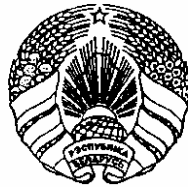


**ОПИСАНИЕ
ИЗОБРЕТЕНИЯ
К ПАТЕНТУ**
(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
СОБСТВЕННОСТИ

(19) **ВУ** (11) **7011**
(13) **С1**
(46) **2005.06.30**
(51)⁷ **Н 01L 35/28**

(54)

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ХОЛОДИЛЬНИК

(21) Номер заявки: а 20020285
(22) 2002.04.09
(43) 2003.12.30

(71) Заявители: Белорусский национальный технический университет; Сычик Василий Андреевич (ВУ)

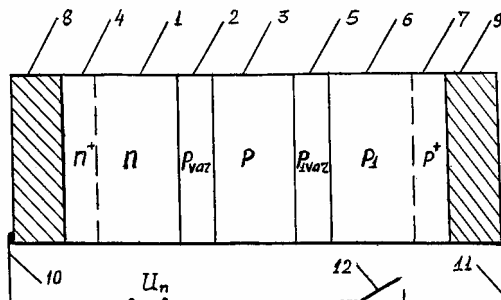
(72) Авторы: Сычик Василий Андреевич; Сычик Андрей Васильевич; Шумило Виктор Степанович; Лашицкий Эдуард Казимирович (ВУ)

(73) Патентообладатели: Белорусский национальный технический университет; Сычик Василий Андреевич (ВУ)

(56) US 5064476 А, 1991.
RU 2117362 С1, 1998.
RU 2110021 С1, 1998.
RU 2129745 С1, 1999.
EP 0592044 А2, 1993.
WO 94/28364, А1.
JP 63273466 А, 1988.

(57)

Полупроводниковый холодильник, включающий термопреобразователь, содержащий р- и n-полупроводниковые области, омические контакты, р-n-переход, внешние электрические выводы, **отличающийся** тем, что р-n-переход сформирован в виде анизотипного гетероперехода, включающего n-область из узкозонного полупроводника, варизонный r_{var} -слой и р-область из широкозонного полупроводника, причем n-область контактирует с сильнолегированной n^+ -областью, а р-область контактирует с варизонным r_{1var} -слоем, соединенным с r_1 -областью широкозонного полупроводника, запрещенная зона которого больше запрещенной зоны р-области, контактирующей с сильнолегированной p^+ -областью, при этом структура р- r_{1var} - r_1 выполнена в виде изотипного р-р-гетероперехода, а омические контакты размещены на сильнолегированных n^+ - и p^+ -областях, толщина n- и р-областей составляет (0,7...0,9) диффузионной длины пробега электронов, толщина r_1 -области составляет (2...5) диффузионной длины пробега электронов, толщина анизотипного гетероперехода и изотипного гетероперехода составляет (0,8-0,9) W_0 , где W_0 -суммарная толщина р-и n- областей, оба варизонных слоя, толщина которых составляет (0,3...0,8) диффузионной длины пробега электронов, выполнены так, что n- и р-области анизотипного гетероперехода и р- и r_1 -области изотипного гетероперехода проникают внутрь соответствующего варизонного слоя на глубину (0,1...0,2) суммарной толщины соответствующего гетероперехода.



Фиг. 1

ВУ 7011 С1 2005.06.30

ВУ 7011 С1 2005.06.30

Изобретение относится к полупроводниковым термопреобразователям, функционирующим на эффекте Пельтье, и может быть использовано в холодильных агрегатах бытовых и специальных холодильных аппаратов.

Известен полупроводниковый термоэлектрический холодильник [1], который содержит несколько термоэлектрических модулей, каждый из которых составлен из множества объединенных попарно термоэлектрических элементов. На одной стороне каждого модуля имеется рабочий канал, на другой стороне модуля размещен теплообменник. Такой преобразователь электрической энергии в тепловую обладает небольшой температурой охлаждения и сложной конструкцией.

Также известен термоэлектрический холодильник [2], который содержит термоэлектрические преобразователи термопарного типа с радиаторными пластинами, вентиляционный блок и источник питания. Этот преобразователь электрической энергии в тепловую также обладает сложной конструкцией и небольшой температурой охлаждения.

Прототипом предлагаемого изобретения является полупроводниковый холодильник [3], который содержит ленту с проводящей полоской, на которой формируют матрицу контактов для первой стороны термоэлектрического холодильника. Матрица контактов прикреплена к изолирующей пластине, представляющей плату термопреобразователя. Термоэлектрические элементы р-п типа проводимости, расположенные между контактами платы и выводами, включают р-п переход с примыкающими р- и п-полупроводниковыми областями и омическими контактами.

