

А. В. Каримов, Д. М. Ёдгорова, Р. А. Саидова, Д. Р. Джураев*, А. А. Тураев*.

О ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРОННОГО БЕЗИНДУКТИВНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

ФТИ НПО “Физика-Солнце“ АН РУз, karimov@uzsci.net,
*Бухарский Государственный Университет, djuraev2002@mail.ru

В настоящей работе сообщается о возможности создания термоэлектронного безиндуктивного трансформатора основанного на принципе электричество-тепло-электричество ($E \rightarrow P \rightarrow E$). В нем используется элемент Пельтье $t_1 - p(n) - t_2$ состыкованный с затворной областью полевого термотранзистора с $p - n$ -переходом, служащего в качестве приемника тепловых сигналов. Результаты работы позволяют надеяться, что в недалеком будущем такие приборы получат широкое распространение и будут доступными, как и обычные трансформаторы.

Введение. Известно, что в основе работы трансформатора лежит магнитная связь между первичной и вторичной обмотками. Обмотки представляют собой проволоку намотанную на катушку сердечника обладающей индуктивностью. При работе трансформатора создаваемое магнитное поле влияет на расположенные рядом элементы, создавая помеху. Кроме того, возможны потери коэффициента полезного действия, а сравнительно большие габариты этих электромеханических трансформаторов затрудняет их использование в опто и микроэлектронных устройствах.

Отличающиеся малыми размерами и долговечностью трансформаторы могут быть созданы на основе новых принципов трансформации электрических сигналов. В этом аспекте представляют интерес опто и термоэлектронные трансформаторы, в которых вместо магнитной среды можно использовать оптическую и тепловую. Оптоэлектронный трансформатор действует по принципу электричество – свет – электричество. В нем в качестве первичного приемника используется светодиод, излучение которого принимается фотодиодом и усиливается транзистором [1]. В другом случае в качестве вторичной цепи используются туннельно-связанные $p^+ - i - n^+$ фотодиоды, которые создают высокое выходное напряжение [2]. Вместе с тем представляют интерес, также нефотонные – тепловые приемные устройства на основе полупроводников, окислов металлов и сверхпроводников [3]. Интерес к тепловым устройствам обусловлен возможностью создания на основе принципа ($E \rightarrow P \rightarrow E$) новых термоэлектронных трансформаторов, потенциометров, резисторов и различных переключателей, отличающихся малыми размерами, долговечностью по сравнению с электромеханическими аналогами.

В настоящей работе на основе принципа электричество – тепло – электричество ($E \rightarrow P \rightarrow E$) рассматривается возможность создания термоэлектронного безиндуктивного трансформатора.

Изготовление теплоизлучателя и теплоприемника, исследование их электрофизических характеристик. Теплоизлучатель изготовлен на основе полупроводникового соединения теллурида висмута и сурьмы в виде прямоугольного параллелепипеда с длиной 15 – 20 мм и сече-

нием $1 \times 5 \text{ мм}^2$ методом прессования. Выбор теллурида висмута и сурьмы обусловлен его высокой термоэлектрической эффективностью по сравнению с $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, PbTe [4]. В частности, измельченные частицы ($\leq 40 \text{ мкм}$) слитка р-типа $(\text{BiSb})_2\text{Te}_3$ с добавками бора прессовали под давлением ($1 \text{ тн}/80\text{-}90 \text{ мм}^2$) и в последующем спекали при $300 - 400 \text{ }^\circ\text{C}$ по технологии [5]. Торцевые контакты с площадью 5 мм^2 получены напылением Ag с последующим лужением мягким припоем из сплава висмута олово и сурьма (Bi+Sn+Sb) для создания токонесущих выводов. В результате получается структура металл – полупроводник – металл ($m_1 - p - m_2$), где граница перехода между металлом и полупроводником является рабочим и такая конструкция позволяет легко реализовать эффекты Пельтье и Зеебека. Как известно, в элементе Пельтье пропускание тока приводит к выделению и поглощению тепла на месте контакта полупроводника и металла. Тот контакт, с которым сталкиваются электроны, нагревается, а другой контакт охлаждается. При этом температура средней части элемента сохраняется на уровне окружающей среды (комнатной). Смена полярности прилагаемого напряжения приведет к охлаждению горячего конца и нагреву холодного конца, т.е. в выбранном $\text{Ag} - p(\text{BiSb})_2\text{Te}_3 : \text{B} - \text{Ag}$ -теплоизлучателе оба конца являются рабочими [6]. Оптимизация термоэлектрических параметров теплового излучателя осуществлена путем подбора размеров смешиваемых частиц и соотношения $(\text{BiSb})_2\text{Te}_3$ к бору, а также отжиг в температурном поле при $400 - 600 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение $20 - 40$ секунд (табл. 1). Из таблицы видно, что при объемной

