УДК 621.36

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ХОЛОДИЛЬНИК НА ОСНОВЕ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛ–ДИЭЛЕКТРИК–ПОЛУПРОВОДНИК–МЕТАЛЛ

Карапетьян Г. Я.[1]***, Днепровский В. Г.***[2]***, Катаев В. Ф.***[3]

THE SEMICONDUCTING THERMOELECTRIC REFRIGERATOR ON THE BASIS OF METAL–DIELECTRIC–SEMICONDUCTOR–METAL STRUCTURE

Karaptyan G. Ya., Dneprovski V. G., Kataev V. F.

The semiconducting thermoelectric refrigerator on the basis of metal–dielectric–semiconductor–metal structure is developed. The given refrigerator is based on the thermoelectric capacitor representing metal–dielectric–semiconductor–metal system which cools when charging and heats up in the course of discharging. The heat up is less intensified than cooling because charging and discharging occur via different contacts with different Peltier factor. As a result the capacitor is cooled during the charge-and-discharge cycle.

Keywords: thermoelectric capacitor, near surface charge

Уже давно существуют микроэлектронные устройства, например, элементы Пельтье, которые охлаждаются при пропускании тока. Новый виток их исследования начался одно-два десятилетия назад вместе со стремительной миниатюризацией электроники вплоть до одноэлектронных устройств. На основе многослойных микроустройств, собранных в различных комбинациях из слоев сверхпроводника, металла, полупроводника и изолятора, были сконструированы микрорефрижераторы, микротермометры криогенных температур, микрокалориметры. Обзор современного состояния дел отражен в [1].

Интересно, что, несмотря на большие достижения, до сих пор не был создан настоящий циклический микрохолодильник, работающий не на протекающем сквозь него постоянном токе, а на периодическом движении зарядов вперед-назад. Авторы статьи [2] восполнили этот пробел, описав принцип работы микроэлектронного устройства, которое они назвали одноэлектронным холодильником (хотя более точно его следовало бы назвать двухэлектронным). Такое устройство можно получить, если изготовить трехслойную структуру «сверхпроводник—изолятор—нормальный металл» (СИН-переход) и подать на нее переменное напряжение. Тонкий зазор из изолятора, разделяющий сверхпроводник и маленький островок из обычного металла, препятствует свободному перетеканию электронов и позволяет им лишь тунелировать (перескакивать через классически запрещенную область) поодиночке. (Такой режим работы называется режимом кулоновской блокады, а само это направление микроэлектроники известно как «одноэлектроника»).

Из-за высокочастотного (десятки и сотни мегагерц) переменного напряжения в течение каждого периода лишь один-два электрона успевают перескочить с металла на сверхпроводник и затем обратно. При этом из-за различия электронных свойств сверхпроводника и металла возникает следующая картина с передачей энергии. В сверхпроводнике все электронные состояния с низкой энергией заняты, поэтому перескочить туда из металла может только электрон с достаточно боль-

[1]Карапетьян Геворк Яковлевич, старший научный сотрудник НИИ механики и прикладной математики им. И. И. Воровича Южного федерального университета; e-mail: jorichkaka@rambler.ru

[2]Днепровский Валерий Григорьевич, канд. технических наук, заведующий лаборатории НИИ механики и прикладной математики им. И. И. Воровича Южного федерального университета; e-mail: dnepr3@rambler.ru

[3]Катаев Владимир Федорович, генеральный директор ЗАО «Институт термоэлектричества»; e-mail: kvf@volgodonsk.ru