Недостатками прототипа являются:

а) в структуре устройства используется узкозонный р-п переход, например из германия, и высота его потенциального барьера незначительна (десятые доли эВ), поэтому такой полупроводниковый холодильник обладает небольшой температурой охлаждения, не выше $10\text{ }^{\circ}\text{C}$;

б) сложная конструкция полупроводникового холодильника, содержащая множество элементов, кроме полупроводникового р-п преобразователя;

в) невысокая стабильность работы полупроводникового холодильника из-за большого числа коммутирующих соединений.

Техническим результатом изобретения является повышение температуры охлаждения холодильного агрегата и стабильности работы.

Поставленная задача достигается тем, что в полупроводниковом холодильнике, включающем термопреобразователь, содержащий р- и п-полупроводниковые области, омические контакты, р-п-переход, внешние электрические выводы, р-п переход сформирован в виде анизотипного гетероперехода, включающего п-область из узкозонного полупроводника, варизонный p_{var} -слой и р-область из широкозонного полупроводника, причем п-область контактирует с сильнолегированной n^{+} -областью, а р-область контактирует с варизонным $p_{1\text{var}}$ -слоем, соединенным с p_1 -областью широкозонного полупроводника, запрещенная зона которого больше запрещенной зоны р-области, контактирующей с сильнолегированной p^{+} -областью, при этом структура р- $p_{1\text{var}}$ - p_1 выполнена в виде изотипного р-р-гетероперехода, а омические контакты размещены на сильнолегированных n^{+} - и p^{+} -областях, толщина п- и р-областей составляет $(0,7...0,9)$ диффузионной длины пробега электронов, толщина p_1 -области составляет $(2...5)$ диффузионной длины пробега электронов, толщина анизотипного гетероперехода и изотипного гетероперехода составляет $(0,8-0,9)W_0$, где W_0 - суммарная толщина р- и п-областей, оба варизонных слоя, толщина которых составляет $(0,3...0,8)$ диффузионной длины пробега электронов, выполнены так, что п- и р-области анизотипного гетероперехода и р- и p_1 -области изотипного гетероперехода проникают внутрь соответствующего варизонного слоя на глубину $(0,1...0,2)$ суммарной толщины соответствующего гетероперехода.

Температура охлаждения полупроводникового холодильника-прототипа не превышает $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, а температура охлаждения предлагаемого устройства на анизотипном и изотипном

ВУ 7011 С1 2005.06.30

гетеропереходах с использованием варизонных слоев типа nInAs-pGaAs-pAlAs достигает -30 °С, причем благодаря существенному упрощению конструкции холодильника более чем в два раза повышается стабильность его работы.

На фиг. 1 изображена конструкция полупроводникового холодильника, а на фиг. 2 - его зонная диаграмма.

Конструктивно полупроводниковый холодильник состоит из анизотипного гетероперехода, включающего n-область 1 из узкозонного полупроводника, варизонный p_{var} -слой 2 и p-область 3 из широкозонного полупроводника. n-Область 1 контактирует с сильнолегированным n^+ -слоем 4. P-область 3 из широкозонного полупроводника контактирует с варизонным p_{1var} -слоем 5, который соединен с p_1 -областью 6 широкозонного полупроводника, запрещенная зона которой E_{g3} больше запрещенной зоны E_{g2} p-области 3. Структура p-область 3 – p_{1var} -слой 3 - p_1 -область 6 представляет изотипный гетеропереход. P_1 -область 6 широкозонного полупроводника контактирует с сильнолегированным p^+ -слоем 7. На сильнолегированных n^+ - и p^+ -слоях 4 и 7 размещены металлические слои - омические контакты 8 и 9, которые жестко связаны с внешними выводами 10 и 11 и с помощью электронного коммутатора 12 подключаются к внешнему источнику питания U_n .

