

Высокоэффективный термоэлектрический преобразователь (ТЭП) на основе новых эффектов генерации ЭДС в полупроводниках SmS

Часть I. РАССМОТРЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ В ЦЕЛОМ

АННОТАЦИЯ

При исследовании высокотемпературных электрических свойств редкоземельных полупроводников было обнаружено новое физическое явление, заключающееся в возникновении спонтанной генерации электрического напряжения образцом материала при его равномерном нагреве. В основе эффекта лежит коллективный процесс изменения валентности ионов редкоземельного металла (самария), сопровождающийся скачкообразным увеличением количества свободных электронов. Был изготовлен и испытан макет ТЭП, осуществляющий преобразование в температурном интервале 150 - 450 °С. Экспериментально определённый коэффициент полезного действия макета преобразователя энергии оказался равным ~ 47% при T=150 °С и ~ 30% при T=450 °С. Генерируемое электрическое напряжение составило около 0,5 В. Вес макетного образца термоэлемента составлял всего 10 г. Наиболее близким аналогом предлагаемого преобразователя по выполняемой функции является классический термоэлектрический преобразователь на основе эффекта Зеебека, широко применяемый на практике. Основным параметром, характеризующим качество термоэлектрических преобразователей, считается коэффициент полезного действия. По этому параметру даже первый макетный образец предлагаемого преобразователя превосходят лучшие из термоэлектрических в 3 - 4 раза. Следует отметить, что теория и практика классического термоэлектрического преобразования энергии уже в основном исчерпали себя и в последние десятилетия существенного прогресса здесь не наблюдается. Пределы совершенствования нового принципа пока не ясны, но и уже достигнутые результаты являются достаточными для начала разработки коммерческого генератора. Такие генераторы будут предназначены для всех тех областей, где сейчас применяются термоэлектрические генераторы, то есть для "малой энергетики". Они будут обладать такими уникальными качествами как полная автономность, высокая надёжность, простота эксплуатации, долговечность, малогабаритность, высокие энергетические характеристики. В предлагаемых преобразователях отсутствуют движущие части и необходимость создания больших градиентов температуры, что упрощает технологию их изготовления и удешевляет производство по сравнению, как с термоэлектрическими, так и с другими энергоисточниками. Для термоэлектрогенераторов экономически показано, что когда их КПД достигнет 15% (сейчас реальные цифры менее 10%), то они будут способны конкурировать со многими другими энергоисточниками. В предлагаемом преобразователе эти цифры будут перекрываться в 2-3 раза, т.к. уже сейчас приближаются к 40-50%. Это дает основание утверждать, что предлагаемый термоэлектрический преобразователь найдет эффективное применение во многих областях техники. Могут быть созданы солнечные термоэлектрогенераторы, термоэлектрогенераторы на органическом топливе, изотопные и реакторные термоэлектрогенераторы (рабочий материал преобразователя обладает рекордно высокой радиационной стойкостью среди известных полупроводников). Благодаря сравнительно низкой рабочей температуре преобразователя перспективным представляется его использование для утилизации потерь тепловой энергии (двигатели внутреннего сгорания, сжигание мусора, ядерные отходы и др.). Они могут найти применение в объектах аэрокосмической, автомобильной, судостроительной, нефтяной промышленности и других областях, где необходимо наличие автономных источников электроэнергии.

Принцип действия

Принцип действия термоэлектрического преобразователя основан на эффекте генерации электродвижущей силы при нагреве полупроводникового материала на основе сульфида самария (SmS) в условиях отсутствия внешних градиентов температуры. Конструктивно ТЭП могут быть разработаны и изготовлены в двух вариантах, схематически представленных на рис. 1: радиальном (рис.1, а) и плоском (рис.1, б). Радиальный вариант более функционален, а плоский - более технологичен.

