
ПРИКАСПИЙСКИЙ ЖУРНАЛ: управление и высокие технологии № 4 (8) 2009

ных частиц, должно происходить резкое уменьшение σ_s . Полученный результат хорошо согласуется с результатами других авторов [4, с. 175; 5, с. 198].

Основные результаты и выводы.

1. Синтезированы однородные по фазовому составу ультрадисперсные порошки замещенного железо-иттриевого граната, со средним размером частиц ~ 100 нм.
2. Уменьшение размера частиц порошков и зерен в керамических образцах ЖИГ приводит к снижению значений удельной намагниченности насыщения.

Библиографический список

1. *Агекян, Т. А.* Основы теории ошибок для астрономов и физиков / Т. А. Агекян. – М.: Наука, 1972. – 172 с.
2. *Ремпель, А. А.* Нанотехнологии, свойства и применение наноструктурированных материалов / А. А. Ремпель // Успехи химии. – 2007. – Т. 76, № 5. – С. 474–500.
3. *Mackrodt, W. C.* Defect calculations for ionic materials / W. C. Mackrodt // Lect. Notes Phys. – 1982. – Vol. 166. – P. 175–194.
4. *Yen-Pei Fu.* Microwave-induced combustion synthesis of yttrium iron garnet nano-powders and their characterizations / Yen-Pei Fu, Cheng-Hsiung Lin and K.-Y. Ko-Ying Pan // J. Magn. Magn. Mater. – 2004. – Vol. 272–276, Part 3. – P. 2202–2204.
5. *Zhongjun, Chenga.* Synthesis and magnetic properties of Sm–Y₃Fe₅O₁₂ nanoparticles / Zhongjun Chenga and Hua Yang. // Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures. – 2007. – Vol. 39, № 2. – P. 198–202.

УДК 621.36

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ТЕПЛА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ЭНЕРГИЮ С ПОМОЩЬЮ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОНДЕНСАТОРА

Г.Я. Карапетьян, В.Ф. Катаев, И.В. Крейс

Рассмотрены процессы зарядки и разрядки термоэлектрического конденсатора, представляющего систему металл1-диэлектрик-металл2-металл1. Показано, что в такой системе возможно прямое преобразование тепловой энергии окружающей среды, если изменить в процессе зарядки контактную разность между металлом 1 и металлом 2 под действием внешних полей.

Ключевые слова: термоэлектрический конденсатор, потенциальная диаграмма, уровень Ферми.

Key words: thermoelectric condenser, the potential diagram, Fermi level.

Авторами предложено в процессе зарядки/разрядки такого конденсатора из-за влияния на термоэлектродвижущую силу внешних полей изменять термоэлектродвижущую силу таким образом, чтобы при направлении тока, когда идет поглощение тепла из окружающей среды, термоэлектродвижущая сила была больше, чем при направлении тока, когда идет выделение тепла. В результате за цикл зарядки-разрядки термоэлектрического конденсатора происходит поглощение и преобразование тепловой энергии окружающей среды в электрическую энергию конденсатора, которая может быть в дальнейшем преобразована в механи-

ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА, НАНОСИСТЕМ И МАТЕРИАЛОВ

ческую энергию или служить источником электрической энергии для различных электрических устройств.

Рассмотрим термоэлектрический конденсатор, изображенный на рис. 1, который представляет систему металл 1-диэлектрик-металл2-металл1.

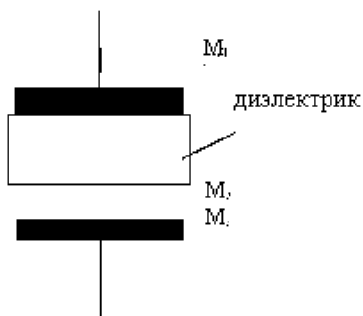


Рис. 1. Термоэлектрический конденсатор с металлическими обкладками

Потенциальная диаграмма конденсатора, когда к нему не приложено напряжение ($U_0 = 0$), имеет вид (рис. 2).

