

07.2

Влияние числа рядов GaInAs-квантовых объектов на ток насыщения GaAs-фотопреобразователей

© М.А. Минтаиров¹, В.В. Евстропов², С.А. Минтаиров², А.М. Надточий¹, Р.А. Салий¹, М.З. Шварц², Н.А. Калюжный²

¹ НТЦ микроэлектроники РАН, Санкт-Петербург, Россия

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: mamint@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 12 марта 2020 г.

В окончательной редакции 12 марта 2020 г.

Принято к публикации 24 марта 2020 г.

Исследованы спектры электролюминесценции и зависимости напряжения холостого хода от фотогенерированного тока для GaAs-солнечных элементов, $p-n$ -переход которых содержал различное количество рядов (r) квантовых объектов на основе слоев $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$. Для всех образцов получены значения тока насыщения (J_0), ширины запрещенной зоны квантового объекта (E_g^Q) и падения напряжения холостого хода (ΔV_{oc}) относительно реферного ($r = 0$) образца. Предложена модель, адекватно описывающая зависимости $J_0(r)$ и $\Delta V_{oc}(r)$, и найдены модельные параметры, в том числе токовый инвариант $J_z = 1.4 \cdot 10^5 \text{ A/cm}^2$, однозначно связывающий ток насыщения с шириной запрещенной зоны квантового объекта.

Ключевые слова: квантовые объекты, солнечные элементы, фотопреобразователи, ток насыщения.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.12.49524.18284

Использование квантовых объектов (квантовых точек, квантовых ям и гибридных объектов) в субэлементах многопереходных солнечных элементов является перспективным методом решения проблемы дисбаланса фотогенерируемых токов субэлементов. Это достигается за счет того, что включенные в субэлемент квантовые объекты (КО) поглощают дополнительные фотоны и, как следствие, позволяют увеличить его фотогенерированный ток. Однако включение КО всегда ведет к понижению напряжения холостого хода субэлемента. Это наблюдается для всех видов квантовых объектов: для квантовых точек [1–3], квантовых ям [4–6] и других объектов (проволочных [7] и гибридных [8–10]). Основной причиной падения напряжения является возникновение дополнительной рекомбинации в КО [3,8–10]. Эти процессы были исследованы нами в [9,10]. В частности, в [8,9] была предложена модель, описывающая увеличение тока насыщения (J_0) при введении в $p-n$ -переход различного количества рядов (r) КО. Отметим, что ток насыщения напрямую определяет фотонапряжение, генерируемое $p-n$ -переходом. Согласно предложенной модели, этот ток линейно увеличивается с r , что было подтверждено экспериментально [10] для образцов с количеством рядов КО от 1 до 10. В настоящей работе проведено исследование характеристик GaAs $p-i-n$ -переходов с количеством рядов гибридных КО GaInAs от 1 до 20, а также экспериментально обнаружена и интерпретирована сверхлинейная зависимость J_0 от r . В процессе исследования также было обнаружено, что рекомбинация через уровни в КО не всегда доминирует над рекомбинацией в матрице, что требует совершенствования используемой ранее модели [9,10].

Все исследуемые структуры были выращены методом металлоорганической газофазной эпитаксии, технология выращивания структур описана в [11].

Токи насыщения J_0 определялись, как и в [8], по анализу экспериментальных характеристик $V_{oc}-J_g$ (напряжение холостого хода–фотогенерированный ток), приведенных на рис. 1 (символы). Все характеристики были измерены при достаточно больших фотогенерированных токах ($> 1 \text{ A/cm}^2$), когда доминирует так называемый диффузионный [12] или единичный [8,9] механизм протекания тока через $p-n$ -переход. Единичный ток насыщения определялся путем аппроксимации двухдиодной моделью [8] характеристик $V_{oc}-J_g$. Результат аппроксимации показан на рис. 1 (линии), найденные значения единичного тока насыщения приведены в таблице. Полученная зависимость $J_0(r)$ была построена. Было определено, что она (при $r > 10$) сверхлинейна.