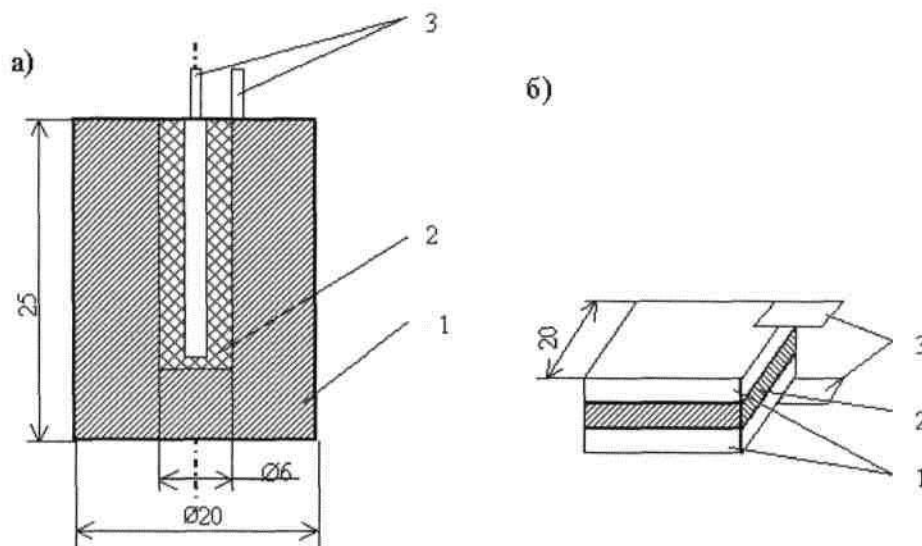


Рис.1. Конструкции термоэлементов

Термоэлектрический преобразователь состоит из:

- массивного металлического корпуса (теплоаккумулятора), служащего для передачи тепла теплоносителя преобразующему элементу, поддержания преобразующего элемента в рабочем тепловом режиме во время скачков его температуры, сопровождающих процесс генерации, а также для защиты преобразующего элемента от внешних воздействий (рис.1, 1)
- преобразующего элемента из монокристаллического либо поликристаллического SmS (возможно поликристаллической плёнки), легированного донорными примесями вдоль направления расположения электродов (рис.1, 2)
- металлических электродов (рис. 1,3)

Ожидаемые параметры ТЭП	
Рабочие температуры	+130 ÷ 500 °С
Средний КПД в рабочем интервале температур	~ 40%
Генерируемое напряжение	постоянное, 0,5 ÷ 1,5 В
Внутреннее электросопротивление	0,1-1 Ом
Вес	-10 г
Радиационная стойкость к у- излучению	до экспозиционных доз ~ 10 ¹⁰ Рентген

Другие эксплуатационные параметры ТЭП будут определены в процессе его "разработки".

Для пояснения принципа действия ТЭП, приводящего к качественно новым эксплуатационным параметрам по сравнению с существующими, рассмотрим форму генерируемого электрического напряжения и возникающие при этом температурные режимы для предлагаемого ТЭП на примере данных, снятых с макета радиальной конструкции (рис.1 а).

ТЭП нагревался на пламени спиртовки, затем спиртовка была погашена и ТЭП остывал до комнатной температуры. На рис. 2 представлена зависимость генерируемой при этом электродвижущей силы от времени (пунктирная линия - момент прекращения внешнего нагрева).

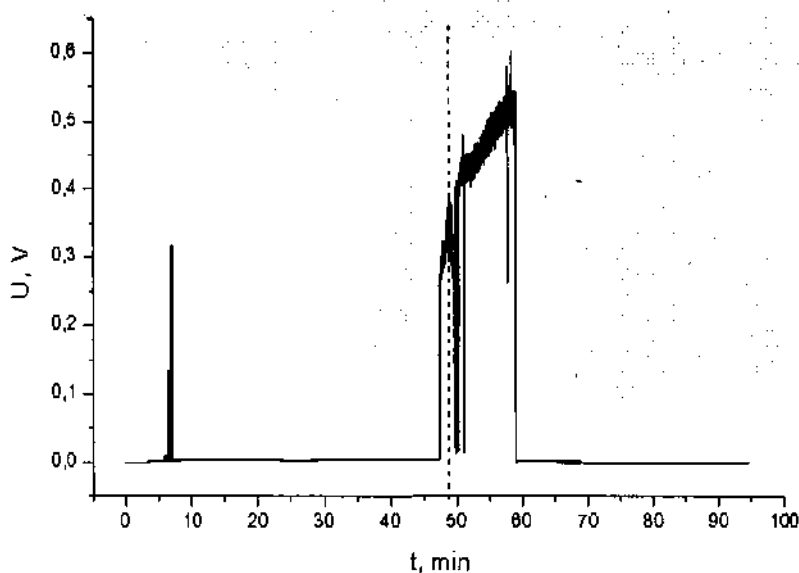


Рис. 2. Зависимость генерируемой электродвижущей силы от времени при его внешнем нагреве (пунктирная линия – момент прекращения внешнего нагрева).

