

07

Влияние механизмов токопрохождения на эффективность фотодиодов $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$

© В.С. Калиновский, Е.В. Контрош, Г.В. Климко, Т.С. Табаров, С.В. Иванов, В.М. Андреев

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

E-mail: vitak.sopt@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 24 июля 2018 г.

Выполнены исследования фотовольтаических характеристик гетероструктурных $p-i-n$ -фотодиодов $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$, полученных методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Достигнуты значения КПД 50% при преобразовании монохроматического излучения в фотовольтаическом режиме работы с плотностью мощности до 200 W/cm^2 на длине волны $\lambda = 830 \text{ nm}$. Показана связь между „токами насыщения“ для диффузионного механизма токопрохождения (Шокли) в $p-i-n$ -фотодиодах, рассчитанными из темновых вольт-амперных характеристик, и полученными экспериментальными значениями КПД. При увеличении на порядок величины „тока насыщения“ диффузионного механизма токопрохождения наблюдается относительное снижение КПД от максимального значения на величину более 10% при возбуждении постоянным и импульсным монохроматическими излучениями.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.22.46919.17471

За последние годы достигнут значительный прогресс в разработке эффективных фотоэлектрических преобразователей мощного лазерного излучения, работающих в фотовольтаическом режиме, без приложения внешнего обратного напряжения [1–3]. Высокая эффективность преобразователей монохроматического излучения достижима при оптимальном согласовании ширины запрещенной зоны полупроводникового материала с энергией падающих фотонов. Для излучения в диапазоне длин волн от 800 до 850 nm максимальный КПД обеспечивается в фотодиодах на основе GaAs [1,4]. При этом эффективность фотопреобразования определяется доминирующими механизмами токопрохождения

в области объемного заряда и квазинейтральных областях поглощающих слоев p - n -перехода [5–8]. В настоящей работе экспериментально показана связь величины предэкспоненциального множителя — „тока насыщения“ для диффузионного (Шокли) механизма токопрохождения (J_{0d}) — и КПД p - i - n -фотодиодов (ФД) $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ при преобразовании в фотовольтаическом режиме постоянного и импульсного монохроматического излучения в диапазоне плотности падающей оптической мощности 50–650 W/cm^2 .

Фотодиодные гетероструктуры $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ ($x = 0.12$) были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии (на оборудовании STE3526, SemiTEq) на 2'' подложках n -GaAs (001) с использованием элементарных твердотельных испарительных источников Ga и Al и клапанного источника с кречером As_4 . В качестве легирующих примесей использовались Si(n) и Be(p). Исследуемая структура включала в себя тыльный потенциальный барьер n - $\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$; n -GaAs ($n = 5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)/ i -GaAs ($n, 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) толщиной 0.5/1 μm ; эмиттер p -GaAs толщиной 0.7 μm с градиентным легированием; широкозонное окно p - $\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$ толщиной 2 μm ($p = 5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) и контактный слой p^+ -GaAs.

На выращенной эпитаксиальной пластине с использованием фотолитографии были сформированы чипы ФД с общей площадью 1 mm^2 . На фронтальной фоточувствительной поверхности чипов диаметром 500 μm с помощью фотолитографии была сформирована контактная сетка с последующим удалением контактного слоя p^+ -GaAs между контактными шинками и нанесением антиотражающего покрытия $\text{TiO}_x/\text{SiO}_2$, оптимизированного на диапазон длин волн 700–900 nm .

Выполнены экспериментальные исследования темновых и световых вольт-амперных характеристик (ВАХ) p - i - n -ФД $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$. Измерения ВАХ проводились при комнатной температуре. Световые ВАХ измерялись в фотовольтаическом режиме при возбуждении непрерывным монохроматическим излучением на длине волны 830 nm с плотностью мощности до 200 W/cm^2 и при возбуждении импульсным излучением на длине волны $\lambda = 780 \text{ nm}$ с пиковой мощностью до 650 W/cm^2 и длительностью импульсов на полувывоте амплитуды $\tau_{0.5} = 300 \text{ ps}$.

