

СУРАЙКИН А. И., ФЕДОТОВ Е. Н.

БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ GaAs ДИОДЫ ДЛЯ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Аннотация. В статье приводятся результаты исследования относительно нового класса полупроводниковых приборов – быстродействующих высоковольтных *GaAs p-i-n*-диодов для высокоэффективной силовой электроники. Приводятся общие технические требования к быстродействующим высоковольтным *GaAs p-i-n*-диодам, а также основные электрические параметры и характеристики экспериментальных образцов *GaAs p-i-n*-диодов.

Ключевые слова: силовой диод, *p-i-n*-структура, максимальный прямой ток, максимальное обратное напряжение, время обратного восстановления.

SURAYKIN A. I., FEDOTOV E. N.

HIGH-SPEED AND HIGH-VOLTAGE GaAs DIODES FOR POWER ELECTRONICS

Abstract. The article presents the research results of relatively new semiconductor devices – high-speed and high-voltage *GaAs p-i-n*-diodes for high-performance power electronics. The authors consider the general technical requirements for high-speed and high-voltage *GaAs p-i-n*-diodes as well as the basic electrical characteristics of experimental *GaAs p-i-n*-diodes.

Key words: power diode, *p-i-n*-structure, maximal forward current, maximal reverse voltage, reverse recovery time.

Инновации в энергетике имеют для России исключительное значение. Но, к сожалению, развитие электронной компонентной базы (ЭКБ) силовой электроники на сегодняшний день недостаточно [1, с. 15–19]. Решение данной задачи вполне возможно с помощью высоких технологий, в данном случае через энергоэффективную преобразовательную технику, основу которой составляет ЭКБ на широкозонных полупроводниках.

Одно из направлений развития ЭКБ силовой электроники – высоковольтные быстродействующие переключающие диоды на основе многослойных *GaAs* эпитаксиальных *p-i-n*-структур, изготовленных комбинацией методов жидкофазной (ЖФЭ) и газофазной (ГФЭ) эпитаксий [2, с. 36–47]. Достоинства *GaAs p-i-n*-диодов можно кратко перечислить: высокая скорость переключения; высокая рабочая температура; высокая радиационная стойкость; минимизированная емкость; малый заряд обратного восстановления; высокие частоты коммутации; высокая динамическая устойчивость; слабая зависимость заряда восстановления, времени обратного восстановления и обратного тока восстановления от температуры.

Ряд российских предприятий освоил технологию производства многослойных эпитаксиальных *GaAs*-структур и, соответственно, *p-i-n*-диодов на их основе [3, с. 16–19]. Исследование таких диодов относительно идентификации их важнейших параметров с целью определения возможности применения таких диодов в электронной технике является достаточно актуальной задачей. Структура кристалла *GaAs p-i-n*-диода приведена на рисунке 1.

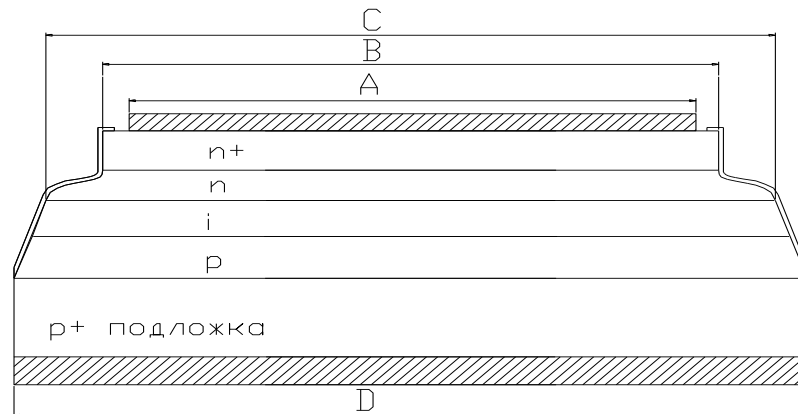


Рис. 1. Структура кристалла *GaAs p-i-n*-диода (*A* – катод, *B* – *n*⁺, *C* – *p-i-n*-область, *D* – анод).