Из рис. 2 следует:

- 1) генерация развивается не постепенно, а скачком при достижении критического значения параметров (температуры, концентрации свободных электронов);
- 2) генерируемое напряжение состоит из большого числа отдельных импульсов, соответствующих коллективному изменению валентности ионов самария в различных областях преобразующего элемента, имеющих различную концентрацию свободных электронов из-за различной степени легирования SmS;
- 3) генерация напряжения продолжает развиваться после выключения источника внешнего нагрева, что является следствием саморазогрева SmS, возникающего в процессе генерации и не дающего в течение некоторого времени опуститься температуре ниже критического значения.

Пункт 3 можно рассмотреть подробнее. На рис. 3 представлена зависимость генерируемого напряжения от температуры ТЭП, снятая в том же эксперименте, что и кривая рис. 2. Из рис. 3 следует, что каждому импульсу напряжения соответствует импульсный разогрев ТЭП. Этот разогрев является следствием фазового перехода SmS в генерирующей области из полупроводникового состояния в металлическое ($Sm^{2+}S \rightarrow Sm^{3+}S$), идущего с выделением энергии. Эти импульсы разогревают до критической температуры область SmS, соседнюю с генерирующей и в ней тоже начинается генерация (новый импульс напряжения и импульс Т). Далее этот процесс развивается по цепочке. При общем охлаждении ТЭП при выключении внешнего нагрева процесс генерации напряжения будет продолжаться до тех пор, пока в результате импульсного нагрева будет достигаться критическая температура, необходимая

для начала генерации (пунктирная линия на рис. 3).

Из вышеизложенного ясен порядок работы ТЭП: необходимо нагреть термоэлемент до $T \sim 450 \text{ }^\circ\text{C}$ и не давать ему охладиться до $T \leq 130 \text{ }^\circ\text{C}$. При этом будет происходить генерация напряжения порядка 0,5 В.

На рис. 4,5 представлены фотографии макетного образца ТЭП, работающего на новом принципе, и температурная зависимость его КПД.

Таким образом, повышение в 4 раза основного параметра преобразователя энергии, КПД, по сравнению с ближайшими аналогами термоэлектрическими преобразователями, достигается за счёт применения нового принципа преобразования, основанного на неизвестном ранее физическом эффекте. Применяемый материал, SmS, является наиболее радиационно стойким среди известных полупроводников, что позволяет рассчитывать на его более успешное применение в изотопных и реакторных термоэлектродвигателях. В предлагаемых преобразователях отсутствуют движущие части и необходимость создания больших градиентов температуры, что упрощает технологию их изготовления и удешевляет производство по сравнению как с термоэлектрическими, так и с другими энергоисточниками. Следует отметить также нетоксичность SmS, которая определяется помимо прочего, высокой температурой плавления ($2300 \text{ }^\circ\text{C}$) и отсутствием какого-либо разложения или газовыделения в рабочем интервале температур.

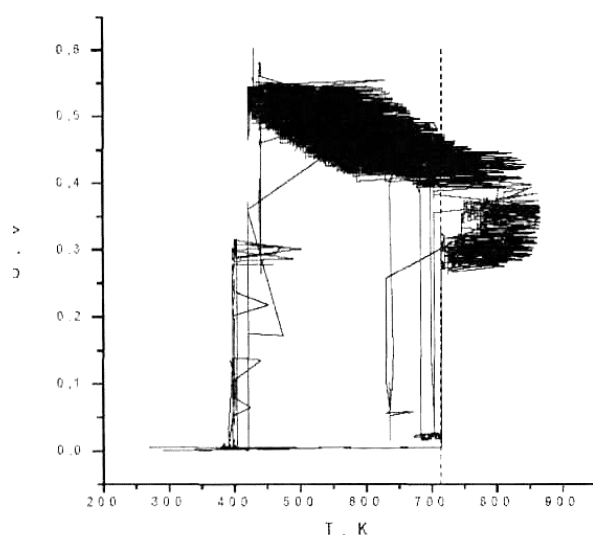


Рис. 3. Зависимость генерируемой термоэлектродвижущей силы от температуры. Пунктирная линия — температура в момент прекращения внешнего нагрева. Чёрная линия — нагревание, красная (серая) — охлаждение.