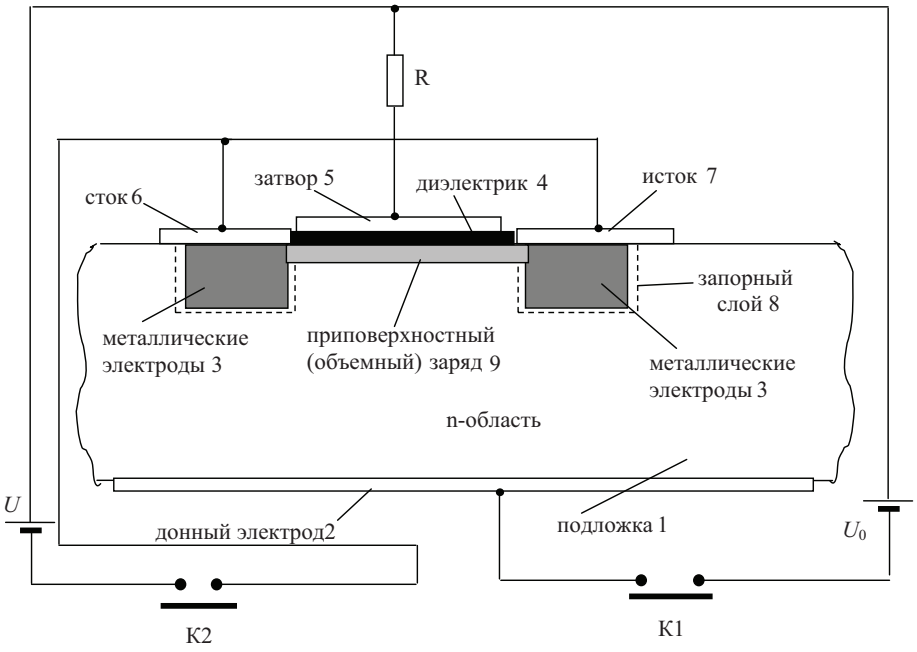

Рис. 1. Конструкция термоэлектрического конденсатора

шой энергией. В течение полупериода, когда на сверхпроводник подается «плюс», перескочивший электрон тут же уносится прочь от контакта, вглубь сверхпроводника. Еще через полпериода, под действием обратного напряжения, из сверхпроводника в металл возвращается уже другой, более «холодный» электрон [2]. В результате получается циклический процесс, сопровождающийся направленной теплопередачей: у металла отбирают «горячие» электроны, а возвращают ему уже «холодные». Это и приводит к охлаждению металлического островка. Авторы провели подробные аналитические вычисления и численное моделирование динамики этого процесса и выяснили, что в зависимости от частоты источника переменного напряжения и начальной температуры удается добиться охлаждения на несколько сот миллиградусов Кельвина. В отличие от холодильников, основанных на эффекте Пельтье, в которых есть горячий и холодные концы, в данных охладителях, как следует из [2], отсутствует горячий конец. Это делает такие охладители намного эффективнее холодильников Пельтье, поскольку в них отсутствует бесполезный переток тепла от горячего конца к холодному.

Но охлаждение в сверхпроводниках возможно только при очень низких температурах, что делает невозможным использование такого способа охлаждения для отвода тепла от процессоров и других микросхем, работающих при температурах, значительно превышающих криогенные. Поэтому создание холодильников, у которых так же, как и у холодильников, работающих при низких температурах, нет горячего конца, является весьма актуальной задачей.

Целью настоящей работы является разработка новой конструкции холодильника на основе МДП структур, представляющих собой термоэлектрический конденсатор. Такой холодильник может работать при комнатных температурах и выше.

Основой холодильника является термоэлектрический конденсатор (рис. 1), который состоит из полупроводниковой подложки 1 n-типа, на нижней поверхности которой расположен донный электрод 2, имеющий омический контакт с подложкой. На верхней стороне подложки расположены металлические электроды 3, образующие в контакте с полупроводниковой подложкой запорный слой 8. Электроды 3 расположены в углублениях в подложке. На поверхности подложки имеется диэлектрический слой 4, расположенный между углубленными электродами 3, который слегка перекрывает их на поверхности. На этот диэлектрический слой нанесен электрод 5, называемый затвором, а на металлические электроды 3 нанесены электроды 6, 7

