

позволили выявить преимущество ErNi по сравнению с традиционно применяемым Er3Ni вследствие малой длины регенеративного теплообменника второй ступени.

Литература

1. Способ получения монодисперсных сферических гранул. В.Б. Анкудинов, Ю.А. Марухин, В.П. Огородников. Патент РФ 2174060, 2001.
2. Методы повышения эффективности регенераторов второй ступени криокулера Гиффорда-Макмагона. М.В. Калюжный, Наука и образование, № 11, 2012, с.55-66.
3. Способ получения монодисперсных сферических гранул. В.Б. Анкудинов, Ю.А. Марухин, В.П. Огородников. Патент РФ 2015117107, 2016.
4. Влияние теплофизических свойств материала насадки регенеративного теплообменника на характеристики работы криогенной газовой машины Гиффорда-Мак-Магона В.Б.Анкудинов, Ю.А.Марухин, В.П.Огородников, В.А.Рыжков. Материалы 9-й Международной научно-технической конференции «Вакуумная техника, материалы и технология». Москва, КВЦ «Сокольники» 2014, 15-17 апреля, с. 304-307, ООО «Издательство Новелла».

Оценка максимальной разности температур создаваемой вакуумным туннельным диодом (ВТД) в режиме охлаждения

*С.Б. Нестеров, А.И. Холопкин, Р.О. Кондратенко
Москва ОАО «НИИВТ им. С.А. Векшинского», Нагорный проезд, 7
E-mail: holopkinai@mail.ru*

В работе проведена теоретическая оценка максимальной разности температур создаваемой вакуумными туннельными диодами (ВТД) в режиме охлаждения. Показано, что максимальная разность температур может достигать 210 К. Эта величина больше чем в 2,5 раза превышает максимальную разность температур создаваемой термоэлектрическими охлаждающими приборами. Результаты вычислений показывают перспективность использования ВТД в системах охлаждения для микроэлектроники, медицины и техники.

***Estimation of Maximal Temperature Difference Created by Vacuum Tunnel Diodes (VTD) in Cooling Mode of Operation. S.B. Nesterov, A.I. Holopkin, R.O. Kondratenko.** The paper presents a theoretical evaluation of the maximal temperature difference created by tunnel diodes (VTDs) in the cooling mode of operation. It was shown that the maximal temperature difference could reach value of 210 K. This value is more than by 2.5 times higher than the maximal temperature difference created thermoelectric cooling devices. The results of calculation shows the prospects of using VTDs in cooling systems for microelectronics, medicine and technology.*

В настоящее время в холодильной технике используются в основном холодильные установки компрессорного типа и термоэлектрические преобразователи энергии.

Основными характеристиками охлаждающих приборов являются: максимальная холодильная мощность, максимальный перепад температур и холодильный коэффициент равный отношению холодильной мощности к потребляемой электрической мощности.

Холодильные установки компрессорного типа характеризуются высокими величинами удельной холодильной мощности, высокими значениями перепада температур до 150 К и высокими значениями холодильного коэффициента в диапазоне 3-4 [1]. Недостатками таких установок являются наличие движущихся механических частей и хладагентов, повышенные значения вибраций и шума, сравнительно низкая надежность и высокая удельная стоимость.

Термоэлектрические охлаждающие приборы являются твердотельными приборами свободными от выше перечисленных недостатков холодильных установок компрессорного

типа. Однако они имеют более низкие величины удельной холодильной мощности, сравнительно невысокие значения перепада температур до 70 - 90 К и низкие значения холодильного коэффициента в диапазоне 0,5 - 1,2 [2, 3].

В последние годы появился ряд теоретических исследований по созданию вакуумных диодов с размерами основных элементов, лежащими в нанометровом и субнанометровом диапазонах, и предназначенных для их использования в холодильной технике, которые по своим техническим характеристикам и себестоимости должны превосходить холодильные установки компрессорного типа и термоэлектрические преобразователи энергии [4, 5].