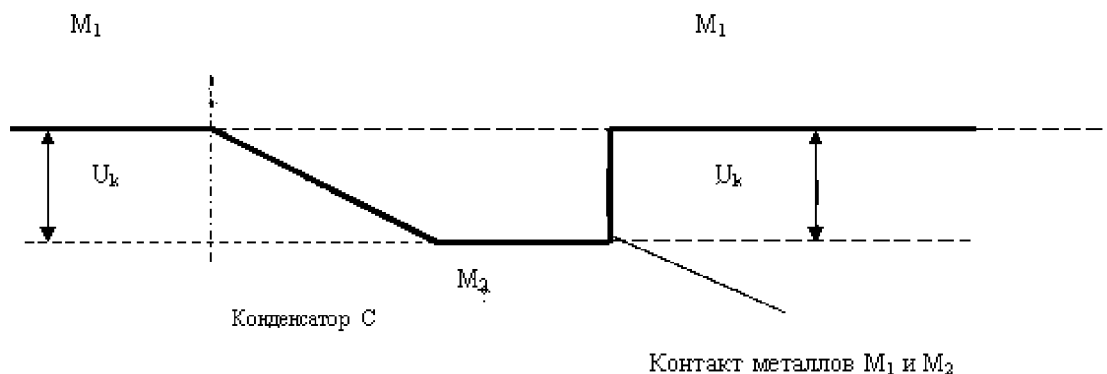


Рис. 2. Потенциальная диаграмма незаряженного термоэлектрического конденсатора с металлическими обкладками

Эквивалентная схема термоэлектрического конденсатора состоит из обычного конденсатора той же емкости C , что и термоэлектрический конденсатор, и источника напряжения, заменяющего контактную разность между металлами M_1 и M_2 , равную U_k (рис. 3).

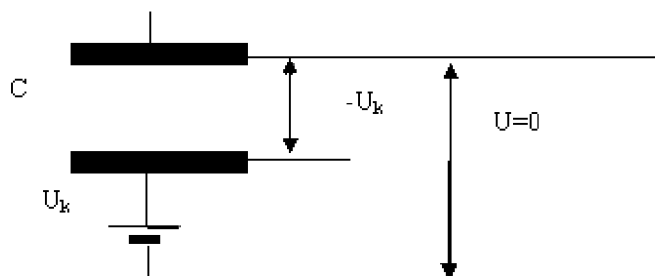


Рис. 3. Эквивалентная схема термоэлектрического конденсатора

Как видно из рис. 3, конденсатор заряжен до напряжения U_k , контакт между металлами резкий, и потенциал меняет свое положение скачком на величину U_k . Таким образом, на об-

кладках конденсатора получается одинаковый потенциал, т.е. разность потенциалов (напряжение) между обкладками конденсатора равна нулю. Контактная разность компенсирует напряжение на конденсаторе – напряжение на конденсаторе и напряжение на источнике напряжения, заменяющем контактную разность, равны между собой и противоположны по знаку, что и видно на рис. 1, где электроды термоэлектрического конденсатора имеют одинаковый потенциал [5, с. 703].

Рассмотрим заряд такого термоэлектрического конденсатора (на рис. 4 ключ K1 замыкается, ключ K2 разомкнут) от постоянного источника напряжения через резистор R.

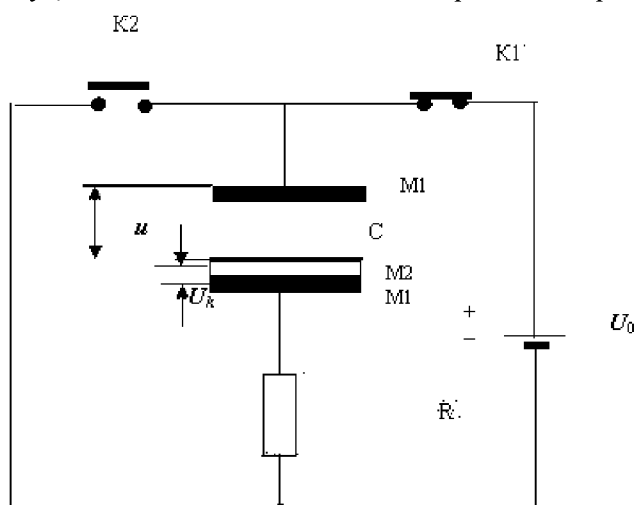


Рис. 4. Зарядка термоэлектрического конденсатора
 u – напряжение на обкладках конденсатора, C – емкость термоэлектрического конденсатора,
 U_k – контактная разность потенциалов между металлами, U_0 – напряжение источника питания