Для всех исследуемых образцов были исследованы спектры электролюминесценции (рис. 2), полученные при пропускании через образцы одинакового тока (0.128 A/cm^2). Эти спектры содержали два пика: один от GaAs-матрицы (энергия фотона 1.426 eV интерпретируется как ширина запрещенной зоны E_g), другой от квантовых объектов (от 1.189 до 1.213 eV , что характеризует его ширину запрещенной зоны E_g^Q). Высота пиков электролюминесценции характеризует темп излучательной рекомбинации через матрицу и КО соответственно. Видно, что при введении одного ряда КО в $p-i-n$ -переход высота пика КО незначительно больше, чем высота пика матрицы, что свидетельствует об отсутствии доминирования рекомбинации в КО над рекомбинацией в матрице. С увеличением числа рядов КО рекомбинация

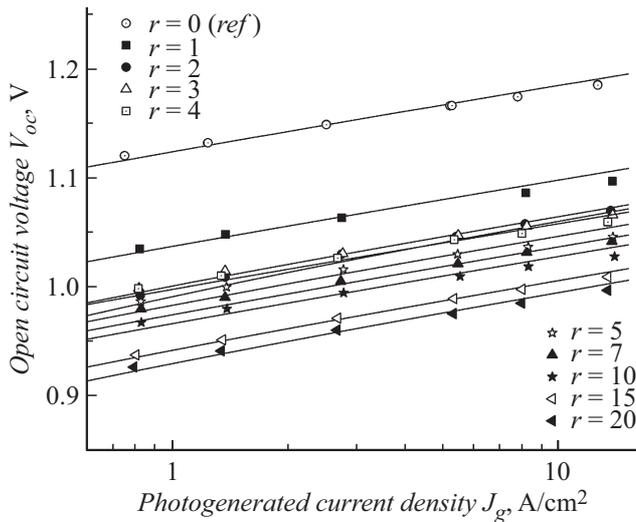


Рис. 1. Зависимости напряжения холостого хода от фотогенерированного тока при разном числе рядов (r) квантовых объектов. Символы — эксперимент, сплошные линии — аппроксимация двухдиодной моделью [8].

Полученные значения параметров исследуемых солнечных элементов

Число рядов КО r	E_g , eV	J_0 , A/cm ²	ΔE_g , eV	ΔV_{oc} , V
0 (реферный образец)	1.426	$2.5 \cdot 10^{-19}$	0.000	0.000
1	1.210	$9.0 \cdot 10^{-19}$	0.2126	0.090
2	1.202	$2.9 \cdot 10^{-18}$	0.2209	0.1189
3	1.209	$3.1 \cdot 10^{-18}$	0.2138	0.1205
4	1.213	$4.0 \cdot 10^{-18}$	0.2091	0.1267
5	1.203	$6.0 \cdot 10^{-18}$	0.2197	0.1370
7	1.201	$9.0 \cdot 10^{-18}$	0.2209	0.1471
10	1.198	$1.3 \cdot 10^{-17}$	0.2243	0.1563
15	1.195	$3.0 \cdot 10^{-17}$	0.2278	0.1772
20	1.189	$4.5 \cdot 10^{-17}$	0.2335	0.1873

в них увеличивается, а при 20 рядах интенсивность пика КО практически на два порядка больше, чем интенсивность пика матрицы. Тем не менее предыдущая модель, описывающая ток насыщения при введении в $p-n$ -переход КО, а также величину напряжения, не учитывала тот факт, что рекомбинация через КО не всегда доминирует над рекомбинацией в матрице. Отметим также эффект уменьшения ширины запрещенной зоны КО с увеличением числа рядов КО, что приводит к сверхлинейности зависимости $J_0(r)$ (рис. 3, *b*). Этот эффект для гибридных КО обсуждался в работе [13], также он наблюдался при включении квантовых ям и квантовых точек [14–16]. Далее нами применена модель, позволяющая корректно описать зависимость тока насыщения и, как следствие, напряжения холостого хода от числа рядов КО (рис. 3, *a*).

Согласно модели, единичная токовая компонента (с коэффициентом идеальности $A = 1$) составлена из двух субкомпонент

$$J = (J_0^M + J_0^Q) \exp\left(\frac{V}{kT/q}\right). \quad (1)$$

Одна из них (J_0^M) обусловлена рекомбинацией в матрице, другая (J_0^Q) — рекомбинацией через набор рядов КО.