Были измерены вольт-емкостные характеристики (ВЕХ) образцов ФД на частоте 100 kHz при нулевом и прямом напряжениях смещения до 1.0 V и рассчитаны параметры области объемного заряда

$p-i-n$ -переходов. Концентрация носителей в нелегированной i -области перехода в исследованных образцах составляла $\leq 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, а значения измеренных емкостей приведены в таблице.

Спектральные зависимости фотоответа образцов ФД представлены на рис. 1. Максимальное значение внешнего квантового выхода фотоответа Q_{ext} с оптическими потерями на затенение фронтальной контактной сеткой на длине волны 830 нм составило 70%. При вычитании потерь на затенение значение Q_{ext} составило более 85%. На длине волны 780 нм внешний квантовый выход для исследованных ФД составил 35% (рис. 1). Снижение квантового выхода фотоответа при уменьшении длины волны излучения определяется увеличением поглощения оптического излучения в широкозонном поверхностном слое $p\text{-Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$ с $\lambda \leq 820 \text{ nm}$.

Согласно методике, описанной в работах [6,7], с использованием трехкомпонентной экспоненциальной модели ВАХ ФД

$$J = \sum_{i=1}^3 J_{0i} (\exp(V_{\varphi}/A_i \varepsilon) - 1) \quad (1)$$

был выполнен анализ прямых темновых ВАХ и получены значения предэкспоненциальных множителей („токов насыщения“) J_{0i} , диодных коэффициентов (коэффициентов идеальности) A_i и последовательного сопротивления структуры R_S для трех механизмов транспорта неосновных носителей заряда в области объемного заряда $p-i-n$ -перехода: туннельно-ловушечного, „избыточного“ с диодным коэффициентом $A_t > 2$, рекомбинационного (Саа–Нойса–Шокли) с $A_r = 2$ и диффузионного (Шокли) с $A_d = 1$. Полученные значения предэкспоненциальных множителей („токов насыщения“) J_{0i} , диодных коэффициентов (коэффициентов идеальности) A_i и последовательного сопротивления структуры R_S исследованных ФД приведены в таблице. Экспериментальные прямые темновые вольт-амперные характеристики представлены на рис. 1. Показан фитинг темновой ВАХ с расчетными значениями для двух компонент использованной экспоненциальной модели (1): с одинаковыми для всех образцов значениями $J_{0r} = 6 \cdot 10^{-10} \text{ A/cm}^2$ ($A_r = 2$) в случае рекомбинационного механизма токопрохождения и различными значениями J_{0d} ($A_d = 1$) в случае диффузионного (для ФД1 — экспонента 1', для ФД2 — экспонента 2', для ФД3 — экспонента 3'). Экспоненты для туннельно-ловушечного (избыточного)

Значения емкостей C ФД при прямом напряжении смещения U_{dir} , последовательного сопротивления R_s , „токов насыщения“ J_{0i} и диодных коэффициентов A_i для образцов $p-i-n$ -ФД $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$, полученные из экспериментальных ВЕХ и темновых ВАХ при прямом напряжении смещения

Номер ФД	C , pF		R_s , $m\Omega \cdot cm^2$	J_{0r} , $10^{-8} A/cm^2$ ($A_r > 2$)	J_{0r} , $10^{-10} A/cm^2$ ($A_r = 2$)	J_{0d} , $10^{-20} A/cm^2$ ($A_d = 1$)
	$U_{dir} = 0 V$	$U_{dir} = 0.8 V$				
1	63.1	98.0	≥ 4.0	1.0	6.0	1.0
2	63.2	98.0	≥ 4.0	> 1.0	6.0	2.0
3	63.6	100.0	≥ 4.0	≥ 1.0	6.0	10.0

