

07.2

Определение по спектру фототока ширины запрещенной зоны $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ $p-n$ -переходов на метаморфном буфере

© М.А. Минтаиров, В.В. Евстропов, С.А. Минтаиров, М.З. Шварц, Н.А. Калужный

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

E-mail: mamint@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 15 октября 2019 г.

В окончательной редакции 30 декабря 2019 г.

Принято к публикации 30 декабря 2019 г.

Определена связь между шириной запрещенной зоны GaInAs гомо- $p-n$ -переходов и током насыщения. Для этого предложен и обоснован метод определения ширины запрещенной зоны $p-n$ -перехода по спектру квантового выхода фототока. Метод применен для $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ $p-n$ -переходов, полученных с помощью металлоорганической газовой эпитаксии; $p-n$ -переходы выращивались на метаморфных буферах. Разница между шириной запрещенной зоны, определенной при помощи предложенного метода и по положению максимума спектра электролюминесценции, не превышала 3 meV. Установлено, что ток насыщения экспоненциально зависит от ширины запрещенной зоны и эта зависимость характеризуется токовым инвариантом.

Ключевые слова: многопереходный солнечный элемент, метаморфный буфер, лазерный фотоэлектрический преобразователь, электролюминесценция, спектр фототока, ток насыщения, правило Урбаха.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.07.49216.18078

Исследования в области разработки фотовольтаических приборов с гомо- $p-n$ -переходами на основе твердого раствора GaInAs являются актуальными в настоящее время. Это связано как с разработкой многопереходных солнечных элементов [1–3], так и с созданием фотодетекторов и высокоэффективных фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения с заданной шириной запрещенной зоны [4–6]. При создании таких фотовольтаических приборов используется технология получения GaInAs на метаморфном буфере, что позволяет получать слои $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ в широком диапазоне составов. Ранее [7] было исследовано изменение параметров при разном составе x и получена важная зависимость — ток насыщения (J_0)–ширина запрещенной зоны (E_g). Отметим, что ток насыщения является базовым параметром, определяющим основные фотовольтаические характеристики $p-n$ -перехода. Определение ширины запрещенной зоны исследуемых $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ $p-n$ -переходов может быть выполнено различными способами. В работе [7] она определялась как по положению максимума спектра электролюминесценции, так и на основе анализа спектра внешнего квантового выхода фототока. В настоящей работе приведено обоснование второго метода и выполнено сравнение зависимостей J_0-E_g , полученных как при помощи этого метода, так и по положению максимума спектра электролюминесценции. Исследуемые структуры были выращены при помощи металлоорганической газовой эпитаксии. Рост производился на подложках GaAs-n (100), разориентированных на 6° в направлении [111]. На подложках формировался многоступенчатый метаморфный буфер GaInAs , обеспечивающий эффективный загиб прорастающих дислокаций на интерфейсах буферных слоев и выход на слой $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ с

заданным составом x , где значение x варьировалось в диапазоне 0.22–0.26. На метаморфном буфере выращивалась гетероструктура фотоэлектрического преобразователя на основе $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ $p-n$ -перехода. Фотопреобразователи на основе активной области в указанном диапазоне составов обеспечивают максимальный квантовый выход фототока для лазерного излучения 1064 nm [5]. Кроме того, в работе исследовался фотоэлектрический преобразователь с GaAs $p-n$ -переходом, выращенным на GaAs -подложке без метаморфного буфера. Для всех исследуемых структур были измерены спектры интенсивности электролюминесценции и внешнего квантового выхода фототока. Также были использованы значения токов насыщения J_0 , полученные в работе [7].

На рис. 1 приведено сравнение вариантов определения E_g на примере GaAs $p-n$ -перехода. Как известно, в спектре края поглощения есть экспоненциальный участок, линейный в полулогарифмическом масштабе, — „хвост“ (линия) Урбаха [8,9]. Согласно предложенному методу, форма спектра фототока характеризуется двумя прямыми линиями (рис. 1): наклонной (линия Урбаха) и горизонтальной (полка в спектре поглощения с энергией, большей E_g). В аналитическом виде соответствующая кусочно-непрерывная функция $E(h\nu)$ имеет вид

$$E(h\nu) = \begin{cases} E_s \exp\left(\frac{h\nu - E_g}{u}\right) & \text{при } h\nu < E_g \text{ (линия Урбаха),} \\ E_s & \text{при } h\nu \geq E_g \text{ (горизонтальная линия),} \end{cases} \quad (1)$$

где E — внешний квантовый выход фототока, E_s — предельное значение E , $u = [d(\ln(E))/d(h\nu)]^{-1}$ — наклон Урбаха. Точка пересечения двух линий — горизон-