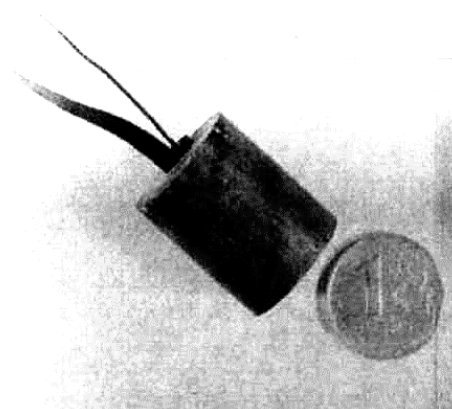


Рис. 4. Экспериментальный ТЭП радиальной конструкции (для сравнения сфотографирована также монета).

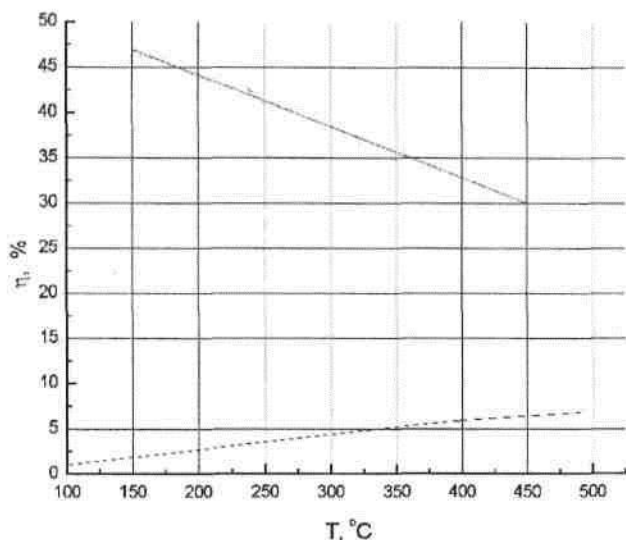


Рис. 5. Температурная зависимость коэффициента полезного действия макетного образца ТЭП – верхняя кривая (расчёт из экспериментальных данных). Для сравнения приведена аналогичная зависимость для одного из лучших существующих термоэлементов – нижняя кривая (Т – температура горячего источника).

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Предлагаемые термоэлектрические преобразователи предназначены для применения в термоэлектрических генераторах. Такие генераторы будут предназначены для всех тех областей, где сейчас применяются обычные термоэлектрические генераторы, то есть для «малой энергетики». Они будут обладать такими уникальными качествами, как полная автономность, высокая надёжность, простота эксплуатации и конструкции, долговечность, малогабаритность, высокие энергетические характеристики, технологичность в производстве. Данные термоэлектрические преобразователи могут найти применение в:

- Термоэлектродвигателях на органическом топливе (твёрдом, жидком, газообразном) для питания станций катодной защиты, предохраняющих магистральные газо- и нефтепроводы и радиорелейные линии от коррозии, питание бытовой радио- и телеаппаратуры, средств связи, освещения, подзарядки аккумуляторов, в частности, для питания электрооборудования, автомобилей и тракторов. К этой же группе следует отнести термоэлектродвигатели, работающие за счёт тепла отработанных газов реактивных двигателей, особенностью и преимуществом которых следует считать их малое время работы - порядка нескольких минут; возможность всех этих применений определяется чрезвычайно большими КПД преобразователей, на порядок превосходящий КПД реально существующих;
- Солнечных термоэлектродвигателей, использующих энергию солнечных лучей; схемы таких генераторов достаточно хорошо разработаны, однако, экономическая целесообразность их построения упирается в малый КПД существующих преобразователей; температурный рабочий интервал предлагаемых преобразователей как раз хорошо подходит для солнечных генераторов;
- Изотопных термоэлектродвигателей, использующих энергию, выделяющуюся при распаде радиоактивных изотопов. Последние получают из отходов ядерного реактора и путём захвата нейтронов материалами при облучении в реакторе; находят применение для питания различных устройств в море и под водой, в трудно доступных и отдалённых районах Земли, а также в космических аппаратах (различные спутники, космические аппараты для исследования