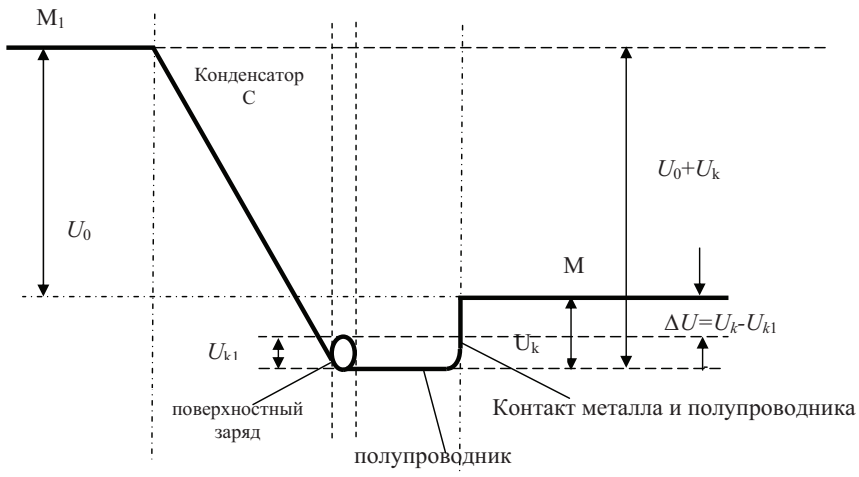

Рис. 2. Потенциальная диаграмма заряженного термоэлектрического конденсатора с полупроводником с учетом контактной разности между металлом и полупроводником

называемые стоком и истоком соответственно.

Зарядка термоэлектрического конденсатора с полупроводником производится по схеме, показанной на рис. 1. При замыкании ключа K1 емкость между затвором и подложкой заряжается до напряжения U_0 через резистор R. Полярность источника напряжения выбирается таким образом, что энергетические зоны в полупроводнике искривляются вниз и в приповерхностном слое под диэлектриком образуется обогащенный электронами объемный заряд 9, в котором концентрация электронов намного больше, чем в подложке.

Напряжение U_0 подбирается таким образом, чтобы электроны в области объемного заряда находились бы в вырожденном состоянии из-за сильно повышенной концентрации электронов. В этом случае запорный слой 8 между металлическими электродами 3 и приповерхностным зарядом 9 исчезает (так как запорные слои характерны только для контакта металла с невырожденным полупроводником), т.е. сток и исток приконтачиваются к области с повышенной концентрацией электронов.

Потенциальный барьер между металлом и приповерхностным зарядом из-за повышенной концентрации электронов будет меньше, чем в объеме полупроводника. Поэтому более медленные электроны, которые не могли преодолеть потенциальный барьер между металлом и полупроводником, смогут теперь преодолеть более низкий потенциальный барьер, что приведет к меньшей концентрации холодных электронов в области контакта приповерхностного слоя полупроводника с металлом. Это означает, что уменьшится коэффициент Пельтье в области приповерхностного слоя по сравнению с объемом полупроводника. Таким образом, в контакте металла с приповерхностным слоем будет поглощаться или выделяться тепла меньше при пропускании тока, чем в контакте металла с полупроводником в отсутствии электрического поля.

При учете контактной разности между полупроводником и металлом с противоположной от диэлектрика стороны напряжение на поверхности полупроводника должно равняться $U_0 + U_k$, где U_k — контактная разность между металлом и полупроводником. На рис. 2 показана потенциальная диаграмма заряженного термоэлектрического конденсатора с полупроводником.

Как видно из рис. 2, между металлическим электродом, подсоединенным к полупроводнику, и электродом, приконтаченным к приповерхностному заряду, имеется разность потенциалов $\Delta U = U_k - U_{k1}$, где U_{k1} — контактная разность между металлом и поверхностным зарядом. Эта контактная разность при напряжении U_0=0 равна U_k и $\Delta U = 0$. При достаточно большом напряжении U_0 напряжение U_{k1} стремится к нулю и $\Delta U = U_k$, так как концентрация электронов в приповерхностном слое стремится к концентрации электронов в металле и энергия электронов в приповерхностном слое слабо

отличается от энергии электронов в металле, т. е. потенциальный барьер между металлом и приповерхностным слоем стремится к нулю. При зарядке конденсатора через контакт, подсоединенный к полупроводниковой подложке с противоположной диэлектрику стороны таким образом, чтобы электроны входили бы в полупроводник через металл, будет происходить охлаждение контакта, и поглощенная тепловая энергия, как отмечалось в [3, 4], будет запасаться в энергии заряженного конденсатора.