n-Область 1 полупроводникового холодильника изготавливается из узкозонного полупроводника, обладающего высокой подвижностью носителей, большим временем их жизни и возможностью методом легирования создавать в его объеме сильнолегированные слои, например из арсенида индия. Ширина n-области 1 определяется минимумом потерь электронов, инжектируемых источником питания U_n , подключаемым к полупроводниковому холодильнику коммутатором 12, и, как показали результаты эксперимента, составляет $(0,7...0,9)L_d$, где L_d - диффузионная длина пробега электронов в n- и p-областях. Сильнолегированный n^+ -слой 4 представляет часть n-области 1 и сформирован методом диффузии или ионной имплантации при введении высокой концентрации донорной примеси $N_d \cong 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Он обладает высокой проводимостью и обеспечивает омический контакт с металлическим слоем 8. На n-области 1 сформирован методом жидкофазной либо газофазной эпитаксии варизонный p_{var} -слой 2, представляющий твердый раствор интерметаллического соединений $A_{1-x}^m A_{2-x}^m B^n$. Параметр степени концентрации компонента в растворе X изменяется от нуля до единицы, причем со стороны n-области 1 он представляет материал этой области, например $A_1^m B^n$, а со стороны p-области 3 - это материал, идентичный материалу p-области 3, то есть соединения $A_2^m B_n$ p-области. Если материалом n-области 1 является узкозонный полупроводник InAs, ширина запрещенной зоны которого $E_{g1} = 0,36$ эВ, а материал p-области 3 является широкозонный полупроводник GaAs с $E_{g2} = 1,43$ эВ, то варизонный p_{var} -слой 2 реализуется из материала $In_x Ga_{1-x} As$, причем структура нижней границы варизонного слоя с параметром $X = 1$ представляет InAs, а структура верхней границы этого слоя представляет GaAs с параметром $X = 0$. Толщина варизонного p_{var} -слоя 2 определяется скоростью изменения его ширины запрещенной зоны (от E_{g1} до E_{g2}) при изменении X от 1 до 0 и диффузионной длиной электронов L_d . С учетом проникновения обедненных n- и p-областей анизотипного гетероперехода внутрь варизонного p_{var} -слоя 2 его толщина составляет $(0,3...0,8)L_d$.

На варизонном p_{var} -слое 4 сформирована методом жидкофазной или газофазной эпитаксии p-область 3 широкозонного полупроводника типа $A_2^m B_n$, например GaAs. Ширина ее соответствует ширине n-области 1 узкозонного полупроводника и составляет $(0,7...0,9)L_d$. Для получения изотипного гетероперехода с высоким коэффициентом передачи электронов на p-область 3 нанесен варизонный p_{1var} -слой 5 также методом жидкофазной или газофазной эпитаксии, который согласовывает p-область 3 и p_1 -область 6 по постоянным кристаллических решеток. Варизонный p_{1var} -слой 5 представляет твердый раствор интерметаллического соединения $A_{2-x}^m A_{3-x}^m B^n$. Параметр степени концентрации

ВУ 7011 С1 2005.06.30

компонента в p_{1var} -слое 5 изменяется от нуля до единицы, причем со стороны p -области 3 он представляет материал этой области $A_2^m B_n$, а со стороны p_1 -области 6 - это материал этой области, то есть соединение $A_3^m B_n$. Если материалом p -области 3 является широкозонный полупроводник GaAs с $E_{g2} = 1,43$ эВ, а материалом p_1 -области 6 является более широкозонный полупроводник AlAs с $E_{g3} = 2,15$ эВ, то варизонный p_{1var} -слой 5 реализуется из материала $Ga_x Al_x As$, причем структура нижней границы варизонного слоя с параметром $X = 1$ представляет GaAs, а структура верхней границы этого слоя представляет AlAs с параметром $X = 0$. Толщина варизонного p_{1var} -слоя 5 определяется также скоростью изменения его ширины запрещенной зоны (от E_{g2} до E_{g3}) при изменении X от 1 до 0 и диффузионной длиной электронов L_d в варизонном слое. С учетом проникновения обедненных p - и p_1 -областей изотипного гетероперехода внутрь варизонного P_{1var} -слоя 5 его толщина составляет $(0,3...0,8)L_d$.

На варизонном p_{1var} -слое 5 сформирована методом жидкофазной или газофазной эпитаксии p_1 -область 6 широкозонного полупроводника типа $A_3^m B_n$, например AlAs. Ширина p_1 -области 6 определяется полным поглощением в ней тепловой энергии решетки электронами, экстрагируемыми из n -области 1 в p_1 -область 6 через анизотипный гетеропереход $n-p_{var}-p$ типа и изотипный гетеропереход $p-p_{1var}-p_1$ типа в p_1 -область 6 и, как показали результаты эксперимента, составляет $(2...5)L_d$. Сильнолегированный p^+ -слой 7 представляет часть p_1 -области 6, который сформирован путем введения высокой концентрации акцепторной примеси $Na \cong 10^{20} \text{ см}^{-3}$, обладает малым сопротивлением и обеспечивает омический контакт с металлическим слоем 9.

