



ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ $p-i-n$ -ФОТОДИОДОВ

В.Б Оджаев¹, А.Н Петлицкий², В.С Просолович¹, В.А Филипена², Д.В Шестовский², В.Ю Явид¹, Ю.Н Янковский¹, Г.Х Мавланов³,
Б.К Исмаилов³, З.Т Кенжаев³

¹Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь

²Открытое акционерное общество «ИНТЕГРАЛ» – управляющая
компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» Минск, Республика Беларусь

³Ташкентский государственный технический университет,
Ташкент, Республика Узбекистан

Ранее было установлено, что для $p-i-n$ -фотодиодов на обратных ветвях вольт-амперных характеристик (ВАХ) наблюдаются ступеньки в районе напряжений 25 и 70 В [1], обусловленные термической генерацией носителей заряда с глубоких уровней и неоднородным распределением технологических примесей по объему кристалла. Однако, данные эффекты могут быть обусловлены и особенностями изменения размеров области обеднения при приложении внешнего смещения. 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 кремния p -типа проводимости ориентации (100) с $\rho = 1000 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, выращенных методом бестигельной зонной плавки. Область p^+ -типа анода (изотипный переход) создавалась имплантацией ионов B^+ во всю поверхность непланарной стороны пластины, области катода n^+ -типа и охранного кольца – диффузией P в планарную сторону пластины. Измерения ВАХ и вольт-фарадных характеристик (ВФХ) производились в диапазоне температур $-30\dots 70 \text{ }^\circ\text{C}$ с шагом $10 \text{ }^\circ\text{C}$.

Из данных ВФХ следует, что ёмкость исследуемого прибора уменьшается с увеличением обратного напряжения (рис.1). Зависимость емкости от приложенного обратного смещения имеет вид $1/C^2 \sim U_{\text{обр}}$ для резкого асимметричного $p-n$ -перехода и $1/C^3 \sim U_{\text{обр}}$ для плавного $p-n$ -перехода [2]. Проведенные теоретические расчеты зависимости толщины области обеднения W от приложенного напряжения [2] и сравнение их экспериментальными результатами из измерений барьерной ёмкости и обратного тока I_R показали (рис.2), что переход резкий асимметричный.

Из рис.2 также следует, что при напряжениях более 8 В для обратного тока появляется дополнительный канал утечки. Рост величины обратного тока происходит не только за счёт увеличения толщины W , но и за счет включения нового механизма рекомбинации внутри области обеднения или утечки вне её.



Исследования температурной зависимости барьерной ёмкости (C_b) при различных напряжениях смещения (на частоте 1 кГц) показали (рис.3), что заметная зависимость C наблюдается только при напряжениях, не превышающих контактную разность потенциалов ($V_b \leq 1$ В). В случае резкого несимметричного перехода [2]

$$C \equiv \frac{dQ_c}{dV} = \frac{\epsilon_s}{W} = \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_B}{2}} (V_{bi} \pm V - \frac{2kT}{q})^{-1/2} = \frac{\epsilon_s}{\sqrt{2}L_D} (\beta V_{bi} \pm \beta V - 2)^{-1/2}, \quad (1)$$

а $W \sim (V_{bi} + V)^{1/2}$, где V - приложенное напряжение. В свою очередь

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s V_{bi}}{qN_B}}, \quad (2)$$

где $N_B = N_D$ или N_A в слаболегированной части p - n -перехода, а контактная разность потенциалов

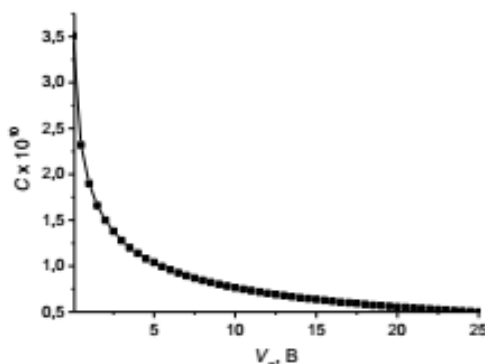


Рисунок 1 - Зависимость барьерной ёмкости p - i - n -фотодиода от приложенного обратного напряжения

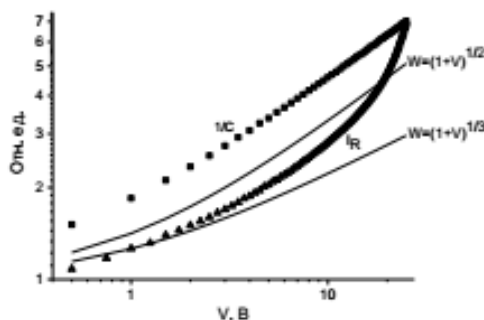


Рисунок 2 – Расчетные зависимости толщины области обеднения W от приложенного напряжения и их сравнение с экспериментальными данными $1/C$ и I_R .

