

ионов иттербия к ионам эрбия в кристалле Er,Yb:СУВ составила 59 %.

Спектр поглощения кристалла Er(0.25 мас.%),Yb(1.22 мас.%):СГВ, зарегистрированный в неполяризованном свете в спектральной области 850–1100 нм представлен на рисунке 4. Максимальное значение коэффициента поглощения в пике на длине волны 976 нм составило $1,8 \text{ см}^{-1}$.

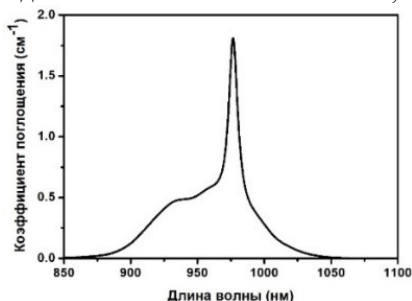


Рисунок 4 – Спектр поглощения кристалла Er,Yb:СГВ в спектральной области 850-1100 нм

В спектре люминесценции наблюдается широкая полоса испускания с пиком на длине волны 1531 нм (рисунок 5).

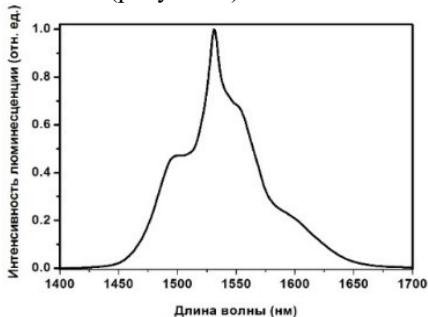


Рисунок 5 – Спектр люминесценции кристалла Er,Yb:СГВ в спектральной области 1400-1700 нм

Затухание люминесценции в области около 1.5 мкм имело моноэкспоненциальный характер (рисунок 6). Время жизни уровня ${}^4I_{13/2}$ иона Er^{3+} составило 550 ± 5 мкс.

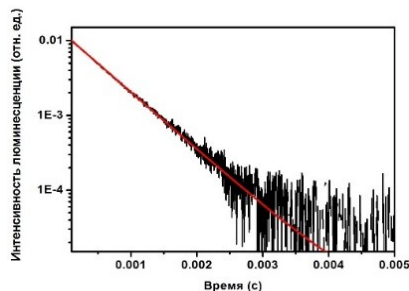


Рисунок 6 – Кинетика затухания люминесценции кристалла Er,Yb:СГВ в спектральной области 1,5–1,6 мкм

Радиационное время жизни уровня ${}^4I_{13/2}$ иона эрбия для кристалла Er,Yb:СГВ составляет 1,98 мс [2]. Квантовый выход люминесценции с уровня ${}^4I_{13/2}$ иона Er^{3+} составляет 27,8 %.

Таким образом, значения спектроскопических характеристик кристаллов Er,Yb:СУВ и Er,Yb:СГВ удовлетворяют требованиям, предъявляемым к лазерным эрбий-иттербиевым средам, для получения эффективной лазерной генерации в спектральной области 1,5–1,6 мкм. Поэтому актуальной остается задача по изучению возможностей получения лазерной генерации и исследованию генерационных характеристик кристаллов Er,Yb:СУВ и Er,Yb:СГВ.

1. 230-mW diode-pumped single-frequency Er,Yb laser at 1.5 μm / S. Taccheo, G. Sorbello, P. Laporta, G. Karlsson, and F. Laurell // IEEE Photonics Technology Letters – 2001. – Vol. 13, № 1. – P.19-21.
2. Optical transition probability of Er^{3+} ions in $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ codoped $\text{Ca}_3\text{Ln}_2(\text{BO}_3)_4$ (Ln=Y, Gd, La) crystals / B. Wei, L.Z. Zhang, Z.B. Lin, and G.F. Wang // Materials Research Innovations. – 2007. – Vol. 11, № 3. – P. 154-157.

