

2. Zhang, K. Meta-Wearable Antennas – A Review of Metamaterial Based Antennas in Wireless Body Area Networks / K. Zhang, P. J. Soh, S. Yan // *Materials*. – 2020. – Vol. 14, № 1. – 32 p.

3. Compact 2.4 GHz L-Shaped Microstrip Patch Antenna for ISM-Band Internet of Things (IoT) Applications / M. F. Zambak [et al.]. – 2023. – 8 May. – 16 p.

4. Ciydem, M. Dual-polarization wideband sub-6 GHz suspended patch antenna for 5G base station / M. Ciydem, E. A. Miran // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. – 2020. – Vol. 19, № 7. – P. 1142–1146.

5. Wireless body area networks: A survey / S. Movassaghi [et al.] // *IEEE Communications Surveys and Tutorials*. – 2014. – Vol. 16, № 3. – P. 1658–1686.

6. Koc Polat, H. Modeling and validation of a new reconfigurable patch antenna through equivalent lumped circuit-based design for minimum tuning effort / H. Koc Polat, M. D. Geyikoglu, B. Cavusoglu // *Microwave and Optical Technology Letters*. – 2020. – V. 62, № 2. – P. 890–898.

7. Garg, R. Microstrip antenna design handbook / R. Garg, P. Bhartia, I. J. Bahal, A. Ittipiboon. – Norwood: Artech House, 2001. – 866 p.

УДК 681.325

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ХОЛОДИЛЬНИК

Сычик В. А., Уласюк Н. Н.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Многослойный термоэлектрический холодильник структурно содержит термоэлектрический преобразователь с омическими контактами и внешними электрическими выводами. Термоэлектрический преобразователь реализован на основе широкозонных полупроводников и включает последовательно соединение п-р-гомопереход, вариозный слой, изотопный р-р⁺ – гетеропереход, сильно легированные п⁺ и р⁺ слои, при этом толщина областей п-р – гомоперехода составляет (0,5–0,9) L_d, толщина вариозного слоя равна (0,3–0,5) L_d, а толщина изотопного гетероперехода составляет (0,4–0,7) L_d, где L_d – диффузионная длина пробега электронов. **Ключевые слова:** термоэлектрический холодильник, р-п-переход, широкозонный полупроводник, гомопереход, вариозный слой, термоэлектрический преобразователь, гетеропереход, омический контакт.

SEMICONDUCTOR THERMOELECTRIC REFRIGERATOR

Sychyk V. A., Ulasiuk M. M.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. The multilayer thermoelectric refrigerator structurally comprises a thermoelectric converter with ohmic contacts and external electrical terminals. The thermoelectric converter is implemented based on wide-bandgap semiconductors and includes a series-connected n-p homojunction, a variozed layer, an isotopic p-p⁺ heterojunction, and heavily doped n⁺ and p⁺ layers. The thickness of the n-p homojunction regions is (0.5–0.9)L_d, the thickness of the variozed layer is (0.3–0.5)L_d, and the thickness of the isotopic heterojunction is (0.4–0.7)L_d, where L_d is the electron diffusion mean free path.

Keywords: thermoelectric refrigerator, p-n junction, wide-bandgap semiconductor, homojunction, variozed layer, thermoelectric converter, heterojunction, ohmic contact.

Адрес для переписки: Сычик В. А. 220095 г. Минск, пр-т Рокоссовского, 49-18

e-mail: bntu@bntu.by

Полупроводниковый термоэлектрический холодильный элемент является базовым модулем полупроводниковых термохолодильников, функционирующих на эффекте Пельтье.

Используется термоэлектрический холодильник [1], который содержит несколько термоэлектрических модулей, каждый из которых составлен из множества объединенных попарно термоэлектрических элементов. На одной стороне каждого модуля имеется рабочий канал, на другой стороне модуля расположен теплообменник, в модуле размещены р-п-структуры. Такой термоэлектрический преобразователь обладает сложной конструкцией и невысокими техническими параметрами.

