

СЕНСОРИ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

PHYSICAL SENSORS

PACS: 07.20.DT, 72.20PA, 85.80.FI

УДК: 621.382

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДАТЧИК СКОРОСТИ ПОТОКА ЖИДКОСТИ

(За матеріалами доповіді на конференції СЕМСТ-2)

Г. В. Кузнецов, В. А. Скрышевский, О. В. Третьяк

Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,
ул. Владимирская, 64, Киев, Украина

Анотация

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДАТЧИК СКОРОСТИ ПОТОКА ЖИДКОСТИ

Г. В. Кузнецов, В. А. Скрышевский, О. В. Третьяк

Проанализированы возможности применения полупроводникового термоэлектрического элемента на основе эффекта Пельтье в качестве датчика скорости потока жидкости. Исследовано влияние потока воды на условия теплообмена и электрические характеристики датчиков с термоэлектрическими элементами на основе Bi_2Te_3 . Использование импульсного метода измерения дает возможность с помощью одного термоэлектрического датчика одновременно регистрировать скорость и температуру потока воды. Определены условия оптимизации режимов измерения в зависимости от влияния внешних факторов (температуры, свойств подвижной среды).

Ключевые слова: термоэлектрический датчик, импульсный метод, коэффициент теплоотдачи, скорость потока воды,

Анотація

НАПІВПРОВІДНИКОВИЙ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ ДАВАЧ ШВИДКОСТІ ПОТОКУ РІДИНИ

Г. В. Кузнецов, В. А. Скришевський, О. В. Третьяк

Проаналізовані можливості застосування напівпровідникового термоелектричного елемента на основі ефекту Пельтье в якості давача швидкості потоку рідини. Досліджено вплив потоку води на умови теплообміну і електричні характеристики давачів з термоелектричними елементами на основі Bi_2Te_3 . Використання імпульсного методу вимірювання дозволяє за допомогою одного термоелектричного давача одночасно реєструвати швидкість і температуру потоку води. Визначені умови оптимізації режимів вимірювання в залежності від впливу зовнішніх факторів (температури, властивостей рухомого середовища).

Ключеві слова: термоелектричний давач, імпульсний метод, коефіцієнт теплопередачі, швидкість потоку води

Abstract

SEMICONDUCTING THERMOELECTRIC SENSOR OF VELOCITY FLUID

G. V. Kuznetsov, V. A. Skrychevsky, O. V. Tretiak

The possibilities of usage of the semiconducting thermoelectric device as sensor of speed of fluid are studied. The influence of a stream of water on heat exchange and electrical characteristics of thermoelectric sensor Bi_2Te_3 is explored. The pulse method of measurement allows one thermoelectric sensor to determine simultaneously speed and temperature of water stream. The conditions of optimization of modes of measurement are defined depending on an external influence (temperature, properties of the relative frame environment).

Key words: thermoelectric detector, impulse method, heat transfer coefficient, water flow velocity

Проанализированы возможности применения полупроводникового термоэлектрического элемента на основе эффекта Пельтье в качестве датчика скорости потока жидкости. Исследовано влияние потока воды на условия теплообмена и электрические характеристики датчиков с термоэлектрическими элементами на основе Bi_2Te_3 . Использование импульсного метода измерения дает возможность с помощью одного термоэлектрического датчика одновременно регистрировать скорость и температуру потока воды. Определены условия оптимизации режимов измерения в зависимости от влияния внешних факторов (температуры, свойств подвижной среды).

Ключевые слова: термоэлектрический датчик, импульсный метод, коэффициент теплоотдачи, скорость потока воды,

Высокая чувствительность полупроводниковых термоэлектрических элементов к внешним тепловым потокам традиционно используется в различных типах термодатчиков [1-2]. Подвижная среда жидкости (или газа) является эффективным фактором влияния на процессы теплообмена в термоэлектрическом элементе, что определяет возможности его применения в расходомерах в качестве датчика скорости потока [2-3]. В настоящей работе исследованы особенности импульсного метода регистрации скорости потока воды с помощью полупроводникового термоэлектрического элемента на основе эффекта Пельтье.