Разряжать конденсатор следует до напряжения U, при котором сохраняется достаточная концентрация электронов в приповерхностном заряде, необходимая для приконтачивания электродов 3. Поэтому рассмотрим разряд этого конденсатора до напряжения U через металлические электроды, которые приконтачиваются к приповерхностному заряду.

Уравнение, описывающее этот процесс, имеет вид

$$RC\frac{du}{dt} + u = U_{k1} + U, \qquad (1)$$

где u — напряжение на обкладках конденсатора (рис. 1), C — емкость термоэлектрического конденсатора, U_{k1} — контактная разность потенциалов между металлическим электродом и приповерхностным зарядом, U — напряжение источника питания, R — резистор в цепи затвора термоэлектрического конденсатора.

В начальный момент времени конденсатор заряжен до напряжения $U_k + U_0$, поэтому $u(0) = U_k + U_0$. Решение уравнения (1) имеет вид

$$u(t) = Ae^{-\frac{t}{RC}} + U_{k1} + U,$$

тогда

$$A = \Delta U + \Delta U_k,$$

где $\Delta U = U_0 - U$, $\Delta U_k = U_k - U_{k1}$.

Ток через конденсатор равен

$$i = \frac{\Delta U + \Delta U_k}{R} e^{-\frac{t}{RC}}. \qquad (2)$$

Далее рассмотрим заряд конденсатора от напряжения U до напряжения U_0 через донный электрод.

Уравнение, описывающее этот процесс, имеет вид

$$RC\frac{du}{dt} + u = U_k + U_0.$$

Его решение:

$$u(t) = Ae^{-\frac{t}{RC}} + U_k + U_0.$$

В начальный момент времени конденсатор заряжен до напряжения $U_{k1} + U$, поэтому $u(0) = U_{k1} + U$. Тогда $A = -(\Delta U + \Delta U_k)$. Ток через конденсатор описывается соотношением (2).

Если теперь вновь разряжать конденсатор до напряжения U через металлические электроды, которые приконтачиваются к приповерхностному заряду, то через резистор вновь потечет ток, определяемый выражением (2). Если далее вновь зарядить конденсатор до напряжения U_0 через донный электрод, вновь будет через резистор течь ток, определяемый выражением (2). Таким образом, в процессе зарядки – разрядки конденсатора напряжение на нем всегда меняется от $U_k + U_0$ до напряжения $U_{k1} + U$, т. е. амплитуда изменения напряжения равна $\Delta U + \Delta U_k$, ток заряда равен току разряда и определяется выражением (2). Так как ток при зарядке и разрядке один и тот же, а контактная разность между приповерхностным зарядом 9 меньше, чем между донным электродом 2 и подложкой, то количество поглощенного тепла оказывается больше, чем выделившегося, поскольку количество поглощенного или выделившегося тепла пропорционально току и контактной разности. В результате за цикл зарядки – разрядки термоэлектрический конденсатор охладится и поглощенное тепло будет преобразовано в электрическую энергию, как показано в [3, 4].

Энергия, которую потребляет данная схема от источника питания (без учета мощности на переключение) за период заряд – разряд

$$W_{\text{ист}} = \int_0^\infty (U_0 - U) i(t) dt = \\ = C\Delta U(\Delta U + \Delta U_k).$$

Энергия, выделившаяся на резисторе за период заряд – разряд

$$W_R = 2\int_0^\infty i^2(t) R dt = C(\Delta U + \Delta U_k)^2.$$

Таким образом,

$$\Delta W = W_R - W_{\text{ист}} = \mathrm{C}(\Delta U + \Delta U_k)\Delta U_k,$$

$$\frac{\Delta W}{W_{\text{ист}}} = \frac{\Delta U_k}{\Delta U}.$$

Если положить $\Delta U = \Delta U_k$, то получается 100 % приращение энергии на резисторе.