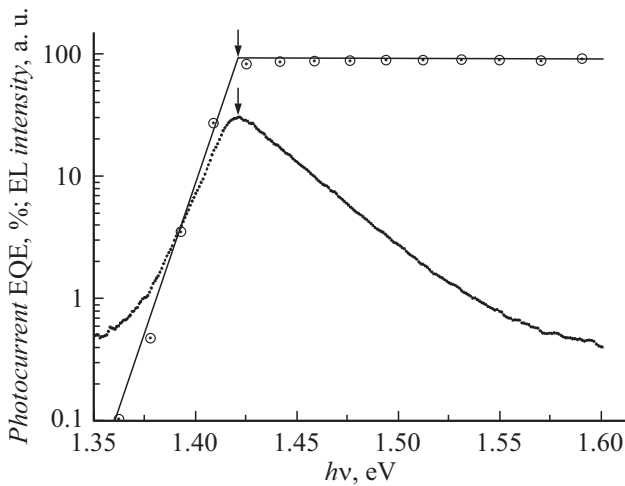


Рис. 1. Сопоставление двух способов определения ширины запрещенной зоны p - n -перехода: на основе анализа (сплошная линия) спектра внешнего квантового выхода фототока (кружки) и по положению максимума спектра интенсивности электролюминесценции (точки). Экспериментальные спектры приведены для GaAs p - n -перехода.

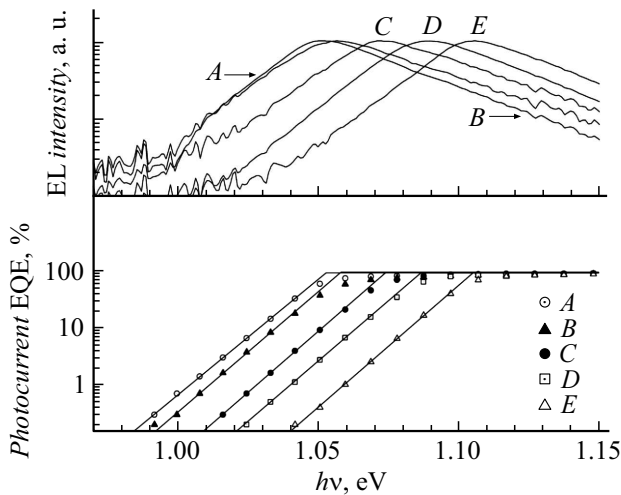


Рис. 2. Сопоставление набора спектров фототока (внизу) с набором спектров электролюминесценции (вверху) для $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ p - n -переходов. Содержание In в твердом растворе x : A — 0.257, B — 0.260, C — 0.245, D — 0.232, E — 0.220.

тальной и Урбаха (верхняя стрелка на рис. 1) — дает искомую ширину запрещенной зоны p - n -перехода.

Согласно другому способу (определение по спектру электролюминесценции), искомая ширина запрещенной зоны равна спектральному положению максимума интенсивности электролюминесценции (нижняя стрелка на рис. 1). Отметим, что оба использованных варианта дают близкие (с разницей в 1 meV) значения ширины запрещенных зон (см. таблицу).

На рис. 2 показаны спектры внешнего квантового выхода фототока и электролюминесценции для пяти образцов, содержащих $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ p - n -переходы

Параметры $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ p - n -переходов

x	$E_{g,\text{PH}}, \text{eV}$	$E_{g,\text{EL}}, \text{eV}$	$J_{01}, \text{A/cm}^2$	$J_{02}, \text{A/cm}^2$
0.000	1.421	1.422	$4.0 \cdot 10^{-20}$	$1.0 \cdot 10^{-10}$
0.220	1.105	1.106	$2.0 \cdot 10^{-14}$	$4.0 \cdot 10^{-8}$
0.232	1.087	1.090	$2.0 \cdot 10^{-14}$	$3.0 \cdot 10^{-8}$
0.245	1.074	1.071	$8.0 \cdot 10^{-14}$	$7.0 \cdot 10^{-8}$
0.260	1.058	1.057	$1.6 \cdot 10^{-13}$	$1.2 \cdot 10^{-7}$
0.257	1.053	1.051	$1.0 \cdot 10^{-13}$	$5.0 \cdot 10^{-8}$

Примечание. x — содержание In в твердом растворе, $E_{g,\text{PH}}$ — ширина запрещенной зоны, определенная по спектру фототока, $E_{g,\text{EL}}$ — по спектру электролюминесценции, J_{01} , J_{02} — токи насыщения для двухдиодной модели.

($x = 0.22$ – 0.26). Спектры квантового выхода проанализированы при помощи предложенного метода (результат анализа — сплошные линии на рис. 2, внизу), что позволило определить искомые ширины запрещенных зон. Также E_g были определены по положению максимумов спектров электролюминесценции (рис. 2, вверху). Результаты сгруппированы в таблице. Также таблица дополнена данными, полученными в работе [7]: J_{01} (ток насыщения для токовой компоненты с коэффициентом идеальности $A = 1$) и J_{02} ($A = 2$). Отметим, что наклоны (u в формуле (1)) всех линий Урбаха (рис. 2, внизу) приблизительно одинаковы и составляют $u = 0.0103$ eV с погрешностью 0.4 meV. Это позволяет прогнозировать форму спектра фототока для $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ p - n -перехода с заданной шириной запрещенной зоны.