Зависимости термо – э.д.с. от рабочего тока
 $\text{Ag} - p(\text{BiSb})_2\text{Te}_3 : \text{B} - \text{Ag}$ -структуры до и после отжига. Таблица 1

Отжиг	I, мА	20	40	60	80
До	α , мкВ/град	360	300	280	250
После	α , мкВ/град	180	220	280	360

доле бора 0.2 и с диаметрами измельченных частиц $80 - 100 \text{ мкм}$ до отжига термо – э.д.с. уменьшается с 360 до 250 мкВ/град. После отжига в температурном поле в течение 30 секунд термо – э.д.с. увеличивается со 180 до 360 мкВ/град. При этом мощность поглощаемого и излучаемого тепла увеличивается прямо пропорционально термо – э.д.с. и градиенту температуры, а также величине протекающего тока.

Особенности данного теплоизлучателя таковы, что с одной стороны (рис. 1, а) его торцевые контакты поглощают и излучают тепло с определенной мощностью, которое можно прямо передавать теплоприемнику в виде тепла. При этом в зависимости от выбора взаимодействующей с ним одной или другой стороны или обеих сторон ему свойственны функциональные возможности холодильника, насоса, а также собственно источника тепла. Где на рис. 1, а приведена геометрия $\text{Ag} - (\text{BiSb})_2\text{Te}_3 : \text{B} - \text{Ag}$ -структуры с указанием режимов включения от источников, поскольку вместо них в функциональной структуре будут подаваться входные сигналы. Например, постоянного или переменного низкочастотного сигнала передаваемого от предыдущего каскада в следующий каскад в радиоэлектронных устройствах. Сама структура из $p(\text{BiSb})_2\text{Te}_3$ обозначена цифрой – 1, с тепло поглощающими и излучающими переходами металл – полупроводник – 2. Как видно из рис. 1, а в положении 1 ключа К2 система работает от переменного входного сигнала, когда выделяе-

мая тепловая мощность определяется выражением $P = (I_{\text{макс}}/\sqrt{2}) \cdot R \cdot t$, где R – сопротивление теплоизлучателя и t – время. В положении 2 ключа $K2$ система переключается на постоянный источник входной сигнал, полярность которого изменяется ключом $K1$. При положительной полярности относительно контакта m_1 (рис. 1, а) в нем будет осуществляться выделение тепловой мощности ($P = \alpha \cdot T \cdot I$) $P_1 > 0$, а на втором контакте m_2 его поглощение $-P_2 < 0$, а при смене полярности наоборот, на контакте m_1 имеем охлаждение (T_2) и на контакте m_2 нагрев (T_1) [7]. А с другой

