

Методики расчета и контроля разностной дозы примеси в лавинных InGaAs/InP структурах

А. К. Будтолаев, Н. В. Кравченко, П. Е. Хакуашев, И. В. Чинарева

В данной статье приводятся методики расчета разностной дозы примеси Q_a и ее контроля при планарной технологии изготовления лавинных фотодиодов (ЛФД) на основе гетероэпитаксиальных структур InGaAs/InP. Разработанные методики контроля разностной дозы в лавинных InGaAs/InP структурах использовались на различных этапах изготовления ЛФД. Показана необходимость более жесткого контроля доз концентрации производителем эпитаксиальных структур, согласования методик их измерения, коррекции диффузионных процессов под конкретные дозы примесей.

Ключевые слова: лавинный фотодиод, эпитаксиальные гетероструктуры, InGaAs/InP, разностная доза.

Введение

В современных системах оптической связи и оптической дальнометрии основными типами фотоприемников являются $p-i-n$ -фотодиоды и лавинные фотодиоды (ЛФД) на основе InGaAs/InP структур [1]. ЛФД превосходят $p-i-n$ -фотодиоды по пороговым характеристикам, но более сложны в изготовлении. Важнейшей задачей при изготовлении ЛФД является создание определенной разностной дозы примеси Q_a в лавинной области. Величина Q_a определяет практически все параметры ЛФД, а именно: рабочее напряжение U_p , коэффициент умножения M , инерционность $t_{0,1-0,9}$, темновой ток I_m .

Существует две принципиально разные технологии создания ЛФД: мезатехнология и планарная [2, 3]. Мезатехнология существенно проще планарной, причем все слои ЛФД создаются во время эпитаксиального выращивания, поэтому изготовителю ЛФД остается только операции травления и защиты мезы. Недостатком таких ЛФД являются относительно высокие темновые токи и низкая надежность фотоприемников. Разу-

меется, проблема создания нужного значения разностной дозы Q_a при этой технологии является задачей изготовителей эпитаксиальных пластин, а изготовителям ЛФД остаются только функции входного контроля Q_a .

Вторая технология, т.е. планарная технология, является оптимальной с точки зрения фотоэлектрических параметров ЛФД. В планарной технологии существуют также два варианта изготовления ЛФД. При равномерном легировании лавинной области (треугольное поле) величина дозы регулируется временем диффузии. При пиковом легировании (прямоугольное поле) регулируется не величина дозы, а толщина лавинной области.

Целью данной работы являлось создание методики расчета разностной дозы примеси Q_a и ее контроля при планарной технологии изготовления ЛФД на основе InGaAs/InP.

Методика расчета

При инициировании лавины дырками известно выражение для коэффициента умножения M из работы [4]:

$$M := \frac{1}{\left[1 - \int_0^{W_a} \beta(x) \exp \left[\int_x^{W_a} (\alpha(x1) - \beta(x1)) dx1 \right] dx \right]} \quad (1)$$

где β , α , – коэффициенты ионизации дырок и электронной компоненты соответственно; W_a – толщина лавинной области.

Полевые зависимости β и α достаточно сильно разнятся в литературе [5, 6]. Как показали

Будтолаев Андрей Константинович, ведущий инженер-технолог.

Кравченко Николай Владимирович, начальник ПТК, к.т.н.

Хакуашев Павел Евгеньевич, зам. начальник ПТК, к.т.н.

Чинарева Инна Викторовна, ведущий инженер-технолог.

АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

Тел. (495) 672-20-31. E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 17 марта 2017 г.

предварительные расчеты и эксперименты, наиболее достоверными являются результаты [7], приведенные ниже:

$$\alpha(x) = 1,41 \times 10^6 \exp \left[- \left(\frac{1,69 \times 10^6}{E(x)} \right)^{1,23} \right] \quad (2)$$

$$\beta(x) = 2,11 \times 10^6 \exp \left[- \left(1,77 \frac{10^6}{E(x)} \right)^{1,15} \right]. \quad (3)$$

Для координатной зависимости поля использовалось выражение

$$E(x) = \int_x^{W_a} \frac{q}{\varepsilon \times \varepsilon_0} N(x) dx + \Delta E \quad (4)$$

где $N(x)$ – распределение примеси; ΔE – дополнительное поле после прокола структуры.

Для расчета напряжения U и дозы Q_a использовались выражения

$$U = \int_0^{W_a} (E(x)) dx \quad (5)$$

$$Q_a = \int_0^{W_a} N(x) dx. \quad (6)$$

Распределение концентрации примеси $N(x)$, для удобства интегрирования, аппроксимировалось выражением

$$N(x) := \left(\frac{Q}{\sqrt{2\pi}\Delta x} \right) \exp \left[- \left[\frac{(x-x_0)^2}{2\Delta x^2} \right] \right] + Ni \quad (7)$$

где Q – доза пика концентрации; x_0 , Δx – глубина пика и его среднеквадратичное отклонение; Ni – фоновая концентрация в бинарной области.