Для кремния n-типа с удельным сопротивлением 1–4 Ом·см термоэдс может составлять 400–1 000 мкВ/град, т.е. коэффициент Пельтье может быть равен 0,1–0,3 В. В приконтактном слое концентрация электронов может быть настолько высока, что они находятся в вырожденном состоянии. Тогда термоэдс для этого приконтактного слоя будет незначительным и можно положить $\Delta U_k = 0,2$ В. При емкости конденсатора площадью 1×1 мм^2 в 100 пФ $W_{\text{ист}} = 4{\cdot}10^{-12}$ Дж. Если теперь соединить 1 000 таких конденсаторов параллельно и переключать их с частотой $f = 1$ МГц (при условии, что конденсатор за время в 1 мкс успеет разрядиться), то мощность, потребляемая от источника, равна $W_{\text{ист}} \cdot f = 410^{-3}$ Вт. Тогда приращение мощности на резисторе равно также 4 мВт. Если в качестве диэлектрика использовать не двуокись кремния, а сегнетоэлектрические пленки, то можно увеличить емкость в 100 раз. Тогда приращение мощности может составить 0,4 Вт с площади 1 000 мм^2 (пластина 33×33 мм^2). Максимальный ток через термоэлектрический конденсатор при сопротивлении 10 Ом равен 40 мА. Тогда при сопротивлении перехода донный электрод — приповерхностный заряд или перехода приповерхностный заряд — металлический электрод в 1 Ом в одной МДПМ структуре (что можно сделать надлежащим подбором толщины подложки) получаем при параллельном соединении 1 000 таких структур сопротивление переходов в 0,001 Ом. При этом максимальное падение напряжения на этом переходе равно $40{\cdot}10^{-6}$ В, что много меньше ΔU_k, и потерями в полупроводнике на джоулево тепло можно пренебречь, т.е. почти все приращение мощности будет выделяться на внешнем резисторе R (и ключах).

Теплом, выделяемым из-за эффекта Томпсона, также можно пренебречь, так как его количество пропорционально разности температур, которая в данном случае будет намного меньше температуры подложки, поскольку кремний обладает достаточно высокой теплопроводностью, и толщина термоэлектрического конденсатора может быть сделана равной не более 350 мкм (толщина кремниевых кристаллов-дисков, выпускаемых серийно). Поэтому этим эффектом в данной системе также можно пренебречь.

В термоэлектрическом конденсаторе используется однородный полупроводник, в котором концентрация электронов в объеме одна и та же. Поэтому нет объемного эффекта Пельтье. Что касается изменения концентрации электронов в приповерхностном слое, то ее величина изменяется по мере зарядки или разрядки конденсатора. Электроны во время зарядки конденсатора при переходе из полупроводника в поверхностный заряд не могут отдать энергию кристаллической решетке (нагревание). Они отдают всю свою энергию, включая и энергию, приобретенную при переходе в полупроводник из металла с поглощением тепла, в электрическую энергию заряженного конденсатора, как показано в [3, 4], т. е. объемный эффект Пельтье в данном случае не сказывается. В приповерхностном заряде концентрацию электронов можно считать постоянной как по толщине, ввиду его тонкости (не более нескольких десятков ангстрем), так и по длине, ввиду однородности электрического поля в плоском конденсаторе. Поэтому объемным эффектом Пельтье при разряде конденсатора можно также пренебречь.