ВТД состоят из двух плоских электродов, помещенных в вакуум и разделенных промежутком шириной до порядка 1 нм (рис.1).

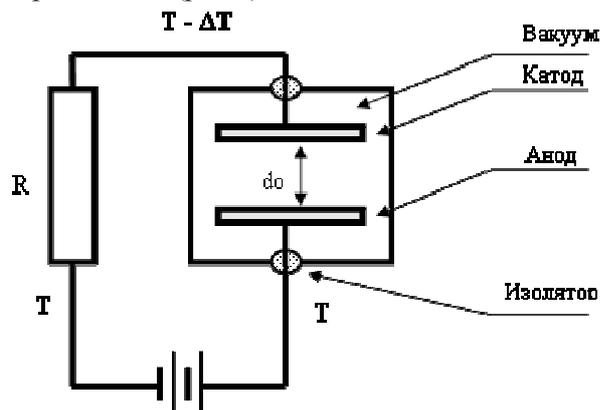


Рис. 1. Схема ВТД, работающего в режиме охлаждения, где d_0 – расстояние между электродами, $(T - \Delta T)$ – температура катода, T – температура анода и R – электрическое сопротивление нагрузки и металлических соединений ВТД с источником питания.

На рис. 2 представлена зонная энергетическая диаграмма ВТД состоящего из металлического катода и анода, изготовленного из полупроводник n-типа проводимости.

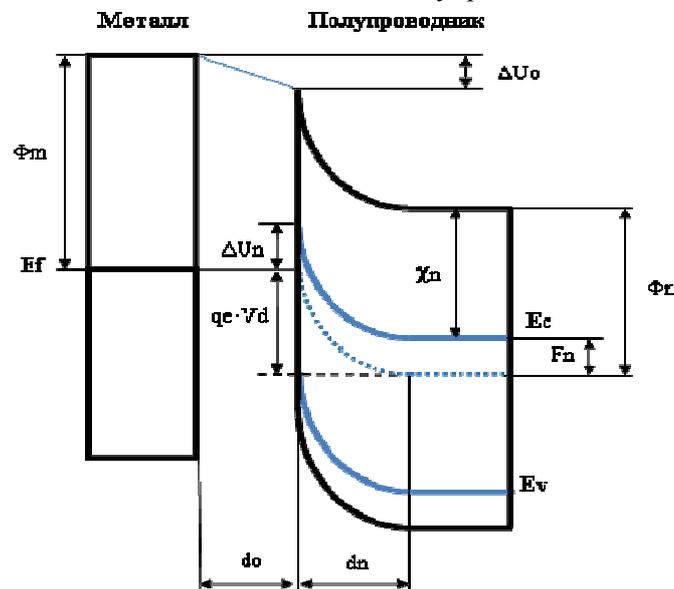


Рис. 2. Зонная энергетическая диаграмма ВТД работающего в режиме охлаждения, где E_f – положение уровня Ферми в металле; E_c и E_v – положение уровня дна зоны проводимости и потолка валентной зоны в полупроводнике соответственно; d_0 – расстояние между электродами, d_n – ширина обедненного слоя в полупроводнике; Φ_m и Φ_n - работа выхода электронов из металла и полупроводника соответственно; V_d – напряжение на ВТД, E_n – положение уровня Ферми в полупроводнике, отсчитанное от края зоны проводимости; ΔU_n – высота барьера в полупроводнике; χ_n – электронное сродство равное разности энергий между дном зоны проводимости и уровнем вакуума; ΔU_0 – высота барьера в вакуумном зазоре.

Работа выхода электронов из катода выше работы выхода электронов из анода, температура катода ниже температуры анода.

