трафаретных масок для создания меандровой (а, б, в) и спиральной (г, д, е) топологии наклонно-конденсированного приемно-преобразующего элемента термоэлектрических преобразователей

Текстура в пленке развивается начиная с толщины 0,2 мкм и проявляется к толщине 0,5 мкм настолько, что текстурой и параметрами пленки (для согласования с параметрами вторичной аппаратуры) можно воспроизводимо управлять наклоном держателя подложки к испарителю (компромисс направления молекулярного пучка от испарителя и направления отвода тепла конденсации через подложку — 15° для текстуры — 40—45°), степенью вакуумирования и температурной испарения (излучением от испарителя и теплотой конденсации происходит нагрев подложки).

Основные параметры созданных и исследованных пленочных наклонно-текстурированных термоэлектрических преобразователей

Параметры термоэлектрических преобразователей измерены при воздействии непрерывного излучения от ИК-нагревательной лампы (интенсивность

потока 1 Вт/см^2) и импульсного излучения лазера ЛТИПЧ-5 (длина волны $1,06 \text{ мкм}$, режим модулированной добротности). Длительность и частота следования импульсов с энергией 1 мДж составляли 15 нс и 100 Гц , соответственно. Выходной сигнал измерялся цифровым вольтметром типа Ш 1413 или осциллографом С8-13.

Электросопротивление “пяточковых” приемно-преобразующих элементов на пленках висмута составило $10\text{--}30 \text{ Ом}$, пленок теллура — $3\text{--}10 \text{ кОм}$ и пленок хрома — $0,5\text{--}1,0 \text{ кОм}$. Для “меандровых” висмутовых приемно-преобразующих элементов оно составило $1\text{--}3 \text{ кОм}$.

Чувствительность “пяточковых” термоэлектрических преобразователей к импульсному излучению достигала: висмутовых — 5 , теллутовых — 12 и хромовых — 20 В/Дж . Время нарастания и спада сигнала составляло: висмутовых — $0,2$ и 10 мкс , теллутовых — $0,5$ и 50 мкс и хромовых — $0,2$ и 5 мкс .

Термоэлектрические преобразователи выдерживали импульсное излучение с плотностью до $0,5 \text{ МВт/см}^2$ (и 1 МВт/см^2 — для хрома) без видимого разрушения и деградации (вжигания и прокисления), без изменения электросопротивления и выходного сигнала (до 10^5 импульсов).

Разработаны также 100 -элементные матричные приемники излучения площадью $60 \times 60 \text{ мм}$ и размером элементов $4 \times 4 \text{ мм}$. Каждый из элементов имеет два независимых вывода, подсоединяемых к ножкам типового разъема. Воспроизводимость элементов по чувствительности не выходит за пределы $\pm 10 \%$. Предусмотрена заменяемость отдельных элементов.

Экспериментально подтвердилось повышение быстродействия приемно-преобразующих элементов при их формировании на подложках из прозрачного для излучения материала (алмазная керамика) и на противоположной по отношению к излучению стороне подложки.

Заслуживает внимания то обстоятельство, что в качестве исходного материала приемно-преобразующих элементов наклонно-текстурируемых термоэлектрических преобразователей используются изотропные материалы (ось текстуры выполняет роль аналога главной кристаллографической оси монокристалла анизотропного материала). Это расширяет возможности выбора исходных материалов, включает в набор высокотемпературные изотропные материалы. Наклонная текстура и искусственная анизотропия пленки (или наклонение и усиление анизотропии термо-ЭДС) в этом случае создаются целенаправленным формированием ее волоконной или столбчатой микроструктуры. Кристаллитам придается форма волокон с длиной, превышающей их диаметр, со средним диаметром, меньшим длины свободного пробега электронов, а ось текстуры наклоняется к длине приемно-преобразующих элементов в направлении контактных площадок для вывода термо-ЭДС. Экспериментальное усредненное сравнение пленочных приемно-преобразующих элементов из текстурированных изотропных металлов Ni и Ta и анизотропного полупроводника CdSb (толщина пленки 1 мкм на основании из алюминия толщиной 20 мм со слоем оксида 30 мкм) показало, что при вольтаваттной чувствительности 10 мВ/кВт лучевая прочность может быть повышена с $0,4$ до $2,2 \text{ кВт/см}^2$ (для Ni — в три раза, для Ta — более чем в пять раз).

Заслуживает также внимание то, что совершенствование параметров термообразовательных измерительных устройств (для обнаружения и регистрации излучений) и конструкторско-технологическое их совершенствование (за счет использования группового пленочного производства) сопровождаются 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.