Создан также термоэлектрический холодильник [2], который содержит ленту с проводящей полоской, из которой формируют матрицу контактов для первой стороны термоэлектрического холодильника. Матрица контактов прикреплена к изолирующей пластине, представляющей плату

термопреобразователя. Термоэлектрические элементы р-п-типа проводимости, расположенные между контактами платы и выводами, содержат р-п-переход с примыкающими р- и п-полупроводниковыми областями, и омическими контактами.

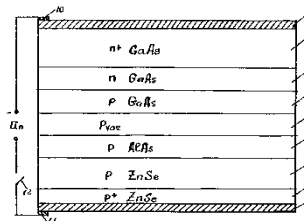


Рисунок 1 – Структурная схема термоэлектрического холодильника

Такого типа полупроводниковые холодильники обладают сложной конструкцией, содержащей множество конструктивных элементов, невысокой стабильностью работы из-за большого числа коммутирующих соединений.

Нами разработан полупроводниковый многослойный термоэлектрический холодильник (МТЭХ), обладающий высокими электрофизическими параметрами. Структура термоэлектрического холодильника изображена на рисунке 1.

Конструктивно МТЭХ состоит из p^+ -основания 1, сформированного из широкозонного полупроводника, например арсенида галлия, на котором создан p -гомопереход из того же материала, включающий n -слой 2 и p -слой 3, p -слой 2 сильно легирован до уровня, когда дно зоны проводимости E_c выходит на уровень Ферми E_F , что обеспечивает высокую инжекцию электронов из p -слоя 2 в p -слой 3 p -гомоперехода и рост его потенциального барьера, повышающего суммарный потенциальный барьер термоэлектрического преобразователя.

p -слой 3 контактирует с варизонным Pu_{az} -слоем 4, который соединен с p -слоем 5 широкозонного полупроводника, запрещенная зона которого E_{g2} больше запрещенной зоны E_{g1} p -слоя 3. Структура p -слой 3 - $Pvar$ -слой 4- p -слой 5 представляет изотипный гетеропереход. На p -слое 5 широкозонного полупроводника сформирован p -слой 6 более широкозонного полупроводника, например селенида цинка, причем структура p -слой 5 - p -слой 6 представляет также изотипный гетеропереход. P -слой 6 наиболее широкозонного полупроводника контактирует с сильнолегированным p^+ -слоем 7 из того же материала. На сильнолегированных p^+ -основании 1 и p^+ -слое 7 размещены соответственно металлические слой 8 и слой 9 - омические контакты, которые жестко связаны с внешними выводами 10 и 11 и с помощью электронного коммутатора 12 подключаются к внешнему источнику питания U_n .

Для получения изотипного гетероперехода с высоким коэффициентом передачи электронов на p -слой 3 нанесен варизонный $Pvar$ -слой 4 методом жидкофазной или газофазной эпитаксии, который согласовывает p -слой 3 и p -слой 5 по постоянным кристаллических решеток и исключает разрыв энергетических зон изотипного p - p -гетероперехода, включающего p -слой 3 и p -слой 5.

На варизонном $Pvar$ -слое 4 методом жидкофазной или газофазной эпитаксии сформирован p -слой 5 широкозонного полупроводника типа $AmBn$, например $AlAs$, толщиной $(0,4...0,7)$ L_d , легированный акцепторной примесью (Cd) с концентрацией $N_A = 10^{16} - 10^{17} \text{ см}^{-3}$. На p -слой 5 p -типа проводимости для увеличения высоты суммарного потенциального барьера и, соответственно, температуры охлаждения нанесен методом молекулярнолучевой эпитаксии с одновременным легированием акцепторной примесью Cu монокристаллический p -слой 6 с максимальной шириной запрещенной зоны, например селенид цинка с $E_g \sim 2,67 \text{ эВ}$. Расхождение в постоянные решетки Δa для изотипного p - p -гетероперехода из контактирующих материалов

