

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ по базовой части государственного задания №2014/702.

ЛИТЕРАТУРА

1. Maronchuk I.I. An obtaining of nanoheteroepitaxial structures with quantum dots for high effective photovoltaic devices, investigation of their properties / S.Bykovsky, S.Bondarec, I. Maronchuk, A.Velchenko // ТЕКА, Polish academy of sciences. UEER. – 2014. – Vol. 14. – No. 1. – P. 154–163.
2. Леденцов Н.Н. Гетероструктуры с квантовыми точками: получение, свойства, лазеры. Обзор. //Леденцов Н.Н [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 1998. – Т. 32. – № 4. – С. 385–410.
3. Maronchuk I.I. Deposition by liquid epitaxy and study of the properties of nano-heteroepitaxial structures with quantum dots for high efficient solar cells / D. Dimova-Malinovska, K. Lovchinov, I.I. Maronchuk, I.E. Maronchuk, D.D. Sanikovich // Journal of Physics: Conference Series. – 2014. – № 558. – 012049.
4. Maronchuk I.I. Study of the morphology of ge quantum dots grown by liquid phase epitaxy/ D. Dimova-Malinovska, H. Nichev, I.I. Maronchuk, I.E. Maronchuk, D.D. Sanikovich // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – № 700. – 012043.

РАСЧЕТ ОПТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ InAs

А. А. Вельченко¹, В. И. Мирончук¹, Р. М. Пелешак², И. В. Протосовицкий¹

¹Белорусский государственный аграрный технический университет,
г. Минск, Беларусь, anna.velchenko@gmail.com

²Дрогобычский государственный педагогический университет имени Ивана Франко,
г. Дрогобыч, Украина, peleshchak@rambler.ru

Аннотация. Рассматривается расчет оптических потерь в наногетероструктуре $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ с квантовыми точками InAs . Для данной наногетероструктуры определены коэффициенты отражения для трех интерфейсов и поглощения в слоях ZnO и CdS . Аналитические выражения позволяют определить квантовую эффективность солнечных элементов $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ с квантовыми точками InAs .

Солнечные энергетические установки находят все более широкое практическое применение как источник электроэнергии для малых и средних потребителей, требующих автономного энергоснабжения, в некоторых случаях они подключены к электрическим сетям. В Германии работают фотоэлектрические установки мощностью 5 МВт, которые включены в единую государственную систему электрогенерирования.

Значительное внимание данной проблеме уделяется организациями, входящими в ООН, такими как ЮНЕСКО, ЕЭК, ЮНЕП, ЮНИДС, а также другими межправительственными и неправительственными международными организациями. Выделяются значительные средства на работы в области НВИЭ из целевых ассигнований ЕЭС, Европейского фонда национального развития, Евроатома и других организаций.

Солнечные элементы на основе $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Se}_2$ (CIGS), показывают долговременную стабильность и высокую радиационную стойкость, являются легкими, гибкими и портативными, занимают одну из перспективных позиций в тонкопленочной фото-

вальтаике в качестве альтернативы солнечным модулям на основе моно- и поликристаллических кремневых пластин [1, 2]. На практике эффективность фотоэлектрического преобразования в солнечных модулях CIGS значительно уступает теоретической границе 28–30%. Поэтому работы направленные на повышения их эффективности чрезвычайно важные, как с научной, так и с экономической точек зрения.

В частности, повышение эффективности фотоэлектрического превращения в исследуемых солнечных элементах CIGS основывается на выяснении механизмов и факторов, среди которых основными являются оптические потери при отражении излучения на границах деления между слоями, а также использование полупроводниковых квантовых точек InAs (КТ InAs) в тонких пленках CIGS, которые расширяют спектральный диапазон чувствительности фотоэлектрических преобразователей, а следовательно, это приводит к повышению КПД фотопреобразователя.