Уравнение, описывающее этот процесс, имеет вид:

$$R * C * \frac{du}{dt} + u = U_k + U_0 \quad (1)$$

Решение уравнения (1) имеет вид:

$$u(t) = A * e^{-\frac{t}{R * C}} + U_k + U_0 \quad (2)$$

В начальный момент времени конденсатор заряжен до напряжения U_k , поэтому $u(0) = U_k$. Тогда $A + U_k + U_0 = U_k$, $A = -U_0$ и

$$u(t) = U_0 * (1 - e^{-\frac{t}{R * C}}) + U_k. \quad (3)$$

ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА, НАНОСИСТЕМ И МАТЕРИАЛОВ

Ток через конденсатор $i = \frac{U_0}{R} * e^{-\frac{t}{R*C}}$, а энергия заряженного конденсатора

$$W_C = \int_0^{\infty} u * i * dt = \int_0^{\infty} U_0 * (1 - e^{-\frac{t}{R*C}}) * \frac{U_0}{R} * e^{-\frac{t}{R*C}} dt + \int_0^{\infty} \frac{U_k * U_0}{R} * e^{-\frac{t}{R*C}} dt = \frac{U_0^2 + 2U_0 * U_k}{2} * C,$$

$$= \frac{C * U_0^2}{2} + C * U_k * U_0$$

(4)

где $\frac{C * U_0^2}{2}$ – энергия, полученная конденсатором от источника напряжения, $C * U_0 * U_k$ –

энергия, поглощенная из окружающей среды, так как направление тока заряда выбрано таким образом, что в контакте металл1-металл2 электроны переходят из металла1 с меньшей энергией электронов в металл2 с большей энергией электронов. При направлении тока, когда электроны переходят из металла1 в металл2, им приходится преодолевать потенциальный барьер, равный разности энергий между уровнями Ферми металлов. Это могут сделать только «быстрые электроны». Поэтому в контакте с избытком остаются «холодные» электроны, и он охлаждается. Это явление называется эффектом Пельтье, а коэффициент Пельтье Π равен внутренней контактной разности потенциалов ($\Pi = U_k$) [1, с. 25].

Таким образом, как следует из рис. 4, конденсатор получил энергию W_C от источников энергии с напряжениями U_0 и U_k посредством электронов, которые и перенесли эту энергию в конденсатор. На внутренних сторонах обкладок конденсатора образовались поверхностные заряды. В металлах глубина проникновения этих поверхностных зарядов менее размеров атомной решетки. На отрицательной обкладке на поверхности оказались электроны. Эти электроны отдали всю свою энергию, которую они приобрели от источников напряжения, электрическому полю конденсатора. Поэтому их энергия должна быть такой же, как и до заряда конденсатора, т.е. их энергия равна энергии электронов в металлических электродах конденсатора (металл1). Если перенести этот процесс на термоэлектрический конденсатор (рис. 4), то энергия электронов в поверхностном заряде должна равняться энергии электронов в металле1. Получается, что металл2 вместе с контактом с металлом1 образует источник ЭДС с напряжением U_k , а поверхностный заряд является как бы продолжением электрода из металла1 (черная полоска над металлом2 на рис. 4). Таким образом, при заряде термоэлектрического конденсатора при охлаждении контакта металл1-металл2 электроны увеличивают свою энергию, поглощая тепло из окружающей среды, затем отдают ее электрическому полю конденсатора, накапливаясь на внутренней обкладке конденсатора. При этом энергия электронов становится равной энергии электронов в металле1, так как они энергию, поглощенную в виде тепла из окружающей среды при переходе из металла1 в металл2, отдали электрическому полю (между поверхностным зарядом и металлом2 появляется скачок потенциала, равный U_k). Электроны при переходе из металла2 в поверхностный заряд не могут отдать энергию кристаллической решетке (нагревание), так как это противоречит закону сохранения энергии (электроны, как следует из выражения 4, отдают всю свою энергию, включая и энергию, приобретенную при переходе в металл2 из металл1 с поглощением тепла). Кроме того, так как толщина поверхностного заряда много меньше, чем размер кристаллической решетки, электроны не могут взаимодействовать с ней. Потенциальная диаграмма заряженного термоэлектрического конденсатора имеет вид, показанный на рис. 5.

