

УДК 621.382

ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕРАЦИОННО-РЕКОМБИНАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ОБЛАСТИ ОБЕДНЕНИЯ *p-i-n*-ФОТОДИОДОВ

Оджаев В.Б.¹, Петлицкий А.Н.², Просолович В.С.¹, Ковальчук Н.С.², Филипеня В.А.², Черный В.В.³,
Шестовский Д.В.², Явид В.Ю.¹, Янковский Ю.Н.¹

¹Белорусский государственный университет

²ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»

³Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Исследованы вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики *p-i-n*-фотодиодов на основе кремния с вертикальной структурой и охранным кольцом. Установлено, что заметная зависимость величины барьерной емкости (на частоте 1 кГц) и размеров области обеднения от температуры наблюдается только при приложенных обратных напряжениях, не превышающих контактную разность потенциалов ($V_b \leq 1$ В). На вольт-амперных характеристиках при обратном смещении можно выделить три области изменения тока в зависимости от приложенного напряжения: сублинейную, линейную и суперлинейную, обусловленные различными механизмами генерационно-рекомбинационных процессов в области обеднения *p-n*-перехода.

Ключевые слова: *p-i-n*-фотодиоды, вольт-амперные характеристики, вольт-фарадные характеристики, генерационно-рекомбинационные процессы.

SPECIFIC FEATURES OF GENERATION-RECOMBINATION PROCESSES IN THE DEPLETION REGION OF *p-i-n*-PHOTODIODES

Odzhaev V.¹, Pyatlitski A.², Prosolovich V.¹, Fililpenya V.², Chorny V., Shestovsky D.², Yavid V.¹,
Yankovsky Yu.¹

¹Belarusian State University

²JSC «INTEGRAL» – «INTEGRAL» Holding Managing Company

³Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus

Abstract. The current-voltage and capacitance-voltage characteristics of *p-i-n*-silicon-based photodiodes with a vertical structure and a guard ring have been investigated. It was found that a appreciable dependence of the barrier capacitance value (at a frequency of 1 kHz) and the size of the depletion region on temperature is observed only at applied reverse voltages not exceeding the contact potential difference ($V_b \leq 1$ V). On the current-voltage characteristics at reverse bias, three regions of current variation can be distinguished depending on the applied voltage: sublinear, linear, and superlinear, due to different mechanisms of generation-recombination processes in the *p-n*-junction depletion region.

Key words: *p-i-n*-photodiodes, current-voltage characteristics, capacitance-voltage characteristics, generation-recombination processes.

Адрес для переписки: Просолович В.С., пр. Независимости, 4, г. Минск 220030, Республика Беларусь
e-mail: prosolovich@bsu.by

В работе проведен анализ изменения электрофизических параметров *p-i-n*-фотодиодов на основе кремния в зависимости от величины внешнего смещения и температуры.

Приборы изготавливались на пластинах Si *p*-типа проводимости ориентации (100) с $\rho = 1000$ Ом·см, выращенных методом бестигельной зонной плавки. Область *p*⁺-типа анода (изотипный переход) создавалась имплантацией ионов бора, области катода *n*⁺-типа – диффузией фосфора. Измерения ВАХ и вольт-фарадных характеристик (ВФХ) производились в диапазоне температур минус 30–70 °С с шагом 10 °С.

Из данных ВФХ следует, что зависимость емкости (*C*) от приложенного обратного смещения (V_R) имеет вид $1/C^2 \sim V_R$ характерный для резкого асимметричного *p-n*-перехода [1] (рис. 1).

Расчеты зависимости толщины области обеднения *W* от приложенного напряжения согласно [1] и сравнение их с экспериментальными результатами из измерений барьерной емкости и обратного тока I_R показали, что переход резкий асимметричный. Из рис. 1 также следует, что при $V > 8$ В для I_R появляется дополнительный канал утечки. Рост величины I_R происходит не только за счет увеличения толщины *W*, но и за счет включения нового механизма рекомбинации внутри области обеднения или утечки вне ее.

Исследование температурной зависимости барьерной емкости ($f = 1$ кГц) показали (рис. 2), что заметная зависимость *C* наблюдается только при напряжениях, сравнимых с величиной контактной разности потенциалов. При напряжениях смещения $V \leq V_{bi}$ зависимость *W* от температуры

определяется температурной зависимостью V_{bi} . Для обратной ВАХ p - n -перехода, в области пространственного заряда которого преобладает генерация электронно-дырочных пар, присуща степенная зависимость тока от напряжения $I_R \sim V^n$ [1]. На рис. 3 приведены ВАХ темновых токов в двойном логарифмическом масштабе. Видно, что зависимость может быть разбита на три участка. I – сублинейный, $n \sim 0,5$. В широкозонных полупроводниках с низкой концентрацией собственных носителей заряда n_i (таких, как Si) и большой концентрацией генерационно-рекомбинационных центров (которой соответствует низкое значение времени жизни неравновесных носителей заряда τ_e) при комнатной температуре преобладает генерационный ток.

