

$$\Delta n = \beta \eta I_v \tau_n, \Delta p = \beta \eta I_v \tau_p, \quad (1)$$

где β – квантовый выход, η – коэффициент поглощения света в р-слое 3 и i-слое 2, I_v – интенсивность света, τ_n , τ_p – время жизни избыточных электронов и дырок. Фотогенерированные электроны и дырки разделяются электрическим полем первого р-i перехода и второго i-n⁺ перехода, причем дырки движутся к верхнему омическому контакту – проводящему слою 5, а электроны – к p⁺-слою 1, выполняющему функции нижнего омического контакта СПЭЭ.

Вследствие разделения зарядов на последовательно соединенных р⁺-i и i-переходах возникает суммарное фото ЭДС U_d , максимальное значение которой при холостом ходе:

$$U_{d_{\max}} = \ln(I_\phi / I_s) kT / e, \quad (2)$$

и течет ток через i-n⁺ переход, обусловленный оптически генерированными электронами и дырками:

$$I_a = I_s \left[\exp \frac{eU_d}{kT} - 1 \right] - I_\phi. \quad (3)$$

Здесь I_ϕ – максимальная плотность фототока, соответствующая данной освещенности; I_s – ток насыщения р-n перехода.

В общем случае при заданной интенсивности света фототок, обусловленный избыточными носителями заряда с концентрациями Δn и Δp , определяется выражением:

$$I_\phi = e(\Delta n \mu_n + \Delta p \mu_p) U_d. \quad (4)$$

Величина фото ЭДС ПСЭЭ определяется суммарной высотой потенциальных барьеров р-i и второго i-n⁺ переходов и составляет величину (0,8÷1,0) В для кремния.

Создано экспериментальное устройство – преобразователь солнечной энергии в электрическую размер 48х48 мм на основе широкозонного полупроводника – кремния, который может использоваться как элемент-модуль солнечной электростанции. Устройство выполнено структурой р-i Si-резкий переход i-n⁺ Si-резкий переход с верхним омическим контактом из проводящего светопрозрачного слоя 5, изготовленного из окиси олова-индия. р⁺-слой 4 выполнен толщиной 0,1 микрон из кремния, легированном бором до концентрации $N_A \approx 10^{21} \text{ см}^{-3}$ р⁺-слой 3, контактирующий с р⁺-слоем 4, сформирован путем легирования бором с концентрацией $N_A \approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Его толщина составляет 0,3 микрона, i-слой 1 представляет кремний собственной

проводимости, его толщина выбрана из условия максимального поглощения, проникающего в слой солнечного излучения, и составляет толщину 1,2 микрона, р-i переход выполнен резким с суммарной шириной обедненных областей 0,5 микрона, i-n переход также выполнен резким с суммарной толщиной 0,3 микрона. Сильнолегированный p⁺-слой 1 выполнен из кремния, он легирован донорной примесью до концентрации $N_D \approx 10^{21} \text{ см}^{-3}$, его толщина соответствует толщине подложки и равна 0,2 мм. На верхний омический контакт – проводящий слой 5 нанесен внешний электрический вывод 6 ПСЭЭ, представляющий собой алюминия + никель толщиной 2 микрона и шириной 2 мм по периметру края проводящего слоя 5. Конструкция фоточувствительной структуры ПСЭЭ размещена на алюминиевом основании 7 размером 48 × 48 мм, толщиной 1 мм и соединена с ним токопроводящим клеем.

Экспериментальный полупроводниковый преобразователь солнечной энергии размером полезной площади 46х46 мм при интенсивности солнечного излучения $P_\Sigma = 65 \text{ мВт/см}^2$ позволяет получать рабочий ток I_s 1,2 А, рабочее напряжение 0,9 В, полезную выходную мощность $P_{\text{вых}} \approx 1,2 \text{ Вт}$ ($> 480 \text{ Вт/м}^2$).

Расчетная надежность безотказной работы ПСЭЭ составляет 10^5 часов. Для аналогов аналогичных размеров эти электрические параметры соответственно составляют: $I \approx 0,21 \text{ А}$, $P_{\text{вых}} = 0,15 \text{ Вт}$.