Значительный объем интегрирования (на базе формул (1)–(6)) выполняется на современных персональных компьютерах в среде Mathcad за вполне разумное время: одна точка по коэффициенту умножения рассчитывается за 1–2 секунды.

Экспериментальные исследования

InGaAs/InP ЛФД изготавливался на эпитаксиальных структурах, выращенных методом МOCVD [8] со следующими параметрами:

- лавинная область InP с фоновым уровнем легирования $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$, толщиной 3,55 мкм,
- лавинная область InP:Si с уровнем легирования $8,1 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$, толщиной 0,31 мкм,
- буферные слои InGaAsP с фоновым уровнем легирования $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$, толщиной 0,15 мкм,
- область поглощения InGaAs с фоновым уровнем легирования $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$, толщиной 2,09 мкм.

Локальный p – n -переход в нелегированной лавинной области InP создавался диффузией Zn [9] на глубине 2,25 мкм.

Доза примеси в пике концентрации составляет $2,51 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Доза фоновой примеси в InP области (с учетом глубины p – n -перехода 2,25 мкм) – $0,13 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

Следовательно, по данным изготовителя пластин, рассчитанное значение разностной дозы – $2,64 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

Для экспериментального определения разностной дозы использовались 3 метода.

Первый метод основывается на анализе CV-характеристик структуры ЛФД, с помощью которых было рассчитано распределение концентрации, представленное на рис. 1.

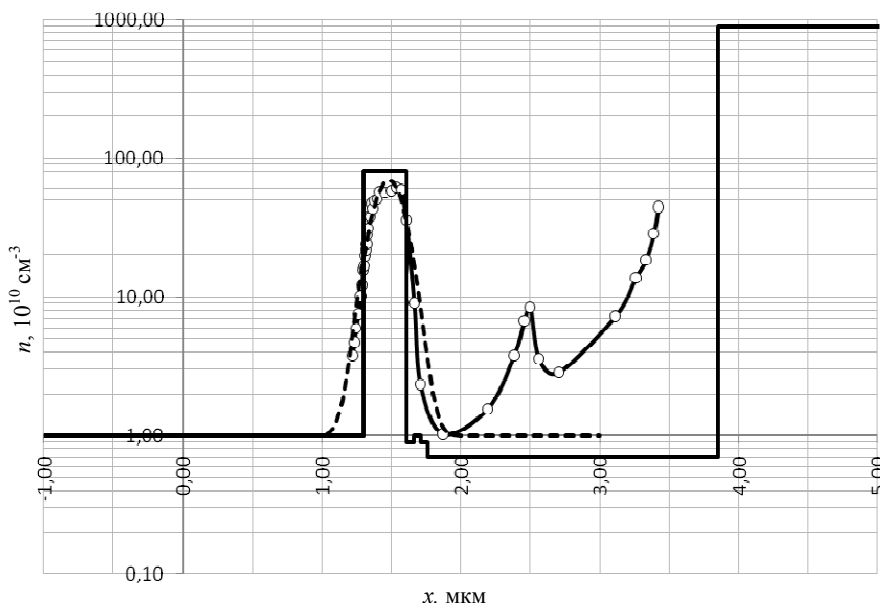


Рис. 1. Распределение концентрации n . Сплошная линия – данные изготовителя структур; сплошная линия с маркерами – экспериментальные значения, прерывистая линия – аппроксимация по формуле 7.

При расчете аппроксимации были использованы следующие параметры: глубина пика $x_0 = 1,48$ мкм, среднеквадратичное отклонение $\Delta x = 0,11$ мкм, доза в пике $1,9 \times 10^{12}$ см⁻². Дозы фоновой примеси InP на толщине 1 мкм составляет $0,1 \times 10^{12}$ см⁻².

Следовательно, экспериментальное значение разностной дозы, определенное по CV-характеристикам составляет $2,0 \times 10^{12}$ см⁻².

Во втором методе определения разностной дозы используется напряжение прокола структуры, т. е. напряжение при котором поле проникает в слой поглощения. Напряжение прокола легко определяется из зависимости коэффициента умножения от напряжения, представленного на рис. 2.

Напряжение прокола данной структуры составляет 44 В. С помощью формул (4)–(7) определяем величину разностной дозы на уровне $1,9 \times 10^{12}$ см⁻².