На рис. 3 построены зависимости токов насыщения J_{01} и J_{02} от ширины запрещенной зоны. Также на рисунке приведены расчетные кривые для данных зависимостей, которые, согласно [7], описываются следующим

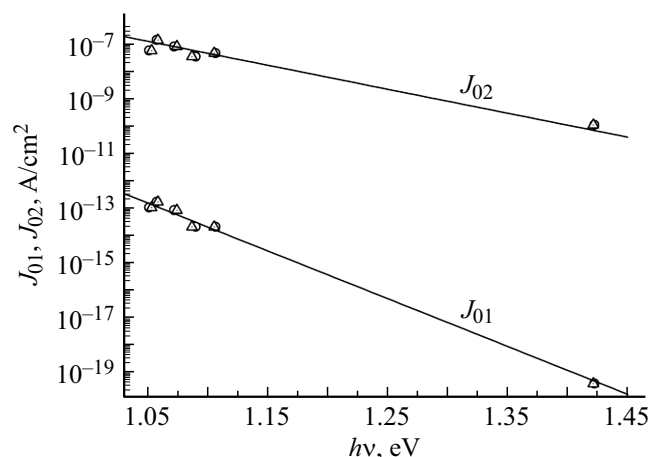


Рис. 3. Связь между шириной запрещенной зоны $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ p - n -переходов и токами насыщения для двухдиодной модели: J_{01} (коэффициент идеальности $A = 1$) и J_{02} ($A = 2$). Кружки — ширина запрещенной зоны определена по спектру фототока, треугольники — по спектру электролюминесценции, сплошные линии — зависимости, рассчитанные по формуле (2).

выражением:

$$J_{0A} = J_{zA} \exp\left(\frac{-E_g}{AkT}\right), \quad A = 1 \text{ или } 2, \quad (2)$$

где A — коэффициент идеальности, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура, J_{zA} — токовый инвариант (в расчетах $J_{z1} = 2.5 \cdot 10^5 \text{ A/cm}^2$, $J_{z2} = 1.4 \cdot 10^2 \text{ A/cm}^2$). Независимо от способа определения ширины запрещенной зоны экспериментальные значения хорошо ложатся на расчетную кривую (рис. 3).

Таким образом, был предложен и обоснован метод определения ширины запрещенной зоны по спектру квантового выхода фототока. Установлена связь экспоненциального характера между шириной запрещенной зоны и током насыщения GaInAs p - n -переходов. Эта связь характеризуется токовым инвариантом.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН № 22 „Перспективные физико-химические технологии специального назначения“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] King R.R., Law D.C., Edmondson K.M., Fetzer C.M., Kinsey G.S., Yoon H., Sherif R.A., Karam N.H. // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 90. N 18. P. 183516.
- [2] Geisz J.F., Steiner M.A., Schulte K.L., Young M., France R.M., Friedman D.J. // AIP Conf. Proc. 2018. V. 2012. P. 040004.
- [3] Geisz J.F., Steiner M.A., Jain N., Schulte K.L., France R.M., McMahon W.E., Perl E.E., Friedman D.J. // IEEE J. Photovolt. 2018. V. 8. N 2. P. 626–632.
- [4] Kalyuzhnyy N.A., Emelyanov V.M., Evstropov V.V., Mintairov S.A., Mintairov M.A., Nahimovich M.V., Saliy R.A., Shvarts M.Z. // AIP Conf. Proc. 2019. V. 2149. P. 050006.
- [5] Kalyuzhnyy N.A., Mintairov S.A., Nadtochiy A.M., Nevedomskiy V.M., Rybalchenko D.V., Shvarts M.Z. // Electron. Lett. 2017. V. 53. N 3. P. 173–175.
- [6] Kim Y., Shin H.-B., Lee W.-H., Jung S.H., Kim C.Z., Kim H., Lee Y.T., Kang H.K. // Solar Energy Mater. Solar Cells. 2019. V. 200. P. 109984.
- [7] Mintairov M.A., Evstropov V.V., Mintairov S.A., Shvarts M.Z., Kalyuzhnyy N.A. // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. V. 1410. P. 012097.
- [8] Moss T.S., Hawkins T.D.F. // Infrared Phys. 1961. V. 1. N 2. P. 111–115.
- [9] Pankove J.I. Optical processes in semiconductors. Prentice-Hall, Inc., 1971. [Панков Ж. Оптические процессы в полупроводниках. М.: Мир, 1973. Гл. 3.1.5].