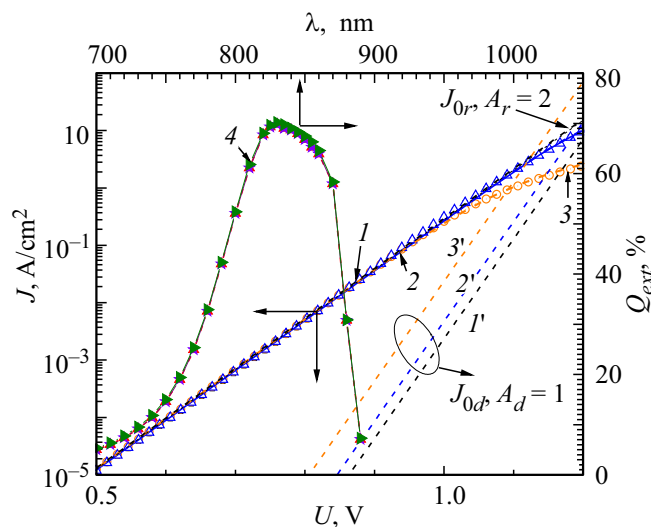


Рис. 1. Прямые темновые ветви ВАХ образцов фотодиодов ФД1 (1, 1'), ФД2 (2, 2'), ФД3 (3, 3') с расчетными значениями „токов насыщения“, одинаковыми для всех образцов в случае рекомбинационного механизма токопрохождения ($J_{0r} = 6 \cdot 10^{-10} \text{ A}/\text{cm}^2$, $A_r = 2$) (1-3) и различными в случае диффузионного ($J_{0d}, A_d = 1$) (1'-3'). 4 — спектральная характеристика внешней квантовой эффективности Q_{ext} для всех исследованных $p-i-n$ -ФД $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$.

механизма токопрохождения не приведены, так как рабочие плотности фототока в рассматриваемом диапазоне падающей оптической мощности определяются главным образом рекомбинационным и диффузионным механизмами токопрохождения.

Полученные из темновых ВАХ, ВЕХ и спектральных измерений параметры исследованных структур приведены в таблице и показаны на рис. 1. Видна идентичность исследованных образцов ФД, за исключением различия в значениях „токов насыщения“ J_{0d} диффузионного механизма токопрохождения (Шокли).

Рассчитанные из световых ВАХ значения КПД приведены на рис. 2 (кривые 1-3). Из полученных данных видно, что элемент ФД1 с минимальным значением предэкспоненциального множителя (плотности „тока насыщения“) $J_{0d} = 1 \cdot 10^{-20} \text{ A}/\text{cm}^2$ имеет максимальное значе-

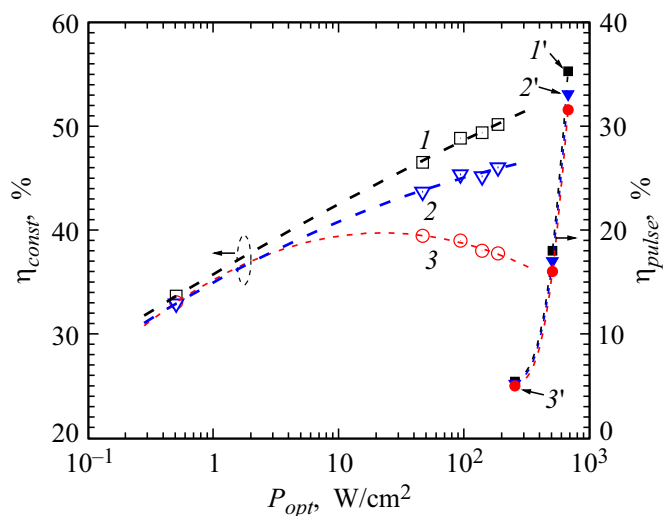


Рис. 2. Зависимости КПД образцов фотодиодов ФД1 (1, 1'), ФД2 (2, 2'), ФД3 (3, 3') от падающей мощности лазерного излучения при освещении в непрерывном режиме на длине волны $\lambda = 830$ nm (25°C) (кривые 1–3) и при импульсном возбуждении на длине волны $\lambda = 780$ nm (кривые 1'–3').

