

Преобразование тепла окружающей среды в электрическую энергию в системе металл–диэлектрик–полупроводник–металл

© Л.С. Лунин, Г.Я. Карапетьян, В.Г. Днепровский, В.Ф. Катаев

Южный научный центр РАН,
344006 Ростов-на-Дону, Россия
e-mail: jorichkaka@rambler.ru

(Поступило в Редакцию 18 апреля 2011 г. В окончательной редакции 22 апреля 2013 г.)

Основой предлагаемого преобразователя является термоэлектрический конденсатор, представляющий собой систему металл–диэлектрик–полупроводник–металл. В такой системе возможно ненулевое преобразование тепла окружающей среды в электрическую энергию без предварительного создания градиента температур. Зарядка термоэлектрического конденсатора происходит через донный электрод полупроводниковой подложки, а разрядка — через обогащенный электронами приповерхностный слой, образующийся при зарядке в приповерхностном слое, граничащим с диэлектриком. В этом случае количество поглощенного тепла при зарядке конденсатора в контакте металл–полупроводник оказывается большим, чем выделяющееся тепло при разрядке вследствие того, что контактная разность между донным электродом и полупроводником оказывается больше чем контактная разность между металлом и приповерхностным обогащенным слоем, в котором концентрация электронов значительно больше, чем в объеме полупроводника. В результате то количество поглощенного тепла, которое не выделилось при разрядке, преобразуется в электрическую энергию, согласно закону сохранения энергии.

Введение

В работах [1–3] показано, что в термоэлектрическом преобразователе, содержащем термоэлектрический конденсатор, представляющий систему металл–диэлектрик–полупроводник–металл (МДПМ), возможно ненулевое преобразование теплоты окружающей среды в электрическую энергию за счет изменения магнитного поля, которое изменяет термоэдс в полупроводнике. Однако создать термоэлектрический преобразователь на основе изменения термоэдс за счет магнитного поля достаточно сложно, так как для этого необходимы сверхпроводящие магниты или высокооборотные механические системы с постоянными магнитами, которые создают изменяющееся магнитное поле. Не проще сделать такой преобразователь и на основе создания поля механических напряжений, поскольку для заметного изменения термоэдс требуются очень высокие давления (более 1000 МПа) [4]. В то же время изменение электрического поля в полупроводниках всего на несколько вольт может заметно изменить энергию электронов из-за искривления энергетических зон [5], что приводит к значительному изменению термоэдс и коэффициента Пельтье.

Поэтому целью настоящей работы является разработка конструкции преобразователя, использующего влияние электрического поля на термоэдс в МДПМ-структурах.

1. Описание конструкции

Основой преобразователя является МДПМ-структура (рис. 1), которая состоит из полупроводниковой подложки *I* *n*-типа, на нижней поверхности которой располо-

жен донный электрод *2*, имеющий омический контакт с подложкой. На противоположной верхней стороне подложки расположены металлические электроды *3*, образующие в контакте с полупроводниковой подложкой запирающий слой *8*. Электроды *3* расположены в углублениях в подложке. На поверхности подложки расположен диэлектрический слой *4*, расположенный между углубленными электродами *3*, который слегка перекрывает их на поверхности. На этот диэлектрический слой нанесен

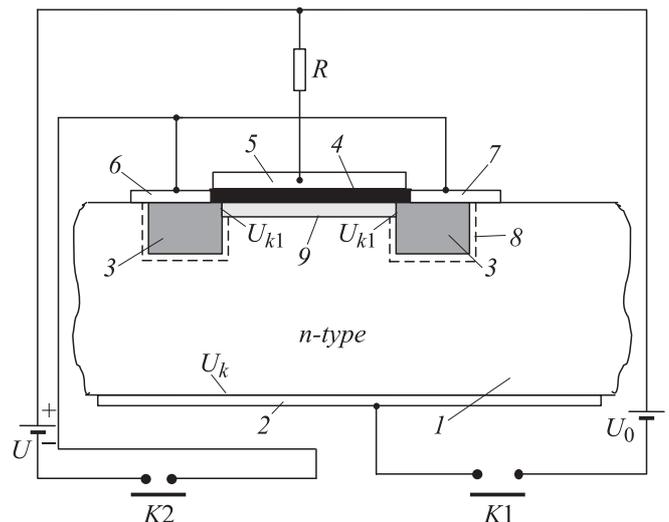


Рис. 1. Термоэлектрический конденсатор: *1* — подложка (substrate), *2* — донный электрод (bottom electrode), *3* — металл (metal), *4* — диэлектрик (dielectric), *5* — затвор (gate), *6* — сток (drain), *7* — исток (source), *8* — запирающий слой (barrier layer), *9* — приповерхностный заряд (near-surface volumetric charge).