На базе предлагаемого ПСЭЭ при использовании матрицы элементов может быть создана солнечная батарея электрической энергии больших мощностей, используемая как автономный источник электроэнергии в стационарных, подвижных и космических объектах.

Литература

1. Пат. 02122259 Рос. Федерация, МПК H01L 31/18. Способ изготовления фотоэлектрического преобразователя / А. В. Иванов, Б. П. Сидоров. – № 02122259; заявл. 15.03.2002; опубл. 10.08.2003, Бюл. № 22.
2. Пат. 4191593 США, МПК H01L 31/06. Полупроводниковый фотоэлектрический прибор / D. E. Carlson, C. R. Wronski. – № 05/683,819; заявл. 05.05.1976; опубл. 04.03.1980.
3. Пат. 9339 Беларусь, МПК H01L 31/06. Фотоэлектрический преобразователь / В. А. Коваленко, П. С. Никитин. – № a20010010; заявл. 02.01.2001; опубл. 30.08.2002, Бюл. № 4.

УДК 681.325

СИНТЕЗ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ Сычик В. А., Уласюк Н. Н.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Способ изготовления полупроводникового преобразователя солнечной энергии включает формирование на металлическом основании с внешним выводом слой диэлектрика, делящий основание на первую и вторую область, затем последовательно формируют из широкозонного полупроводника p⁺-слой на первой области основания, p⁺-слой на второй области основания, эпитаксиальный слой р-слой на n-слое, эпитаксиальный n-слой

на эпитаксиальном р-слое, формируют варизонный эпитаксиальный р-слой на эпитаксиальном р-слое и варизонный эпитаксиальный п-слой на эпитаксиальном п-слое, затем последовательно формируют из более широкозонного полупроводника эпитаксиальный п-слой на варизонном п-слое, эпитаксиальный р-слой на варизонном р-слое, наносят на полученную фоточувствительную структуру просветляющий слой и омические контакты.

Ключевые слова: полупроводниковый преобразователь, солнечная энергия, металлическое основание, диэлектрический слой, фоточувствительная структура, широкозонный полупроводник, эпитаксиальный слой, варизонный слой.

SYNTHESIS OF A SEMICONDUCTOR OPTICAL RADIATION CONVERTER

Sychyk V. A., Ulasiuk M. M.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. A method for manufacturing a semiconductor solar energy converter includes forming a dielectric layer on a metal base with an external terminal, dividing the base into a first and a second region, then sequentially forming an n⁺ layer on the first region of the base from a wide-band semiconductor, a p⁺ layer on the second region of the base, an epitaxial p-layer on the n-layer, an epitaxial n-layer on the epitaxial p-layer, forming a graded-gap epitaxial p-layer on the epitaxial p-layer and a graded-gap epitaxial n-layer on the epitaxial n-layer, then sequentially forming an epitaxial n-layer on a graded-gap n-layer from a wider-band semiconductor, an epitaxial p-layer on a graded-gap p-layer, applying an antireflection layer and ohmic contacts to the resulting photosensitive structure.

Keywords: semiconductor converter, solar energy, metal base, dielectric layer, photosensitive structure, wide-bandgap semiconductor, epitaxial layer, graded-gap layer.

Адрес для переписки: Сычик В. А. 220095 г. Минск, пр-т Рокоссовского, 49-18

e-mail: sychik@bntu.by

Способ изготовления полупроводникового преобразователя солнечной энергии, в котором на металлическом основании с внешним выводом формируют слой диэлектрика, делящий основание на первую и вторую области для формирования первой и второй областей фоточувствительной структуры соответственно, последовательно формируют из одного и того же широкозонного полупроводника р⁺-слой на первой области основания, р⁺-слой на второй области основания, эпитаксиальный п-слой на р⁺-слое, эпитаксиальный р-слой на р⁺-слое, эпитаксиальный р-слой на эпитаксиальном п-слое, эпитаксиальный п-слой на эпитаксиальном р-слое, формируют варизонный эпитаксиальный р-слой на эпитаксиальном р-слое и варизонный эпитаксиальный п-слой на эпитаксиальном п-слое. Наносят на р- и п-варизонные слои через соответствующие маски соответственно слой р-типа более широкозонного полупроводника (AlAs), легированный акцепторной примесью (Cd) с концентрацией $N_A = (1...5)10^{16} \text{ см}^{-3}$, и слой п-типа более широкозонного полупроводника (AlAs), легированного донорной примесью с $N_D = (1...5)10^{16} \text{ см}^{-3}$. Температура нагрева основания $T = 300...400^\circ\text{C}$, а толщина этих слоев составляет 0,4 – 0,6 мкм.