Расчет основных характеристик ВТД, таких как плотность электрического тока, максимальная холодильная мощность, холодильный коэффициент и максимальный перепад температур проводился в следующих предположениях [5]:

- электроды в ВТД плоские и параллельны друг другу, характеристики ВТД зависят только от координаты z в направлении перпендикулярном плоскости электродов,
- ВТД находится в состоянии термодинамического равновесия,
- протекание электрического тока не нарушает термодинамическое равновесие,
- отсутствие поверхностных состояний в полупроводнике,
- высота потенциального барьера в полупроводнике $\Delta U_n \gg K_b \cdot T$, где K_b – константа Больцмана,
- ширина обедненного слоя в полупроводнике меньше длины свободного пробега электронов, поэтому расчеты плотности потока электронов можно проводить в баллистическом режиме,
- отсутствие переноса тепла за счет решеточной теплопроводности из-за наличия вакуумного зазора между электродами.

Если к системе ВТД–металлическое соединение приложить напряжение V_s от источника питания, то через систему начнет протекать электрический ток. При этом напряжение V_s равно сумме падений напряжения на вакуумном туннельном диоде V_d и на сопротивлении металлического проводника V_r ($V_s = V_d + V_r$).

Электроны, создающие электрический ток из металла в полупроводник, должны иметь высокую энергию, необходимую для преодоления потенциального барьера, поэтому они отбирают тепло от катода приводя его к охлаждению. Величина потока энергии ВТД (холодильная мощность) пропорциональна величине электрического тока. С уменьшением d_0 до значений порядка несколько межатомных расстояний электроны с большой вероятностью могут туннелировать через вакуумный зазор и для того, чтобы покинуть катод им необходимо преодолеть потенциальный барьер высотой ΔU_n примерно равной разности работ выхода электронов из металла и полупроводника. Оптимальная величина ΔU_n должна находиться в диапазоне 0,1 - 0,3 эВ, которая обеспечивается правильным выбором металла и полупроводника, а также уровнем легирования полупроводника. При этих условиях могут достигаться большие значения электрического тока и холодильной мощности.

В расчетах также учитывалось снижение высоты потенциального барьера за счет сил изображения, наличие области объемного заряда в полупроводнике и влияние металлических соединений между вакуумным туннельным диодом и источником питания, приводящих к паразитному обратному направленному потоку тепла от горячей к холодной стороне ВТД.

Расчеты проводились в баллистическом режиме [5]. В этом случае плотность электрического тока $j(d_0, \Delta T, V_d)$ равна разности плотности тока из металла в полупроводник $j_{ms}(d_0, \Delta T)$ и плотности тока из полупроводника в металл $j_{sm}(d_0, V_d)$:

$$j(d_0, \Delta T, V_d) = j_{ms}(d_0, \Delta T) - j_{sm}(d_0, \Delta T, V_d), \quad (1)$$

где

$$j_{ms}(d_0, \Delta T) = \frac{4 \cdot \pi \cdot q_e \cdot m}{h^3} \int_0^\infty \int_0^\infty \tau(E_z, V_d) \cdot \frac{1}{\left[\exp \left[\frac{(E_r + E_z - F)}{K_b \cdot (T - \Delta T)} \right] + 1 \right]} dE_r dE_z, \quad (2)$$

$$j_{sm}(d_0, \Delta T, V_d) = \frac{4 \cdot \pi \cdot q_e \cdot m}{h^3} \int_0^\infty \int_0^\infty \tau(E_z, V_d) \cdot \frac{1}{\left[\exp \left[\frac{(E_r + E_z - F - V_d)}{K_b \cdot T} \right] + 1 \right]} dE_r dE_z, \quad (3)$$

где q_e – заряд электрона, m – масса электрона, h – константа Планка, E_r – энергия электронов с импульсами, лежащими в плоскости параллельной поверхности электродов, E_z – энергия электронов с импульсами, лежащими в направлении перпендикулярном поверхности

электродов, F – энергия Ферми, K_b – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, V_d – напряжение на ВТД, $\tau(E_z, V_d)$ – коэффициент прозрачности потенциального барьера.