ние КПД, равное 50%, при освещении постоянным монохроматическим излучением на длине волны $\lambda = 830$ nm и плотности мощности 200 W/cm^2 . ФД3 с наибольшим значением $J_{0d} = 1 \cdot 10^{-19} \text{ A/cm}^2$ имеет минимальное значение КПД (38%). На рис. 2 приведены также значения КПД для пиковой мощности (кривые 1'–3') при импульсном облучении ($\lambda = 780$ nm) исследуемых $p-i-n$ -ФД $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As/GaAs}$. Согласно полученным зависимостям, образец ФД1, имеющий минимальное значение плотности „тока насыщения“ J_{0d} , обеспечивает на длине волны $\lambda = 780$ nm значение КПД 35.3%. ФД3 с наибольшим значением $J_{0d} = 1 \cdot 10^{-19} \text{ A/cm}^2$ имеет при аналогичном импульсном возбуждении меньшее значение КПД (31.6%). Полученные значения КПД при преобразовании излучения с $\lambda = 780$ nm меньше, чем в случае преобразования излучения на длине волны $\lambda = 830$ nm. Это объясняется меньшим значением внешнего квантового выхода фотоответа в случае $\lambda = 780$ nm (рис. 1, кривая 4), чем на длине волны $\lambda = 830$ nm.

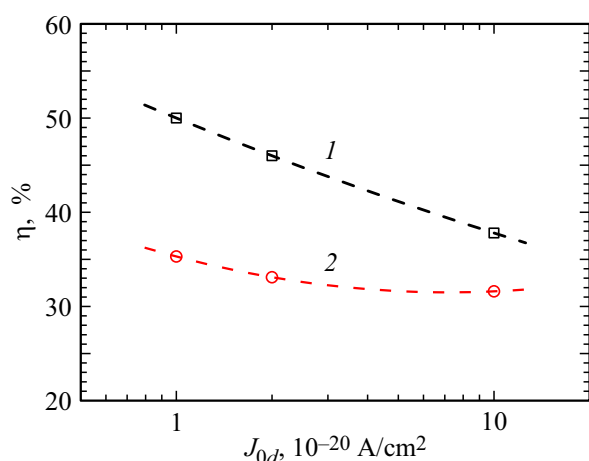


Рис. 3. Зависимости КПД от значений „токов насыщения“ J_{0d} для диффузионного механизма токопрохождения, полученных из темновых ВАХ для трех образцов фотодиодов: ФД1, ФД2, ФД3, при облучении постоянным монохроматическим излучением с длиной волны $\lambda = 830 \text{ nm}$ (1) и импульсным с $\lambda = 780 \text{ nm}$ (2) в диапазоне мощностей $50\text{--}650 \text{ W/cm}^2$.

С использованием параметров, рассчитанных из темновых и нагрузочных ВАХ и импульсных характеристик исследованных ФД, были построены зависимости КПД фотодиодов от „токов насыщения“, соответствующих диффузионному механизму токопрохождения, при $\lambda = 830 \text{ nm}$ (рис. 3, кривая 1) и $\lambda = 780 \text{ nm}$ (рис. 3, кривая 2). Из приведенных зависимостей (рис. 2, 3) хорошо видна связь между величинами J_{0d} ($A_d = 1$) для диффузионного механизма токопрохождения неосновных носителей и КПД преобразования монохроматического излучения в фотовольтаическом режиме работы $p\text{--}i\text{--}n$ -ФД $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ в диапазоне падающей оптической мощности $50\text{--}650 \text{ W/cm}^2$. Чем меньше значение J_{0d} , тем больше значение КПД. Полагаем, что на эффективность преобразования оказывают влияние дефекты, а также уровень и профиль легирования в квазинейтральных областях фотоактивных слоев $p\text{--}i\text{--}n$ -перехода исследованных ФД.