Приращение мощности происходит благодаря наличию контактных разностей и, как следствие, отличной от нуля ΔU_k, которая определяет коэффициенты Пельтье на контактах термоэлектрического конденсатора. Следовательно, приращение энергии происходит благодаря поглощению тепла в контакте донного электрода с подложкой (причем поглощение тепла больше, чем его выделение в контакте приповерхностного заряда с металлическим электродом, благодаря чему $\Delta U_k > 0$), что и приводит к охлаждению конденсатора. Хорошая теплопроводность кремния позволяет более эффективно отбирать тепло от подложки, которая равномерно охлаждается (благодаря высокой теплопроводности), и тепло окружающей среды устремляется в подложку. При этом необходимо учесть, что для получения на выходе термоэлектрического конденсатора мощности 4 мВт для кремниевой пластины размером 33×33 мм^2 и толщиной 0,35 мм, как показывают расчеты (при удельной теплоемкости кремния c=0,71 кДж/(кг·К), плотности ρ = 2 500 кг/м^3, объеме кремниевой пластины V=33×33×0,5·10^{-9} м^3), при мощности охлаждения в Q=4 мВт

кремниевая пластина должна охладится на $\Delta T = Q/(\rho \cdot V \cdot c) = 0,0042\,^\circ/\text{с}$. Если положить, что пластина находится в теплообмене с окружающей средой так, что количество поступающего на нее тепла равно количеству тепла, поглощаемого в контактах, температура пластины будет ниже температуры окружающей среды на очень малую величину, равную 0,0042 °. Если пластину теплоизолировать, то она будет охлаждаться со скоростью $0,0042\,^\circ/\text{с}$.

Таким образом, можно получить устройство, которое охлаждается, причем поглощенное тепло преобразуется в электрическую энергию, выделяемую на резисторе R, т.е. происходит ненулевое преобразование тепловой энергии окружающей среды в электрическую. В обычном резисторе эта энергия снова преобразуется в тепловую. В электродвигателе поглощенное тепло может быть преобразовано в механическую, а далее в электрическую энергию, которая может быть вновь возвращена в схему, уменьшая потребление электроэнергии от источников напряжения. Как показано выше, при $\Delta U = \Delta U_k$ получается 100 % приращение энергии на резисторе, т.е. на резисторе выделяется энергии вдвое больше, чем потребляется от источников напряжения. Поэтому выделившейся на резисторе энергии может оказаться достаточно для компенсации затрат энергии источников напряжения, чтобы создать режим самогенерации. Но это уже отдельная достаточно сложная задача, рассмотрение которой выходит за рамки данной работы.

Можно сказать, что термоэлектрический конденсатор в некоторой степени моделирует ситуацию, которая происходит в одноэлектронном холодильнике с помощью переключателей: переключатели создают ситуацию, при которой электроны уносят тепло из полупроводниковой подложки за цикл зарядки – разрядки термоэлектрического конденсатора.

На рис. 3 показана схема, которая позволяет использовать выделяющуюся на резисторе энергию для подзарядки батарей. В данной схеме резистор заменен на индуктивность, которая через катушку связи подсоединена к выпрямителю. Частота переключений подбирается таким образом, чтобы наступил резонанс в контуре, состоящем из термоэлектрического конденсатора C и индуктивности L. В этом случае в схеме устанавливаются гармонические колебания с частотой, равной резонансной частоте контура и амплитудой напряжения, равной ΔU. Ток в цепи при резонансе будет равен

$$i(t) = I_0 \cos \omega t = \frac{4}{\pi} \frac{\Delta U}{R},$$

где R — сопротивление, вносимое в контур из-за подключения выпрямителя сопротивление индуктивности, $\omega = 2\pi f$, f — резонансная частота контура.

Тепловую мощность, поглощаемую в контактах, можно определить из выражения

$$W_k = \frac{1}{T} \int\limits_{-T/2}^{T/2} \Delta U_k I_0 \cos \omega t dt = \frac{8}{\pi^2} \frac{\Delta U \Delta U_k}{R},$$

при W_k =1 Вт и $\Delta U = 10$ В R =1,622 Ом.