УДК 621.383.51

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ ТОНКОПЛЕНОЧНЫЙ СОЛНЕЧНЫЙ ЭЛЕМЕНТ

Есман А.К., Потачиц В.А., Зыков Г.Л.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

В настоящее время наилучшие характеристики обеспечиваются на тонкопленочных солнечных элементах (СЭ) – $\alpha\text{-SiH}$, CdS/CdTe и соединениях Cu(In,Ga)Se₂. Наиболее перспективны, как по достигаемой эффективности, так и по надёжности и возможностям снижения себестоимости являются СЭ с активным слоем на основе поликристаллических пленок полупроводников Cu(In,Ga)Se₂ (СIGS) [1-4].

Целью данной работы является поиск путей повышения эффективности преобразования солнечного излучения тонкопленочным СЭ на основе CuInSe₂ в электричество.

Структура предлагаемого нами тонкопленочного СЭ на основе CuInSe₂ приведена на рисунке 1 [5]. На полированной лицевой поверхности подложки 1,

изготовленной из нержавеющей стали, с закругленными краями последовательно расположены электрически соединенные: первый электродный слой 2, первый гетеропереход CuInSe₂ 3, второй электродный слой 4, второй гетеропереход CuInSe₂-CdS 5-6, прозрачный электрод 7. Первый 3 и второй 5-6 гетеропереходы по функциональному назначению являются соответственно термоэлектрическим и фотоэлектрическим преобразователями. Геометрические размеры подложки 1 составляли 41×41×9 мм. Толщины электродных слоев 2 и 4 из молибдена (Mo) и слоев CuInSe₂ 3 и 5 были равны 1 мкм, а толщины слоя 6 из сульфида кадмия (CdS) и электрода 7 из оксида цинка (ZnO) – 50 нм. Длина и ширина слоев 2, 3 и 4

составляли соответственно 39×39 мм, а слоев 5 и 6 и электрода 7 – 38,7 × 38,7 мм.

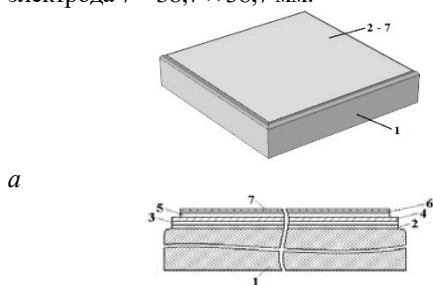


Рисунок 1 – Структура тонкопленочного солнечного элемента (а) и его сечение (б):

1 – подложка, 2 – первый электродный слой, 3 – первый гетеропереход CuInSe₂, 4 – второй электродный слой, 5-6 – второй гетеропереход CuInSe₂-CdS, 7 – прозрачный электрод

Прозрачный электрод 7 пропускает входное солнечное излучение, видимая часть которого поглощается во втором гетеропереходе CuInSe₂-CdS 5-6, нагревая слой 6. Одна часть сгенерированных в слое 5 зарядов, достигших *p-n* перехода, разделяется его полем, в результате чего между прозрачным электродом 7 и вторым электродным слоем 4 создается фото-ЭДС. Другая часть фотогенерированных зарядов рекомбинирует. При этом нагревается слой 5 и за счет теплопередачи нагревается второй электродный слой 4. Инфракрасная часть входного солнечного излучения дополнительно нагревает этот слой. Боковые стороны подложки 1 теплоизолированы, а ее тыльная сторона поддерживается при постоянной температуре. Поэтому между первым 2 и вторым 4 электродными слоями образуется градиент температур, который вызывает появление термо-ЭДС между верхней и нижней сторонами первого гетероперехода CuInSe₂ 3, который является полупроводником с дырочным типом проводимости. В результате между первым электродным слоем 2, электрически соединенным с нижней стороной слоя 3, и прозрачным электродом 7 возникает сумма напряжений фото- и термо-ЭДС, являющаяся выходным электрическим источником постоянного тока. Возможность эффективного отвода тепла с металлической поверхности подложки с выступами 1 за счет увеличенной её площади, стабилизирует температуру тонкопленочного СЭ (второго слоя диселенида меди-индия 5), поддерживая его КПД в требуемом режиме, а инерционность остывания этого тонкопленочного СЭ стабилизирует выходное напряжение при переменной облачности.