Как следует из рис. 5, конденсатор зарядился до напряжения $U = U_0 + U_k$ (поверхностный заряд имеет потенциал $U = U_0 + U_k$). Тот факт, что поверхностный потенциал имеет напря-

жение, равное $U = U_0 + U_k$, а не U_0 , означает, что в процессе зарядки конденсатор приобрел дополнительную энергию из-за поглощения тепла в контакте: кинетическая энергия теплового движения превратилась в потенциальную энергию заряженного конденсатора, что и зафиксировано слагаемым $U_0 * U_k * C$ в формуле (4) [2, с. 46].

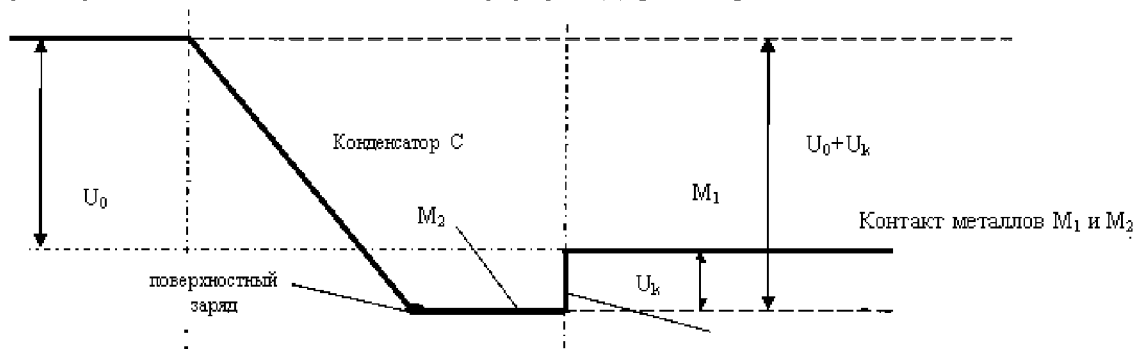


Рис. 5. Потенциальная диаграмма заряженного термоэлектрического конденсатора

Энергия, выделившаяся на резисторе

$$W_R = \int_0^{\infty} i^2 * R * dt = \frac{C * U_0^2}{2} \quad (5)$$

При разрядке конденсатора (рис. 4, ключ K1 разомкнут, ключ K2 замкнут) на резистор R уравнение, описывающее этот процесс, имеет вид:

$$R * C \frac{du}{dt} + u = U_k \quad (6)$$

Решение этого уравнения имеет $u(t) = A * e^{-\frac{t}{R * C}} + U_k$, а начальный момент $u(0) = A + U_k = U_k + U_0$, т.е. $A = U_0$,

$$u(t) = U_0 * e^{-\frac{t}{R * C}} + U_k \text{ и } i(t) = \frac{U_0}{R} * e^{-\frac{t}{R * C}} \quad (7)$$

Энергия, которая выделится на резисторе

$$W_R = \int_0^{\infty} i^2 * R * dt = \frac{C * U_0^2}{2} \quad (8)$$

Энергия, выделившаяся на контакте металл-полупроводник

$$W_k = U_k * \int_0^{\infty} i * dt = C * U_k * U_0 \quad (9)$$

Важно отметить, что, если с самого начала U_k отрицательная, т.е. при зарядке термоэлектрический конденсатор греется, а при разрядке охлаждается, напряжение на конденсаторе после зарядки в этом случае оказывается меньше U_0 на величину U_k , хотя энергия, выделившаяся на резисторе при разрядке, равна $\frac{C * U_0^2}{2}$ [4, с. 38].

Недостающая энергия $C * U_0 * U_k$ (при условии $U_0 \gg U_k$) черпается при разрядке в контакте металлов M_1 и M_2 , так как происходит охлаждение, т.е. происходит полное преобра-

ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА, НАНОСИСТЕМ И МАТЕРИАЛОВ

зование тепловой энергии окружающей среды в электроэнергию. Но такой способ преобразования нельзя считать действенным, так как перед разрядкой конденсатор надо зарядить, что приведет к расходованию энергии на нагревание контакта на ту же величину $C \cdot U_0 \cdot U_k$. Поэтому за цикл зарядки и разрядки приращение энергии за счет тепловой энергии окружающей среды будет равно нулю. Но если во время цикла зарядки/разрядки конденсатора под действием внешних полей изменять контактную разность U_k , то возможно ненулевое преобразование тепла окружающей среды в электрическую энергию.