Исходная кремниевая пластина n-типа выполнена низкоомной (менее 1 Ом·см), и на ее рабочей поверхности создан рабочий слой с удельным сопротивлением 1–4 Ом·см толщиной 10 мкм. При площади электродов преобразователя в 0,5 мм^2 (это примерно 1 мм^2 кремниевой пластины) его сопротивление будет равно 0,2–0,8 Ом. При параллельном соединении 1 000 единичных преобразователей (площадь 1 000 мм^2) сопротивление преобразователя окажется равным 0,0002–0,0008 Ом. В качестве диэлектрика используется, как и в полевых транзисторах, двуокись кремния. В этом случае емкость термоэлектрического конденсатора может достигать нескольких сотен пФ.

Поэтому за период цикла зарядка–разрядка поглотится ничтожное количество тепла. Однако если заряжать–разряжать конденсатор достаточно часто и использовать параллельно соединение многих таких конденсаторов, то можно довести ток до величин, сравнимых с токами в холодильниках Пельтье.

Так, например, при соединении 10 000 таких конденсаторов (каждый конденсатор имеет размер не более 1×1 мм и емкость до 100 пФ) емкость может равняться $C = 1$ мкФ. При частоте переключения f=10 кГц индуктивность

$$L = \frac{1}{\omega^2 C} = \frac{1}{(2\pi f)^2 10^{-6}} \approx 250 \text{ мкГн}.$$

Индуктивное сопротивление $\omega L = 15,7$ Ом. Тогда при добротности катушки индуктивности $Q = 500$ активное сопротивление ка-

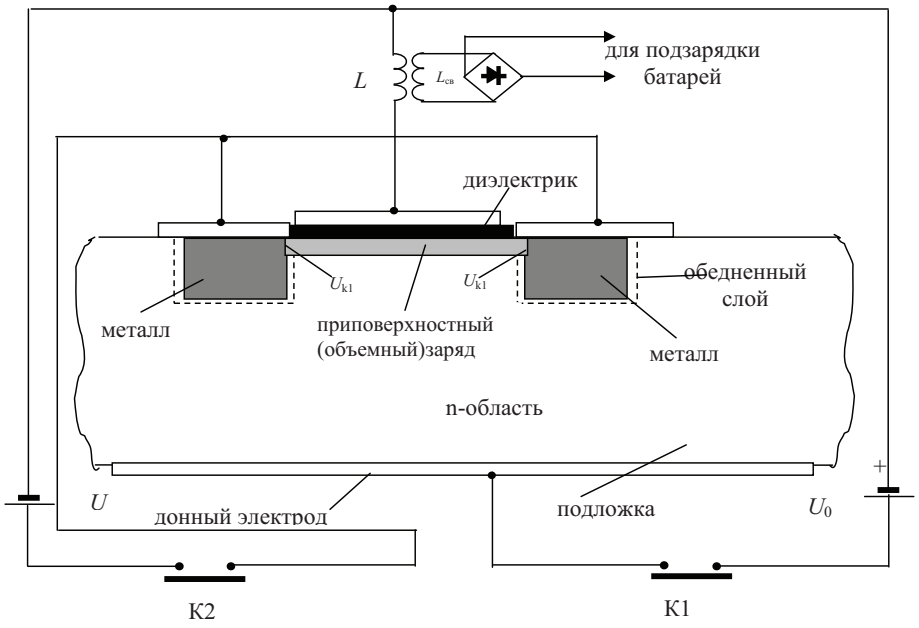

Рис. 3. Схема охлаждающего устройства с повышенным кпд

тушки будет равно 0,03 Ом, и сопротивление, которое должно вноситься в контур из-за подключения выпрямителя, равно $1,622 - 0,03 = 1,592$ Ом.

Амплитуда тока в цепи $I_0 = 4 \cdot 10$ В/ 1,622 Ом $\cdot\pi = 7,85$ А, а действующее значение равно 5,55 А. В этом случае падение напряжения в полупроводнике оказывается все равно много меньше контактной разности. Мощность, потребляемая от источников питания, равна $2 \cdot \Delta U \cdot I_0/\pi = 51$ Вт. Мощность, которая выделяется на вносимом сопротивлении, равна (5,55 А)^2·1,592 Ом=49,03 Вт. К этой мощности необходимо добавить мощность, поглощаемую из окружающей среды в контактах, т.е. на этом резисторе выделится $49,03 + 1 = 50,03$ Вт. Тогда предельный кпд холодильника составит $(50,03/51) \cdot 100 = 98\,\%$.

