

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

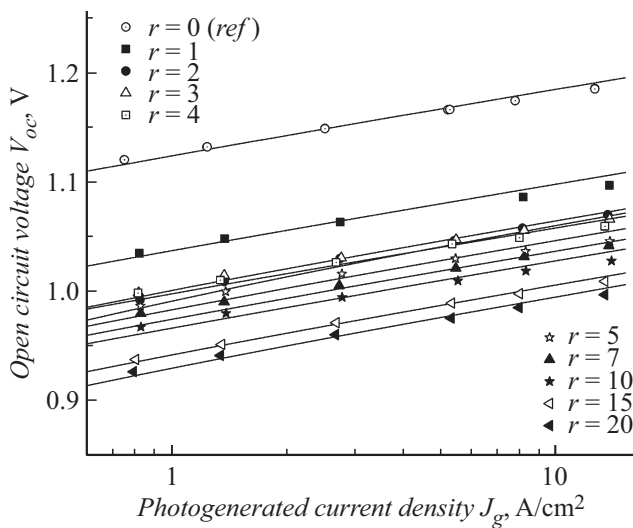


Рис. 1. Зависимости напряжения холостого хода от фотогенерированного тока при разном числе рядов (r) квантовых объектов. Символы — эксперимент, сплошные линии — аппроксимация двухдиодной моделью [8].

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 ширин 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 .

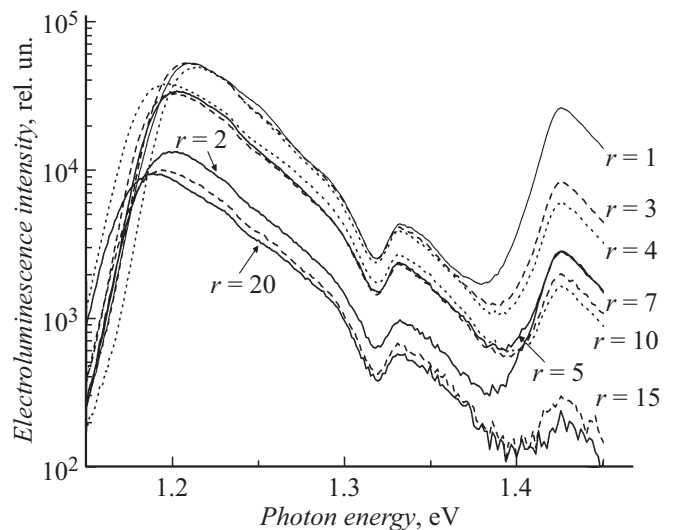


Рис. 2. Спектры электролюминесценции GaAs-солнечного элемента при различном числе рядов (r) квантовых объектов. Провал при $h\nu \approx 1.1$ eV, скорее всего, имеет аппаратное происхождение.

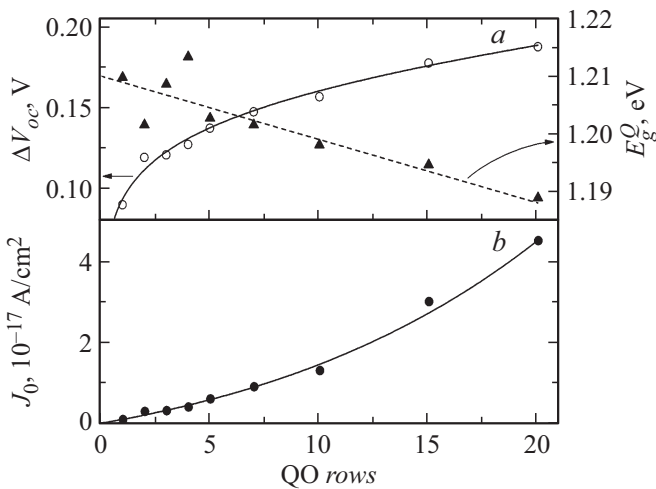


Рис. 3. *a* — зависимости от числа рядов квантовых объектов падения напряжения холостого хода относительно реферного образца (кружки — эксперимент, сплошная линия — аппроксимация по формуле (7)) и ширины запрещенной зоны квантового объекта (треугольники — эксперимент, штриховая прямая — линейная аппроксимация).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