$pAlAs$ - $pZnSe$, составляет 1,3 %, поэтому потери носителей заряда (электронов) в нем будут минимальны. P -слой 6 легирован акцепторной примесью (для $ZnSe$ это медь) с концентрацией $10^{16} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Ширина p -слоя 6 определяется полным поглощением в нем тепловой энергии решетки электронами, экстрагируемыми из p -слоя 2 в p -слой 6, и, как показали результаты эксперимента, составляет $(2...5) L_d$.

Сильнолегированный p^+ -слой 7 представляет часть p -слоя 6, который сформирован путем введения методом ионной имплантации ионов меди с последующей их терморазгонкой акцепторной примеси до величины $N_A = 10 \text{ см}^{-3}$, обладает малым сопротивлением и обеспечивает омический контакт с металлическим слоем 9.

Количество поглощаемой инжектированными электронами из p -слоя 2 в p -слой 6 тепловой энергии зависит от высоты суммарного потенциального барьера

$$\Sigma\phi = \phi_1 + \phi_2 + \phi_3 \text{ (эВ)}, \quad (1)$$

где ϕ_1 – потенциальный барьер $nGaAs$ - $pGaAs$ гомоперехода; $\phi_2 = E_{g2} - E_{g1}$ – потенциальный барьер $pGaAs$ - $pAlAs$ изотипного гетероперехода; $\phi_3 = E_{g3} - E_{g2}$ – потенциальный барьер изотипного $pAlAs$ - $pZnSe$ гетероперехода. Суммарный потенциальный барьер, определяющий отрицательную температуру, количественно равен $\phi_{\Sigma} = 1,43 + 0,72 + 0,52 = 2,67 \text{ эВ}$.

Для обеспечения максимальной инжекции электронов из p -слоя 2 в p -слой 6 широкозонных полупроводников, то есть для исключения потерь электронов при их инжекции через гомопереход и изотипные p - p -гетеропереходы, ширина изотипных гетеропереходов $V_d = (0,6...0,9)W_0$, где W_0 – суммарная толщина его обедненных областей, выбрана из условия, чтобы обедненные области переходов проникали внутрь варизонного Pu_{az} -слоя 4, исключая появление потенциального барьера в валентной зоне и зоне проводимости в области p - p -гомоперехода и p - p -изотипного перехода.

При подаче напряжения прямой полярности U_n через электронный коммутатор 12 на внешние выводы 10 и 11 МТЭХ p -слой 2 начинает эффективно инжектировать через p - p -переход и изотипные p - p -гетеропереходы электроны в p -слой 6. Поскольку гомопереход и изотипные гетеропереходы соединены последовательно и ток в цепи остается неизменным, то результирующий ток определяется из выражения и экспоненциально возрастает

$$I = L_s [\exp(eU_n/KT) - 1] \quad (2)$$

с повышением питающего напряжения. В (2) I_s – ток насыщения перехода; e , K , T – соответственно заряд электрона, постоянная Больцмана, температура. Инжектирующие в p -слой 6 электроны на расстоянии двойной диффузионной длины $(2L_d)$ поглощают из кристаллической решетки этого

слоя 6 энергию и повышают ее до величины энергии электронов р-слоя 6. В результате отбора энергии инжектированными электронами от кристаллической решетки р-слоя 6 температура в нем и соответственно в МТЭХ понижается. Величина поглощаемой тепловой энергии определяется зависимостью

$$Q_p = \Pi It, \quad (3)$$

где Π – коэффициент Пельтье; $I = JS$ – ток, протекающий через изотипный $pAlAs-pZnSe$ -гетеропереход сечением S ; t – время протекания тока. Коэффициент Пельтье структуры МТЭХ из невырожденных полупроводников определяется из зависимости:

$$\Pi = A(KT/e) \ln(n_n/n_p) \quad (4)$$

где A – коэффициент, учитывающий соотношение энергии электронов в п- и р-слоях; n_n, n_p – концентрация собственных электронов в п-слое 2 и р-слое 6.