Для моделирования использовалась программная платформа COMSOL Multiphysics - мощная интерактивная среда для решения большинства научных и инженерных задач, основанных на системе дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных элементов. С целью количественной

оценки повышения вырабатываемой электроэнергии предложенным тонкопленочным СЭ на основе CuInSe₂ использовался модуль «Теплопередача». Расчеты выполнялись для географических координат г. Минска с учетом суточного и сезонного изменения как температуры, так и мощности солнечного излучения спектра AM1,5, максимальное значение которой при использовании концентрации составляло 90 кВт/м². В условиях, когда температура окружающей среды не превышает 0°C, тыльная сторона подложки 1 стабилизировалась при температуре 1 °С, в противном случае - при температуре 10 °С. Практически такая стабилизация может быть достигнута принудительным охлаждением тыльной стороны артезианской водопроводной водой.

Согласно полученным результатам максимальный градиент температуры ~ 3,1·10⁴ К/м достигается на границе раздела первый электродный слой / первый гетеропереход CuInSe₂ сначала с юго-восточной стороны (около 12 часов дня), а затем - с юго-западной (спустя 2,5 часа). Для сравнения был рассчитан градиент температуры на гетеропереходе тонкопленочного СЭ CuInSe₂ с одним гетеропереходом. Численное значение данного градиента составило ~ 2,4·10³ К/м, что в 12,5 раз меньше, чем на первом гетеропереходе тонкопленочного СЭ, состоящего из двух гетеропереходов. Профили градиентов температуры и температуры в электродных слоях и первом гетеропереходе CuInSe₂ для момента времени, когда градиент температуры на нижней границе раздела первого гетероперехода имеет максимальное значение, приведены на рисунке 2, где слой толщины от 0 до 1 мкм соответствует первому электродному слою, слой толщины от 1 до 2 мкм - первому гетеропереходу, слой толщины от 2 до 3 мкм - второму электродному слою.

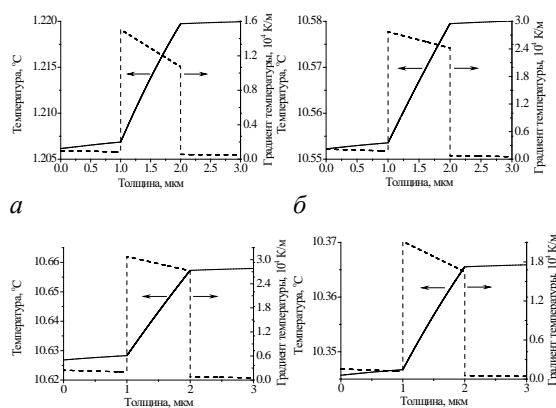


Рисунок 2 – Зависимости профиля температуры (сплошная линия) и градиента температуры (штриховая линия) в первом электродном слое (толщина 0-1 мкм), первом гетеропереходе CuInSe₂ (толщина 1-2 мкм) и втором электродном слое (толщина 2-3 мкм) в 13 (а, б) и 12 (в, г) часов дня с юго-восточной стороны в январе (а), апреле (б), июле (в) и октябре (г)

Градиенты температур на нижней и верхней границах раздела первого гетероперехода CuInSe_2 отличаются примерно на $0,35 \cdot 10^4$ К/м в апреле и июле (штриховая линия, рисунок 2, б и в) и на $\sim 0,45 \cdot 10^4$ К/м в январе и октябре (штриховая линия, рисунок 2, а и з).

Учитывая значения термоЭДС гетероперехода [6] толщиной 3 мкм и то, что генерируемое им напряжение $\sim 0,4$ мВ приводит к увеличению эффективности СЭ на 1 % при максимальной засветке и более 1 % при уменьшении солнечной радиации вследствие облачности и других причин. С другой стороны, введение второго гетероперехода изменяет температуру тонкопленочного солнечного элемента CuInSe_2 при тех же условиях на $0,5$ °С и несущественно влияет на эффективность последнего.