Эта мощность может быть возвращена обратно в схему через выпрямитель, который и вносит сопротивление 1,592 Ом.

Следовательно, блок термоэлектрических конденсаторов размером не более 10×10 см дает возможность получить поглощаемую тепловую мощность 1 Вт.

Если учесть расходы энергии на управление ключами, то кпд будет несколько меньше. Если емкость ключей равна 10 000 пФ (для переключения токов около 10 А), то мощность, расходуемую на переключение, можно оценить по формуле $W_{\text{упр}} = f \cdot C \cdot U^2_{\text{упр}}$. При $U_{\text{упр}}$=10 В и частоте f =10 кГц $W_{\text{упр}}$=$10^4 \cdot 10^{-8} \cdot 100 = 0,01$ Вт, что много меньше даже поглощаемой тепловой мощности и ею можно пренебречь. Генератор прямоугольных импульсов с амплитудой до 10 В, чтобы переключать ключи мощностью управления в 0,01 Вт, можно сделать с потребляемой мощностью не более 1 Вт. Тогда кпд можно определить как $(50,03/52) \cdot 100 = 96,2\,\%$.

Если в качестве батарей с напряжениями U и U_0 использовать блоки питания, которые питаются от электросети, то энергия, снимаемая с выпрямителя, будет идти на компенсацию энергопотребления от источника питания. В этом случае потребляемая от сети мощность определится как $52 - 50,03 = 1,97$ Вт. Тогда термический кпд, определяемый как отношение поглощаемой тепловой мощности к мощности, потребляемой от сети, будет равен (1 Вт/1,97 Вт) · 100=50,76 %.

Таким образом, предлагаемый холодильник получается значительно экономичнее компрессорных холодильников и холодильников Пельтье. В нем нет холодного и горячего концов. Не надо расходовать энергию на паразитную эдс, возникающую из-за этого в холодильниках Пельтье, а поглощенное тепло преобразуется в электроэнергию, кото-

рая может быть возвращена обратно в питающую цепь.

Так как в данной конструкции нет горячего конца, то теплопроводность должна быть, напротив, как можно выше, чтобы обеспечить лучший теплообмен с окружающим пространством. Для данной конструкции параметр ZT невозможно определить (получается, что $ZT = \infty$), но холодильный коэффициент близок 1 и не зависит от разности температур, поскольку почти все поглощенное тепло преобразуется в электроэнергию.

Литература

1. *Giazotto F., Heikkila T. T., Luukanen A., Savin A. M., Pekola J. P.* Opportunities for mesoscopics in thermometry and refrigeration: Physics and applications // Rev. Mod. Phys. 2006. No. 78. P. 217–274.
2. *Pekola J. P., Giazotto F., Saira O.-P.*. Radio-Frequency Single-Electron Refrigerator // Physical Review Letters. 2007. Vol. 98. P. 037201.
3. *Днепровский В.Г., Карапетьян Г. Я., Лысенко М. В., Пустовалов Г. А.* Исследование зависимости термоэдс от магнитного поля в полупроводниковом кристалле // Нано и микросистемная техника. 2003. № 9. С. 38–42.
4. *Карапетьян Г. Я., Катаев В. Ф., Крейс И. А.* О возможности преобразования тепла окружающей среды в электрическую энергию с помощью термоэлектрического конденсатора // Прикаспийский журнал: Управление и высокие технологии. 2009. № 4. С. 90–98.

Ключевые слова: термоэлектрический конденсатор, приповерхностный заряд

Статья поступила 20 декабря 2010 г.

НИИ механики и прикладной математики им. И. И. Воровича Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону

© Карапетьян Г. Я., Днепровский В. Г., Катаев В. Ф., 2010