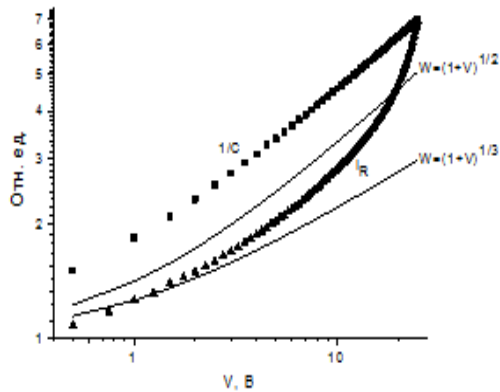


Рисунок 1 – Расчетные зависимости толщины области обеднения W от приложенного напряжения и их сравнение с экспериментальными данными $1/C$ и I_R

$$J_{gen} = \int_0^W q|U| dx \approx q|U|W = \frac{qn_iW}{\tau_e};$$

$$J_{gen} = \frac{1}{\tau_e}; \quad J_{gen} \sim W \sim (V_{bi} + V)^{\frac{1}{2}}.$$

При заданной температуре J_{gen} пропорционален ширине обедненного слоя, которая в свою очередь зависит от приложенного обратного смещения V_R . Таким образом, следует ожидать, для резкого перехода степенную зависимость генерационного тока от приложенного напряжения с показателем степени $n = 0,5$.

При $V_R = 10$ – 25 В ток возрастает с ростом приложенного напряжения и n становится больше 0,5, а $1/C \sim W$ продолжает расти по закону с $n = 0,5$ (рис. 1). Т.е., включается новый механизм увеличения обратного тока, не связанный с увеличением W от V_R . Из исследований температурных зависимостей обратного тока установлено, что генерация носителей заряда на участке I происходит с уровня 0,20 эВ. На участке II наблюдается сублинейная зависимость с $n \sim 2$, которая возможно обусловлена высокой концентрацией рекомбинационно-генерационных центров и их неоднородным распределением по

объему кристалла [2]. На участке III (рис. 3) ток прямо пропорционален приложенному напряжению ($n \sim 1$). На данном участке ток экспоненциально зависит от температуры, генерация носителей заряда происходит с уровня 0,26 эВ. Возможно это пассивный шунтирующий элемент.

Установлено, что заметная зависимость величины барьерной емкости (на частоте 1 кГц) и размеров области обеднения от температуры наблюдается только при приложенных обратных напряжениях, не превышающих контактную разность потенциалов ($V_b \leq 1$ В).

На ВАХ при обратном смещении можно выделить три области изменения тока в зависимости от приложенного напряжения: сублинейную, линейную и суперлинейную, обусловленные различными механизмами генерационно-рекомбинационных процессов в области обеднения p - n -перехода.

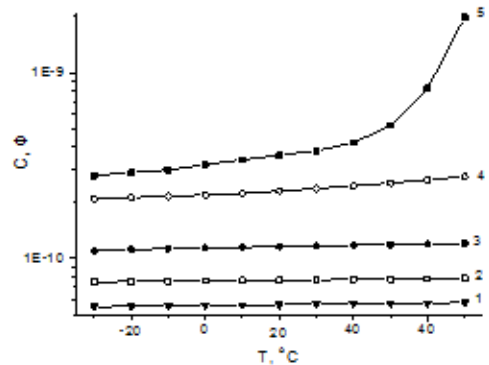


Рисунок 2 – Температурная зависимость барьерной емкости при $f = 1$ кГц: 1 = 20 В; 2 = 10 В; 3 = 5 В; 4 = 0,5 В; 5 = 0 В

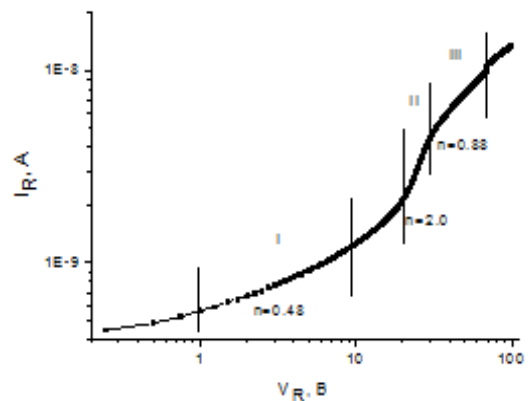


Рисунок 3 – ВАХ темновых токов при $T = 20$ °С

Литература

1. Sze, S. M. Semiconductor Devices: Physics and Technology / S. M. Sze, M. K. Lee – Pub. 3. – John Wiley & Sons Singapore Pte. Limited, 2012. – 582.
2. Liefing, R. Improved device performance by multistep or carbon co-implants / R. Liefing [et al.] // IEEE Trans. Electron Devices. – 1994. – Vol. ED-41. – P. 50–55.