дальнего космоса): Основной недостаток - невысокие удельные тепловые потоки, что вызывает необходимость изготовления термоэлементов большой высоты для создания требуемого градиента температур. Предлагаемые преобразователи не нуждаются в создании градиента температур, их радиационная стойкость выше, чем у полупроводниковых термоэлектрических материалов, что приводит к уменьшению эффектов деградации, КПД почти на порядок выше - все это характеризует преимущества нового принципа преобразования в данных применениях;

- Реакторных термоэлектродгенераторах, использующих тепло ядерного реактора. Возникающие здесь при применении обычных преобразователей технические проблемы, связанные с отводом тепла от холодных спаев и нестабильностью свойств полупроводников под воздействием радиоактивных излучений могут быть решены за счёт отсутствия необходимости создания градиента температуры и высокой радиационной стойкости SmS;
- Комбинированных энергоустановках с целью увеличения КПД и полного использования тепловой энергии (в ядерных энергетических установках, автомобильных и судовых двигателях внутреннего сгорания, установках для сжигания мусора и т.п.).

Таким образом, предлагаемые ТЭП могут найти применение в объектах аэрокосмической, автомобильной, судостроительной, нефтяной промышленности и других областях, где необходимо наличие автономных источников электроэнергии.

ЧАСТЬ II. НЕКОТОРЫЕ ДЕТАЛИ ПРОБЛЕМЫ

1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ВЫРАБОТКИ ЭДС В РАБОЧЕМ ЭЛЕМЕНТЕ ИЗ SmS. ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ПРОФИЛЬ ПО ТОЛЩИНЕ РАБОЧЕГО ЭЛЕМЕНТА, СООТВЕТСТВУЮЩИЙ МАКСИМУМУ ЭДС В УСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ.

Принцип действия основан на обнаруженном автором и его сотрудниками эффекте генерации ЭДС в сульфиде самария (SmS) при равномерном нагреве образца, т.е. в условиях отсутствия внешних градиентов температуры [1,2]. Он заключается в том, что при наличии градиента концентрации примеси, образующей донорные уровни в запрещённой зоне, в полупроводнике при нагреве возникает ЭДС в направлении этого градиента. При этом напряжённость электрического поля

$$E = K \cdot \text{grad} N_i, \quad (1)$$

где N_i – концентрация легирующей примеси, K – коэффициент пропорциональности, являющийся сложной функцией параметров данного полупроводника и зависящий от температуры [3]. Для SmS зависимость $K(T)$ имеет скачок при $T=400\div 500$ К в сторону увеличения и возрастает на порядок и более. Этот скачок является следствием фазового перехода мотовского типа в системе дефектов, когда электроны накапливаются в зоне проводимости в количестве, достаточном для того, чтобы заэкранировать кулоновский потенциал дефектных ионов настолько, что электроны уже не могут на них удерживаться и происходит коллективный выброс их всех в зону проводимости [4]. Далее происходит их диффузия в область полупроводника, где величина N_i меньше. В этой области фазовый переход ещё не произошёл при данной T . Если в направлении диффузии и $\text{grad} N_i$ на образце расположить два электрода, то на них мы будем наблюдать электрическое напряжение U (рис. 1).

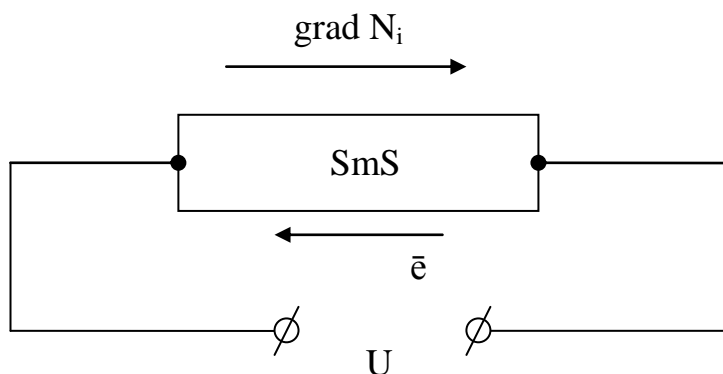


Рис. 6.