Аналогично плотность потока энергии переносимой электронами через вакуумный зазор (холодильная мощность) $q(do, \Delta T, V_d)$ равна разности плотности потока энергии из металла в полупроводник $q_{ms}(do, \Delta T)$ и плотности потока энергии из полупроводника в металл $q_{sm}(do, V_d)$:

$$q(do, \Delta T, V_d) = q_{ms}(do, \Delta T) - q_{sm}(do, \Delta T, V_d), \quad (4)$$

где

$$q_{ms}(do, \Delta T) = \frac{4 \cdot \pi \cdot m}{h^3} \int_0^\infty \int_0^\infty \tau(E_z, V_d) \cdot (E_r + E_z) \cdot \frac{1}{\left[\exp \left[\frac{(E_r + E_z - F)}{K_b \cdot (T - \Delta T)} \right] + 1 \right]} dE_r dE_z, \quad (5)$$

$$q_{sm}(do, \Delta T, V_d) = \frac{4 \cdot \pi \cdot m}{h^3} \int_0^\infty \int_0^\infty \tau(E_z, V_d) \cdot (E_r + E_z) \cdot \frac{1}{\left[\exp \left[\frac{(E_r + E_z - F - V_d)}{K_b \cdot T} \right] + 1 \right]} dE_r dE_z. \quad (6)$$

Наличие металлического соединения снижает холодильную мощность из-за возникновения паразитного потока тепла в проводнике, направленного от горячей стороны к холодной. Паразитный поток тепла складывается из двух компонент: компоненты, связанной с выделением Джоулева тепла в проводнике при протекании через него электрического тока, и компоненты обусловленной теплопроводностью при приложении разности температур к концам проводника.

Простые вычисления показывают, что минимальный поток тепла q_{cu} зависит только от величины электрического тока, разности температур, теплопроводности и удельного сопротивления проводника:

$$q_{cu}(do, \Delta T, V_s) = j(do, \Delta T, V_s) \cdot \sqrt{2 \cdot \kappa_{cu} \cdot \rho_{cu} \cdot \Delta T}, \quad (7)$$

где κ_{cu} и ρ_{cu} теплопроводность и удельное сопротивление металла (в данном случае меди) соответственно.

Холодильная мощность вакуумного туннельного диода равна разности холодильной мощности $q(do, \Delta T, V_s)$ и паразитного потока тепла $q_{cu}(do, \Delta T, V_s)$:

$$Q(do, \Delta T, V_s) = q(do, \Delta T, V_s) - q_{cu}(do, \Delta T, V_s). \quad (8)$$

Электрическая мощность, необходимая для охлаждения, равна произведению напряжения на плотность электрического тока:

$$P(do, \Delta T, V_s) = V_s \cdot j(do, \Delta T, V_s). \quad (9)$$

Холодильный коэффициент $COP(do, \Delta T, V_s)$ вакуумного туннельного диода определяется как отношение холодильной мощности к потребляемой электрической мощности:

$$COP(do, \Delta T, V_s) = \frac{Q(do, \Delta T, V_s)}{P(do, \Delta T, V_s)}. \quad (10)$$

Выводы

Расчеты характеристик ВТД проводились в широком диапазоне изменения следующих параметров: разность работ выхода электронов из металла и полупроводника n-типа проводимости 0,1 – 1,0 эВ (работа выхода из полупроводника 4,2 эВ для кремния), концентрация донорной примеси $10^{20} - 10^{25} \text{ м}^{-3}$, расстояние между электронами 0,1 – 5,0 нм, разность температур между электродами $\Delta T = 0 - 300 \text{ К}$. В расчетах учитывались высота потенциального барьера на поверхности полупроводника, ширина области объемного заряда в полупроводнике и характеристики металлических соединений, создающих паразитный поток тепла.

В результате проведенных расчетов было показано, что оптимальными параметрами ВТД для получения максимальных холодильной мощности и холодильного коэффициента являются:

концентрации электронов в полупроводнике $10^{24} - 10^{25} \text{ м}^{-3}$, ширина вакуумного зазора 0,5 - 0,7 нм и разность работ выхода электронов из металла и полупроводника 0,2 – 0,3 эВ.

