

УДК 681.3

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ХОЛОДИЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ

Сычик В.А., Шумило В.С., Уласюк Н.Н.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

**Аннотация.** Термоэлектрический холодильный элемент содержит  $p$ - и  $n$ -полупроводниковые области с омическими контактами,  $n$ - $p$  гетероперехода, толщина контактирующей с гетеропереходом  $n$ -области составляет  $(0,5-0,8)L$ , толщина контактирующей с гетеропереходом  $p$ -области составляет  $(2-5)L$ , где  $L$  – диффузионная длина пробега электронов, причем  $n$ -полупроводник является узко зонным, а  $p$ -полупроводник – широко зонным.

**Ключевые слова:** полупроводник, гетеропереход, омический контакт, подложка, диффузионная длина, энергия электронов, запрещенная зона, обедненная область.

## THERMOELECTRIC REFRIGERATION ELEMENT

Sychyk V.A., Sumilo V.C., Ulasiuk M.M.

Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

**Abstract.** The thermoelectric refrigeration element contains  $p$ - and  $n$ -semiconductor regions with ohmic contacts, an  $n$ - $p$  heterojunction, the thickness of the  $n$ -region in contact with the heterojunction is  $(0.5-0.8)L$ , the thickness of the  $p$ -region in contact with the heterojunction is  $(2-5)L$ , where  $L$  is the diffusion travel length of electrons, and the  $n$ -semiconductor is narrow-gap, and the  $p$ -semiconductor is wide-gap.

**Keywords:** semiconductor, heterojunction, ohmic contact, substrate, diffusion length, electron energy, band gap, depletion region.

Адрес для переписки: Сычик В.А., пр-т Рокоссовского, 49–18, г. Минск, 220095, Республика Беларусь  
e-mail: bntu@bntu.by

Термоэлектрический термохолодильный элемент представляет полупроводниковый термопреобразователь электрической энергии в низкотемпературный интервал, функционирует на эффекте Пельтье и может эффективно использоваться в холодильных аппаратах. Нами сформирована структура полупроводникового термоэлектрического холодильного элемента, первичным преобразователем которого является  $p$ - $n$  гетеро-переход [1; 2].

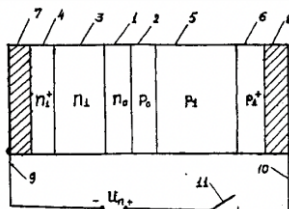


Рисунок 1 – Структурная схема термоэлектрического холодильного элемента

Конструктивно термоэлектрический холодильный элемент (ТХЭ) состоит из гетероперехода, включающего обедненную  $n_0$ -область 1 из узкозонного полупроводника и обедненную  $p_0$ -область 2 – из широкозонного полупроводника. Обедненная  $n_0$ -область контактирует с узкозонной  $n_1$ -полупроводниковой областью 3 и сильнолегированным  $n_1^+$  слоем 4, а обедненная  $p_0$  область контактирует с широкозонной  $p_1$  полупроводниковой областью 5 и сильнолегированным  $p_1^+$  слоем 6. На сильнолегированных  $n_1^+$  и  $p_1^+$  слоях размещены омические контакты 7 и 8, которые жестко связаны с внешними выводами 9 и 10.  $n_1$ -область ТХЭ изготавливается из узкозонного полупроводника, обладающего вы-

сокой подвижностью носителей, большим временем их жизни и возможностью методом легирования создавать в его объеме сильнолегированные слои, например из германия. Ширина  $n_1$ -области ТХЭ определяется минимумом потерь электронов, инжектируемых источникам питания  $U_n$ , подключаемым коммутатором 11, и, как показали результаты эксперимента, составляет  $(0,5-0,8)Ld$ , где  $Ld$  – диффузионная длина пробега электронов в  $n_1$ - или  $p_1$ -области.  $P_1$  область ТХЭ формируется из широкозонного полупроводника с большим временем жизни носителей и также возможностью создавать методом легирования в его объеме сильнолегированные слои, например из арсенида галлия. Ширина  $p_1$  области определяется полным поглощением в ней тепловой энергии электронов, экстрагируемых из  $n_1$ - в  $p_1$ -область и составляет  $(2-5)Ld$ .

Сильнолегированный  $n_1^+$  слой представляет часть  $n_1$ -области, который сформирован путем введения высокой концентрации донорной примеси  $N_d \cong 10^{20} \text{ см}^{-3}$ , обладает малым сопротивлением и обеспечивает омический контакт с металлическим слоем.

Сильнолегированный  $p_1^+$ -слой представляет часть  $p_1$ -области и также сформирован методом диффузии или ионной имплантации при введении высокой концентрации акцепторной примеси  $N_a \cong 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . Он обладает высокой проводимостью и обеспечивает омический контакт с металлическим слоем. Для контакта невырожденных полупроводников количество поглощаемого тепла в  $p_1$ -области от инжекции в нее электронов из  $n_1^+$ -области зависит от соотношения концентрации

электронов в этих областях ( $n_{n1}/n_{p1}$ ), поэтому узкозонная  $n_1$  области легирована примесью с концентрацией примеси  $N_{d1} \cong 10^{18}-10^{19} \text{ см}^{-3}$ , а широкозонная  $p_1$  область легирована акцепторной примесью  $Na_1 \cong 10^{16}-10^{17} \text{ см}^{-3}$ .