Л и т е р а т у р а

1. *Анатычук Л. И.* Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник. — Киев: Наука, 1979. — 768 с.
2. *Ухлинов Г. А., Косаковская З. Я., Карачун В. Н.* Пленочные термоэлектрические приемники излучения//В кн.: Методы и средства измерения параметров устройств квантовой электроники: тр. ВНИИФТРИ. Вып. 39(69). — М.: ВНИИФТРИ. 1978. С. 41—46.
3. *Вигдорович В. Н., Косаковская З. Я., Ухлинов Г. А.* Поперечный термоэлектрический эффект в пленках висмута: Тез. докл. I Всес. конф. по физике и технологии тонких пленок (явления переноса) (11—13 мая 1981 г., Ивано-Франковск). — г. Ивано-Франковск, АН СССР, Министерство просвещения УССР. 1981. С. 233.
4. *Косаковская З. Я., Епихина Г. Е., Нестеренко В. М., Ухлинов Г. А.* Новые тепловые преобразователи импульсного оптического излучения//В кн.: Импульсная фотометрия. 1983. Вып. 8. С. 118—120.
5. *Ухлинов Г. А., Каримов Ф. Ч., Резников Б. Л.* Пленочные анизотропные термоэлементы//Электронная пром-сть. 1985. Вып. 2(14). С. 8—10.
6. *Ухлинов Г. А., Марков Ф. В., Каримов Ф. Ч., Резников Б. Л.* Пленочные анизотропные датчики излучения//Опт.-мех. пром-сть. 1985. № 6. С. 50—52.
7. *Вигдорович В. Н., Ухлинов Г. А., Каримов Ф. Ч., Карснов Д. М.* Природа анизотропного термоэлектрического эффекта в наклонно-конденсированных пленках//Известия АН СССР. Сер. Неорганические материалы. 1987. Т. 23. № 7. С. 1081—1085.
8. *Вигдорович В. Н., Марков Ф. В.* Координатно-чувствительные измерители энергии и мощности лазерного излучения: Тез. докл. Всес. конф. "Применение лазеров в народном хозяйстве" (4—8 декабря 1989 г., Шатура). — г. Шатура, НИЦ ТЛ АН СССР. С. 244—245.
9. *Вигдорович В. Н., Каримбеков М. А.* Тонкие наклонно-конденсированные пленки, их технология и измерительное применение: Тез. докл. III Всес. конф. по физике и технологии тонких полупроводниковых пленок (9—12 октября 1990 г., Ивано-Франковск). — г. Ивано-Франковск, АН СССР и ПО "Родон". 1990. Ч. I. С. 15.
10. *Вигдорович В. Н., Марков Ф. В., Каримбеков М. А.* Координатно-чувствительные измерители энергии и мощности лазерного излучения на наклонно-конденсированных пленках//Там же. С. 134.
11. *Электроника: Энциклопедический словарь*/Гл. ред. В. Г. Колесников. — М.: Сов. Энциклопедия, 1991. — 688 с.
12. *Физика: Большой энциклопедический словарь*/Гл. ред. А. М. Прохоров. — 4-е изд. — М.: Большая Российская Энциклопедия, 1991. — 944 с. [репринтное издание 1983 г.].
13. *Гольцман Б. М., Дашевский З. М., Кайданов В. И., Коломоец Н. В.* Пленочные термоэлементы: физика и применение. — М.: Наука, 1985. — 232 с.
14. *Каримбеков М. А., Корнилов В. А.* Классификация и критерии совершенствования пленочных термоэлектрических преобразователей измерительного назначения//В кн.: Проблемы новых материалов и технология/Под ред. В. Н. Вигдоровича. — М.: НПО ЦНИИ "Волна". 1989. Вып. 1. С. 25—35.
15. *Каримбеков М. А., Корнилов В. А.* Конструкторско-технологические решения по созданию пленочных термоэлектрических преобразователей//Там же. — М.: Науч.-производств. ассоциация. 1990. Вып. 2. С. 29—47.
16. *Вигдорович В. Н., Каримбеков М. А., Корнилов В. А.* Разработка пленочных термоэлектрических преобразователей как средств технологического контроля и измерения. — г. Шатура: Экоинформсистема, 1995. — 52 с.
17. *Ухлинов Г. А., Каримов Ф. Ч., Резников Б. Л., Марков Ф. В.* Матричные приемники излучения на основе пленочных анизотропных термоэлементов//В кн.: Координатно-чувствительные фотоприемники и оптико-электронные приборы на их основе. — г. Барнаул, Алтайский политехн. ин-т им. И. И. Ползунова, 1985. Ч. 2. С. 19—20.

Thermoelectrical converters of laser radiation based on inclination-condensed film materials

V. N. Vigdorovich

Institute of Chemical Problems for Microelectronics, Moscow, Russia

M. A. Karimbekov

Moscow Power Engineering Institute (Technical University), Russia

Termo-electric effect concept in inclination-condensed film of polycrystal materials obtained by vacuum-thermal vaporization and condensation on the isolated heat conduction substrate is developed. The models for analysis of the peculiarities thermal-e.m.f. (thermal electrical moving force) in anisotropic medium, the estimation of sensitivity to continuous radiation, shape definition of outer signal from short-impulse radiation and the role of surface film comb is proposed. Main parameters of created and investigated inclination-texture thermo-electrical converters of different types are presented: round, snaked and spiral sensitive-measuring input-converter thermo-electrical elements. The inclination-texture thermo-electrical converters are analogs of the anisotropic monocrystal. It enabled to amplify the natural anisotropy and to create artificial "anisotropy" of thermal-e.m.f. which extended the choice of initial materials including high-temperature and isotropic materials for increasing of laser ray strength. The improvement of the sensitive-measuring input-converter thermo-electrical elements is accompanied not by new materials attracting and not by the transition to more complex materials and/or technology but by returning to known simpler materials both on composition and on technology.