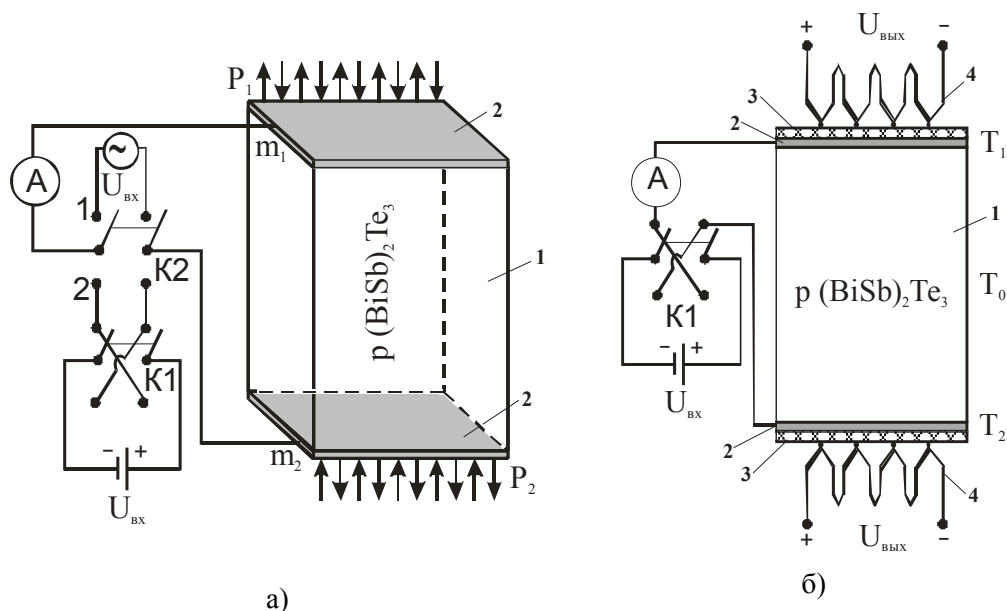


Рис. 1. Схема включения $\text{Ag} - \text{p}(\text{BiSb})_2\text{Te}_3 : \text{B} - \text{Ag}$ -структуры как теплоизлучателя (а) и функционального преобразователя постоянного тока (б):
 1 – элемент Пельтье из прессованного $\text{p}(\text{BiSb})_2\text{Te}_3$ с размерами $20 \times 5 \times 1 \text{ мм}^3$;
 2 – серебряно оловянный спай; 3 – теплообменник; 4 – термопары.

стороны это тепло можно преобразовать в электричество с помощью последовательно соединенных термопар – 4 сообщающихся с торцевыми контактами через теплообменник – 3 с целью предотвращения закорачивания вырабатываемой э.д.с. (рис. 1, б). В этом случае система работает только при подаче постоянного тока на $\text{Ag} - (\text{BiSb})_2\text{Te}_3 : \text{B} - \text{Ag}$ -структуру. С помощью ключа $K1$ меняется полярность входного сигнала. Электрический сигнал, снимаемый с выхода термопар можно усилить с помощью обычного полевого транзистора. Благодаря тому, что полевой транзистор имеет высокий коэффициент усиления по напряжению, в отличие от биполярных транзисторов, на его выходе получается большое напряжение.

Следует отметить, что тепло, выделяемое элементом Пельтье ($m_1 - p - m_2$) определяется законом зависимости входного сигнала от времени. Так в случае подачи постоянного тока (рис.2, а) на концах будем иметь постоянную температуру (рис.2, б) с различными значениями T_1 и T_2 . Если, теперь на теплоизлучатель подадим переменное напряжение, то на концах получим следящую за полярностью и амплитудой входного напряжения максимальное и минимальное изменение температуры во времени (рис. 2, в, г). Соответственно, этот тепловой сигнал, принудительно нагревая и охлаждая концы теплоизлучателя, выдает аналогичной формы зависимость температуры во времени.

Теплоприемник изготовлен на основе арсенидгаллиевого полевого транзистора с р – п-переходом, работающего в плавающем режиме затвора, когда все изменения происходящие при воздействии на затворную область можно регистрировать на выходе полевого транзистора между стоком и истоком. В нем канальная область в виде вытравленной канавки толщиной 0.15 – 0.3 мкм получена на эпитаксиальном слое nGaAs легированном теллуром толщиной порядка 0.7 – 1 мкм, выращенной жидкостной эпитаксией поверх слоя рGaAs сформированного на сильнолегированной подложке р⁺ GaAs. Концентрация носителей в рGaAs и nGaAs составляет $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и $2 \cdot 10^{16}$