Для контакта невырожденных полупроводников количество поглощаемого тепла в p_1 -области 6 от инжекции в нее электронов из n -области 1 зависит от соотношения концентрации электронов в этих областях (n_n/n_{p1}) с учетом того, что через анизотипный и изотипный гетеропереходы инжектированные из n -области 1 электроны практически проходят без потерь. Поэтому узкозонная n -область 1 легирована донорной примесью с концентрацией примеси $Nd \cong 10^{18}...10^{19} \text{ см}^{-3}$, а широкозонная p -область 3 и p_1 -область 6 легированы акцепторной примесью $Na \cong 10^{16}...10^{17} \text{ см}^{-3}$. Поскольку в рабочем режиме примесь узкозонного полупроводника, то есть n -области 1 полностью ионизирована, то концентрация электронов в n -области 1 $n_n \cong 10^{18}...10^{19} \text{ см}^{-3}$, а концентрация электронов в широкозонной полупроводниковой p_1 -области 6 будет меньше концентрации носителей для собственного полупроводника, причем $n_{p1} \cong 10^7...10^8 \text{ см}^{-3}$, то соотношение $n_n/n_{p1} \geq 10^{10}$. Количество поглощаемого инжектированными электронами тепла в p_1 -области 6 также зависит от разности энергий инжектированных из n -области 1 электронов и энергии электронов в p_1 -области 6, то есть $A = \frac{W_2}{W_1} \cong \frac{E_{g3}}{E_{g1}}$, где A - коэффициент, учитывающий соотношение энергий электронов в узкозонном W_1 и широкозонном W_2 полупроводниках; E_{g1} , E_{g3} - ширина запрещенной зоны узкозонного (n -области 1) и широкозонного (p_1 -области 6) полупроводников. Для структуры полупроводникового холодильника, включающей последовательно соединенные анизотипный $nInAs-pGaAs$ и изотипный $pGaAs-pAlAs$ гетеропереходы коэффициент $A = 2,15/0,36 = 6$.

Для обеспечения максимальной инжекции электронов из n -области 1 в p_1 -область полупроводникового холодильника, то есть исключения потерь электронов при их инжекции через анизотипный и изотипный гетеропереходы, ширина $n-p$ анизотипного гетероперехода и $p-p_1$ изотипного гетероперехода $d = (0,8-0,9)W_0$, где W_0 - суммарная толщина его p - и n -обедненных областей, выбрана из условия, чтобы обедненные области гетеропереходов проникали внутрь варизонного p_{var} -слоя 2 и варизонного p_{1var} -слоя 5, исключая появление локального потенциального барьера в валентной зоне и зоне проводимости в области $n-p$ анизотипного и $p-p_1$ изотипного гетеропереходов. Используя структуру $p-p_{1var}-p_1$ изотип-

ВУ 7011 С1 2005.06.30

ного гетероперехода существенно возрастает разность величин энергий электронов в областях n и p_1 , то есть возрастает коэффициент A и предельная величина температуры охлаждения. Для повышения эффективного отбора тепла из охлаждаемого объема полупроводниковый холодильник устанавливается на радиатор.

При подаче питающего напряжения прямой полярности U_n через электронный коммутатор 12 на внешние выводы 10 и 11 полупроводникового холодильника n -область 1 начинает инжектировать через структуру n - p анизотипный гетеропереход и p - p_1 изотипный гетеропереход электроны в p_1 -область 6. Плотность тока через гетеропереходную структуру определяется из выражения

$$I \cong I_s [\exp(\frac{eU_n}{nkT}) - 1] \quad (1)$$

и экспоненциально возрастает с повышением питающего напряжения. В (1) I_s - ток насыщения; e , k , T - соответственно заряда электрона, постоянная Больцмана, температура; $n = 0,5...1$ - поправочный коэффициент. Инжектирующие в p_1 -область 6 электроны на расстоянии диффузионной длины L_d поглощают из кристаллической решетки этой области энергию и повышают ее до величины энергии электронов p_1 -области 6. В результате отбора энергии инжектированными электронами от кристаллической решетки p_1 -области 6 ее температура и соответственно температура полупроводникового холодильника понижается. Величина поглощаемой тепловой энергии определяется зависимостью

$$Q_{\Pi} = \Pi It, \quad (2)$$

где Π - коэффициент Пельтье; $I = J \cdot S$ - ток, протекающий через гетеропереходную структуру сечением S ; t - время протекания тока. Коэффициент Пельтье для n - p гетероперехода из невырожденных полупроводников определяется из зависимости

$$\Pi = A \frac{kT}{e} \ln \frac{n_n}{n_p}, \quad (3)$$

где A - коэффициент, учитывающий соотношение энергии электронов в p - и n -областях; n_n , n_p - концентрация собственных электронов в n - и p -областях.