электрод 5, называемый затвором, а на металлические электроды 3 нанесены электроды 6, 7, называемые стоком и истоком соответственно. Такая структура напоминает структуру полевого транзистора [6], поэтому электроды названы аналогичным образом. Отличие состоит в том, что полевой транзистор работает в режиме сильной инверсии, а предлагаемая структура — в режиме насыщения, также в том, что сток и исток выполняют одинаковые функции — подсоединение к приповерхностному заряду.

2. Принцип работы

Зарядка конденсатора с полупроводником, который представляет собой МДПМ-структуру, 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 приповерхностный заряд 9, в котором концентрация электронов намного больше, чем в подложке. Наличие электрического поля $E(z)$ в приповерхностном заряде меняет величину потенциальной энергии электрона в этой области. Так как электрическое поле направлено от поверхности в глубь полупроводника, то электроны будут иметь минимальную энергию в этом поле вблизи поверхности, где для них энергетическое положение соответствует наличию потенциальной ямы. Поэтому при зарядке конденсатора с полупроводниковым электродом (МДПМ-структура) электроны отдадут всю свою энергию электрическому полю. При этом их энергия становится минимальной (близкой к энергии электронов в металле), но в отличие от полупроводника концентрация электронов в приповерхностном заряде может быть намного больше, чем в его объеме.

В процессе зарядки конденсатора электроны переходят из металла в полупроводник, и им приходится преодолевать потенциальный барьер, равный разности энергий между уровнем Ферми металла и дном зоны проводимости полупроводника [5]. Это могут сделать только „самые энергичные“ или „горячие“ электроны в виду того, что имеется распределение электронов по энергиям [8]. Поэтому в контакте с избытком остаются менее энергичные или <холодные> электроны и он охлаждается, так как они, приходя в термодинамическое равновесие с кристаллической решеткой металла, отбирают у нее энергию. Это явление называется эффектом Пельтье, а коэффициент Пельтье Π равен внутренней контактной разности потенциалов ($\Pi = U_k$), если под внутренней контактной разностью понимать $(E_c - F)/e$ [5], где: E_c — энергия на дне зоны проводимости полупроводника; F — уровень Ферми; e — заряд электрона. Далее эти электроны в процессе зарядки

конденсатора переходят в приповерхностный заряд, в котором они должны иметь минимальную энергию, отдавая всю свою энергию, в том числе и приобретенную при переходе из металла в полупроводник тепловую энергию, полю заряжаемого конденсатора.

Таким образом, поглощенная в процессе зарядки конденсатора в контакте донный электрод–подложка тепловая энергия (кинетическая энергия хаотически движущихся электронов) переходит в потенциальную энергию заряженного конденсатора. При этом эта энергия, как показано в [1,3] равна

$$W_C = C \frac{U_0^2 + 2U_0U_k}{2}, \quad (1)$$

где $CU_0^2/2$ — энергия, полученная конденсатором от источника напряжения, CU_0U_k — поглощенная в контакте донный электрод 2 — подложка 1, U_k — контактная разность между металлом и полупроводником, U_0 — напряжения источника питания. Потенциальная диаграмма заряженного термоэлектрического конденсатора имеет вид, показанный на рис. 2. На ней видно, что разность потенциалов между поверхностным зарядом и затвором равна $U = U_0 + U_k$, поскольку энергия заряженного конденсатора определяется формулой (1).