Действительно, если термоэлектрический конденсатор при заряде поместить во внешнее поле, то его энергия

$$W_C = \frac{U_0^2 + 2 \cdot U_{kA} \cdot U_0}{2} C. \quad (10)$$

При выносе заряженного конденсатора из внешнего поля ($A = 0$) его энергия не изменится, так как внешние поля неэлектрического происхождения не могут изменить заряд на конденсаторе, когда он разомкнут, а емкость, предполагается, не изменяется под действием внешних полей. Например, магнитное поле не может совершить работу по зарядке конденсатора потому, что изменяющееся во времени магнитное поле (при его выключении) порождает вихревое электрическое поле, которое, в свою очередь, порождает вихревые токи только в электродах конденсатора, не изменяя их заряда.

Следовательно, при отсутствии внешнего поля ($B = 0$) энергия конденсатора $W_{CA=0} = W_{CA \neq 0}$, т.е.

$$C \frac{U^2 + 2 \cdot U_k \cdot U}{2} = C \frac{U_0^2 + 2 \cdot U_0 \cdot U_{kA}}{2}, \quad (11)$$

где U – напряжение на металлических электродах термоэлектрического конденсатора в отсутствии внешнего поля:

$$U = -U_k + \sqrt{U_k^2 + U_0^2 + 2U_0 \cdot U_{kA}} \quad (12)$$

Таким образом, в контакте поглощается энергия $C U_{kA} U_0$, а выделяется $C \cdot U_k \cdot U$.

Тогда

$$dW_k = C \cdot (U_0 \cdot U_{kA} - U \cdot U_k) = C \cdot \left[U_0 \cdot U_{kA} - U_k \left(-U_k + \sqrt{U_k^2 + U_0^2 + 2U_0 \cdot U_{kA}} \right) \right] \quad (13)$$

Согласно закону сохранения эта энергия должна выделяться на резисторе R :

$$W_R = \frac{C \cdot U^2}{2} = C \frac{\left(-U_k + \sqrt{U_0^2 + U_k^2 + 2U_0 \cdot U_{kA}} \right)^2}{2} \approx C \frac{U_0^2 + 2U_0 \cdot dU}{2}. \quad (14)$$

Так как $\frac{C \cdot U_0^2}{2}$ – энергия, которую получает конденсатор от источника напряжения, а

W_R – энергия, которую отдает конденсатор при разрядке, то получается, что при разрядке на резисторе выделится энергии больше на величину $C \cdot U_0 \cdot U$. Это происходит потому, что в контакте при зарядке конденсатора поглощается тепловая энергия из окружающей среды (контакт охлаждается). Эта поглощенная в контакте кинетическая энергия превращается в потенциальную энергию заряженного конденсатора, что фиксируется членом $W = C \cdot U_0 \cdot U_{km}$ в выражении (14).

При разряде конденсатора потенциальная энергия опять превращается в контакте в тепловую (кинетическую), но превращается не вся, а несколько меньшая часть. Оставшаяся часть должна выделиться в резисторе, поскольку вся потенциальная энергия конденсатора при разряде должна израсходоваться. Если в качестве резистора поставить электродвига-

тель, то оставшаяся часть этой поглощенной энергии превратится в магнитную и далее в механическую. Эта часть энергии равна $C \cdot U_0 = U_k$. К.П.Д. такого устройства:

$$\eta = \frac{W_{kA} - W_k}{W_{kA}} = \frac{C \cdot U_0 \cdot U_{kA} - C \cdot U_0 \cdot U_k}{C \cdot U_{kA} \cdot U_0} = \frac{dU_k}{U_{km}}, \quad (15)$$

где $C \cdot U_0 \cdot U_{kA}$ – энергия, поглощенная в контакте, $C \cdot U_0 \cdot U_k$ – энергия, выделившаяся в контакте.

Интересно отметить, что при тепловом воздействии

$$\eta = \frac{\alpha T_1 - \alpha T_2}{\alpha T_1} = \frac{\Delta T}{T_1}, \quad (16)$$

если пренебречь потерями тепла на нагревание конденсатора, т.е. К.П.Д. равен К.П.Д. цикла Карно. Если воздействие нетепловое, то вся поглощенная тепловая энергия, равная $(C \cdot U_{kA} \cdot U_0 - C \cdot U_k \cdot U)$, выделяется на резисторе, т.е. полностью преобразуется в электрическую энергию.