Повышение диапазона рабочих отрицательных температур в предложенном полупроводниковом холодильнике по сравнению с аналогами, где используется p - n гомопереход обусловлено существенным увеличением коэффициента Пельтье. Для предлагаемой структуры n - p анизотипный гетеропереход - p - p_1 изотипный гетеропереход коэффициент $A = 6$, а соотношение $\ln(n_n/n_p) \geq 6$. Поэтому с учетом (2) поглощаемая тепловая энергия предлагаемым полупроводниковым холодильником по сравнению с прототипом при одинаковых значениях I и t возрастает в $n = 6 \cdot \frac{10}{6} \approx 10$ раз.

Повышение стабильности работы предложенного устройства в сравнении с аналогами заключается в существенном упрощении его конструкции и использовании в качестве теплопоглощающей области широкозонного полупроводника.

Создано экспериментальное устройство - полупроводниковый холодильник, выполненное структурой $n\text{InAs}-p_{\text{var}}\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_x-p\text{GaAs}$ анизотипный гетеропереход - $p\text{GaAs}-p_{1\text{var}}\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}-p\text{AlAs}$ изотипный гетеропереход с омическими контактами и внешними выводами. n^+ -Слой толщиной 0,3 мкм выполнен на основе InAs , легированного селеном до концентрации $N_d \cong 3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, n -область представляет слой арсенида индия толщиной 0,6 мкм, легированный селеном с концентрацией $N_d \cong 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Варизонный p_{var} -слой представляет соединение $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ толщиной 0,35 мкм, а p -область выполнена на основе GaAs , легированного акцепторной примесью - кадмием с концентрацией $N_a \cong 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Варизонный $p_{1\text{var}}$ -слой представляет соединение $\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ толщиной 0,4 мкм, p_1 -область сформирована на базе AlAs , легированного кадмием с концентрацией $N_a \cong 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, ее толщина выбрана с учетом полного поглощения инжектированными из n -области электронами энергии ее решетки и составляет 3,5 мкм. p^+ -слой сформирован в AlAs путем ле-

ВУ 7011 С1 2005.06.30

гирования кадмием с концентрацией $N_a \cong 5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, а его толщина составляет 0,3 мкм. Внешние выводы сформированы к n^+ -слою структурой Se-Al-Ni общей толщиной 1,3 мкм а к p^+ -слою - структурой Cd-Al-Ni толщиной 1,5 мкм.

Экспериментальный полупроводниковый холодильник при плотности прямого тока 1 А/см^2 позволяет получать предельную температуру охлаждения $-32 \text{ }^\circ\text{C}$, расчетная надежность безотказной работы устройства составляет $\sim 10^5$ ч. Для прототипа эти параметры соответственно составляют $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ и $2 \cdot 10^4$ ч.

На базе предлагаемого устройства при использовании матрицы элементов может быть создан термохолодильник требуемых объемов охлаждения и температур.

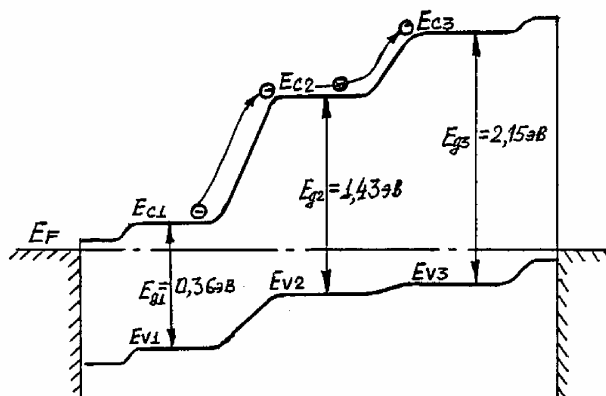
Технико-экономические преимущества предлагаемого полупроводникового холодильника в сравнении с базовым устройством-прототипом и другими аналогами:

Более чем в 2,5 раза возрастает предельная температура охлаждения.

Более чем в 5 раз повышается стабильность работы полупроводникового холодильника.

Источники информации:

1. Патент США 4134803, МПК⁴ Н 01L 35/28, 1987.
2. А.с. СССР 1791874, МПК⁵ Н 01L 35/28, 1993.
3. Патент США 5064476, МПК⁵ Н 01L 35/34, 1993.



Фиг. 2