Принцип действия термоэлектрического датчика показан на рис.1. При прохождении электрического тока I через спаи 3 двух полупроводниковых ветвей 1 (р- и п-типа) в зависимости от полярности включения один из контактов 2 нагревается, а другой охлаждается. Количество выделенной или поглощенной теплоты Пельтье определяется свойствами

контактирующих материалов, величиной и временем прохождения тока. При использовании термоэлектрического элемента в качестве термодатчика обеспечивается теплообмен внешней текучей среды с “холодным” либо “горячим” контактом. Если при этом один из контактов термоэлектрического датчика за счет интенсивного теплоотвода поддерживается при температуре внешней среды T_0 , то изменение температуры противоположного рабочего контакта T будет определяться условиями его взаимодействия с обтекающим потоком жидкости (рис.1).

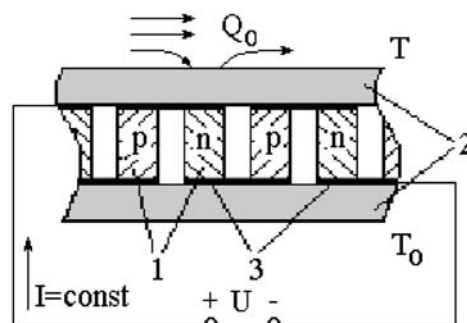


Рис. 1. Принцип действия термоэлектрического датчика.

В случае контактирования с потоком жидкости поверхности обтекания “горячего” контакта ($T > T_0$) в условиях теплового баланса поступление теплоты в результате термоэлектрического эффекта $-Q_{II}$ и джоулевого разогрева Q_J компенсируется отводом тепла за счет теплопроводности датчика Q_x и влияния обтекающего потока Q_0 :

$$-Q_{II} + \frac{1}{2}Q_J + Q_x + Q_0 = 0 \quad (1)$$

где $Q_{II} = \alpha_{12}IT_0$; $Q_J = I^2R$; $Q_x = \chi(T - T_0)$; $Q_0 = \alpha^*S_k(T - T_0)$; I — ток через датчик; α_{12} —

термоэлектродвижущая сила датчика; χ — теплопроводность датчика; R — электрическое сопротивление датчика; T — температура рабочего контакта; T_0 — температура текучей среды; α^* — коэффициент теплоотдачи; S_k — площадь поверхности снятия тепла.

Внешняя температура среды существенно влияет как на параметры полупроводниковых термоэлектрических элементов, так и на свойства потока жидкости. Это приводит как к температурным изменениям процессов теплообмена на поверхности обтекания рабочего контакта, так и процессов рассеяния и потерь тепла в термоэлектрическом датчике [4]. Основным механизмом теплопередачи в среде подвижной жидкости является конвекция, условия которой зависят от режима течения жидкости (ламинарного, турбулентного или переходного). Конвективный коэффициент теплоотдачи α^* пропорционален скорости, теплоемкости и плотности жидкости. Результаты расчета зависимости коэффициента теплопередачи α^* от скорости движения воды v в круглой цилиндрической трубе диаметром $D=50$ мм при разных температурах T_0 приведены на рис. 2. Для такой трубы движение потока становится турбулентным уже при скорости $v_0 > 0,1$ м/с и расчет проводится с учетом характеризующих турбулентное движение жидкости гидродинамических критериев подобия [5]. Повышение температуры водного потока приводит к увеличению конвективного коэффициента теплоотдачи во всем интервале скоростей, что обуславливает соответствующее возрастание чувствительности термоэлектрического датчика.

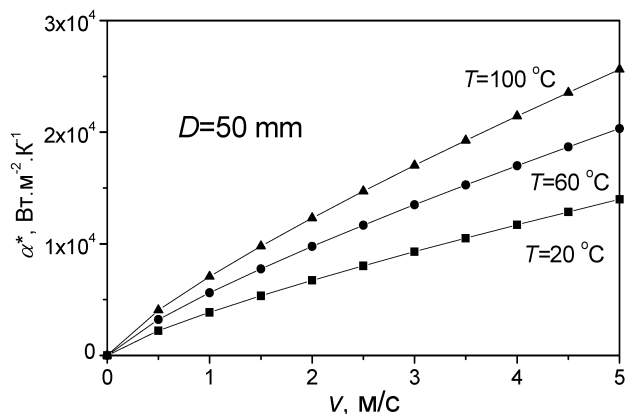


Рис. 2. Зависимость конвективного коэффициента теплоотдачи α^* от скорости движения потока воды v при разных температурах.