В [3, с. 35] показано, что внешние поля (магнитное, электромагнитное излучение, поле механических деформаций) могут изменять термоэдс. Поэтому $U_{kA} = U_k + dU_k(A)$, где A – основной параметр внешнего поля (для магнитного поля – это индукции магнитного поля, B (для электромагнитного излучения) – интенсивность излучения на частоте максимального поглощения I , для деформаций – S , где S – относительная деформация).

Например, магнитное поле изменяет соотношение быстрых и медленных электронов в токе за счет того, что быстрые электроны рассеиваются на тепловых колебаниях кристаллической решетки меньше, чем медленные электроны, т.е. в зависимости от величины магнитного поля, количество быстрых электронов в токе увеличивается. Это приводит к увеличению коэффициента Пельтье, а следовательно, и термо э.д.с. Так как время рассеяния электронов на тепловых фонах имеет порядок величины 10^{-11} с, то при каждом изменении магнитного поля новое равновесное распределение электронов установится также за это время. Это означает, что изменение U_k будет происходить с запаздыванием 10^{-11} с, поэтому этим запаздыванием можно пренебречь, если постоянная времени при зарядке конденсатора $R \cdot C \gg 10^{-11}$ с. Таким образом, можно изменять коэффициент Пельтье (U_k) на десятки процентов в полупроводниках (антимонид индия и полуметаллах (сплав висмут сурьма)).

Так как магнитное поле в процессе зарядки-разрядки термоэлектрического конденсатора изменяется во времени (после зарядки конденсатора оно выключается, а после разрядки снова включается), то оно порождает вихревое электрическое поле, а следовательно, и вихревую э.д.с. Тогда можно оценить мощность, расходуемую магнитным полем на нагревание конденсатора, когда магнитное поле переключается с частотой f , $W_{\text{вихр}} = E_{\text{вихр}}/R$, где R – сопротивление металлической пленки (как наиболее низкоомной) электрода конденсатора. Тогда

$$\frac{W_{\text{вихр}}}{W_{\text{конт}}} \approx \frac{40 \cdot 10^8 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-18}}{10^{-8} \cdot 10^{-2} \cdot 10^4} = 4 \cdot 10^{-5}, \quad (17)$$

т.е. мощность, выделяемая в виде тепла из-за вихревых токов, много меньше мощности, поглощаемой в контакте, и ей можно пренебречь.

Мощность, рассеиваемая на сопротивлении полупроводника или полуметалла,

$$W_{\text{п/п}} = I^2 \cdot R_{\text{п/п}}.$$

Тогда потерями в полупроводнике можно пренебречь.

Рассчитаем теперь энергию, которая необходима на создание магнитного поля $B(t)$. Прежде всего, отметим, что на изменение коэффициента Пельтье энергия не затрачивается, так как сила Лоренца перпендикулярна траектории движения электронов. Магнитное поле только перераспределяет холодные и горячие электроны в токе, оставляя их общую энергию

ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА, НАНОСИСТЕМ И МАТЕРИАЛОВ

неизменной. Если взять магнитопровод из магнитодиэлектрика, у которого нет насыщения, сечением 16 см^2 и сделать там зазор $l = 1 \text{ см}$, то поле в зазоре (куда будут помещены термоэлектрические конденсаторы) будет равно

$$B = \frac{I * N * \mu_0}{l}, \quad (18)$$

где N – число витков.

$$\text{При } B = 0,1 \text{ Тл и } N=1000 \quad I = \frac{B * l}{N * \mu_0} = \frac{0,1 \cdot 10^{-2}}{1000 \cdot 12,56 \cdot 10^{-7}} \approx 0,8 \text{ А}.$$