Напряжение U_0 подбирается таким образом, чтобы электроны в области приповерхностного заряда находились бы в вырожденном состоянии из-за сильно повышенной концентрации электронов. В этом случае заборный слой 8 между металлическими электродами 3 и приповерхностным зарядом 9 исчезает (так как заборные слои характерны только для контакта металла с невырожденным полупроводником), т.е. сток и исток подсоединяются (приконтактируются) к области с повышенной концентрацией электронов. Потенциальный барьер между металлом и приповерхностным зарядом в этом случае будет меньше, чем в объеме полупроводника, так как уровень Ферми в вырожденном

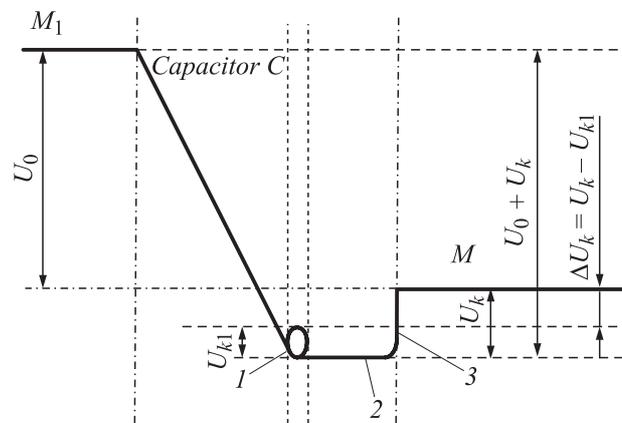


Рис. 2. Потенциальная диаграмма заряженного термоэлектрического конденсатора: — приповерхностный заряд (near-surface charge), 2 — полупроводник (semiconductor), 3 — контакт металла и полупроводника (contact of metal and semiconductor).

случае может находиться гораздо ближе к дну зоны проводимости, чем в невырожденном случае. Это означает, что уменьшится коэффициент Пельтье в области приповерхностного слоя по сравнению с объемом полупроводника. Таким образом, получается, что в контакте металла с приповерхностным слоем будет поглощаться или выделяться тепла меньше при пропускании тока, чем в контакте металла с полупроводником в отсутствие электрического поля.

Между металлическим электродом, подсоединенным к полупроводнику, и электродом, подсоединенным 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 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.

Разряжать конденсатор необходимо до напряжения U , при котором сохраняется достаточная концентрация электронов в приповерхностном заряде, необходимая для подсоединения электродов 3. Поэтому рассмотрим разряд этого конденсатора до напряжения U через металлические электроды, которые подсоединяются к приповерхностному заряду, при этом ключ $K1$ на схеме на рис. 1 размыкается, а ключ $K2$ замыкается.

Уравнение, описывающее этот процесс, имеет вид

$$RC \frac{du}{dt} + u = U_{k1} + U, \quad (2)$$

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 — сопротивление в цепи зарядки (разрядки) конденсатора.

В начальный момент времени конденсатор заряжен до напряжения $U_k + U_0$, поэтому $u(0) = U_k + U_0$. Решение и уравнения (2) имеет вид

$$u(t) = A \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) + U_{k1} + U. \quad (3)$$

Тогда $A + U_{k1} + U = U_k + U_0$, $A = U_0 - U + U_k - U_{k1} = \Delta U + \Delta U_k$, где $\Delta U = U_0 - U$, $\Delta U_k = U_k - U_{k1}$. Ток через конденсатор

$$i = \frac{\Delta U + \Delta U_k}{R} \exp\left(-\frac{t}{RC}\right). \quad (4)$$

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

Уравнение, описывающее этот процесс, имеет вид

$$RC \frac{du}{dt} + u = U_k + U_0. \quad (5)$$

Решение и уравнения (5) имеет вид

$$u(t) = A \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) + U_k + U_0.$$

В начальный момент времени конденсатор заряжен до напряжения $U_{k1} + U$, поэтому $u(0) = U_{k1} + U$. Тогда $A + U_k + U_0 = U_{k1} + U$, $A = -(U_0 - U) - (U_k - U_{k1}) = -(\Delta U + \Delta U_k)$, где $\Delta U = U_0 - U$, $\Delta U_k = U_k - U_{k1}$.

Ток через конденсатор

$$i = \frac{\Delta U + \Delta U_k}{R} \exp\left(-\frac{t}{RC}\right). \quad (6)$$

Если теперь вновь разряжать конденсатор до напряжения U через металлические электроды, которые приконтакчиваются к приповерхностному заряду, то через резистор вновь потечет ток, определяемый выражением (4) или (6). Если далее вновь зарядить конденсатор до напряжения U_0 через донный электрод, вновь будет через резистор течь ток, определяемый выражением (4) или (6). 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 (4) или (6). 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 прошедшему заряду и контактной разности. В результате за цикл зарядки-разрядки термоэлектрический конденсатор охладится и часть поглощенного тепла (которое не выделилось в контакте приповерхностный заряд-металл) будет преобразовано в электрическую энергию и выделится на резисторе R (рис. 1).