Таков процесс элементарного акта возникновения ЭДС в рабочем элементе преобразователя из SmS.

Гораздо менее ясна физика установления режима непрерывной генерации ЭДС на основе этих элементарных актов [2]. Здесь дело связано с тепловыми процессами, сопровождающими данный фазовый переход. При коллективном опустошении уровней N_i энергия поглощается электронной системой (происходит охлаждение), т.к. электроны переходят с уровней $E_i=0,045$ eV в зону проводимости, повышая свою энергию. Однако, когда произошёл переход $\text{Sm}^{2+}\text{S} \rightarrow \text{Sm}^{3+}\text{S}$, энергия выделяется (имеет место саморазогрев), т.к. происходит сжатие вещества из-за существенного уменьшения размеров иона самария:

ионный радиус Sm^{2+} равен 1,14 Å, а радиус Sm^{3+} – 0,96 Å. По-видимому, в SmS устанавливается некий волновой процесс, связанный с разогревом и охлаждением соседних областей вещества. Этот процесс поддерживается внешним нагревом. На данный момент этот волновой процесс экспериментально зарегистрирован нами и изучается путём Фурье-анализа выходного сигнала преобразователя.

Температурный профиль по толщине рабочего элемента существенной роли в процессе генерации не играет, т.к. эффект основан не на градиенте температуры, а на градиенте концентрации легирующей примеси.

2. ПОКАЗАТЕЛИ УСТРОЙСТВА. КАК ОПРЕДЕЛЁН КПД?

Предельные показатели устройства до конца не выявлены так же, как и не создана пока оптимальная конструкция преобразователя. К настоящему времени экспериментально достигнуты следующие результаты:

<i>Характеристика</i>	<i>SmS</i>	<i>Термоэлементы, работающие по классическому принципу</i>
<i>Удельная генерируемая мощность, Вт/гр</i>	<i>до 1,8 [5]</i>	<i>≤0,2</i>
<i>Напряжение, генерируемое единственным термоэлементом, В</i>	<i>до 5 [5]</i>	<i>≤0,1</i>
<i>Внутреннее сопротивление, Ом</i>	<i>~ 1</i>	<i>0,2÷2</i>
<i>Радиационная стойкость электрических параметров (экспозиционная доза до изменения параметра на 1%, Рентген)</i>	<i>1010</i>	<i>109</i>
<i>Максимальная мощность, полученная с единичного термоэлемента, Вт</i>	<i>5·10⁻³</i>	<i>единицы</i>
<i>КПД преобразования, %</i>	<i>30÷47*</i>	<i>до 10</i>

* – расчётные данные

Для сравнения в таблице приведены также результаты, достигнутые при разработке лучших термоэлектропреобразователей, работающих по классическому принципу (эффект Зеебека) в том же интервале температур 400÷600 К, который для классического термоэлектричества считается низкотемпературной областью. Наблюдается существенное превосходство нового принципа термоэлектропреобразования почти по всем характеристикам за исключением максимальной мощности, генерируемой одним термоэлементом.

Может вызывать сомнение способ определения КПД. Этот вопрос не исследован подробно и был оставлен до тех пор, когда будут получены имеющие промышленное значение мощности (именно тогда он и приобретёт практический смысл).