Целью работы является: рассмотреть оптические потери в CIGS устройствах с квантовыми точками InAs, которые существенно влияют на квантовую эффективность и эффективность превращения солнечной энергии в электрическую.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе рассматриваются солнечные элементы CIGS с КТ InAs, расчеты оптических потерь которых осуществляются на основе оптических констант материалов. Схематический поперечный разрез солнечного элемента CIGS с КТ InAs изображен на рисунке, где указаны обозначения оптических констант n_i и κ_i и коэффициенты отражения на интерфейсах R_{ij} , которые используются в расчетах. Фотоэлектрическое превращение в таких солнечных элементах происходит при толщине CIGS поглотителя 2 мкм, а пленка CdS с толщиной 30–40 нм является окном для излучения. Слой ZnO:Al толщиной 300–500 нм является прозрачным проводящим оксидом (TCO). Наиболее часто используется в устройствах конфигурации «substrate» между слоями TCO и CdS нелегированный слой ZnO с высоким удельным сопротивлением толщиной 50 нм, а также наносят антиотражательное покрытия (MgF_2) толщиной ~100 нм на фронтальную поверхность ZnO.

Для расчетов квантовой эффективности солнечного элемента CdS/CIGS с КТ InAs, необходимо определить оптическое пропускание $T(\lambda)$ структуры ZnO/CdS, которое характеризуется отражением от границ деления (интерфейсов) воздух/ZnO, ZnO/CdS, CdS/CIGS и поглощением в слоях ZnO и CdS. Для определения оптического пропускания $T(\lambda)$ необходимо знать показатели преломления n_i и коэффициенты экстинкции κ_i ZnO, CdS и CIGS с КТ InAs.

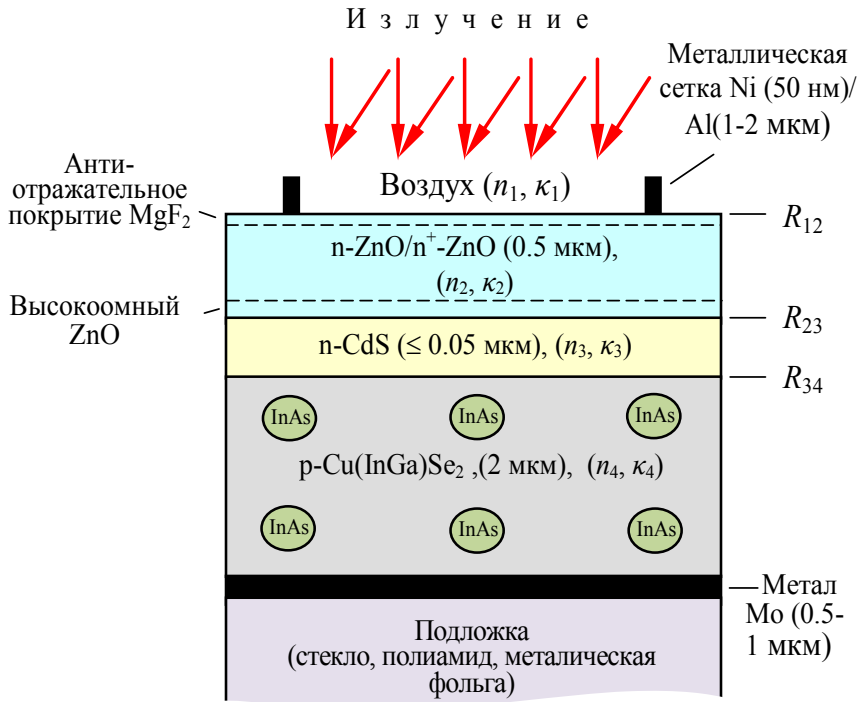


Рисунок – Поперечный разрез солнечного элемента CdS/CIGS с квантовыми точками InAs

Коэффициенты отражения от трех интерфейсов R_{12} , R_{23} и R_{34} , согласно уравнению Френеля, при нормальном падении света, могут быть рассчитаны как:

$$R_{ij} = \frac{\left| n_i^* - n_j^* \right|^2}{\left| n_i^* + n_j^* \right|^2} = \frac{(n_i - n_j)^2 + (\kappa_i - \kappa_j)^2}{(n_i + n_j)^2 + (\kappa_i + \kappa_j)^2}, \quad (1)$$

где n_i^* и n_j^* - показатели преломления материалов, которые учитывают их поглощение и содержат мнимые части, и находятся из выражений $n_i^* = n_i - i\kappa_i$ и $n_j^* = n_j - i\kappa_j$.