Если сечение магнита квадратное, длина провода равна 160 см , и сопротивление провода сечением $0,1 \text{ (мм}^2\text{)}$ $R = 27,2 \text{ (Ом)}$, и резистивные потери в магните $W_m = I^2 * R / 2 = 8,7 \text{ (Вт)}$. Длина обмотки магнита при сечении провода в $0,1 \text{ мм}^2$ равна $11,2 \text{ см}$. Тогда объем магнита равен $179,2 \text{ см}^3$. Удельные потери в ферритовом магнитопроводе могут быть равны на частоте 16 кГц и при $B = 0,1 \text{ Тл}$ $1,3 \text{ мВт/(см}^3\text{*Гц)}$. Тогда потери в магнитопроводе равны $3,72 \text{ Вт}$. Полная мощность на создание магнитного поля с индукцией $0,1 \text{ Т}$ равна $8,7 + 3,32 = 12,42 \text{ Вт}$. В зазоре магнитопровода можно поместить 400 конденсаторов толщиной $0,1 \text{ мм}$, так что поглощаемая мощность при $U = 0,01 \text{ В}$ равна 8 Вт . Чтобы поглощаемая мощность превысила потери в магните, толщина конденсатора должна быть в $1,5$ раза тоньше, т.е. не более $0,066 \text{ мм}$. Если магнит делать из высокотемпературного сверхпроводника, то для получения индукции магнитного поля $B = 0,1 \text{ Тл}$, при $N = 1000$ и сечении провода $0,1 \text{ мм}^2$ ток должен быть равен 9 А . Потери в сверхпроводящем магните отсутствуют. Поэтому на создание магнитного поля не требуется энергия. Кроме того, конденсаторы в этом случае помещаются внутри соленоида, образующего сверхпроводящий магнит.

Переменное магнитное поле можно также создать при помощи постоянных магнитов, движущихся около термоэлектрических конденсаторов. В этом случае затраты энергии на создание переменного магнитного поля будут определяться только добротностью механической системы, создающей движение магнитов, т.е. трением. При использовании подшипников эти потери будут близки к нулю.

На основе предложенного термоэлектрического конденсатора можно создать преобразователь тепловой энергии окружающей среды в электрическую. Как источник электроэнергии преобразователь можно отнести к возобновляемым источникам энергии, так как в нем используется энергия нагретых солнцем тел.

В отличие от известных возобновляемых источников энергии, таких как ветер, солнечная радиация, данный преобразователь не подвержен капризам погоды, смене дня и ночи, времен года, что является бесспорным его преимуществом перед существующими преобразователями возобновляемой энергии. Это позволит, очевидно, предлагаемому термоэлектрическому преобразователю легко конкурировать с известными преобразователями солнечной энергии.

Что касается холодильников, то, помимо того, что такому холодильнику не будет требоваться питание, он не будет иметь вращающихся частей, что повысит надежность его работы. Кроме того, возможно изготовление на базе этих холодильников кондиционеров, которые можно устанавливать прямо в комнате как вентилятор, так как у него нет горячего конца. Это ставит такие кондиционеры вне конкуренции по сравнению с существующими кондиционерами, требующими специальной установки в оконном проеме или использование сплитсистем. Так как такой кондиционер не требует электропитания, он может быть установлен в автомобиле и работать постоянно, поддерживая необходимую температуру.

ПРИКАСПИЙСКИЙ ЖУРНАЛ: управление и высокие технологии № 4 (8) 2009

Использование высоких технологий позволит создать многослойные структуры, в которых плотность мощности отбора тепловой энергии может превысить 1 Вт/см^3 , что позволит создать термопреобразователь мощностью в несколько десятков кВт в объеме, не превышающем объем автомобильного двигателя, т.е. установить термопреобразователь в автомобиль в качестве питания электродвигателей.

Библиографический список

1. *Гаджилаев, М. М.* Термоэдс InSb в поперечном квантующем магнитном поле / М. М. Гаджилаев // Известия вузов. – 1993. – № 3. – (Сер. Физика).
2. *Каган, В. Д.* Максимум в зависимости диффузионной термоэдс от магнитного поля для полупроводниковых сплавов n-Bi-Sb / В. Д. Каган, Н. А. Редько, Н. А. Родионов, В. И. Польшин // ФТТ. – 2000. – Т. 42, вып. 8.
3. *Карапетян, Г. Я.* Влияние магнитного поля на величину термо Э.Д.С. в полупроводниках / Г. Я. Карапетян, В. Ф. Катаев, В. И. Ратушный, И. А. Сысоев // Машиностроение и техносфера на рубеже XXI века : тр. Междунар. науч.-техн. конф. (11–17 сентября 2000 г., г. Севастополь). – Севастополь, 2001. – С. 34–35.
4. *Щенников, В. В.* Термоэдс халькогенидов свинца при высоком давлении / В. В. Щенников, С. В. Овсянников, А. Ю. Деревсков // ФТТ. – 2002. – Т. 44, вып. 10.
5. *Ure, Ronald W.* Теория материалов для термоэлектрических и термомагнитных приборов / Ure Ronald W. // ТНИЭР. – 1963. – Т. 51, № 5. – С. 702–717.