

МНОГОПЕРЕХОДНЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ НА ОСНОВЕ GaInN / GaN / GaInP / GaAs / Si / InGaAsP

А.К. Есман, Г.Л. Зыков, В.А. Потачиц

Белорусский национальный технический университет, Минск

MULTIJUNCTION SOLAR CELLS BASED ON GaInN / GaN / GaInP / GaAs / Si / InGaAsP

A.K. Esman, G.L. Zykov, V.A. Potachits

Belarusian National Technical University, Minsk

Аннотация. Выполнена оценка предельной эффективности многопереходных солнечных элементов с помощью термодинамического подхода к расчету эффективности. Согласно проведенным исследованиям, эффективность однопереходных солнечных элементов для исследуемых материалов не превышает 50%. Увеличение числа $p-n$ переходов от одного до шести приводит к повышению эффективности преобразования солнечного излучения от ~18,2% до ~62,5% (при понижающем коэффициенте $d=0,8$) и от ~20,2% до ~55,5% (при понижающем коэффициенте $d=0,7 \dots 0,89$). Показано, что наиболее оптимальны по эффективности солнечные элементы с шестью $p-n$ переходами.

Ключевые слова: аналитическая модель, распределение Планка, термодинамический подход, солнечный спектр, понижающий коэффициент, ширина запрещенной зоны, $p-n$ переход, предельная эффективность.

Для цитирования: Есман, А.К. Многопереходные солнечные элементы на основе GaInN / GaN / GaInP / GaAs / Si / InGaAsP / А.К. Есман, Г.Л. Зыков, В.А. Потачиц // Проблемы физики, математики и техники. – 2022. – № 3 (52). – С. 18–21. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2022_3_52_18. – EDN: BLXQGP

Abstract. The limited efficiency of the multijunction solar cells using a thermodynamic approach to calculating the efficiency has been estimated. According to the performed studies, the efficiency of single-junction solar cells for the studied materials does not exceed 50%. An increase from one to six in the number of $p-n$ junctions leads to an increase in the efficiency of solar radiation conversion from ~18,2% to ~62,5% (when derating factor is equal to 0,8) and from ~20,2% to ~55,5% (when derating factor is equal to $d=0,7 \dots 0,89$). It is shown that the solar cells with six $p-n$ junctions are the most optimal in terms of efficiency.

Keywords: analytical model, Planck distribution, thermodynamic approach, solar spectrum, derating factor, bandgap, $p-n$ junction, limited efficiency.

For citation: Esman, A.K. Multijunction solar cells based on GaInN / GaN / GaInP / GaAs / Si / InGaAsP / A.K. Esman, G.L. Zykov, V.A. Potachits // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2022. – № 3 (52). – P. 18–21. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2022_3_52_18 (in Russian). – EDN: BLXQGP

Введение

Солнце является единственным основным неиссякаемым источником энергии и жизни на Земле. Его энергия является источником энергии ветра, воды, тепла морей, биомассы, а также причиной образования на протяжении тысячелетий торфа, бурого и каменного угля, нефти и природного газа, однако эта опосредованная энергия и накопленная в течение тысяч и миллионов лет.

Солнце в масштабах существования человеческой цивилизации является неисчерпаемым источником энергии. Поскольку источником энергии в самом Солнце является термоядерный синтез, при котором атомы водорода, соединяясь друг с другом, образуют гелий, второй элемент таблицы Менделеева. При этом выделяется гигантское количество энергии, которая распространяется в виде радиации и доходит до Земли. Здесь и происходит ее преобразование в другие

виды энергии. Альтернативная энергетика как раз и использует преобразованную солнечную энергию.

Основная задача солнечной энергетики – это решение проблемы по накоплению энергии, соизмеримой с существующими запасами углеводородного топлива.

Постоянный процесс инноваций электрификации необратимо ведет к повсеместному повышению расхода энергии. Существенный вклад в удовлетворение мирового спроса на электроэнергию придется на альтернативные источники. К альтернативным источникам энергии относят нетрадиционные источники энергии: солнечную, ветровую, геотермальную энергетику и так далее. Их объединяет то, что на сегодняшний день все они используются гораздо реже, чем источники энергии на ископаемом топливе, но при этом обладают большим потенциалом для развития.

В настоящее время ведется активный поиск альтернативных материалов [1], которые смогли бы быть достаточно дешёвыми, технологичными и давали бы возможность получить коэффициент полезного действия более 30%. Одним из возможных кандидатов может быть CuInGaSe₂ / CdS [2], [3] из-за высокого коэффициента поглощения CuInGaSe₂, долговременной стабильности работы и более низкой стоимости. Другими потенциальными кандидатами являются шести-переходные солнечные элементы GaInN / GaN / GaInP / GaAs / Si / InGaAsP, возможность применения которых была обоснована в работах [4], [5]. Оценка предельной эффективности вышеуказанных элементов будет выполнена в данной работе.