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

$$W_{\text{source}} = \int_0^{\infty} (U_0 - U) i(t) dt = C \Delta U (\Delta U + \Delta U_k). \quad (6)$$

Энергия, выделившаяся на резисторе за период заряд-разряд

$$W_R = 2 \int_0^{\infty} i^2(t) R dt = C (\Delta U + \Delta U_k)^2. \quad (7)$$

Таким образом $\Delta W = W_R - W_{\text{source}} = C (\Delta U + \Delta U_k) \times \Delta U_k$, а

$$\frac{\Delta W}{W_{\text{source}}} = \frac{\Delta U_k}{\Delta U}. \quad (8)$$

Если положить $\Delta U = \Delta U_k$, то получается приращение энергии на резисторе равно энергии получаемой от источников питания.

Для кремния n -типа с удельным сопротивлением $1\text{--}4\ \Omega \cdot \text{cm}$ термоэдс может составлять $300\text{--}400\ \mu\text{V/K}$ [7], т.е. коэффициент Пельтье может быть равен $0.1\text{--}0.12\ \text{V}$. 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 $\Delta U_k = 0.1\ \text{V}$. При емкости конденсатора площадью $1 \times 1\ \text{mm}^2$ в $100\ \text{pF}$ $W_{\text{source}} = 10^{-10} \cdot 0.1 \cdot (0.1 + 0.1) = 2 \cdot 10^{-12}\ \text{J}$. Если теперь соединить 1000 таких конденсаторов параллельно и переключать их с частотой $f = 1\ \text{MHz}$ (при условии, что конденсатор за время в $1\ \mu\text{s}$ успеет разрядиться), то получаем, что мощность, потребляемая от источника, равна $W_{\text{source}} \cdot f = 2 \cdot 10^{-3}\ \text{W}$. Тогда приращение мощности на резисторе равно также $2\ \text{mW}$. Если в качестве диэлектрика использовать не двуокись кремния, а сегнетоэлектрические пленки, то можно увеличить емкость в 100 раз. Тогда приращение мощности может составить $0.2\ \text{W}$ с площади $1000\ \text{mm}^2$ (пластина $33 \times 33\ \text{mm}$). Максимальный ток через термоэлектрический конденсатор при сопротивлении $10\ \Omega$ равен $0.2\ \text{V}/10\ \Omega = 20\ \text{mA}$. Тогда при сопротивлении перехода донный электрод 2 — приповерхностный заряд (рис. 1) или перехода приповерхностный заряд—металлический электрод в $1\ \Omega$ в одной МДПМ-структуре (что можно сделать надлежащим подбором толщины подложки) получаем при параллельном соединении 1000 таких структур сопротивление переходов в $0.001\ \Omega$. Максимальное падение напряжения на этом переходе равно $20 \cdot 10^{-3}\ \text{A} \cdot 10^{-3}\ \Omega = 20 \cdot 10^{-6}\ \text{V}$ что много меньше ΔU_k , и потерями в полупроводнике можно пренебречь, т.е. почти все приращение мощности будет выделяться на внешнем резисторе R (и ключах). 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 $2\ \text{mW}$, для кремниевой пластины размером $33 \times 33\ \text{mm}$ и толщиной $0.35\ \text{mm}$, как показывают расчеты (при удельной теплоемкости кремния $c = 0.71\ \text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, плотности $\rho = 2500\ \text{kg}/\text{m}^3$ [8], объеме кремниевой пластины $V = 544.5 \cdot 10^{-9}\ \text{m}^3$), при мощности охлаждения в $Q = 2\ \text{mW}$ кремниевая пластина должна охладиться на $\Delta T = Q/(\rho VC) = 0.0021\ \text{K/s}$. Если положить, что пластина находится в теплообмене

с окружающей средой так, что количество поступающего на нее тепла равно количеству тепла, которое поглощается в контактах, температура пластины будет ниже температуры окружающей среды на очень малую величину, равную $0.0021\ \text{K}$.