Ток насыщения (предэкспонента) матричной субкомпоненты

$$J_0^M = J_z \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right), \quad (2)$$

где E_g — ширина запрещенной зоны матрицы (GaAs), J_z — токовый инвариант относительно E_g в системе GaInAs [17,18]. Ток насыщения КО-субкомпоненты пропорционален числу рядов КО r и также выражается через токовый инвариант

$$J_0^Q = \frac{r}{r_s} J_z \exp\left(-\frac{E_g^Q}{kT}\right) = \frac{r}{r_s} J_z \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) \exp\left(\frac{\Delta E_g}{kT}\right), \quad (3)$$

где r_s — множитель, учитывающий стремление $\frac{r}{r_s} J_z$ к инварианту J_z при увеличении r и его пропорциональность r , что удовлетворяется в линейном приближении при $r \ll r_s$, ΔE_g — разница ширины запрещенных зон КО (E_g^Q) и матрицы (E_g). Отметим, что выражение (3) является приближенным, в нем множитель $\frac{r}{r_s}$ линейно описывает наблюдаемое увеличение темпа рекомбинации через КО с увеличением числа их рядов. Смысл r_s заключается в следующем: r_s — это такое воображаемое число рядов, при котором набор КО стал бы эквивалентен объемному материалу, имея такое же значение J_z .

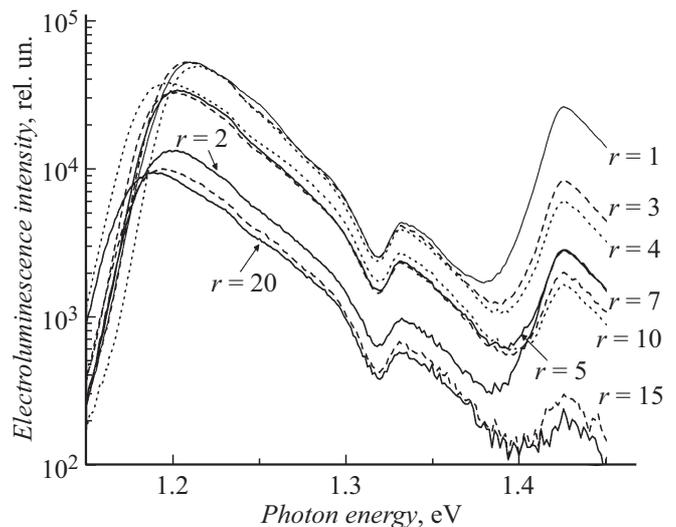


Рис. 2. Спектры электролюминесценции GaAs-солнечного элемента при различном числе рядов (r) квантовых объектов. Провал при $h\nu \approx 1.1$ eV, скорее всего, имеет аппаратное происхождение.

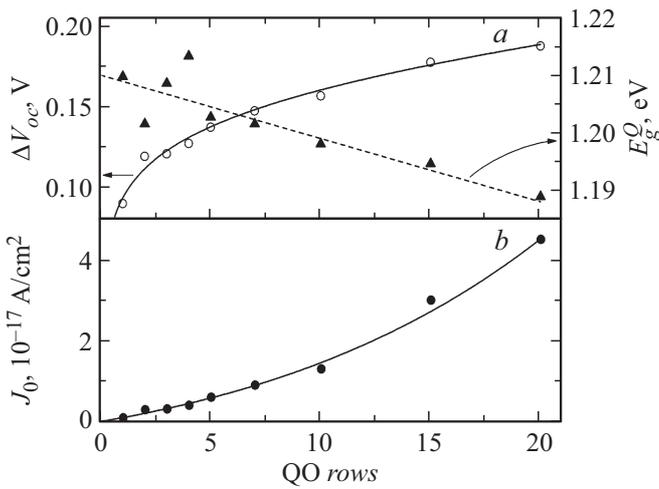


Рис. 3. *a* — зависимости от числа рядов квантовых объектов падения напряжения холостого хода относительно реферного образца (кружки — эксперимент, сплошная линия — аппроксимация по формуле (7)) и ширины запрещенной зоны квантового объекта (треугольники — эксперимент, штриховая прямая — линейная аппроксимация). *b* — зависимости от числа рядов квантовых объектов тока насыщения единичной компоненты (кружки — эксперимент, сплошная линия — аппроксимация по формуле (4)).