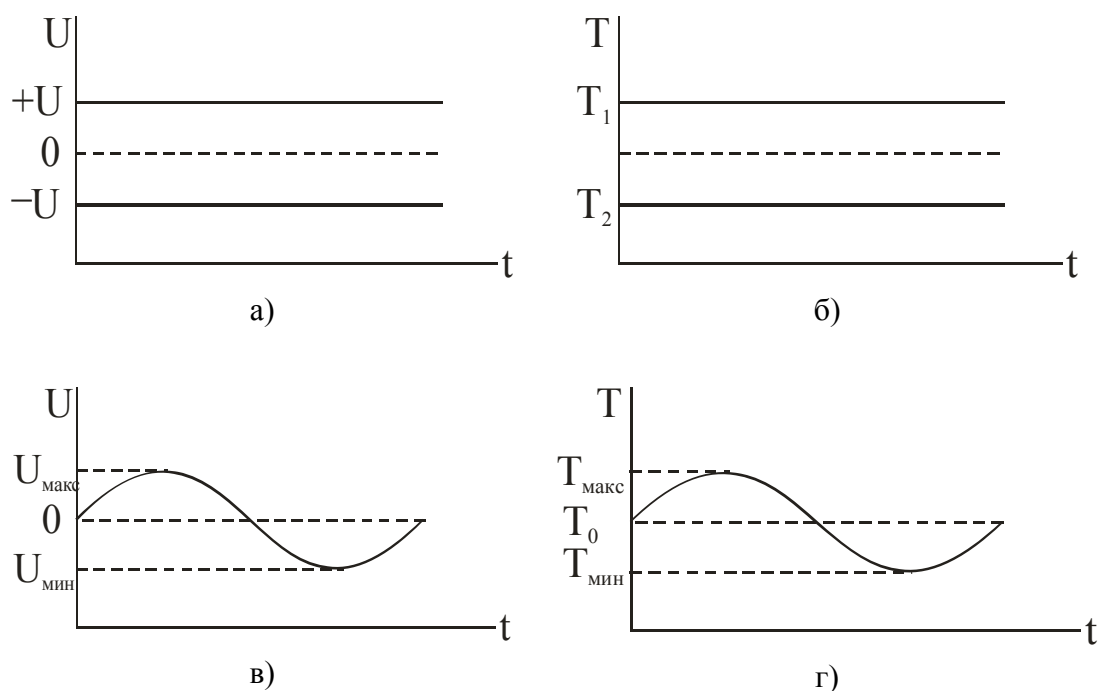


Рис. 2. Зависимости температуры на концах теплоизлучателя от входного сигнала во времени.

см^{-3} соответственно. На поверхности nGaAs нанесены омические контакты из Sn для создания электродов стока и истока, расположенных на расстоянии 50 мкм друг от друга. Затворная область р⁺ GaAs специально покрыта серебром и залужена оловянным припоем для приведения в контакт с торцом теплоизлучателя. Основная характеристика теплоприемника определяется температурной зависимостью тока протекающего в канале (рис. 3). Из рис. 3 видно, что с повышением темпе-

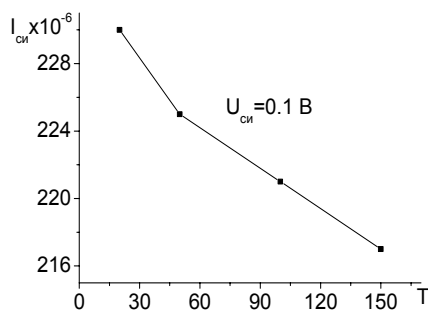


Рис. 3. Зависимость тока стока от температуры при напряжении стока $U_{cu} = 0.1 \text{ В}$ GaAs: Те; I_{cu} , А; Т,

$^{\circ}\text{C}$
 ратуры затвора от комнатной до 150°C ток стока линейно уменьшается от $230 \cdot 10^{-6}$ до $217 \cdot 10^{-6}$ А. При этом коэффициент температурной чувствительности теплоприемника определяется отношением приращения тока к разности температур затвора $k = \Delta I / \Delta T$. Его величина составляет $1 \cdot 10^{-7}$ А/град.

Таким образом, от входного электрического сигнала в элементе Пельтье имеем выделение и поглощение тепла определенной мощности, которое при поступлении в затворную область полевого транзистора приводит к пропорциональному изменению его тока стока.