Указанная структура, как говорилось ранее, выращивается методами ЖФЭ и ГФЭ. Полученные эпитаксиальные *p-i-n*-структуры имеют металлургические переходы внутри *i*-эпитаксиальной области. В зависимости от разностной концентрации носителей заряда величина диффузионной длины электронов L_n находится в пределах от 15 до 60 мкм, так, при значениях легирующей примеси $\sim 8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ – $L_n \sim 35 \text{ мкм}$, время жизни составляло 130 нс; для концентраций 10^{14} см^{-3} $L_n \sim 60 \text{ мкм}$, а $\tau_n \sim 360 \text{ нс}$.

Физическая структура и распределение концентрации в *p-i-n*-диоде приведена на рисунке 2. Если принять общую протяженность базовых областей *GaAs p-i-n*-диода такой, как показано на рисунке 2, то на переходах x_{j1} , x_{j2} , x_{j3} , x_{j4} возникают диффузионные потенциалы, сумма которых дает полное диффузионное напряжение на диоде при $T=300 \text{ K}$:

$$U_{p-i-n} = U_{pE} + U_p + U_n + U_{nE} = 1,3B. \quad (1)$$

Для *GaAs p⁺-p-i-n-n⁺*-структуры, *BAX* будет отличной (по крайней мере, в части коэффициента неидеальности) от кремниевого *p-i-n*-диода. Рассчитаем характеристику такой структуры. В отличие от кремниевой, в *GaAs p⁺-p-i-n-n⁺*-структуре, учитывая размеры *i*-области и время жизни носителей заряда в ней, мы не можем пренебрегать падением напряжения на *i*-области – U_{mi} , которое сопоставимо с напряжениями на других областях *GaAs p⁺-p-i-n-n⁺*-структуры (рисунок 2).

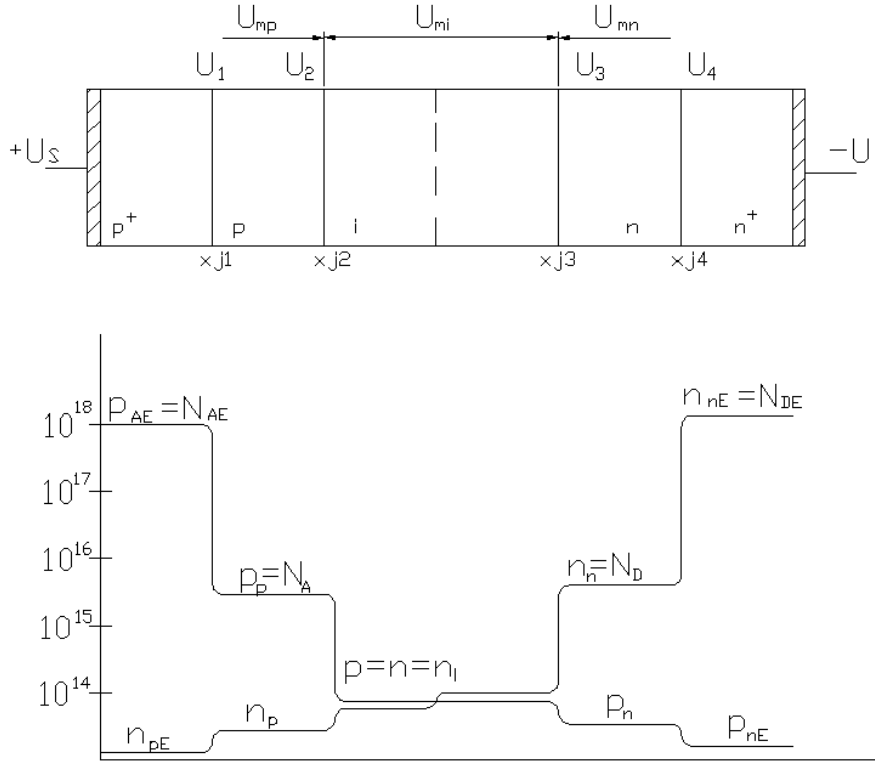


Рис. 2. Распределение концентрации носителей заряда в $p-i-n$ -диоде.