Простой подход к вычислению оптимальных запрещенных зон многoperеходных солнечных элементов состоит в использовании гипотезы предельной эффективности [6], [7]: каждый фотон с энергией, большей чем энергия запрещенной зоны E_g , производит один электронный заряд.

Авторы [6] исследовали параметры солнечного элемента с одним $p-n$ переходом для излучения черного тела при температуре 6000 К. Они вычислили предельную эффективность для $E_g=1,1$ эВ (~ 44%). Термодинамический подход к расчету эффективности [8], [9] показал, что использование многoperеходных солнечных элементов позволяет повысить эффективность преобразования солнечного спектра. Однако использование большего количества элементов лишь незначительно повышает предельную эффективность и в большинстве случаев оказывается затратным.

В данной работе выполнена оценка предельной эффективности многoperеходных солнечных элементов вплоть до шести запрещенных зон с помощью термодинамического подхода к расчету эффективности.

1 Аналитическая модель

Мы считаем, что солнечные элементы в многозонной структуре объединены поверхностями друг с другом. Предположим, что излучение, поступающее в i -ый элемент данной структуры, передается в $i + 1$ -элемент без потерь. Число фотонов с энергиями, равными или больше ширины запрещенной зоны для верхнего элемента может быть записано в виде:

$$Q_N = \frac{2\pi}{c^2} \int_{\nu_N}^{\infty} \frac{\nu^2}{e^{h\nu/kT} - 1} d\nu, \quad (1.1)$$

где ν – частота фотона, ν_N – частота запрещенной зоны верхнего элемента, h – постоянная Планка, k – постоянная Больцмана, c – скорость света в вакууме и T – температура черного тела, испускающего излучение. Для i -го элемента,

находящегося под верхним элементом, число полезных фотонов с энергиями, равными или больше ширины запрещенной зоны определяется таким образом:

$$Q_i = \frac{2\pi}{c^2} \int_{\nu_i}^{\nu_{i+1}} \frac{\nu^2}{e^{h\nu/kT} - 1} d\nu; \quad i = 1, \dots, N-1 \quad (1.2)$$

где ν_i и ν_{i+1} – частоты i -го и $(i + 1)$ -го элемента соответственно.

Если поверхность рассматриваемой структуры, на которую воздействует излучение, имеет площадь A , то согласно гипотезе предельной эффективности [6] выходная мощность, создаваемая Q_i (1.2), будет равна:

$$P_i = h \cdot \nu_i \cdot A \cdot Q_i. \quad (1.3)$$

Полная выходная мощность представляет собой сумму вкладов P_i (1.3) от каждого элемента:

$$P = h \cdot A \cdot \sum_{i=1}^N (\nu_i \cdot Q_i). \quad (1.4)$$

В соответствии с формулой распределения Планка мощность излучения, падающего на единицу площади за единицу времени, равна:

$$P_s = \frac{2\pi^5 A (kT)^4}{15h^3 c^2}. \quad (1.5)$$

Введем стандартное упрощение:

$$x = \frac{h\nu}{kT}. \quad (1.6)$$

Предельная эффективность определяется как отношение полной выходной мощности P (1.4) к мощности излучения, падающего на единицу площади за единицу времени, P_s (1.5):

$$u = \frac{P}{P_s} = \frac{15h^4 c^2}{2\pi^5 (kT)^4} \sum_{i=1}^N (\nu_i Q_i). \quad (1.7)$$

Используя выражения (1.1), (1.2) и (1.6) в уравнении (1.7), можно записать выражение для предельной эффективности в виде:

$$u = \frac{15}{\pi^4} \left[\sum_{i=1}^{N-1} \left(x_i \cdot \int_{x_i}^{x_{i+1}} \frac{x^2}{e^x - 1} dx \right) + x_N \cdot \int_{x_N}^{\infty} \frac{x^2}{e^x - 1} dx \right]. \quad (1.8)$$

Интегралы в уравнении (1.8) известны из статей [8], [9], посвященных излучению черного тела. Предельная эффективность многозонного элемента может быть численно определена:

$$u = \frac{15}{\pi^4} \left\{ \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{i=1}^{N-1} \left[\alpha_{i,j} x_i e^{-jx_i} - \alpha_{i+1,j} x_i e^{-jx_{i+1}} \right] + \alpha_{N,j} x_N e^{-jx_N} \right\} \quad (1.9)$$