Коэффициенты поглощения в слоях ZnO и CdS можно представить в виде $\exp(-\alpha_2 d_2)$ и $\exp(-\alpha_3 d_3)$, где α_2 и α_3 , d_2 и d_3 коэффициенты поглощения и толщины слоев ZnO и CdS, соответственно. Пропускание $T(\lambda)$ этих слоев можно представить в виде:

$$T(\lambda) = T_{gr} (1 - R_{12}) \exp(-\alpha_2 d_2) (1 - R_{23}) \exp(-\alpha_3 d_3) (1 - R_{34}) \quad (2)$$

В уравнении (2) коэффициент T_{gr} учитывает эффект затенения существующим металлическим сетчатым контактом, нанесенным на фронтальную поверхность ZnO. Ширина лент сетки и расстояние между ними на практике выбираются таким образом, чтобы затенение составляло около 4–5% от фронтальной поверхности солнечного элемента. Минимальная погрешность значения T_{gr} может быть принята 0,96 [2].

Выражение для коэффициента отражения материала с антиотражающим покрытием имеет вид [3]:

$$R_{\text{arc}} = \frac{r_f^2 + r_b^2 + 2r_f r_b \cos(2\beta)}{1 + r_f^2 r_b^2 + 2r_f r_b \cos(2\beta)}, \quad (3)$$

где $r_f = (n_{\text{arc}} - n_1)/(n_{\text{arc}} + n_1)$ и $r_b = (n_2 - n_{\text{arc}})/(n_2 + n_{\text{arc}})$ – амплитудные значения коэффициентов отражения от фронтальной и тыльной поверхностей антиотражающего слоя, а $\beta = (2\pi/\lambda)n_{\text{ars}}d_{\text{ars}}$.

Таким образом, при наличии просветляющего покрытия в выражении (2) коэффициент отражения R_{12} необходимо заменить коэффициентом R_{ars} (формула 3), тогда получим:

$$T(\lambda) = T_{\text{grid}}(1 - R_{\text{arc}})\exp(-\alpha_2 d_2)(1 - R_{23})\exp(-\alpha_3 d_3)(1 - R_{34}) \quad (4)$$

ВЫВОДЫ

Разработана математическая модель наногетеросистемы $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ с напряженными квантовыми точками InAs , которая позволила учесть оптические потери. В ходе математических расчетов было установлено, общие потери при отражении излучения от интерфейсов для типичных параметров солнечных элементов CIGS с КТ InAs без учета затенения от электродной металлической сетки на поверхности ZnO . Антиотражающее покрытие уменьшает потери на фронтальной поверхности солнечных элементов CIGS с КТ InAs .

ЛИТЕРАТУРА

1. Kosyachenko L.A. Optical and recombination losses in thin-film $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ solar cells / Solar Energy Materials and Solar Cells // L.A. Kosyachenko, X. Mathew, P.D. Paulson, V.Ya. Lytvynenko, O.L. Maslyanchuk. – 2014. – Vol. 120. – P. 291–302.
2. Neumann H. Relation between electrical properties and composition in CuInSe_2 single crystals / H. Neumann, R. D. Tomlinson // Sol. Cells. – 1990. – V. 28. – P. 301–313.
3. Born M. Principles of Optics / M. Born, E. Wolf, A.B. Bhatia. – [7th edition]. – UK: Cambridge University Press, 1999. – P. 65.

САМООРГАНИЗАЦИЯ НАНОПУСТОТ В УПРУГО-ДЕФОРМИРОВАННЫХ СТРУКТУРАХ $\text{SiGe}(\text{Sn})$ ПРИ ИОННОМ ОБЛУЧЕНИИ

П. И. Гайдук

Белорусский государственный университет, gaiduk@bsu.by

Рассмотрены процессы самоорганизации нано-пустот в ионно-имплантированных слоях упруго-деформированных $\text{Si/SiGe}(\text{Sn})$ гетероструктур. Нанопустоты использованы для геттерирования и (или) сегрегации примесей с последующим формированием массивов захороненных нано-оболочек и нано-точек Ge , Sn или Au в Si слоях, расположенных вблизи p - n -перехода. Исследованы структурные превращения в слоях $\text{Si/SiGe}(\text{Sn})$ во время формирования нано-пустот, а также оптические характеристики и спектральные зависимости фототока в p - n -переходах и гетеро-слоях