Складывая (2) и (3), получаем суммарный ток насыщения

$$J_0 = J_0^M + J_0^Q = J_z \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) \left[1 + \frac{r}{r_s} \exp\left(\frac{\Delta E_g}{kT}\right)\right]. \quad (4)$$

Наблюдаемое падение напряжения холостого хода при увеличении числа рядов (рис. 1) моделируется следующим образом. Фотовольтаические характеристики $J_g - V_{oc}$ (фотогенерированный ток–напряжение холостого хода) функционально совпадают с темновыми безрезистивными вольт-амперными характеристиками и получаются из них при замене $J \rightarrow J_g$ и $V \rightarrow V_{oc}$. Таким образом, фотовольтаические характеристики реферного (без КО, $r = 0$) $p-n$ -перехода и изучаемого ($r \geq 1$) соответственно имеют вид

$$J_g^M = J_0^M \exp\left(-\frac{V_{oc}^M}{kT/q}\right), \quad (5)$$

$$J_g^{QM} = (J_0^Q + J_0^M) \exp\left(-\frac{V_{oc}^{QM}}{kT/q}\right). \quad (6)$$

Приравняв $J_g^M = J_g^{QM}$ и разрешив с учетом (2) и (3) полученное уравнение относительно разницы $V_{oc}^M - V_{oc}^{QM} = \Delta V_{oc}$, находим искомое падение напряжения на участке с $A = 1$

$$\Delta V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left[1 + \frac{r}{r_s} \exp\left(\frac{\Delta E_g}{kT}\right)\right]. \quad (7)$$

Предложенная модель была применена к экспериментальным данным. На рис. 3 показаны зависимо-

сти от r трех величин: E_g^Q , ΔV_{oc} и J_0^Q . Зависимость $E_g^Q(r)$ была аппроксимирована линейной функцией $E_g^Q(r) = (1.210 - 0.011r)$ [eV] (рис. 3, *a*, штриховая линия). Функция $E_g^Q(r)$ позволяет получить $\Delta E_g(r) = E_g - E_g^Q(r)$, где значение $E_g = 1.4255$ eV определено экспериментально (рис. 2). С использованием полученной зависимости $\Delta E_g(r)$ и выражения (7) была проведена аппроксимация экспериментальной зависимости $\Delta V_{oc}(r)$ (рис. 3, *a*, сплошная линия) и определен безразмерный параметр $r_s = 140$. Полученные функция $\Delta V_{oc}(r)$ и значение величины r_s позволили аппроксимировать при помощи (4) исследуемую зависимость тока насыщения от числа рядов КО (рис. 3, *b*, сплошная линия) и определить параметр $J_z = 1.4 \cdot 10^5$ A/cm². Отметим, что этот параметр близок к определенному в работах [17,18], где $J_z = 2.5 \cdot 10^5$ A/cm².

Таким образом, в работе экспериментально определены зависимости J_0 , E_g^Q , ΔE_g и ΔV_{oc} от числа рядов КО. Обнаружена сверхлинейность зависимости $J_0(r)$. Предложена и применена модель, адекватно описывающая исследуемые зависимости, и найдены параметры $r_s = 140$ и $J_z = 1.4 \cdot 10^5$ A/cm². Модель позволяет описывать ток насыщения $p-n$ -перехода с КО, а значит, прогнозировать основные параметры солнечных элементов на его основе, в том числе эффективность.