Предположим, что структура симметричная: $N_{AE}=N_{DE}$, $N_A=N_D$. Из условия симметрии можно записать:

$$U_{p+} \approx U_{n+}, U_{mp} \approx U_{mn}. \quad (2)$$

Пренебрегая падениями напряжений на высоколегированных областях U_{p+} и U_{n+} , падение напряжение на всей диодной структуре можно записать в виде (3):

$$U_S = U_1 + U_2 + U_{mp} + U_{mi} + U_3 + U_{mn} + U_4. \quad (3)$$

Учитывая (3), согласно [4, с. 82–88], расчетная прямая ветвь BAX $GaAs$ $p-i-n$ -диода будет такой:

$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{U_S}{4\phi_T}\right) - 1 \right], \quad (4)$$

где $I_s = qn_iSW/\tau_n$ – ток насыщения диода, $m=4$ – коэффициент неидеальности $p-i-n$ – структуры, U_S – напряжение, приложенное к $p-i-n$ -диоду.

На экспериментальных образцах диодов в количестве 20 шт., было проведено исследование прямой и обратной ветвей BAX , а также проведено измерение времени обратного восстановления. Усредненная прямая ветвь BAX при $T=300$ К приведена на рисунке 3.

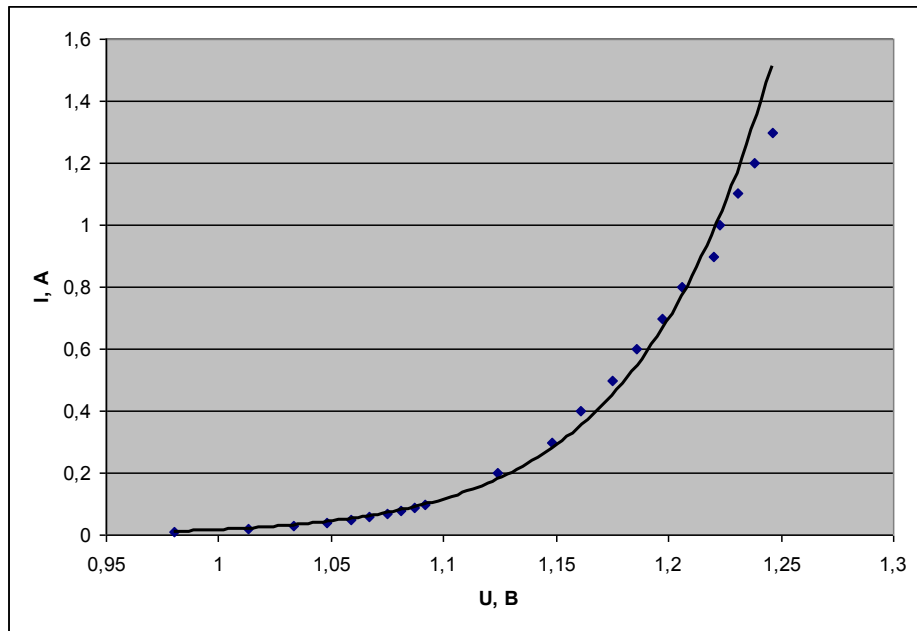


Рис. 3. Прямая ветвь *VAX* *GaAs p-i-n*-диодов.

Согласно полученным экспериментальным данным, был уточнен коэффициент неидеальности *p-i-n*-диода. Записывая соотношение (4) в виде:

$$\ln\left(\frac{I}{I_s} + 1\right) = \frac{1}{m} \cdot \frac{U_s}{\varphi_T}, \quad (5)$$

мы получим уравнение прямой в координатах $\ln(I/I_s - 1) - U_s/\varphi_T$, у которой тангенс угла наклона равен $1/m$ ($\operatorname{tg}(\alpha) = 1/m$). С учетом вычисленного значения коэффициента неидеальности ($m=2,23$), прямая ветвь *VAX* будет записана следующим образом:

$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{U_s}{2,23\varphi_T}\right) - 1 \right], \quad (6)$$

где I_s – ток насыщения, составил величину – $I_s = 3,2 \cdot 10^{-10} \text{ A}$.