Таким образом, можно получить устройство, которое охлаждается, причем поглощенное тепло преобразуется в электрическую энергию, которая выделяется на резисторе R_0 , т.е. происходит ненулевое преобразование тепловой энергии окружающей среды в электрическую энергию. Как показано выше, при $\Delta U = \Delta U_k$, на резисторе выделяется энергии вдвое больше, чем потребляется от источников напряжения. Поэтому выделившейся на резисторе энергии оказывается 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.

Как ясно из выше описанного, предлагаемый преобразователь преобразует тепло окружающей среды в электрическую энергию без предварительного создания разности температур.

Термоэлектрический конденсатор необходимо рассматривать как двухпараметрическую систему, поскольку имеется два параметра: α и α_1 (или Π и Π_1 или U_k и U_{k1}), для которой в момент переключения однозначно не определены как энтропия, так и интегрирующий делитель [9]. Поэтому к нему не применимо второе начало термодинамики как универсальный физический принцип [10] и снимаются не только известные ограничения на КПД преобразования тепла в работу, но и сама необходимость использования холодильника.

Кроме того, рабочий цикл в таких системах является квазистатическим и поэтому обладает нулевой мощностью, т.е. практического применения не имеет. Но если быть точным, то квазистатическому циклу соответствует квазиулеватая мощность. Для предлагаемого преобразователя энергия заряженного конденсатора при емкости в $1\ \mu\text{F}$ и напряжении в $0.1\ \text{V}$ равна $0.5 \cdot 10^{-8}\ \text{J}$. Если переключать раз в секунду, то мощность процесса равна $0.5 \cdot 10^{-8}\ \text{W}$, т.е. очень малое значение мощности. Для систем, основанных на газовых циклах, их частота может ограничиваться десятками-сотнями герц, в то время как для предлагаемого полупроводникового преобразователя частоты переключения могут достигать частоты в $1\ \text{MHz}$ и более, что существенно может поднять мощность процесса и сделать его пригодным для практического использования.

Источником энергии для предлагаемого преобразователя является тепловая энергия окружающей среды, которая поглощается в контакте донный электрод—подложка, за счет того что в полупроводнике „горячие“ электроны способны преодолеть потенциальный барьер, а „холодные“ электроны остаются в контакте и отбирают энергию у кристаллической решетки полупроводника, что приводит к охлаждению полупроводника вместе

контакта полупроводниковой подложки с донным электродом и тепло из окружающей среды устремляется в подложку. При контакте подложки с окружающей средой температура подложки стабилизируется, хотя остается меньше температуры окружающей среды. Как было показано выше, при выходной мощности преобразователя в 2 мВт преобразователь может охладиться при его теплоизоляции на 0.0021 deg/s. При мощности в 1 W скорость охлаждения будет 0.1 deg/s. Если преобразователь находится в хорошем тепловом контакте с окружающей средой, то его охлаждение будет незначительным (доли единицы deg) и распределение электронов по энергиям все время сохраняется. Это создает условия для накопления в контакте „холодных“ электронов, а значит и к охлаждению контакта и притока к нему тепла окружающей среды. Если преобразователь теплоизолировать, то он будет охлаждаться, и разброс скоростей электронов будет все меньше и меньше, что, в конце концов, приведет к невозможности скапливания „холодных“ электронов в контакте и, следовательно, к невозможности поглощения тепла из окружающей среды. Таким образом, движущей силой в предлагаемом преобразователе является распределение электронов по энергиям, в котором значительный разброс энергий электронов будет только при поддержании температуры полупроводника в определенных пределах, что достигается хорошим тепловым контактом преобразователя с окружающей средой.

3. Экспериментальная часть

МДПМ-структуры с конденсатором в настоящее время широко используются в полевых транзисторах и технология их изготовления хорошо отработана. Но полевые транзисторы не совсем подходят для использования в предлагаемых термоэлектрических преобразователях, так как они работают в режиме сильной инверсии, а для предлагаемых преобразователей необ-

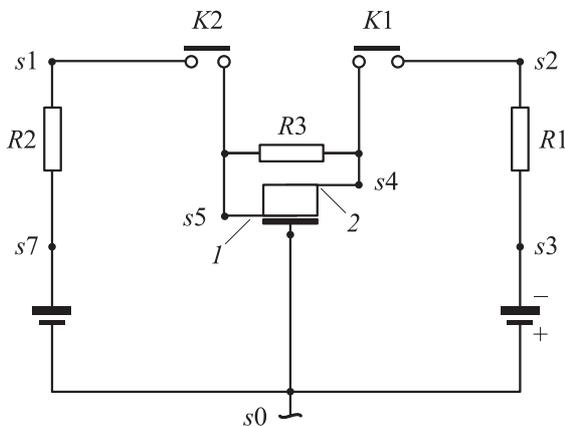


Рис. 3. Схема измерения полевых транзисторов. 1 — сток-исток (source-drain), 2 — донный электрод-подложка (bottom electrode-substrate).