Нарушение условий теплообмена на поверхности обтекания при изменении скорости потока жидкости приводит к изменению характеристик термоэлектрического элемента. Основным информативным параметром является падение напряжения U на термоэлектрическом датчике, величина которого определяется из уравнения теплового баланса (1). Значение падения напряжения U зависит от величины проходящего тока $I=const$, параметров полупроводникового материала, температуры окружающей среды T_0 и температуры рабочего контакта T . Характер зависимости напряжения на термодатчике от скорости потока жидкости при фиксированной температуре T_0 и неизменном значении тока I представлен на рис. 3. С увеличением скорости потока напряжение на термоэлектрическом датчике изменяется от напряжения холостого хода U_0 (скорость потока $v_0=0$) до определяемого значением омического сопротивления напряжения $U_R=IR$ (скорость потока $v_0 \rightarrow \infty$). При изменении температуры потока жидкости изменяются как значения напряжения U_0 и U_R так и степень нелинейности зависимости $U=f(v)$.

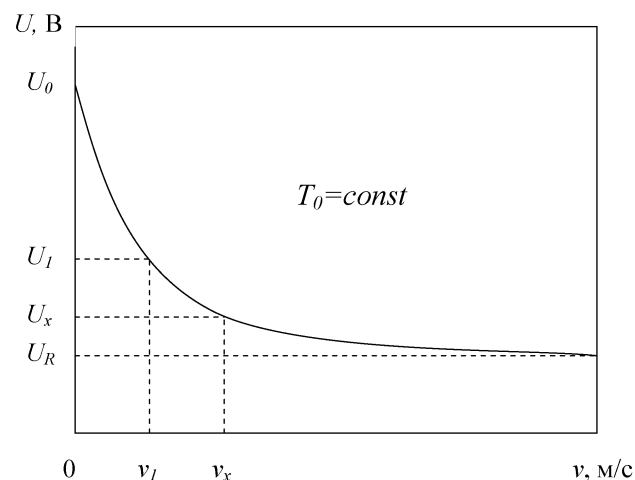


Рис. 3. Зависимость напряжения на термоэлектрическом датчике от скорости потока воды.

При прохождении постоянного тока общее падение напряжения U на термоэлектрическом датчике определяется падением напряжения U_R на омическом сопротивлении объема полупроводника и противодействием возникающей термоэлектродвижущей силы (термоэдс) U_T :

$$U = U_R + U_T, \text{ где } U_R = IR; \quad U_T = \alpha_{12}(T - T_0). \quad (2)$$

Определение по отдельности значений напряжений U_R и U_T позволяет одновременно

получать раздельную информацию о температуре и скорости потока жидкости, что является важным при измерении тепловых потерь в системах коммунального водоснабжения [2]. Амплитуда сигнала термоэдс U_T зависит от условий теплообмена (скорости и температуры исследуемого потока жидкости). В то же время значение напряжения U_R не зависит от скорости потока, но при известной температурной зависимости сопротивления полупроводника $R(T)$ дает возможность непосредственного контроля температуры потока T_0 .

Регистрация значения напряжения термоэдс U_T позволяет определять скорость потока при заданной температуре потока T_0 без учета влияния балластного сопротивления объема полупроводника. Раздельное измерение значений напряжений U_R и U_T можно осуществить с помощью импульсного режима работы (попеременного включения и отключения источника питания). В момент отключения источника $U_R=0$ и общее падение напряжения на датчике определяется лишь сигналом термоэлектродвижущей силы $U=U_T$. В дальнейшем за счет теплопроводности температуры “горячего” и “холодного” спаев с течением времени выравниваются $T \rightarrow T_0$ и напряжение на датчике уменьшается $U \rightarrow 0$.

Расчет переходных процессов в термоэлементах Пельтье обычно производится операционным методом, где время установления стационарного режима определяется наибольшей из временных констант в показателях экспонент [6-7]. Инерционность процесса изменения напряжения на термодатчике после отключения источника питания запишется в виде: $U \sim U(0) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$, где $U(0)$ — начальное напряжение на датчике в момент отключения $t=0$. Постоянная времени τ для датчиков на основе Bi_2Te_3 с размерами полупроводниковых ветвей порядка 1-2 мм характеризуется значениями $\tau > 1$ сек. Условие $t \ll \tau$ определяет допустимую продолжительность импульса отключения источника тока t_2 , на протяжении которого сохраняется значение напряжения $U \approx U(0)$.