Исследование обратной ветви *VAX* проводилось в диапазоне температур от 25° С до 250° С и показало, что зависимость обратного напряжения от температуры не приводит к увеличению тока более 1 *мА* (рисунок 4). При этом напряжение лавинного пробоя [5, с.103–117] достаточно стабильно и не ниже 800 В. То есть, в диапазоне 25–250° С обратное напряжение практически не снижается.

Анализ измеренных значений времени обратного восстановления t_{RR} экспериментальных образцов *GaAs p-i-n*-диодов [5, с.117–119] показывает, что среднее значение данной величины – $t_{RR} = 54,5 \text{ нс}$ (см. таблица 1). Полученное значение вполне приемлемо для использования диодов в быстродействующей электронике. Отметим лишь то, что на подобных структурах возможно получение времени обратного восстановления менее 10 нс ($t_{RR} \leq 10 \text{ нс}$). Но это комплексная задача, включающая как оптимизацию физической

структуры кристалла *GaAs p-i-n*-диода, так и решение сложных задач разработки технологических процессов.

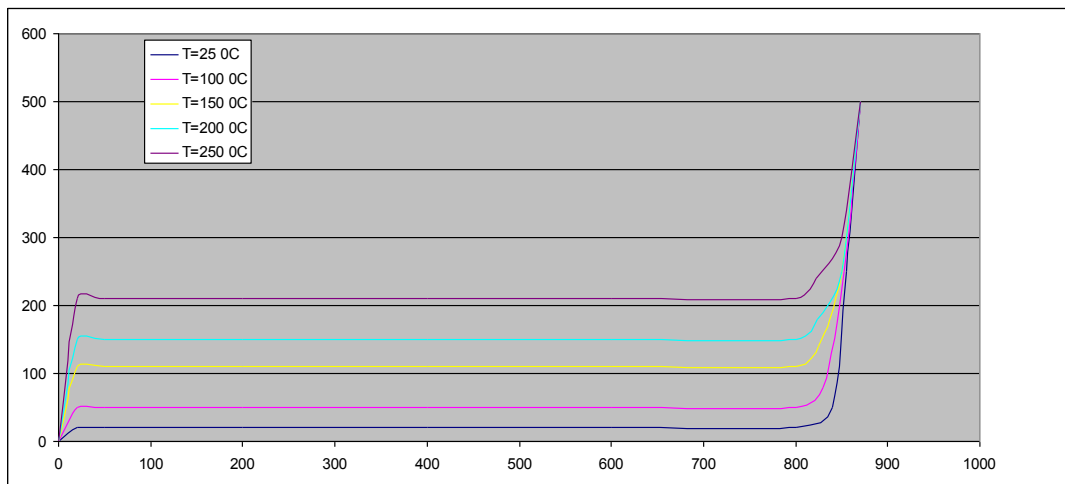


Рис. 4. Зависимость обратного тока диодов от обратного напряжения для различных температур.

Таблица 1

Время обратного восстановления экспериментальных образцов диодов

Номер диода	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_{RR}, \text{нс}$	80	60	50	50	50	60	50	40	50	40

Продолжение таблицы 1

Номер диода	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Ср.
$t_{RR}, \text{нс}$	50	40	60	60	50	50	50	80	50	70	54.5

На основании полученных данных можно сделать вывод о том, что статические и динамические характеристики *GaAs p-i-n*-диодов вполне позволяют использовать их в быстродействующих устройствах электронной техники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Войтович В., Гордеев А., Думаневич А. Чем заменить SiC-диоды Шоттки? // Силовая электроника. – 2009. – № 5. – С. 15–19.
2. Кесаманлы Ф. П., Наследова Д. Н. Арсенид галлия. Получение, свойства, применение. – М.: Наука, 1973. – 471 с.
3. Войтович В., Гордеев А., Думаневич А. Новые отечественные высоковольтные *p-i-n-GaAs*-диоды // Силовая электроника. – 2010. – № 2. – С. 16–19.
4. Герлах В. Тиристоры / пер. с нем. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 328 с.
5. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: В 2-х кн. – Кн. 1. / пер. с англ. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Мир, 1984. – 456 с.