Повышение диапазона рабочих отрицательных температур в предложенном многослойном термоэлектрическом холодильнике обусловлено существенным повышением суммарного потенциального барьера Φ_{Σ} коэффициента Пельтье и соотношением электронов в п-слое 2 и р-слое 6. С учетом выражения (4), при условии $A > 2$, соотношением $\ln(n_n/n_p) < 4$, поглощаемая

тепловая энергия в предлагаемом термоэлектрическом холодильнике по сравнению с аналогами возрастает в $N = 2 \cdot 10 / 4 = 5$ раз.

Экспериментальный многослойный термоэлектрический холодильник размером его термопреобразователя 10×10 мм при плотности прямого тока 1 А/см^2 позволяет получать предельную температуру охлаждения -25°C , расчетная надежность безотказной работы термохолодильника составляет $\sim 10^5$ ч. Техничко-экономические преимущества предлагаемого многослойного термоэлектрического холодильника в сравнении с аналогами:

- Более чем в два раза возрастает предельная температура охлаждения.
- Более чем в три раза повышается стабильность работы термоэлектрического холодильника.
- Существенно упрощается конструкция термоэлектрического холодильника.

Литература

1. Пат. 4134803 США, МПК H01L 35/28. Термоэлектрический модуль / J. C. Bowers, S. L. Kearney (заявитель: Minnesota Mining and Manufacturing Company). – № 05/811452; заявл. 28.06.1977; опубл. 16.01.1979.
2. Пат. 5064476 США, МПК H01L 35/34. Термоэлектрический охлаждающий прибор / R. A. Birkholz, D. E. Hein. – № 07/625,841; заявл. 10.12.1990; опубл. 12.11.1991.

УДК 631.3

УСТРОЙСТВО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ

Сычик В. А., Уласюк Н. Н.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Преобразователь солнечной энергии в электрическую содержит фоточувствительную p^+-p-i p^+ -структуру из широкозонного полупроводника, реализованную в виде совокупности сформированных на расстоянии от 10 до 100 мкм друг от друга столбиков диаметром 50–100 мкм и высотой от 10 до 150 мкм каждый, нижний p^+ -слой представляет полупроводниковую подложку заданной толщины и электрически соединен с металлическим основанием, а на p^+ -слой нанесен электропроводящий просветляющий слой, на котором сформирован внешний металлический вывод.

Ключевые слова: преобразователь солнечной энергии, фоточувствительная структура, широкозонный полупроводник, р-п переход, полупроводниковый столбик, полупроводниковая подложка, носители заряда, металлическое основание.

DEVICE FOR CONVERTING OPTICAL ENERGY INTO ELECTRICAL ENERGY

Sychyk V. A., Ulasiuk M. M.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. A solar energy to electrical energy converter contains a photosensitive p^+-p-i p^+ structure made of a wide-bandgap semiconductor, implemented in the form of a set of columns formed at a distance of 10 to 100 μm from each other, each with a diameter of 50–100 μm and a height of 10 to 150 μm , the lower p^+ layer is a semiconductor substrate of a given thickness and is electrically connected to a metal base, and an electrically conductive antireflection layer is applied to the p^+ layer, on which an external metal lead is formed.

Keywords: solar energy converter, photosensitive structure, wide-bandgap semiconductor, p-n junction, semiconductor pillar, semiconductor substrate, charge carriers, metal base.

Адрес для переписки: Сычик В. А. 220095 г. Минск, пр-т Рокоссовского, 49-18

e-mail: bntu@bntu.by

Устройство преобразования оптической энергии в электрическую относится к полупроводни-

ковым фоточувствительным приборам с потенциальным барьером, и используется в электронно-