где

$$\alpha_{i,j} = \frac{x_i^2}{j} + \frac{2x_i}{j^2} + \frac{2}{j^3},$$

$$\alpha_{i+1,j} = \frac{x_{i+1}^2}{j} + \frac{2x_{i+1}}{j^2} + \frac{2}{j^3}$$

$$\alpha_{N,j} = \frac{x_N^2}{j} + \frac{2x_N}{j^2} + \frac{2}{j^3}.$$

2 Анализ полученных результатов

Теоретические расчеты предела эффективности преобразования солнечной энергии показывают, что, согласно идеальным предположениям, множество подходов может использоваться для приближения к термодинамическим пределам эффективности преобразования солнечной энергии [10]. В работе [11], [12] показано, что наиболее оптимальны по эффективности солнечные элементы с шестью *p-n* переходами. Для расчета эффективности такой структуры мы использовали следующие материалы: *GaN* (2,4 эВ); *GaInP* (1,84 эВ); *GaAs* (1,43 эВ); *Si* (1,12 эВ) и *InGaAsP* (0,95 и 0,7 эВ). В используемой структуре солнечный спектр делится на три области: область высоких энергий (от 2,4 до 1,84 эВ), средних энергий (от 1,84 до 0,95 эВ) и низких энергий (от 0,95 до 0,7 эВ) (рисунок 2.1). В случае использования однопереходных солнечных элементов термодинамическая эффективность указанных выше материалов приведена на рисунке 2.2. Расчетные значения получены нами на основе термодинамического подхода к расчету эффективности. Поскольку на практике термодинамическая эффективность не может быть достигнута из-за неизбежных потерь, таких как паразитное сопротивление и отражение, то в расчетах обычно используют так называемый “derating factor” или понижающий коэффициент *d*, равный 0,8, для перехода от термодинамической эффективности к достижимой эффективности [4]. Позднее в работе [5] было показано, что понижающие коэффициенты могут быть различны в зависимости от используемого материала солнечных элементов. Так, например, понижающий коэффициент, согласно [5], может изменяться от 0,7 (для $E_g = 0,7$ эВ) до 0,89 (для $E_g = 2,4$ эВ).

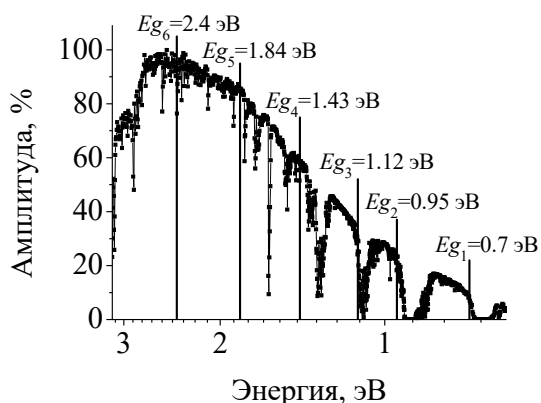


Рисунок 2.1 – Солнечный спектр стандарта AM 1.5G

Согласно нашим расчетам, предельная эффективность шестислойной структуры солнечных элементов (рисунок 2.3) составила 62,5% (кривая 2, рисунок 2.4) (с учетом понижающего

коэффициента $d = 0,8$ [11]), что превышает практический предел эффективности (54,3% [11], кривая 4, рисунок 2.4) и незначительно ниже расчетных значений эффективности (64,2% [11], кривая 1, рисунок 2.4). При использовании в расчетах $d = 0,7 \dots 0,89$ из [12] предельная эффективность (кривая 3, рисунок 2.4) составила $\sim 55,5\%$. Обозначения на рисунке 2.4 ($\square \blacksquare \circ \bullet$) соответствуют *p-n* переходам рассматриваемого солнечного элемента.

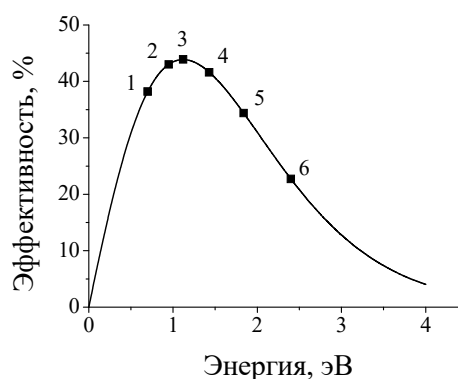


Рисунок 2.2 – Эффективность однопереходных солнечных элементов: InGaAsP (1,2), Si (3), GaAs (4), GaInP (5) GaInN/GaN (6)