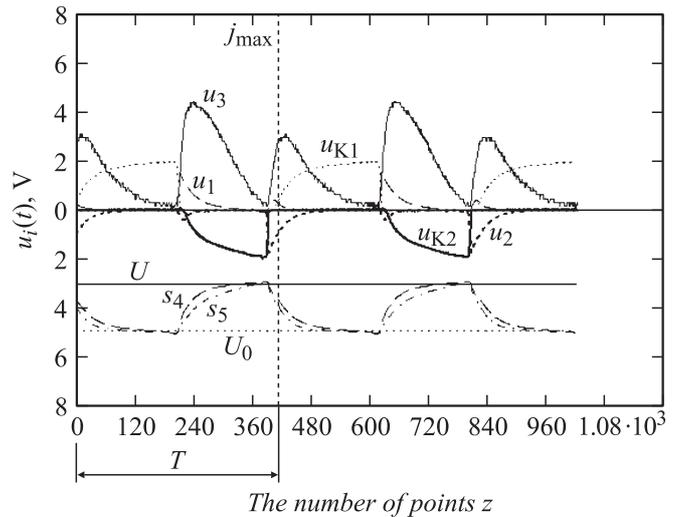


Рис. 4. Осциллограммы напряжений: u_{K1} — напряжение на ключе 1 (voltage on the key 1), u_{K2} — напряжение на ключе 2 (voltage on the key 2), U_0 , U — напряжения на источниках питания (voltage on the sources of power), u_1 — напряжение на резисторе R_1 (voltage on resistor R_1), u_2 — напряжение на резисторе R_2 (voltage on resistor R_2), u_3 — напряжение на резисторе R_3 (voltage on resistor R_3).

ходим режим насыщения. При работе полевых транзисторов в режиме насыщения между стоком (истоком) и проводящим каналом образуется запирающий слой. Не исправляет ситуацию и работа транзистора в режиме сильной инверсии, так как в этом случае запирающий слой образуется между подложкой и проводящим каналом. Были проведены эксперименты с полевыми транзисторами КП304А в режиме обогащения в схеме переключения, но при подключении дополнительного резистора (R_3) между стоком/истоком и подложкой (рис. 3). В качестве электронных ключей использовались полевые транзисторы 2N700, которые управлялись от генератора Г5-112 прямоугольными импульсами с частотой 12 kHz и амплитудой 10 V через импульсные трансформаторы, обеспечивающие поочередное открытие ключей. Так как емкость затвор-подложка для КП304А равна 10 pF, а емкость измерительного щупа равна 5 pF, подключенного к цифровому осциллографу В-421 с входным сопротивлением 1 MΩ и точностью измерения напряжения 1%, то для уменьшения влияния емкости щупа на измерения, измерения производились с 10 параллельно соединенными транзисторами. В этом случае емкость затвор-подложка становится равной 100 pF, что много больше емкости щупа. Мощности W_{Ri} на резисторах рассчитывались как средняя за период переключения от величины $u_i^2(t)/R_i$, т. е.

$$W_{Ri} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{u_i^2(t)}{R_i} dt,$$

где $u_i(t)$ — напряжение на резисторе R_i ($i = 1, 2, 3$). Напряжения $u_i(t)$ соответственно равны: $u_1(t) = s3 - s2$, $u_2(t) = s7 - s1$, $u_3(t) = s5 - s4$, где $s1, s2, s3, s4, s5, s7$ — осциллограммы напряжений в точках $s(i)$ относительно корпуса (рис. 4). Интегрирование производилось численно с помощью программы „Mathcad“. Входная мощность W_{in} рассчитывалась как среднее за период заряда конденсатора от произведения $U_0 \cdot u_1(t)/R_1 - U \cdot u_2(t)/R_2$, т.е. при $R_1 = R_2 = R$

$$W_{in} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{U_0 u_1(t) - U u_2(t)}{R} dt.$$