Таким образом, в предложенном тонкопленочном СЭ за счет использования теплоотвода через слой термоэлемента к подложке, тыльная сторона которой поддерживается при постоянной температуре, возможно увеличение эффективности преобразования солнечного излучения в электричество как минимум на 1 %. Проведенное моделирование показывает, что использование тандема

“СЭ – термоэлемент” на основе CuInSe_2 при концентрации солнечного излучения (с охлаждением тыльной стороны) не только в разы повышает выходную мощность за счет стабилизации температуры, а значит – КПД, но и позволяет увеличить эффективность работы всего тандема. Моделирование проводилось для неподвижного устройства без механического слежения за Солнцем.

1. Новиков, Г.Ф. Солнечные преобразователи третьего поколения на основе Cu-In-Ga-(S, Se) / Г.Ф. Новиков, М.В. Гапанович // УФН. – 2017. – Т. 187, № 2. – С. 173–191.
2. Easily realizable heterojunction CdS/CuInSe₂ thin films photovoltaic application / A. Mandjoub [et al.] // Chalcogenide Letters. – 2015. – Vol. 12, no. 2. – P. 59–66.
3. Infiltrated photonic crystals for light-trapping in CuInSe₂ nanocrystal-based solar cells / S. Dottermusch [et al.] // Optics express. – 2017. – Vol. 25, no. 12. – P. A502–A514.
4. Davis, M.W. Prediction of building integrated photovoltaic cell temperatures / M.W. Davis, A.H. Fanney, B.P. Dougherty // J. Sol. Energy Eng. – 2001. – Vol. 123, 200–210 (2001).
5. Пат. РБ № 20481 / А.К. Есман, В.К. Кулешов, Г.Л. Зыков, В.Б. Залеский, Т.Р. Леонова // Афіцыйны бюл. / Нац. центр інтэлектуал. уласнасці. – 2016. – № 5. – С. 120.
6. Магомедов, М.-П.А. Термоэлектрические и фотоэлектрические свойства р-п-гетероструктур $\text{CuInSe}_2/\text{CdS}$, полученных методом квазиравновесного осаждения / М.-П.А. Магомедов, Ш.М. Исмаилов, Дж.Х. Магомедова, П.П. Хохлачев // ФТП. – 2000. – Т. 34, вып. 6. – С. 689–691.

УДК 621.317

ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ ДАТЧИК ИЗМЕРЕНИЯ БИЕНИЯ ВАЛА ТУРБО- И ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ

Зайцев Е.А.¹, Сидорчук В.Е.²

¹ Институт электродинамики НАН Украины

² Киевский национальный торгово-экономический университет
Киев, Украина

Во время работы и при плановых осмотрах турбо- и гидрогенераторов возникает необходимость в контроле биений боковых цилиндрических поверхностей валов ротора в нескольких контрольных сечениях по длине вала. Полученные данные используются при балансировке вала, минимизации динамического дисбаланса обусловленного технологическими погрешностями при изготовлении и сборке, повреждениями, осевыми деформациями вала, которые возникают при эксплуатации, например при износе подшипников [1]. При этом как указано в [2], использование датчиков вибрации корпуса неэффективно для мониторинга машин в которых вибрация, производимая движением или положением вала, значительно гасится масляной пленкой подшипника. В связи с чем возникает необходимость в непосредственном контроле параметров биений валов.

Таким образом, создание датчиков для подсистем контроля биения валов турбо- и гидрогенераторов является актуальной научно-технической проблемой обеспечения безопасной и бесперебойной работы гидрогенераторов.

Классическим методом контроля биения является применение механических индикаторов [1]. Для минимизации воздействия на объект со стороны измерительного оборудования измерения проводят бесконтактными способами.

Наиболее известной подсистемой бесконтактной системой вибрационного контроля является VibraWatch - Vibration Monitoring System [3], разработанная как часть универсального контрольно-диагностического комплекса ZOOM [4] компанией VibroSystM Inc. (Канада). Для измерения вибраций в данной системе используется ёмкостной датчик PCS-102, преимуществами которого является низкая стоимость, простота конструкции и высокая точность измерения. Но при этом ему присущи и недостатки, связанные с диэлектрическими свойствами среды эксплуатации. Последнего недостатка лишены оптические датчики.

Наибольшее распространение получили оптические датчики на основе триангуляционного и амплитудного методов измерения. Недостатками триангуляционного метода является влияние турбулентности среды между датчиком и поверхностью вала на