Оценки КПД преобразования тепловой энергии в электрическую на основе наблюдаемого

эффекта проводились следующим образом [6]. Исходя из того, что ЭДС, возникающая в эффекте, сопровождается возникновением градиентов температуры в образце, мы попробовали использовать формулу для классического термоэлектричества. В основу расчёта была положена обычная формула, полученная из термодинамических соображений и используемая для определения максимальной эффективности термоэлектрических преобразователей:

$$\eta_{\max} = \frac{T_h - T_c}{T_c} \cdot \frac{M - 1}{M + T_c / T_h}, \quad (2)$$

где $M = \sqrt{1 + zT_M}$; $T_M = (T_h + T_c)/2$; T_c – температура холодного спаеа, T_h – горячего. Тепловые режимы, возникающие в образце в процессе генерации ЭДС могут быть взяты из эксперимента [7] (см. ч. I рис. 3). В качестве T_c следует взять среднюю температуру среды и образца в момент начала следующего импульса ЭДС. В качестве T_h следует взять температуру, которая достигается в течение данного импульса. Можно также вычислить величину термоэлектрической добротности $z = \alpha^2 \sigma / \lambda$, если для величин электропроводности (σ) и теплопроводности (λ) взять типичные значения для SmS. В качестве эффективного значения термоэдс (α) формально можно использовать генерируемую ЭДС соотнесённую к $T_h - T_c$. Полученное значение $z \sim 0.1 \text{ K}^{-1}$. Соответственно максимально достижимый КПД рассчитанный в температурном интервале $420 \div 550 \text{ K}$ составляет $47 \div 30\%$.

3. ЗАВИСИМОСТИ ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ (КПД) ОТ МАССЫ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО ЭЛЕМЕНТА

Вопрос этот сложен по той причине, что пока нет устоявшейся конструкции термоэлемента. Исходя из наших экспериментальных данных, от массы рабочего элемента зависит не КПД, а величина генерируемой мощности (как и в классическом термоэлектричестве). От геометрии рабочего элемента КПД должен зависеть. Если в классическом термоэлементе КПД зависит от разницы температур горячего и холодного спаев (см. формулу 2), то в нашем случае КПД зависит от разницы концентраций N_i у электродов. В SmS величина N_i не должна быть больше $\sim 10^{21} \text{ см}^{-3}$ [3], что примерно соответствует составу Sm_{1,17}S. При большем количестве избыточный Sm начинает выделяться в виде металлических включений и перестаёт участвовать в процессе генерации. Таким образом (см. рис. 1), для создания максимального $\text{grad}N_i$ необходимо, чтобы у одного электрода состав был SmS, а у другого Sm_{1,17}S и эти электроды должны находиться максимально близко друг к другу. Однако, если их слишком сблизить, то при нагревании вследствие диффузии составы быстро выровняются (будет состав Sm_{1,085}S), градиент исчезнет и генерация прекратится. Из этих и некоторых других соображений следует, что рабочий элемент должен быть максимально тонким в направлении расположения электродов, но иметь некоторую оптимальную величину толщины. Такая ситуация была реализована нами в [5] (5 В; 1,8 Вт/гр).

4. СТОИМОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ SmS, ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА (УД. ВЕС, ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ, УД. ЭЛ. СОПРОТИВЛЕНИЕ, ПЛАСТИЧНОСТЬ ПРОЧНОСТЬ, ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ И Т.Д.)

Стоимость 1 кг сульфида самария при налаженном производстве составляет $\sim \$ 500$.

Физические свойства его таковы:

- Полупроводник с n-типом проводимости
- Удельный вес – $5,7 \text{ Г/см}^3$
- Теплопроводность – $0,05 \text{ Вт/см}\cdot\text{град}$
- Теплоёмкость – $1,8 \text{ Дж/см}^3\cdot\text{град}$
- Удельное электросопротивление – $0,01 \div 0,05 \text{ }\Omega\cdot\text{см}$

- Концентрация носителей заряда – $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$
- Модуль Юнга – $1,2 \cdot 10^6 \text{ кГ/см}^2$
- Предел прочности – 4000 кГ/см^2
- Температура плавления – $2300 \text{ }^\circ\text{C}$

Простота технологий, основанных на SmS, связана с большой концентрацией носителей заряда и невозможностью получения этого материала с р-типом проводимости. Это приводит к возможности обходиться без специальных мер, направленных на повышение чистоты производства. Данное полупроводниковое производство – самое “грязное” из существующих. Трудности технологии связаны с высокотемпературностью данного соединения.

5. Возможности промышленного освоения (производство материала в гр, кг, тоннах)

Для промышленного освоения производства SmS нет никаких принципиальных препятствий, поскольку в советское время он выпускался в ГИРЕДМЕТ’е. Килограммы SmS мы можем производить своими силами. Промышленную технологию производства материала для термоэлементов из SmS с градиентом легирующей примеси ещё только предстоит разработать.