На рис.4 показана временная зависимость напряжения на термоэлектрическом датчике в режиме периодического включения-выключения источника питания. Продолжительность импульса подачи постоянного тока составляет $t_1=1-10$ с. При этом напряжение на термодат-

чике определяется суммой: $U = U_R + U_T$. В режиме отключения источника тока напряжение на термодатчике определяется лишь действием термоэлектродвижущей силы: $U_T = U - U_R$. Значение напряжения U_T пропорционально количеству тепла, которое выносится с поверхности обтекания датчика, то есть, определяется скоростью потока жидкости или газа. Продолжительность импульса отключения источника тока не превышает $t_2 < 10^{-2}$ ч 10^{-3} с и измеренное в этот момент напряжение можно считать равным сигналу термоэдс в начальный момент отключения $U_T \approx U_T(0)$.

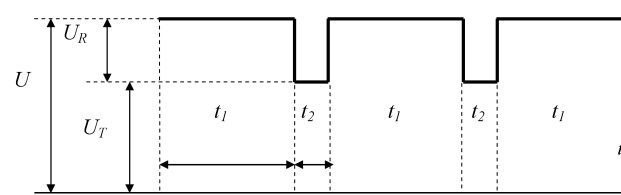


Рис. 4. Временная зависимость изменения напряжения на термоэлектрическом датчике.

По измеренным в режиме отключенного источника тока значениям напряжения на термоэлектрическом датчике $U_{T0} = U_0 - U_R$, $U_{T1} = U_1 - U_R$, $U_{Tx} = U_x - U_R$, скорость потока жидкости или газа можно рассчитать согласно выражению:

$$v_x = v_1 \left[\frac{\left(\frac{U_{T0}}{U_{Tx}} - 1 \right)}{\left(\frac{U_{T0}}{U_{T1}} - 1 \right)} \right]^n, \quad (3)$$

где $n=1-1,5$ — параметр, зависящий от степени турбулентности потока жидкости ($n=1$ для ламинарного движения потока). Напряжение U_{T0} — измеряется при скорости потока $v=0$; U_{T1} — измеряется при известном контрольном значении скорости потока $v=v_1$; U_{Tx} — измеряется при скорости потока v_x , которая определяется. Показатель степени n определяется экспериментально при предварительном тестировании термодатчика. Выражение (3) получено в предположении постоянства температуры движущейся жидкости T_0 в момент измерения, что справедливо с учетом значительной инерционности временных изменений температуры потока по сравнению с временем измерений. Характер зависимости (3) сохраняется для любого значения температуры жидкости T_0 , а изменяются только абсолютные значения измеряемых напряжений U_{T0} , U_{T1} , U_{Tx} .

Температура внешней среды существенно влияет как на параметры полупроводникового

материала, так и на процессы рассеяния и потерь тепла в термоэлектрическом датчике. На рис.5 для датчиков на основе Bi_2Te_3 представлены результаты измерений импульсным методом температурной зависимости напряжения термоэлектродвижущей силы U_{T0} при скорости потока $v=0$. По сравнению с рассчитанными (кр.1) термоэлектрические датчики во всем интервале исследованных температур характеризуются меньшими значениями падения напряжения U_{T0} в среде воздуха (кр.2) и среде воды (кр.3). Уменьшение экспериментальных значений падения напряжения обусловлено дополнительными потерями тепла как в самом термоэлектрическом датчике, так и за счет изменения условий теплообмена на поверхности обтекания в среде газа или жидкости. Фиксация разности напряжения на термоэлектрическом датчике в состоянии включенного и отключенного источника тока позволяет непосредственно в процессе измерений компенсировать температурные изменения параметров датчиков при изменении температуры подвижной среды.

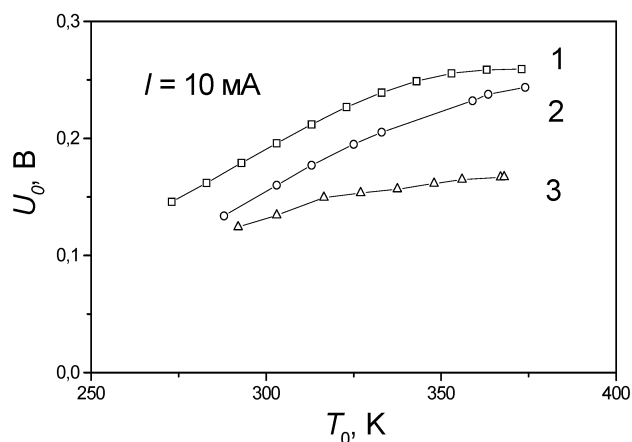


Рис. 5. Зависимость напряжения U_0 на термоэлектрическом датчике от температуры потока воды T_0 .