На р- и п-слоях более широкозонного полупроводника формируют сильнолегированные слои более широкозонного полупроводника (AlAs): р⁺-типа слой, легированный акцепторной примесью с концентрацией $N_A = (10^{19}...10^{20}) \text{ см}^{-3}$, и п⁺-типа слой, легированный донорной примесью с $N_D = (10^{19}...10^{20}) \text{ см}^{-3}$. Средняя скорость формирования р⁺- и п⁺-слоев более широкозонного полупроводника составляет 20–30 Å/с, а температура нагрева основания $T = 300...400^\circ\text{C}$.

На р⁺- и п⁺-слои более широкозонного полупроводника заданных размеров формируют просветляющий слой SiO₂ толщиной 0,05...0,15 мкм. Температура нагрева основания $T = 350...400^\circ\text{C}$.

Наносят на свободные от просветляющего слоя участки р⁺- и п⁺-слоев более широкозонного полупроводника электронно-лучевым напылением омические контакты путем последовательного нанесения на р⁺-слой структуры Cd-Al-Ni суммарной толщиной 1,5...2,0 мкм и на п⁺-слой структуры Te-Al-Ni общей толщиной 1,5...2,0 мкм. Завершающей операцией способа изготовления преобразователя солнечной энергии является термоотжиг сформированной структуры в инертной среде в течение 10...15 мин при температуре 300...450 °С для создания надежных омических контактов к р⁺- и п⁺-слоям широкозонного полупроводника (GaAs) и полупроводника (AlAs).

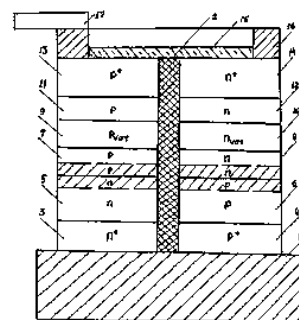


Рисунок 1 – Структура синтезируемого преобразователя солнечной энергии

Формирование полупроводниковых фоточувствительных приборов с потенциальным барьером относится к технологии изготовления преобразователей солнечной энергии.

Известен способ изготовления преобразователя солнечной энергии [1], включающий операции образования на поверхности полупроводниковой подложки структуры параллельно расположенных канавок путем механического удаления или травления, нанесения на всю структурированную поверхность пассивирующего слоя и срезания возвышенностей гребней на глубину пассивирующего слоя.

Такой способ изготовления солнечного элемента не позволяет создавать преобразователь солнечной энергии на основе полупроводниковых многослойных структур.

Используется также способ изготовления преобразователя солнечной энергии [2], с помощью которого полупроводниковый р-п-слой изготавливают путем измельчения полупроводникового материала в порошок, нагрева порошка и спекания до образования полупроводникового слоя. Этот способ изготовления преобразователя солнечной энергии сложен в реализации, трудоемок, энергозатратен. Он также не позволяет создавать преобразователь солнечной энергии на основе полупроводниковых многослойных структур.

Нами создана методика синтеза полупроводникового преобразователя оптического излучения, который обладает высокими коэффициентами преобразования оптической энергии в электрическую и выходной электрической мощностью.

Технология синтеза полупроводникового преобразователя солнечной энергии в электрическую реализуется по схеме, представленной на рисунке 1.

На середину заданного участка металлического основания с химически чистой поверхностью, являющегося нижним электродом преобразователя солнечной энергии, наносят методом ионно-плазменного распыления через маску узкий слой диэлектрика, например SiO_2 . Температура нагрева металлического основания составляет $300...400^\circ\text{C}$, а средняя скорость формирования диэлектрика $V = 30...40$ А/с. Молекулярно-лучевой эпитаксией наносят с помощью маски на левую отделенную слоем диэлектрика область основания сильнолегированный донорной примесью монокристаллический слой широкозонного полупроводника p^+ -типа проводимости, например GaAs, легированный Te с концентрацией $(1...5)10^{19} \text{ см}^{-3}$. Температура нагрева основания $T = 300...400^\circ\text{C}$.