В третьем методе определения разностной дозы также используется зависимость коэффициента умножения от напряжения, но уже в области более высоких напряжений, чем напряжение прокола (см. рис. 3). На этом рисунке представлены экспериментальная зависимости $M(U)$, а также три расчетные зависимости для доз $1,9 \times 10^{12}$ см⁻², $2,0 \times 10^{12}$ см⁻², $2,1 \times 10^{12}$ см⁻². Как видно, характер экспериментальных и теоретических зависимостей несколько отличается. Скорее всего, это связано с повышенной по сравнению с фоновой концентрацией в области поглощения (см. рис. 1). Но в области рабочих коэффициентов умножения $M = 10$ – 20 теоретические оценки неплохо совпадают с экспериментом. Поэтому, в конечном итоге, можно оценить реальное значение разностной дозы в диапазоне $(1,9$ – $2,1) \times 10^{12}$ см⁻².

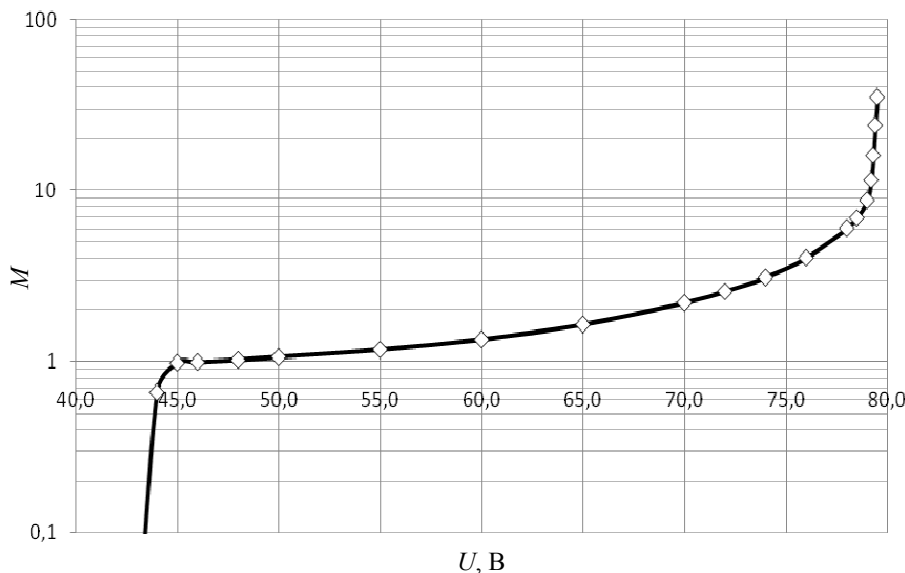


Рис. 2. Зависимость коэффициента умножения M от напряжения смещения U .

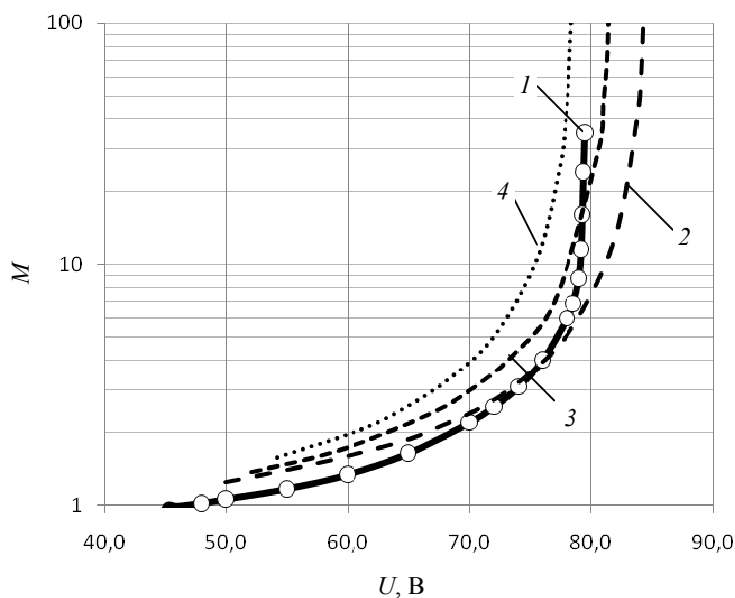


Рис. 3. Зависимость коэффициента умножения M от напряжения смещения U : кривая 1 – эксперимент; кривая 2 расчетная для дозы $1,9 \times 10^{12}$ см⁻²; кривая 3 для дозы $2,0 \times 10^{12}$ см⁻²; кривая 4 для дозы $2,1 \times 10^{12}$ см⁻².

Все значения разностных доз, а именно, рассчитанное по данным изготовителя эпитаксиальных пластин, а также экспериментальные, определенные по трем вышеуказанным методам, приведены в таблице.