При импульсном режиме измерения разность падения напряжения на термоэлектрическом датчике при включенном и отключенном источнике питания определяется лишь значением омического сопротивления полупроводника $U_R=IR$ (рис.3), что позволяет использовать температурную зависимость сопротивления датчика $R(T)$ для контроля температуры потока T_0 . На рис.6 показаны типичные результаты измерений сопротивления термоэлектрических элементов на основе Bi_2Te_3 , используемых в качестве датчиков скорости и

температуры потока воды. Как видно из рис. 6, экспериментальная температурная зависимость сопротивления датчиков такого типа близка к линейной, причем точность линейной аппроксимации возрастает при уменьшении исследуемого интервала температур.

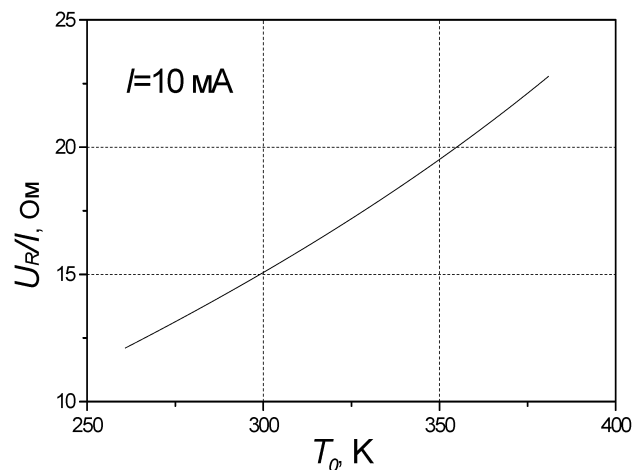


Рис. 6. Зависимость сопротивления термоэлектрического датчика $R = \frac{U_R}{I}$ от температуры потока воды.

Экспериментальная проверка описаного импульсного метода была проведена при определении скорости потока воды в трубах различного диаметра ($D=25$ мм и $D=50$ мм). Результаты расчетов согласно (3) скорости потока воды хорошо согласуются с экспериментальными значениями, полученными с помощью специализированной установки калибровки и испытаний счетчиков расхода воды. Использование экспериментальных значений напряжений U , U_0 , U_T , U_R позволяет учитывать температурные изменения параметров водного потока и термоэлектрического датчика, а также обусловленные неидеальностью теплоизоляции датчика процессы теплового рассеяния. Погрешность измерений не превышает 1-2 %. Одновременный контроль скорости и температуры потока воды делает перспективным применение такого типа датчиков в счетчиках расхода воды и тепла.

Литература

1. Анатычук Л.И. //Термоэлементы и термоэлектрические устройства. — Киев, Наукова думка. — 1979. — 767с.
2. Кремлевский П.П. //Расходомеры и счетчики количества. — Л-д, Машиностр. — 1989. — 550с.

3. Егупов С.И., Жигун В.Я., Кузнецов Г.В., Литвиненко С.В., Скрышевский В.А., Третьяк О.В., Устилко В.Е. Влияние температуры на теплообмен в термоэлектрическом датчике расхода воды на основе Bi_2Te_3 . //Термоэлектрика. — 2001. — №4. — С.76-83.
4. Бурнштейн А.И. //Физические основы расчета полупроводниковых термоэлектрических устройств. — М., Сов радио. — 1967. — 250с.
5. Аксенов А.И., Глушкова Д.Н., Иванов В.И. //Отвод тепла в полупроводниковых приборах. — М., Энергия. — 1971. — 176с.
6. Иорданишвили Е.К., Малкович Б.Е. — Ш. Нестационарные процессы в термоэлектрических и термомагнитных системах преобразования энергии. — М., Наука. — 1983. — 350 с.
7. Равич Ю.И., Гордиенко А.Н. Метод расчета времени переходного процесса многоступенчатой охлаждающей термобатареи. Физика и техника полупроводников. — 2007. — Т.41. — №1. — С.112-116.