6. Конструкция устройства. Можно ли обойтись без громоздкого внешнего металлического корпуса (аккумулятора тепла)?

Конструкция устройства ещё окончательно не сложилась. Однако, уже сейчас ясно, что она может существенно отличаться от того, что представлено в ч. I. В частности, при стабильном обтекании рабочего элемента внешним теплоносителем, громоздкий металлический аккумулятор тепла не нужен.

часть III. Предложения по дальнейшему сотрудничеству

Сотрудничество должно быть направлено на изготовление макетного образца термоэлектропреобразователя на основе нашего эффекта, обладающего мощностью представляющей практический интерес. Работу предполагается разделить на 3 этапа:

1. На первом этапе следует решить проблему, которая в настоящее время является наиболее актуальной. Необходимо повысить величину мощности, генерируемой единичным термоэлементом от величин порядка 10^{-3} Вт до величин порядка единиц Вт. Таковые мощности являются приемлемыми для практики и характерны для термоэлементов, работающих на обычном термоэлектрическом эффекте. Следует отметить, что за предыдущие полтора года нам удалось повысить мощность с $\sim 10^{-8}$ Вт до $\sim 10^{-3}$ Вт. Это вселяет некоторый оптимизм. На этом этапе акцент будет сделан на технологии получения **gradN**, в единичном элементе и оптимизации геометрии и размеров термоэлемента.
2. На втором этапе следует разработать схему коммутации термоэлементов и изготовить макет генератора из нескольких термоэлементов. Этот макет будет работать от теплоносителя, близкого по своим параметрам к таковому в планируемой энергетической установке. Он должен выйти на мощность ~ 10 Вт. На этом этапе будет также исследована стабильность **gradN**, в SmS в условиях облучения.
3. Трудно предвидеть задачи, которые будут решаться на третьем этапе. Однако, цель его ясна – это создание макета работоспособного в реальных условиях электростанции и имеющего мощность ~ 1 кВт. По-видимому, после выполнения этапов 1 и 2 задача получения мощности не будет основной. Основным будут проблемы стабильности генерации по времени, при колебаниях температуры, в условиях облучения.

Литература

1. М.М. Казанин, В.В. Каминский, С.М. Соловьёв. Аномальная термоэдс в моносulfиде самария. ЖТФ, 2000, т.70, в. 5, стр. 136-138.
2. В.В. Каминский, С.М. Соловьёв. Возникновение электродвижущей силы при изменении валентности ионов самария в процессе фазового перехода в монокристаллах SmS. ФТТ, 2001, т. 43, в. 3, стр. 423-426.
3. В.В. Каминский, А.В. Голубков, Л.Н. Васильев. «Дефектные ионы самария и эффект генерации электродвижущей силы в SmS». ФТТ, 2002, т.44, вып.8, с.1501-1505
4. В.В. Каминский, Л.Н. Васильев, М.В. Романова, С.М. Соловьёв. Механизм возникновения электродвижущей силы при нагревании монокристаллов SmS. ФТТ, 2001, том 43, в. 6, стр. 997-999.
5. В.В. Каминский, А.В. Голубков, М.М. Казанин, И.В. Павлов, С.М. Соловьёв, Н.В. Шаренкова, Термоэлектрический генератор (варианты) и способ изготовления термоэлектрического генератора, – Заявка на изобретение №2005120519/28 от 22.06.2005, положительное решение от 16.06.2006.
6. V.V.Kaminski, L.N.Vasil'ev, M.M.Kazanin, S.M. Solov'ev and A.V.Golubkov "Electromotive force generation in SmS based nanostructures" – Fifth ISTC scientific Advisory Committee Seminar "Nanotechnologies in the area of physics, chemistry and biotechnology", St.Petersburg, May 27-29 2002, p.131-134.
7. В.В. Каминский, С.М. Соловьёв, А.В. Голубков. Генерация электродвижущей силы при однородном нагреве полупроводниковых образцов моносulfида самария. Письма в ЖТФ, 2002, т.28, в.6, стр. 29-34.

Руководитель проекта, д.т.н.

Каминский Владимир Васильевич