Таблица

Разностная доза

Рассчитанная доза	$2,64 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$
Метод CV-характеристик	$2,0 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$
Метод напряжения прокола	$1,9 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$
Метод $M(U)$ характеристик	$(1,9-2,1) \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$

Данные всех трех экспериментальных методов показывают неплохую корреляцию ($\sim 5\%$), но резко (на уровне $\sim 30\%$) отличаются от значения разностной дозы, рассчитанного по данным изготовителя структур.

Заключение

В работе приведены методики расчета разностной дозы примеси Q_a и ее контроля при планарной технологии изготовления лавинных фотодиодов (ЛФД) на основе гетероэпитаксиальных структур InGaAs/InP. Разработанные методики контроля разностной дозы в лавинных InGaAs/InP структурах использовались на различных этапах изготовления ЛФД.

В ходе работы показана применимость трех методов контроля разностной дозы в лавинных InGaAs/InP-структурах:

– метод CV-характеристик может использоваться для выборочного контроля при производстве структур; кроме того, этот метод дополнительно позволяет определять глубину $p-n$ -пере-

хода, что важно при проведении диффузионных процессов;

– метод напряжения прокола оптимально использовать для оперативного контроля структур, измерения разброса разностной дозы по пластинам;

– метод $M(U)$ -характеристик можно использовать на начальном этапе производства структур при подборе рабочих напряжений ЛФД.

Показана необходимость более жесткого контроля доз концентрации производителем эпитаксиальных структур, согласования методик их измерения, коррекции диффузионных процессов под конкретные дозы примесей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. // Успехи прикладной физики. 2015. Т. 3. № 2. С. 162.
2. Будтолаева А. К., Хакуашев П. Е., Чинарева И. В. // Успехи прикладной физики. 2015. Т. 3. № 4. С. 386.
3. Бурлаков И. Д., Гринченко Л. Я., Дирочка А. И., Залетаев Н. Б. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 2. С. 131.
4. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. – В. 2-х кн.: Пер. с англ. под ред. Р. А. Сурица. – М.: Мир, 1984. Кн. 2. – 456 с.
5. Капассо Ф., Пирсолл Т., Поллак М. и др. Техника оптической связи: Фотоприемники. – М.: Мир, 1988.
6. Бурлаков И. Д., Филачев А. М., Холоднов В. А. // Успехи прикладной физики. 2016. Том 4. № 1. С. 52.
7. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Фотодиоды. – М.: Физматкнига, 2011. – 448 с.
8. Будтолаев А. К., Горлачук П. В., Ладугин М. А., Мармалюк А. А., Рябоштан Ю. Л., Хакуашев П. Е., Чинарева И. В., Яроцкая И. В. // Прикладная физика, 2016. № 1. С. 82.
9. Андреев Д. С., Хакуашев П. Е., Чинарева И. В. и др. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 3. С. 374.

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz,

Methods of calculation and control of the impurity difference dose in avalanche InGaAs/InP structures

A. K. Budtolaev, N. V. Kravchenko, P. E. Khakuashev, and I. V. Chinareva

Orion R&P Association
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

Received March 17, 2017

Consideration is given to methods of calculation and control of the impurity difference dose in avalanche InGaAs/InP structures at planar technology of fabrication. Three methods were been used for

investigation of the impurity difference dose. It is shown a necessity of control for an impurity concentration dose by a manufacturer of epitaxial structures.

Keywords: avalanche photodiode, epitaxial heterostructures, InGaAs/InP, difference dose.

REFERENCES

1. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Usp. Prikl. Fiz.* **3** (2), 162 (2015).
2. A. K. Budtolaev, P. E. Khakuashev, and I. V. Chinareva, *Usp. Prikl. Fiz.* **3** (4), 386 (2015).
3. I. D. Burlakov, L. Ya. Grinchenko, A. I. Dirochka, and N. B. Zaletarv, *Usp. Prikl. Fiz.* **2** (2), 131 (2014).
4. S. Zee, *Physics of Semiconductor Devices* (Mir, Moscow, 1984) [in Russian].
5. F. Kapasso, T. Pirsoll, M. Pollak, et al., *Engineering of Optical Communication: Photodetectors* (Mir, Moscow, 1988) [in Russian].
6. I. D. Burlakov, A. M. Filachev, and V. A. Kholodnov, *Usp. Prikl. Fiz.* **4**, 52 (2016).
7. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid-State Photoelectronics. Photodiodes.* (Fizmatkniga, Moscow, 2011) [in Russian].
8. A. K. Budtolaev, P. V. Gorlachuk, M. A. Ladugin, et al., *Prikl. Fiz.*, No. 1, 82 (2016).
9. D. S. Andreev, P. E. Khakuashev, I. V. Chinareva, et al., *Usp. Prikl. Fiz.* **1** (3), 374 (2013).