Благодарности

Авторы выражают благодарность М.В. Нахимович за измерение спектров электролюминесценции и зависимостей напряжения холостого хода от фотогенерированного тока.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (соглашение 17-72-20146).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Bailey C., Hubbard S., Polly S., Forbes D.V., Raffaele R.P. // Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 2009. V. 1121. P. 1121-N10-02. DOI: <https://doi.org/10.1557/PROC-1121-N10-02>
- [2] Bailey C.G., Forbes D.V., Raffaele R.P., Hubbard S.M. // Appl. Phys. Lett. 2011. V. 98. P. 163105.
- [3] Chan S., Kim D., Sanchez A.M., Zhang Y., Tang M., Wu J., Liu H. // IET Optoelectron. 2019. V. 13. P. 215–217.
- [4] Fujii H., Toprasertpong K., Wang Y., Watanabe K., Sugiyama M., Nakano Y. // Prog. Photovolt.: Res. Appl. 2014. V. 22. P. 784–795.
- [5] Toprasertpong K., Fujii H., Thomas T., Führer M., Alonso-Álvarez D., Farrell D.J., Watanabe K., Okada Y., Ekins-Daukes N.J., Sugiyama M., Nakano Y. // Prog. Photovolt.: Res. Appl. 2016. V. 24. P. 533–542.

- [6] *Ekins-Daukes N.J., Barnes J.M., Barnham K.W.J., Connolly J.P., Mazzer M., Clark J.C., Grey R., Hill G., Pate M.A., Roberts J.S.* // *Solar Energy Mater. Solar Cells.* 2001. V. 68. P. 71–87.
- [7] *Sugiyama M., Fujii H., Katoh T., Toprasertpong K., Sodabanlu H., Watanabe K., Alonso-Álvarez D., Ekins-Daukes N.J., Nakano Y.* // *Prog. Photovolt.: Res. Appl.* 2016. V. 24. P. 1606–1614.
- [8] *Mintairov M.A., Evstropov V.V., Shvarts M.Z., Mintairov S.A., Saliy R.A., Kalyuzhnyy N.A.* // *AIP Conf. Proc.* 2016. V. 1748. P. 050003.
- [9] *Mintairov M.A., Evstropov V.V., Mintairov S.A., Shvarts M.Z., Kalyuzhnyy N.A.* // *Appl. Phys. Express.* 2019. V. 12. P. 035005.
- [10] *Минтаиров М.А., Евструпов В.В., Минтаиров С.А., Салий Р.А., Шварц М.З., Калюжный Н.А.* // *ФТП.* 2018. Т. 52. В. 10. С. 1126–1130.
DOI: 10.21883/FTP.2018.10.46451.8878 [Пер. версия: 10.1134/S1063782618100135].
- [11] *Mintairov S.A., Kalyuzhnyy N.A., Lantratov V.M., Maximov M.V., Nadtochiy A.M., Rouvimov S., Zhukov A.E.* // *Nanotechnology.* 2015. V. 26. P. 385202.
- [12] *Андреев В.М., Грилихес В.А., Румянцев В.Д.* Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения. Л.: Наука, 1989. 310 с. [*Andreev V.M., Grilikhes V.A., Romyantsev V.D.* Photovoltaic conversion of concentrated sunlight. John Wiley&Sons Ltd, 1997. 308 p.]
- [13] *Mintairov S.A., Evstropov V.V., Kalyuzhnyy N.A., Maximov M.V., Mintairov M.A., Nadtochiy A.M., Pavlov N.V., Shvarts M.Z., Zhukov A.E.* // *Appl. Phys. Express.* 2020. V. 13. P. 015009.
- [14] *Bailey C.G., Forbes D.V., Polly S.J., Bittner Z.S., Dai Y., MacKos C., Raffaele R.P., Hubbard S.M.* // *IEEE J. Photovolt.* 2012. V. 2. P. 269–275.
- [15] *Forbes D.V., Hubbard S.M., Bailey C., Polly S., Andersen J., Raffaele R.* // *Proc. SPIE.* 2010. V. 7772. P. 77720C-1.
- [16] *Bushnell D.B., Tibbits T.N.D., Barnham K.W.J., Connolly J.P., Mazzer M., Ekins-Daukes N.J., Roberts J.S., Hill G., Airey R.* // *J. Appl. Phys.* 2005. V. 97. P. 124908.
- [17] *Минтаиров М.А., Евструпов В.В., Минтаиров С.А., Шварц М.З., Калюжный Н.А.* // *Письма в ЖТФ.* 2020. Т. 46. В. 7. С. 29–31.
- [18] *Mintairov M.A., Evstropov V.V., Mintairov S.A., Shvarts M.Z., Kalyuzhnyy N.A.* // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019. V. 1410. P. 012097.