

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В КОНТАКТЕ МЕТАЛЛ-ПОЛУПРОВОДНИК

АННОТАЦИЯ

На основе экспериментальных исследований установлена взаимосвязь плотности теплового потока и термо-ЭДС в контакте Al-Si, и построена эмпирическая модель, позволяющая определять плотность теплового потока по контактной температуре и термо-ЭДС. Рассмотрена проблема выпрямления теплового потока в контакте.

1. ВВЕДЕНИЕ

В технике широко используются так называемые тесные контакты, в которых расстояние между соприкасающимися поверхностями соизмеримо с размерами молекул. Поскольку они близки к идеальным, их термическое сопротивление пренебрежимо мало [1]:

$$R = \frac{\Delta T}{q} \approx 0, \quad (1)$$

где q – плотность теплового потока, ΔT – контактный перепад температуры. Это вызвано тем, что согласно теории теплообмена, основанной на уравнении теплопроводности и законе Фурье, температурное поле в идеальном контакте считается непрерывным. При прохождении теплового потока через контакт металла с полупроводником появляется термо-ЭДС, величина которой связана с плотностью теплового потока в определенном диапазоне температур, благодаря чему прямые измерения теплового потока можно заменить более простым и точным измерением контактной температуры и термо-ЭДС.

В данной работе изучается взаимосвязь плотности теплового потока с термо-ЭДС для контактной пары Al-Si. Результаты могут быть использованы для определения тепловых потоков в соединениях, где непосредственные тепловые измерения затруднены, в частности, в микросхемах.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В КОНТАКТЕ Al-Si

Определение теплового потока по термо-ЭДС в контакте разнородных материалов называется методом «естественной термопары». С использованием этого метода было проведено экспериментальное исследование термоэлектрического взаимодействия в контактной паре Al-Si в виде диода Шоттки. Зависимость термо-ЭДС от контактной температуры представлена на рис. 1.

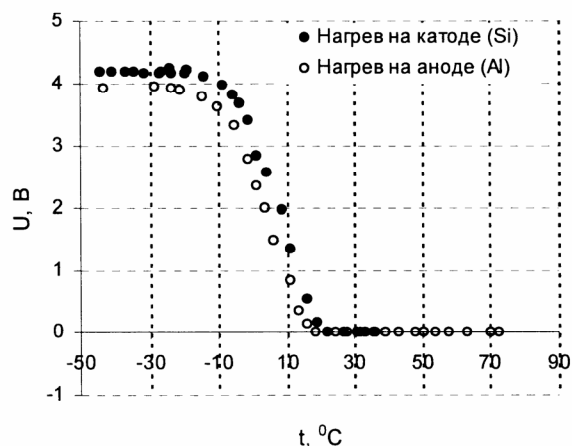


Рис. 1. Зависимость термо-ЭДС диода Шоттки от температуры контакта.

Интересной особенностью термо-ЭДС в данном контакте является независимость ее знака от направления теплового потока (поток электронов всегда направлен из металла в полупроводник). В равновесном состоянии при достаточно высоких температурах поток электронов из металла компенсируется потоком электронов из полупроводника. С уменьшением температуры энергия электронов в полупроводнике становится недостаточной для перехода через запрещенную зону (с валентного уровня на уровень проводимости), и тогда результирующий поток электронов становится равным потоку электронов из металла [2]. Поскольку направление электронного потока соответствует обратному направлению электрического тока через барьер Шоттки в данном контакте, сила электрического тока мала (порядка нескольких мкА).

Предельное значение термо-ЭДС при прямом тепловом потоке (нагрев со стороны Si), умноженное на заряд электрона, определяет энергию электрона, покинувшего зону проводимости металла, и совпадает с работой выхода этого металла:

$$\phi_{Al} = eU_{\max} \approx 4.17 \text{ эВ}, \quad (2)$$

где e – заряд электрона. При обратном тепловом потоке (нагрев со стороны Al) электроны проводимости в металле более возбуждены, и предельное значение термо-ЭДС, связанное с работой выхода электронов, меньше, чем при прямом потоке. В диапазоне температур, в котором поток электронов из металла не полностью скомпенсирован потоком электронов из полупроводника, U зависит от плотности теплового потока. Эту связь можно использовать для определения плотности теплового

потока по термо-ЭДС, измерить которую значительно проще. С учетом того, что при отсутствии теплового потока (в равновесном состоянии) $U = 0$, для установления связи между q и U необходимо одновременно измерить значения термо-ЭДС и плотности теплового потока при данной температуре контакта. Этого будет достаточно для того, чтобы построить линейную аппроксимацию функциональной зависимости между данными параметрами. Произведя подобные измерения для различных температур можно построить семейство прямых $q(U)$, которые могут быть в дальнейшем использованы для определения плотности теплового потока по термо-ЭДС в рассматриваемой контактной паре.