4. Результаты

При напряжении менее 0.5 V в схеме ток был равен нулю, так как емкость, образованная запирающим слоем, не разряжалась, так что режим (при $R_3 = \infty$) при котором $\Delta U = \Delta U_k$ осуществить невозможно. Измерения производились при напряжениях $U_0 = 5, 14$ V и $U = 3, 5$ V соответственно, $R_1 = R_2 = R_3 = 2$ kΩ. Кривые $s(i)$ усреднялись по 1000 измерениям, что исключало влияние случайных помех на результаты измерений. Мощности потерь на ключах рассчитывались как среднее за период переключения произведения падения напряжения на ключах $u_{k1}(t) = s2 - s4$, $u_{k2}(t) = s1 - s5$ на проходящие через них токи, определяемые как $i_1(t) = u_1(t)/R_1$, $i_2(t) = u_2(t)/R_2$, т.е.

$$W_K = W_{K1} + W_{K2} \\ = \frac{1}{T} \int_0^T \left[\frac{u_{K1}(t) i_{R1}(t)}{R_1} + \frac{u_{K2}(t) i_{R2}(t)}{R_2} \right] dt.$$

Разность абсолютных значений токов через резисторы R_1 и R_2 (эти токи имеют противоположные направления, поскольку ток через резистор R_1 — это ток заряда, а ток через резистор R_2 — это ток разряда) была равна $1.23 \cdot 10^{-3}$ μA, при токе через резистор R_1 равном 80.5 μA, т.е. отличие этих токов находится в пределах измеряемой погрешности и их можно считать одинаковыми. Это и понятно, так как средний ток через конденсатор в такой схеме должен быть равен нулю, поскольку ток заряда должен быть равен току разряда, исходя из закона сохранения заряда. Измерения показали, что мощность, выделяющаяся на резисторах и ключах, на 1–7% превышала потребляемую мощность, равную 12 mW при $U_0 - U = 2$ V. Мощность, необходимая на работу ключей, не учитывалась. Такая малая величина приращения мощности не позволяет практически использовать непосредственно полевые транзисторы в термоэлектрических преобразователях. Кроме того, при точности измерения в 1% нельзя однозначно сказать, что произошло превышение выделяемой мощности потребляемой от источников питания.

Заключение

Для практического использования необходимо использовать структуру и схему, показанную на рис. 1 ($R_3 = \infty$), работающую в режиме насыщения, не имеющей запирающих слоев и позволяющей работать при напряжениях $\Delta U \leq \Delta U_k$. Поэтому возникает необходимость в создании МДПМ-структур, работающих в режиме насыщения без запирающих слоев, чтобы тепловой энергии, поглощаемой из окружающей среды, хватало бы не только на работу переключающих схем, но и на работу тех устройств, для которых и предназначен предлагаемый термоэлектрический преобразователь.

Список литературы

- [1] Днепроцкий В.Г., Карапетян Г.Я., Лысенко М.В., Пустовалов Г.А. // Нано и микросистемная техника. 2003. № 9. С. 38–42.
- [2] Карапетян Г.Я., Катаев В.Ф. // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2006. № 3. С. 35–36.
- [3] Карапетян Г.Я., Катаев В.Ф., Крейс И.А. // Прикаспийский журнал: Управление и высокие технологии. 2009. № 4. С. 90–98.
- [4] Щенников В.В., Овсянников С.В., Деревсков А.Ю. // ФТТ. 2002. Т. 44. Вып. 10. С. 1762–1765.
- [5] Киреев П.С. Физика полупроводников. М.: Высшая школа, 1969. 479 с.
- [6] Агаханян Т.М. Основы транзисторной электроники. М.: Энергия, 1974. 256 с.
- [7] Анатыхук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. Справочник. Киев: Наукова думка, 1979. 763 с.
- [8] Сильбанс Л.С. Физика полупроводников. М.: Сов. радио, 1967. 451 с.
- [9] Скорняков Г.В. // ЖТФ. 1995. Т. 66. Вып. 1. С. 3–14.
- [10] Зильбергейт А.С., Скорняков Г.В. // ЖТФ. 1992. Т. 62. Вып. 2. С. 190–195.