Для сравнения вакуумных туннельных диодов с термоэлектрическими (ТЭ) приборами были выполнены расчеты характеристик последних. В качестве термоэлектрических материалов были выбраны сплавы теллурида висмута, которые в настоящее время обладают наилучшими характеристиками в температурном диапазоне 100 – 300 К.

На рис. 3 представлены типичные зависимости холодильной мощности вакуумного туннельного диода для разных значений напряжения питания V_s и ТЭ модуля от создаваемой разности температур.

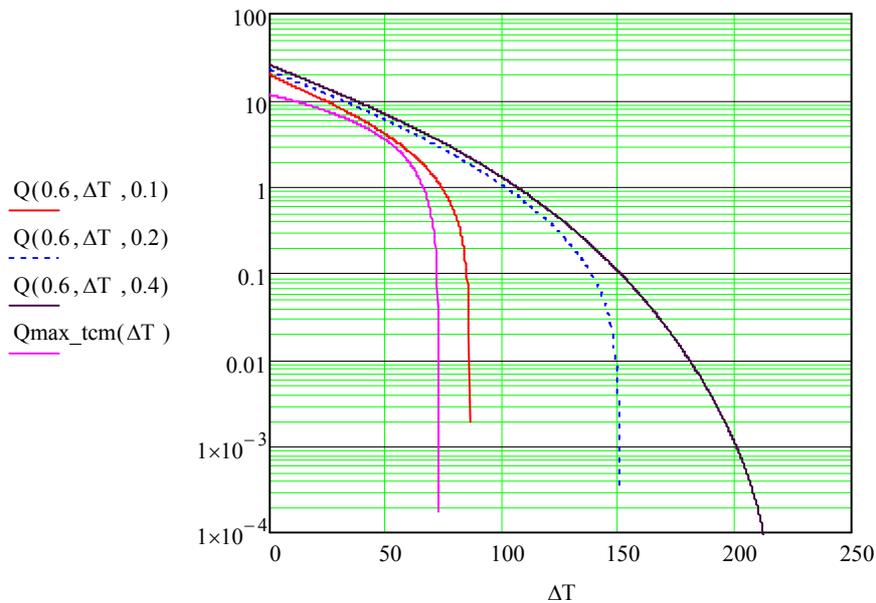


Рис. 3. Зависимости холодильной мощности вакуумного туннельного диода $Q(do, \Delta T, V_s)$ ($do = 0,6 \text{ нм}$, $V_s = 0,1, 0,2 \text{ и } 0,4 \text{ В}$) и ТЭ модуля $Q_{tem}(\Delta T)$ в $\text{Вт}/\text{см}^2$.

На рис. 4 представлены типичные зависимости холодильного коэффициента вакуумного туннельного диода для разных значений напряжения питания V_s и ТЭ модуля от создаваемой разности температур.