Зависимость плотности теплового потока от температуры изображена на рис. 2.

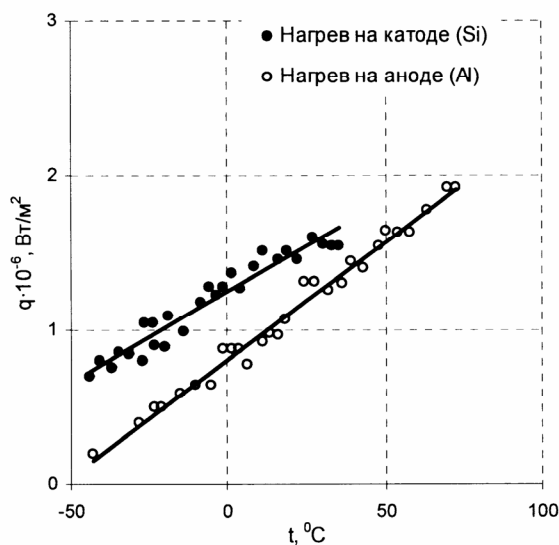


Рис. 2. Плотности прямого (нагрев на катоде) и обратного (нагрев на аноде) теплового потока в зависимости от средней температуры в контакте.

Тепловой поток создавался за счет электрического нагрева контактной пары с одной стороны и охлаждения криогенной жидкостью (жидкий азот) с другой. Несмотря на то, что динамика процесса нагрева при прямом и обратном тепловом потоке сохранялась, т.е. граничные условия были одни и те же, величина плотности теплового потока при данной контактной температуре не одинакова в прямом и обратном направлении. Так как величина термо-ЭДС связана с плотностью теплового потока (увеличивается с ростом q), то согласно рис. 1 при данной температуре в контакте плотность теплового потока в случае нагрева со стороны металла меньше плотности теплового потока при нагреве со стороны полупроводника. Это вполне согласуется с данными рис. 2. С учетом того, что погрешность измерения плотности теплового потока не превысила 25%, наблюдаемый эффект выходит за рамки погрешности. Такой результат объясняется тем, что при инверсии граничных условий температура в контакте изменяется, поэтому при одном и том же ее значении

плотности прямого и обратного теплового потока различаются.

Семейство прямых, аппроксимирующих функциональную зависимость $q(U)$ для разных значений контактной температуры, показано на рис. 3.

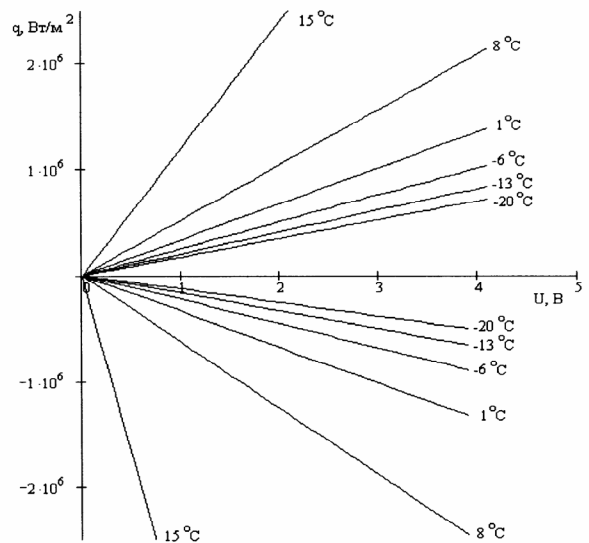


Рис. 3. Зависимость теплового потока от термо-ЭДС для различных значений температуры в контакте Al-Si.

С увеличением температуры угол наклона прямых возрастает. При достижении предельных температур, определяющих границы применимости метода, тангенс угла наклона стремится к 0 или ∞ .

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, метод определения теплового потока в контакте металл-полупроводник по величине термо-ЭДС достаточно эффективен, т.к. электрические измерения точнее и проще тепловых, но его применение ограничено сравнительно узким диапазоном температуры.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- e – заряд электрона, Кл;
- q – плотность теплового потока, Вт/м²;
- R – контактное термическое сопротивление, (м²·К)/Вт;
- ΔT – перепад температуры в реальном контакте, К;
- t – температура в идеальном контакте, °С;
- U – термо-ЭДС, В;
- ϕ – работа выхода электрона, Дж.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Основы** теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике: Учебник для авиационных специальностей/ В.С. Авдуевский, Б.М. Галицкий, Г.А. Глебов и др.; Под ред. В.С. Авдуевского, В.К. Кошкина. – 2-е изд., М.: Машиностроение, 1992. С. 319-321.
2. **Родерик Э.Х.**, Контакты металл-полупроводник, под. ред. Степанова Г.В., М.: Радио и связь, 1982. С. 15-16.