Анализ электронных процессов при теплоэлектрическом преобразовании и их техническая реализация в термоэлектронных устройствах. В устройствах функционирующих на тепловых и термоэлектрических эффектах, каковыми являются теплоэлектрические преобразователи, одни физические процессы сменяются другими. Так, в термоэлектронном трансформаторе, состоящем из состыкованного тепло излучателя и теплочувствительного полевого транзистора, в зависимости от режимов их включения будем иметь соответствующие физические процессы. При подаче на него постоянного напряжения потечет ток в направлении от положительной полярности к отрицательной. Тот контакт (+), из которого в полупроводник р-типа входят электроны охлаждается, а тот контакт (-) с которым сталкиваются электроны будет нагреваться. А именно, в режиме (+) $m_1 - p - m_2$ (-) контакт m_1 будет охлаждаться, а m_2 - нагреваться и наоборот в режиме (-) $m_1 - p - m_2$ (+) контакт m_1 будет нагреваться, а m_2 - охлаждаться.. Соответственно при подаче переменного напряжения будем иметь попеременное охлаждение и нагрев каждого контакта. Как видно из рис. 4 входная цепь состоит из $\text{Ag} - p(\text{BiSb})_2\text{Te}_3 : \text{B} - \text{Ag}$ -структуры с переходами металл -

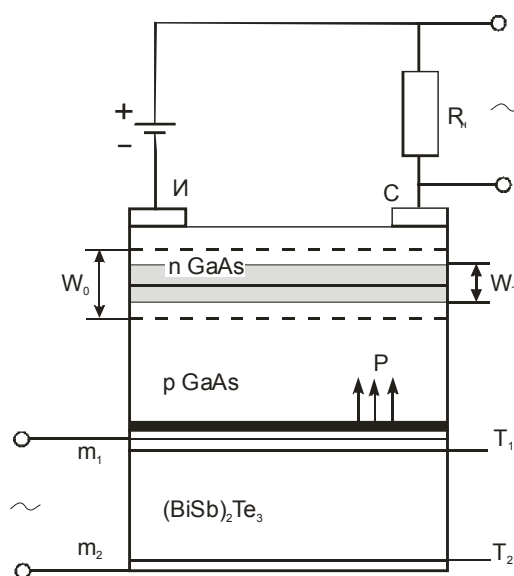


Рис. 4. Геометрическая конструкция термоэлектронного трансформатора

полупроводник - металл. Эффективность преобразования электричества в тепло будет тем больше, чем больше носителей будет принимать участие в электронном процессе, т. е. пропорционально входному току. При этом затвор полевого транзистора (теплоприемник) нагревается, что создает условия с одной стороны для уменьшения контактной разности потенциалов, а с другой сторо-

ны для уменьшения подвижности носителей канала. Анализ электронного процесса в этом случае показывает, что при уменьшении контактной разности потенциалов уменьшается толщина слоя объемного заряда (W_T) по сравнению с исходной толщиной (W_0) и приводит к уменьшению сопротивления канала. А при уменьшении подвижности носителей канала уменьшается ток стока как показано на рис. 3, приводя к существенному увеличению сопротивления канала.

Здесь следует отметить, что из-за существенного изменения сопротивления канала от подвижности носителей по сравнению с его незначительным изменением вызываемым за счет изменения толщины канала усиление входного сигнала осуществляется за счет изменения подвижности носителей канала. Усиленный выходной сигнал снимается с нагрузочного сопротивления стока. При этом коэффициент усиления может быть регулирован в широких пределах за счет введения во вторичную цепь, как в оптоэлектронном трансформаторе [1], дополнительных каскадов на транзисторах, тогда общий коэффициент усиления термотранзистора будет, состоят из произведения его коэффициента температурной чувствительности к коэффициенту усиления схемы.

Таким образом, осуществляется трансформация электричества с помощью тепла. А в случае использования во вторичной цепи термопары имеем прямое преобразование тепла в электричество, которое в последующем можно усилить с помощью усилителя постоянного тока на полевом транзисторе. Такой принцип преобразования электрического сигнала через тепловой сигнал в электрический создает ряд несомненных преимуществ, по сравнению с микроволновыми или ультразвуковыми датчиками аналогичного назначения. В частности, их функционирование, осуществляется без каких либо излучений, без помех для близко расположенных микросхем. В настоящее время повышение эффективности и качества устройств автоматики, радиотехники, электросвязи, промышленной и бытовой электроники, требует замены электромеханических трансформаторов, реле, потенциометров, кнопочных и клавишных переключателей более компактными, долговечными аналогами. В этом аспекте удовлетворение этих целей в определенной степени может быть осуществлено с помощью выше предложенных термоэлектронных трансформаторов на основе нефотонных тепловых полупроводниковых приемников, перспективных для создания системы передачи информации, электронных переключателей, счетчиков электрической энергии, термометров, микровольтметров, а также модуляторов.