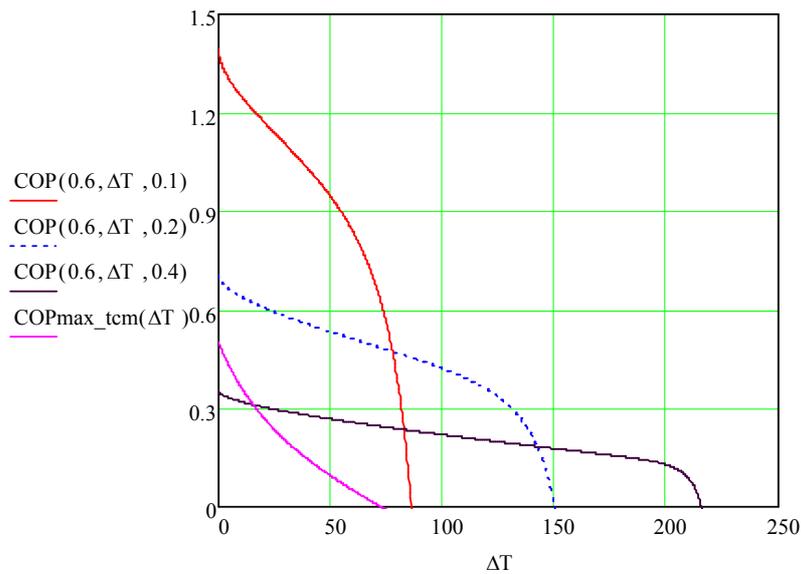


Рис. 4. Зависимости холодильного коэффициента вакуумного туннельного диода $COP(do, \Delta T, V_s)$ ($do = 0,6 \text{ нм}$, $V_s = 0,1, 0,2 \text{ и } 0,4 \text{ В}$) и ТЭ модуля $COP_{tem}(\Delta T)$ от создаваемой разности температур ΔT в К.

Результаты проведенных вычислений характеристик ВТД, работающих в режиме охлаждения, показали следующее:

- максимальная разность температур ВТД составляет 210 К, в то время, как для ТЭ приборов – 74 К, что делает ВТД перспективными преобразователями энергии для их использования в системах охлаждения для микроэлектроники, медицины и специальной техники,
- холодильная мощность ВТД превышает холодильную мощность ТЭ приборов в 1,5 раза и в 6,0 раз для ширины вакуумного зазора 0,6 нм и 0,5 нм соответственно,
- холодильный коэффициент ВТД превышает холодильный коэффициент ТЭ приборов в 2,8 и в 10 раз для ширины вакуумного зазора 0,6 нм и 0,5 нм соответственно,
- холодильная мощность и холодильный коэффициент ВТД сравнимы по величине с аналогичными характеристиками холодильников компрессорного типа.

Литература

1. Кошкин Н. Н., Сакун И. А., Бамбушек Е. М., Холодильные машины, «Машиностроение», 1985, 510 с.
2. Анатыхук Л.И., Термоэлементы и термоэлектронные устройства, Справочник, Киев, «Наукова думка», 1978.
3. M.S. Dresselhaus and J.P. Heremans, Thermoelectric Handbook, Macro to Nano, Ed. by D.M. Rowe, CRC Press, 2006, Chap. 34
4. С.Б. Нестеров, А.И. Холопкин, «Оценка характеристик вакуумных туннельных диодов и возможности их использования в качестве генераторов электроэнергии», «НАНОИНДУСТРИЯ», № 2 (64), 2016, стр. 58 - 65.
5. С.Б. Нестеров, А.И. Холопкин, Р.О. Кондратенко, «Оценка характеристик вакуумных туннельных диодов и возможности их использования в холодильной технике», Холодильная техника, № 6, 2016, стр. 40 - 46.

Криовоздействие при буллезно-некротическом рожистом воспалении нижних конечностей

*С.С. Маскин, Л.А. Иголкина, А.В. Павлов, *А.В. Буторина, ** С.Б. Нестеров,
**Р.О. Кондратенко*

Волгоградский государственный медицинский университет

**Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова*

***РНТВО им. академика С.А. Векинского*

Криотерапия обладает многими лечебными факторами при буллезно-некротической форме рожистого воспаления и является необходимым и перспективным методом лечения этого заболевания.

Cryogenic treatment at bullosa necrotic erysipelas of lower extremities. S.S. Maskin, L.A. Igoalkina, A.V. Pavlov, A.V. Butorina, S.B. Nesterov, R.O. Kondratenko. Cryotherapy has many healing factors in bullesno-necrotic form of erysipelas and is a necessary and a promising method for treatment of this disease.

Согласно современным эпидемиологическим данным рожистое воспаление занимает четвертое место среди инфекционных заболеваний, уступая лишь острым респираторным заболеваниям, кишечной инфекции, инфекционному гепатиту. Частота составляет 12-20% на 10 тыс. населения.

Рожа возникает у людей с пониженным иммунитетом. Связана с падением ответа иммунной системы на гемолитический стрептококк А в организме. Рожистое воспаление часто