Молекулярно-лучевой эпитаксией масочным методом наносят на правую отделенную слоем диэлектрика область основания сильнолегированной акцепторной примесью монокристаллический слой широкозонного полупроводника p^+ -типа проводимости, например GaAs, легированный Cd с концентрацией $(1...5)10^{19} \text{ см}^{-3}$. Средняя скорость наращивания p^+ -GaAs составляет $20...30$ А/с, а температура нагрева основания $T = 300...400^\circ\text{C}$.

На сформированные p^+ -слой и p^+ -слой широкозонного полупроводника соответственно наносят через соответствующие маски эпитаксиальный n -слой широкозонного полупроводника (GaAs), легированного донорной примесью (Te) с концентрацией $N_D = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, и p -слой того же полупроводника (GaAs), легированного акцепторной примесью (Cd) с концентрацией $N_A = (1...5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Температура нагрева основания $T = 300...400^\circ\text{C}$.

На n -слой и p -слой левой и правой областей фоточувствительной структуры наносят слои обратной проводимости из того же широкозонного полупроводника (GaAs), то есть слои p - и n -типа проводимости, легированные акцепторной примесью (Cd) и донорной примесью (Te) с концентрацией $N_{D,A} = (1...5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Температура нагрева основания $T = 300...400^\circ\text{C}$. В результате формируются два p - n -перехода фоточувствительной структуры, ширина обедненной области которых составляет $W_0 = 0,65$ мкм.

Методом молекулярно-лучевой эпитаксии через соответствующие маски формируют на p - и p -слоях широкозонного полупроводника варизонные слои более широкозонного полупроводника (AlAs) того же типа проводимости $\text{Am}_1\text{XAm}_{2(1-X)}\text{B}_n$, изменяя параметр x от 1 до 0 в варизонных слоях со стороны широкозонного полупроводника. Варизонные слои p - и n -типа проводимости наращивают с одновременным легированием акцепторной примесью (Cd) p -слоя с концентрацией $N_A = (1...5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, и донорной примесью n -слоя (Te) с концентрацией $N_D = (1...5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Температура нагрева основания $T = 300...400^\circ\text{C}$.

Наносят на p - и n -варизонные слои через соответствующие маски соответственно слой p -типа более широкозонного полупроводника (AlAs), легированный акцепторной примесью (Cd) с концентрацией $N_A = (1...5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и слой n -типа более широкозонного полупроводника (AlAs), легированного донорной примесью с $N_D = (1...5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Температура нагрева основания $T = 300...400^\circ\text{C}$, а толщина этих слоев составляет $0,4...0,6$ мкм.

На p - и p -слоях более широкозонного полупроводника формируют сильнолегированные слои более широкозонного полупроводника (AlAs): p^+ -типа слой, легированный акцепторной примесью Cd с концентрацией $N_A = (10^{19}...10^{20}) \text{ см}^{-3}$, и p^+ -типа слой, легированный донорной примесью $N_D = (10^{19}...10^{20}) \text{ см}^{-3}$. Средняя скорость формирования p^+ - и p^+ -слоев более широкозонного полупроводника составляет $20...30$ А/с, а температура нагрева основания $T = 300...400^\circ\text{C}$.

На p^+ - и p^+ -слои более широкозонного полупроводника заданных размеров просветляющий слой SiO_2 толщиной $0,05...0,15$ мкм. Температура нагрева основания $T = 350...400^\circ\text{C}$.

Наносят на свободные от просветляющего слоя участки p^+ - и p^+ -слоев более широкозонного полупроводника электронно-лучевым напылением омических контактов путем последовательного нанесения на p -слой структуры $Cd-Al-Ni$ суммарной толщиной 1,5...2,0 мкм и на p^+ -слой структуры $Te-Al-Ni$ общей толщиной 1,5...2,0 мкм.

Завершающей операцией способа изготовления преобразователя солнечной энергии является термоотжиг сформированной структуры в инертной среде в течение 10... 15 мин при температуре 300...450 °С для создания надежных омических контактов к p^+ - и p^+ -слоям широкозонного полупроводника (GaAs) и полупроводника (AlAs).