На сегодня для повышения надежности электрических счетчиков разрабатываются их различные варианты. Авторы работы [8] показали возможность реализации простого электронного счетчика состоящего из датчика тока (измерительного трансформатора тока) и выполненного на печатной плате преобразователя, на интегральной микросхеме AD 7755 и модуля тарификации. Однако в этом счетчике использование измерительного трансформатора тока приводит к появлению погрешностей при оценке показаний вызываемых воздействием магнитного поля трансформатора. К вниманию разработчиков счетчиков вместо трансформатора тока можно предложить выше приведенный термоэлектронный трансформатор (рис. 4), который введен в блок схему электронного счетчика электрической энергии в виде электрической схемы (рис. 5, а). Здесь следует отметить, что при работе термоэлектронного трансформатора будем иметь переменный ток, а на емкости переменное напряжение, ход которых во времени повторяет ход входного сигнала.

Кроме того, при необходимости измерения очень низких напряжений постоянного тока от источников с низким сопротивлением применение усилителей с непосредственной связью невозможно из-за их высокого дрейфа. Известно, что в этом случае разработчики использовали метод

(М – ДМ) модуляции и демодуляции (преобразование постоянного напряжения в переменный и обратно в постоянный) постоянного тока [9]. Однако при этом свойственная им коммутационная помеха, вызываемая за счет прохождения импульсного сигнала через емкости переходов затвор-исток (сток) на выход ограничивает возможность их применения для измерений постоянного тока. Для этих целей вместо усилителей на принципе М – ДМ можно использовать термоэлектронный трансформатор постоянного тока, выполненный на основе элемента Пельтье и термопар (рис. 1, б). Как видно из рис. 5, б тепло, возникающее после подачи постоянного сигнала на термоэлемент, преобразуется с помощью термопар в электрический сигнал и подается на затвор – исток полевого транзистора, который снимается в усиленном виде через нагрузку. При этом на сток – исток полевого транзистора подается рабочее напряжение.

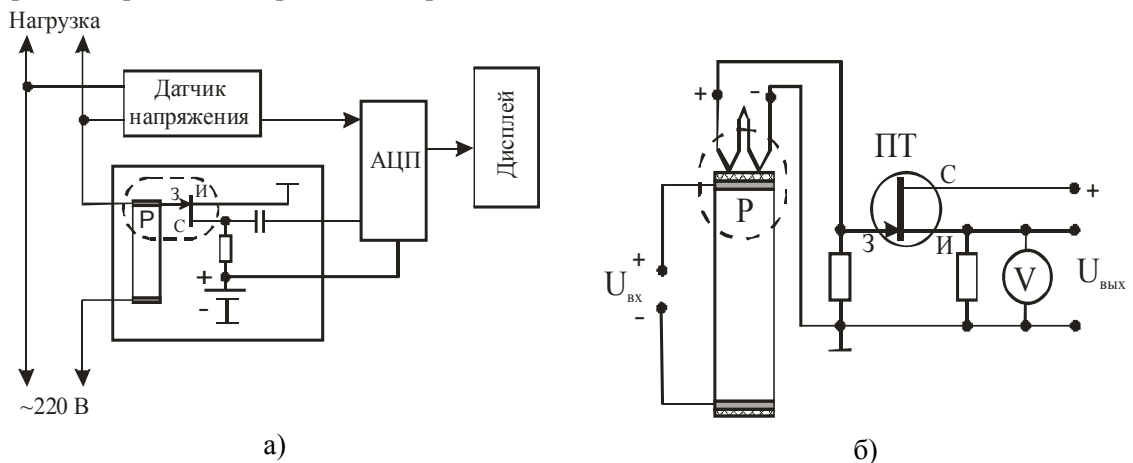


Рис. 5. Использование термоэлектронного трансформатора (а) в блок схеме электронного счетчика электрической энергии на переменном токе и (б) принципиальная схема трансформаторного усилителя постоянного тока