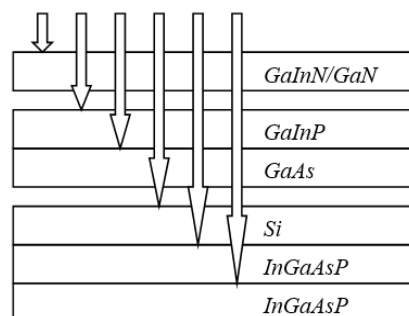


Рисунок 2.3 – Схема исследуемого солнечного элемента с 6 *p-n* переходами

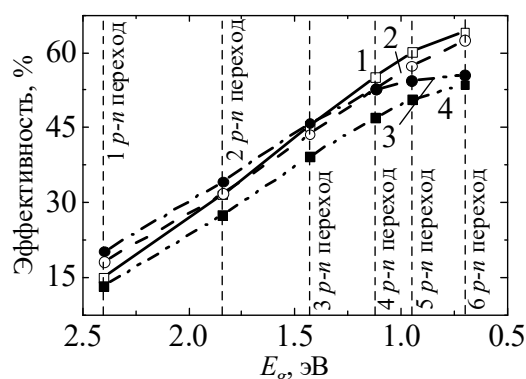


Рисунок 2.4 – Предельная эффективность многопереходных солнечных элементов GaInN / GaN / GaInP / GaAs / Si / InGaAsP: 1 – расчетные значения [9], 2 ($d = 0,8$) и 3 ($d = 0,7 \dots 0,89$) – наши расчеты, 4 – практический предел [9]

Заключение

Проведенные исследования показывают, что эффективность однопереходных солнечных элементов для исследуемых материалов не превышает 50%. Увеличение числа p - n переходов приводит к повышению эффективности преобразования солнечного излучения, и для 6 p - n переходов предельная эффективность составляет ~ 62,5% (при $d = 0,8$) и 55,5% (при $d = 0,7 \dots 0,89$). Показано, что наиболее оптимальны по эффективности солнечные элементы с 6 p - n переходами.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Simulation of photovoltaic thermoelectric battery characteristics* / A.K. Esman, G.L. Zykov, V.A. Potachits, V.K. Kuleshov // Energetika. Proceeding of CIS higher education institutions and power engineering associations. – 2021. – Vol. 64, № 3. – P. 250–258.
2. *Optimal CdS buffer thickness to form high-quality CdS / Cu(In,Ga)Se₂ junctions in solar cells without plasma damage and shunt paths* / K.S. Cho [et al.] // ACS Omega. – 2020. – Vol. 5, iss. 37. – P. 23983–23988.
3. *Есман, А.К.* Повышение энергоэффективности тонкопленочных солнечных элементов на основе соединения $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ / А.К. Есман, В.А. Потачиц, Г.Л. Зыков // Проблемы физики, математики и техники. – 2016. – № 1 (26). – С. 30–33.
4. *Fabrication of GaInP / GaAs // Si solar cells by surface activated direct wafer bonding* / K. Drendorf [et al.] // IEEE Journal of Photovoltaics. – 2013. – Vol. 3, iss. 4. – P. 1423–1428.
5. *Wafer-bonded GaInP / GaAs // Si solar cells with 30% efficiency under concentrated sunlight* /

S. Essig [et al.] // IEEE Journal of Photovoltaics. – 2015. – Vol. 5, iss. 3. – P. 977–981.

6. *Shockley, W.* Detailed balance limit of efficiency of p - n junction solar cells / W. Shockley, H.J. Queisser // J. Appl. Phys. – 1961. – Vol. 32. – P. 510–519.

7. *Dupre, O.* A full thermal model for photovoltaic devices / O. Dupre, R. Vaillon, M.A. Green // Solar Energy. – 2016. – Vol. 140. – P. 73–82.

8. *Planck, M.* The Theory of Heat Radiation / M. Planck. – Dover Publications, Inc. New York, 1991. – 224 p.

9. *Bronshtein, I.N.* Handbook of Mathematics / I.N. Bronshtein, K.A. Semendyayev. – Van Nostrand Reinhold Company. New York, 1985. – 1164 p.

10. *Solar cell efficiency tables (version 57)* / M.A. Green [et al.] // Progress in Photovoltaics. – 2021. – Vol. 29, iss. 1. – P. 3–15.

11. *50% efficient solar cell architectures and designs* / A. Barnett [et al.] // IEEE 4th World Conference on PV Energy Conversion. – 2006. – Vol. 2. – P. 2560–2564.

12. *Milestones toward 50% efficient solar cell modules* / A. Barnett [et al.] // IEEE 22nd European PV Solar Energy Conference. – 2007. – P. 95–100.

Поступила в редакцию 25.04.2022.

Информация об авторах

Есман Александр Константинович – д.ф.-м.н., доцент
 Зыков Григорий Люцианович – к.ф.-м.н., доцент
 Потачиц Владимир Александрович – к.ф.-м.н., доцент