Изготовленный предложенным способом полупроводниковый преобразователь солнечной энергии с фоточувствительной структурой на двух последовательно соединенных n - p - и p - p -структурах типа $nGaAs-pGaAs-pGa_xAl_{(1-x)}As-pAlAs$ и $pGaAs-nGaAs-nGa_xAl_{(1-x)}As-nAlAs$ размером рабочей поверхности первой и второй областей фоточувствительной структуры 5×10 мм

каждая позволяет получать при интенсивности солнечного излучения с энергией $P_v = 65$ мВт/см выходную электрическую мощность $P_{ат} = 40\text{--}50$ мВт/см², максимальное выходное напряжение $U_{ам} = 2,6$ В и максимальный выходной ток $I_{ам} < 20$ мА/см².

Технико-экономические преимущества полупроводникового преобразователя солнечной энергии, полученного предлагаемым способом, в сравнении известными способами-аналогами:

- более чем в 3 раз возрастает выходная мощность;
- более чем в 2 раза возрастает фотоЭДС.

Литература

1. Пат. 20122261 Рос. Федерация, МПК H01L 31/18. Способ изготовления фотоэлектрического преобразователя / А. В. Иванов, Б. П. Сидоров. – № 20122259; опубл. 10.08.2021, Бюл. № 22.
2. Пат. 02148876 Рос. Федерация, МПК H01L 31/18. Фотоэлектрический модуль и способ его изготовления / В. К. Петров, С. М. Козлов. – № 02148876; опубл. 27.04.2004, Бюл. № 12.

УДК 681.325

ФОРМИРОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО СОЛНЕЧНОГО ХОЛОДИЛЬНИКА Сычик В. А., Уласюк Н. Н.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Способ изготовления термоэлектрического солнечного холодильника включает формирование термоэлектрического элемента, в котором на поверхность монокристаллической подложки из-за широкозонного полупроводника наносится первый p^+ -слой, который размещают на металлическом основании, на противоположной поверхности подложки формируют n -слой, на который последовательно наращивают эпитаксиальный i -слой и второй p^+ -слой, образца $p^+-i-n-p^+$ структуру из широкозонного полупроводника и наносит на второй p^+ -слой электропроводящий просветляющий оптически прозрачный слой.

Ключевые слова: термоэлектрический холодильник, монокристаллическая подложка, широкозонный полупроводник, металлическое основание, эпитаксиальный слой, омический контакт, просветляющий слой.

FORMATION OF A SEMICONDUCTOR SOLAR REFRIGERATOR Sychyk V. A., Ulasiuk M. M.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. The method for manufacturing a thermoelectric solar refrigerator includes forming a thermoelectric element in which a first p^+ layer is applied to the surface of a single-crystal substrate from a wide-bandgap semiconductor, which is placed on a metal base, an n -layer is formed on the opposite surface of the substrate, onto which an epitaxial i -layer and a second p^+ layer are successively grown, of a $p^+-i-n-p^+$ structure from a wide-bandgap semiconductor, and an electrically conductive, antireflective, optically transparent layer is applied to the second p^+ layer.

Keywords: thermoelectric refrigerator, single-crystal substrate, wide-bandgap semiconductor, metal base, epitaxial layer, ohmic contact, antireflection layer.

Адрес для переписки: Сычик В. А. 220095 г. Минск, пр-т Рокоссовского, 49-18
e-mail: bntu@bntu.by

Термоэлектрические холодильники – это новые типы полупроводниковых устройств, функционирующих на эффекте Пельтье и осуществляющих преобразование солнечной лучистой энергии в минусовые температуры на выходе.

Существует способ создания термоэлектрического солнечного холодильника [1], включающий операцию нанесения на подложку из анизотропного материала элементов – полупроводников n -типа и p -типа проводимости, на которых

формируют омические контакты. Такой способ изготовления термоэлектрического холодильника не позволяет создавать полупроводниковый солнечный холодильник на основе p - n переходов с высокой температурой охлаждения.

Также известный способ изготовления полупроводникового термоэлектрического холодильника [2], который включает операции нанесения на ленту из проводящей плоской матрицы омиче-