Заключение

В работе рассмотрены функциональные свойства элемента Пельтье и полевого транзистора как термоэлектрических преобразователей. Экспериментально показано, что с увеличением рабочего тока в $\text{Ag} - \text{p}(\text{BiSb})_2 \text{Te}_3 : \text{V} - \text{Ag}$ -структуре линейно увеличивается значение термо э.д.с. свидетельствуя об увеличении количества носителей принимающих в тепловых процессах. В полевом транзисторе в плавающем режиме затвора получено изменение тока стока от температуры. Описан предлагаемый термоэлектронный безиндуктивный трансформатор на принципе электричество-тепло-электричество (Е) с использованием элемента Пельтье $m_1 - p - m_2$ состыкованного с затворной областью полевого термотранзистора с $p - n$ -переходом, служащего в качестве приемника тепловых сигналов. Приведены примеры возможного использования термоэлектронного трансформатора в электронном счетчике электрической энергии и трансформаторного усилителя постоянного тока.

Обозначения

$^{\circ}\text{C}$ – температура в градусах Цельсия; E – электрическая энергия; $I_{\text{си}}$ – ток протекающий между стоком-истоком, А; I – ток; i – высокоомная область; k – коэффициент температурной чувствитель-

ности теплоприемника; m_1 – серебряно - оловянный контакт с одному торцу $p(\text{BiSb})_2\text{Te}_3$; m_2 – серебряно - оловянный контакт с другому торцу $p(\text{BiSb})_2\text{Te}_3$; n^+ - сильнолегированный полупроводник n-типа проводимости; P – тепловая мощность; P_1 – тепловая мощность на контакте m_1 ; P_2 – тепловая мощность на контакте m_2 ; p – полупроводник p-типа проводимости; p^+ – сильнолегированный полупроводник p-типа проводимости; R – сопротивление $p(\text{BiSb})_2\text{Te}_3$; t – время прохождения тока; $U_{\text{си}}$ – напряжение прилаемое к переходу сток-исток, В; W_0 – толщина слоя объемного заряда при исходной температуре; W_T – толщина слоя объемного заряда при заданной температуре; α , термо – э.д.с., мкВ/град;

ДМ– демодуляция; К1–первый переключатель; К2–второй переключатель; T_1 – температура на контакте m_1 ; T_2 – температура на контакте m_2 ; T – заданная температура; М – модуляция; ПТ– полевой транзистор. э.д.с. – электродвижущая сила;

Индексы: си – сток -исток ; см – смещение; t – при заданной температуре; 0 –при исходной температуре; 1 – первый торец; 2 – второй торец.

Литература

- [1]. Оптроны и их применение. <http://kazus.ru/articles/205.html>.
- [2]. Ю.Т.Ребане, Ю.Г.Шретер. Высоковольтный оптоэлектронный трансформатор напряжения на каскаде туннельно-связанных $p^+ - i - n^+$ -диодов. ПЖТФ, 1998, том 24, выпуск 21. с. 68-73.
- [3]. Старцев В.В. Новые технологии и конструкции наружной высоковольтной изоляции. Журнал «Электротехнический рынок». <http://market.elec.ru/>
- [4]. Аморфные и поликристаллические полупроводники. Под ред. В. Хейванга. Пер. с нем. М.В. Акуленок. М.: Мир. 1987. С. 63-68
- [5]. Агзамова М. Х., Ёдгорова Д.М., Каримов А.В., Нуркузиев Г. Исследование термо эдс прессованных порошков теллуридов висмута и сурьмы с добавками железа и бора. // Гелиотехника. 1993. № 3 . С. 75-77.
- [6]. Каримов А.В. Способ определения термоэдс. Патент РУз №IAP 02666, 14.02.05. Бюлл. №2, 29.04.05 г.
- [7]. Ёдгорова Д.М., Джаханов С.С., Каримов А.В., Кулиев Ш. М. Способ определения термоэдс и теплопроводности. // Приборы и техника эксперимента. 2006. №2 стр 1-3
- [8]. Энтони Коллинз. Аспекты конструирования счетчика электроэнергии, связанные с устойчивостью к электромагнитным помехам. // Компоненты и технологии. 9. 10. 2000. <http://www.pozitron.pp.ru/shem.htm>,
- [9]. Милехин А. Г. Радиотехнические схемы на полевых иранзисторах. М.: Энергия. 1976. С.63-65.