Таким образом, экспериментально подтверждается связь между параметрами, определяемыми исходя из первичной прямой тем-

новой ВАХ, и фотовольтаической характеристикой КПД–падающая оптическая мощность для $p-i-n$ -фотодиодов при преобразовании монохроматического излучения, которая ранее была показана в [8–10] для солнечных элементов.

В работе выполнено комплексное исследование вольт-амперных, вольт-емкостных, спектральных и импульсных характеристик $p-i-n$ -фотодиодов $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ при возбуждении монохроматическим постоянным и импульсным излучениями в диапазоне плотности мощности 50–650 W/cm^2 .

В фотовольтаическом режиме работы $p-i-n$ -ФД показана связь между эффективностью и значениями „токов насыщения“ для диффузионного (Шокли) механизма токопрохождения при возбуждении монохроматическими излучениями на длинах волн 830 и 780 nm . Чем меньше значения „токов насыщения“ J_{0d} , соответствующих диффузионному механизму токопрохождения, тем больше КПД $p-i-n$ -ФД.

Установлено, что рост „токов насыщения“ для диффузионного механизма токопрохождения на порядок приводит к снижению КПД: при возбуждении непрерывным монохроматическим излучением на длине волны 830 nm от 50 до 38%, а при возбуждении на длине волны 780 nm — от 35 до 32%.

Путем вариации „токов насыщения“ J_{0d} диффузионного механизма токопрохождения показана связь между темновой ВАХ и зависимостью КПД от плотности падающей оптической мощности $p-i-n$ -фотодиодов при преобразовании мощного ($< 10^3 \text{ W}/\text{cm}^2$) монохроматического излучения.

Список литературы

- [1] Андреев В.М. // Современная электроника. 2014. № 6. С. 20–25.
- [2] Reichmuth S., Helmers H., Philipps S., Schachtner M., Siefer G., Bett A. // Prog. Photovolt.: Res. Appl. 2017. V. 25. P. 67–75.
- [3] York M.C.A., Fafard S. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2017. V. 50. P. 173003 (1–22).
- [4] Höhn O., Walker A.W., Bett A.W., Helmers H. // Appl. Phys. Lett. 2016. V. 108. P. 241104.
- [5] Андреев В.М., Гребенищикова Е.А., Дмитриев П.А., Ильинская Н.Д., Калиновский В.С., Контрош Е.В., Малевская А.В., Усикова А.А. // ФТП. 2014. Т. 48. В. 9. С. 1249–1253.

- [6] *Kalinovsky V.S., Grebenshchikova E.A., Ilinskaya N.D., Kontrosh E.V., Lebedeva N.M., Malevskaya A.V., Andreev V.M.* // Techn. Digest of the 6th World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion. Kyoto, 2014. P. 793–794.
- [7] *Kalinovsky V.S., Grebenshchikova E.A., Dmitriev P.A., Ilinskaya N.D., Kontrosh E.V., Malevskaya A.V., Usikova A.A., Andreev V.M.* // AIP Conf. Proc. 2014. V. 1616. P. 326–330.
- [8] *Фаренбрух А., Бьюб Р.* // Солнечные элементы. Теория и эксперимент. М.: Энергоатомиздат, 1987. С. 126.
- [9] *Андреев В.М., Евстропов В.В., Калиновский В.С., Лантратов В.М., Хвостиков В.П.* // ФТП. 2009. Т. 43. В. 5. С. 671–678.
- [10] *Kalinovsky V.S., Evstropov V.V., Lantratov V.M., Pokrovsky P.V., Andreev V.M.* // Proc. 25th Eur. Photovoltaic Solar Energy Conf. and 5th World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion. Valencia, 2010. P. 979–985.