Поскольку в рабочем режиме примесь узкозонного полупроводника, то есть  $n_1$ -области полностью ионизирована, то концентрация электронов в  $n_1$ -области  $n_{n1} \cong 10^{18}-10^{19} \text{ см}^{-3}$ , а концентрация электронов в широкозонной полупроводниковой  $p_1$ -области будет меньше концентрации носителей для собственного полупроводника, то есть  $n_{p1} \cong 10^8 \text{ см}^{-3}$ , то соотношение  $n_{n1}/n_{p1} \geq 10$ . Количество поглощаемого тепла также зависит от разности энергий инжектированных из  $n_1$ -области электронов и энергии электронов в  $p_1$ -области, то есть  $A = \frac{w_2}{w_1} \cong \frac{E_{g2}}{E_{g1}}$ , где  $A$  – коэффициент, учитывающий соотношение энергий электронов в узкозонном  $w_1$  и широкозонном  $w_2$  полупроводниках;  $E_{g1}, E_{g2}$  – ширина запрещенной зоны узкозонного и широкозонного полупроводников. Для  $n_0\text{Ge} - p_0\text{GaAs}$  гетероперехода коэффициент  $A = E_{g2}/E_{g1} = 1,43 / 0,66 \cong 2,2$ .

Для обеспечения максимальной инжекции электронов из  $n_1$ -области узкозонного полупроводника в  $p_1$ -область широкозонного полупроводника, то есть исключения потерь на границе контакта  $n_0-p_0$  обедненных областей и узкозонный материал (Ge) и широкозонный материал (GaAs) выбираются с одинаковыми структурой и постоянными решеток  $a_1$  и  $a_2$ , а относительное их изменение  $\Delta = \left(\frac{2(a_2-a_1)}{a_2+a_1}\right) \cdot 100 \leq 2\%$ .

Для гетероперехода  $n_0\text{Ge} - p_0\text{GaAs}$   $\Delta \cong 1\%$ . Для повышения эффективности отбора тепла из охлаждаемого объема ТХЭ устанавливается на радиатор.

При подаче питающего напряжения прямой полярности  $U_n$  через коммутатор на внешние выводы термоэлектрического холодильного элемента  $n_1$ -области начинает инжектировать через  $n_0-p_0$  гетеропереход электроны в  $p_1$ -область. Плотность тока через  $n_0-p_0$  гетеропереход определяется из выражения

$$I \cong I_S \left[ \exp\left(\frac{eU_n}{kT}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

и экспоненциально возрастает с повышением питающего напряжения. В (1)  $I_S$  – ток насыщения;  $e, k, T$  – соответственно заряд электрона, постоянная Больцмана, температура. Инжектирующие в  $p_1$ -область электроны на расстоянии диффузионной длины  $L_d$  поглощают из кристаллической решетки этой области энергию и повышают ее до величины энергии электронов  $p_1$ -области. В результате отбора энергии инжектированными

электронами от кристаллической решетки  $p_1$ -области ее температура и соответственно температура ТХЭ понижается. Величина поглощаемой тепловой энергии определяется зависимостью

$$Q_n = \Pi It, \quad (2)$$

где  $\Pi$  – коэффициент Пельтье;  $I = JS$  – ток, протекающий через  $n_0-p_0$  гетеропереход сечением  $S$ ;  $t$  – время протекания тока. Коэффициент Пельтье для  $n-p$  гетероперехода из невырожденных полупроводников определяется из зависимости

$$\Pi = A \frac{kT}{e} \ln \frac{n_2}{n_1}, \quad (3)$$

где  $A$  – коэффициент, учитывающий соотношение энергии электронов в  $p$  и  $n$  областях;  $n_1$  и  $n_2$  – концентрация собственных электронов в  $n$ - и  $p$ -областях.

Повышение диапазона рабочих отрицательных температур в предложенном ТХЭ по сравнению с аналогами, где используется  $p-n$  гомопереход, обусловлено существенным повышением коэффициента Пельтье. Для предлагаемого  $n_0\text{Ge} - p_0\text{GaAs}$  гетероперехода с  $n_1$ - и  $p_1$ -областями коэффициент  $A = 2,2$ , а соотношение  $\ln n_2/n_1 \leq 6$ . Поэтому с учетом (2) поглощаемая тепловая энергия предлагаемым ТХЭ по сравнению с прототипом возрастает в  $n = 2,2 \cdot \frac{10}{6} \cong 3,7$  раз.

Повышение стабильности работы предложенного устройства в сравнении с аналогами заключается в существенном упрощении ее конструкции и использовании в качестве теплопоглощающей области широкозонного полупроводника.

Экспериментальный термоэлектрический холодильный элемент при плотности прямого тока  $1 \text{ А/см}^2$  позволяет получать предельную температуру охлаждения  $-25 \text{ }^\circ\text{C}$ , расчетная надежность безотказной работы устройства составляет  $\sim 10^5$  часов.

На базе предлагаемого устройства при использовании матрицы элементов может быть создан термохолодильник требуемых объемов охлаждения и температур.

Технико-экономические преимущества предлагаемого термоэлектрического холодильного элемента в сравнении с аналогами [2]:

- более чем в два раза возрастает предельная температура охлаждения.

- более чем в 3 раз повышается стабильность работы термоэлектрического холодильного элемента.

#### Литература

1. Thermoelectric cooler and fabrication method : pat. US 5064476 / Leonard J. Recine. – Publ. 17.09.1990.
2. Усиленное термоэлектрическое охлаждение на холодных границах раздела переходов / U. Ghoshol. [и др.] // Epl. Phys. Lett.. – 2002. – V. 34, № 16.