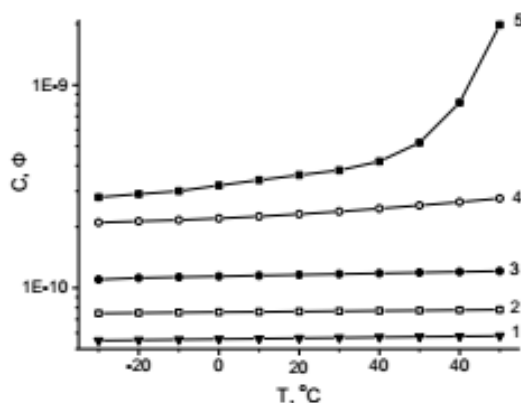


Рисунок 3 – Температурные зависимости барьерной емкости при $f=1$ кГц:
1= 20 В; 2= 10 В; 3= 5 В; 4= 0,5 В; 5= 0 В.

$$qV_{bn} = E_g - (qV_n + qV_p) = kT \ln\left(\frac{n_{n0} p_{p0}}{n_i^2}\right) \approx kT \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right), \quad (3)$$

где E_g – ширина запрещенной зоны; qV_n и qV_p – положение уровня Ферми в запрещенной зоне относительно дна зоны проводимости в полупроводнике n -типа и относительно потолка валентной зоны в полупроводнике p -типа; n_{n0} и p_{p0} – равновесные концентрации электронов и дырок в полупроводнике n -типа и дырок в полупроводнике p -типа, соответственно; N_D и N_A – концентрации доноров и акцепторов; n_i – собственная концентрация носителей заряда в полупроводнике.

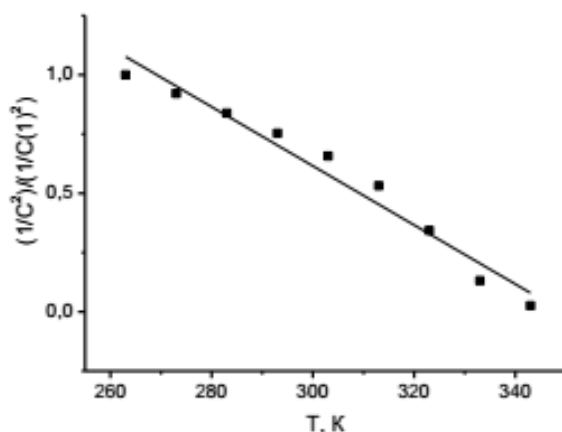


Рисунок 4 – Температурная зависимость относительной величины обратного квадрата барьерной ёмкости p - i - n -фотодиода.



В выражение для C_b (1) входят два параметра, зависящие от температуры: относительная диэлектрическая проницаемость ϵ и высота потенциального барьера qV_{bi} . При повышении температуры ϵ увеличивается, а qV_{bi} уменьшается [3]. Поскольку ϵ входит в числитель формулы для C_b , а qV_{bi} в знаменатель, то при повышении температуры барьерная ёмкость возрастает. Однако, в формулу (1) входит величина $V_{bi}+V$ (сумма запирающего напряжения и высоты потенциального барьера). Следовательно, при напряжениях смещения $V \leq V_{bi}$ зависимость W от температуры определяется температурной зависимостью V_{bi} . Таким образом $1/C^2 \sim W^2 \sim V_{bi}$ (рис. 4).

Исследования частотной зависимости C_b p - i - n -фотодиода показали (рис.5), что ёмкость существенно зависит от температуры измерений тогда, когда размеры W полностью определяются величиной V_{bi} , т.е. при $V \leq V_{bi}$. Если размеры W определяются внешним приложенным обратным смещением ($V \gg V_{bi}$), то C_b практически не зависит от частоты. Уменьшение C_b при частотах более 100 кГц для напряжения смещения $V \approx V_{bi}$, учитывая амплитуду сканирующего сигнала (25 мВ), вероятно связано с возрастанием влияния диффузионной ёмкости.

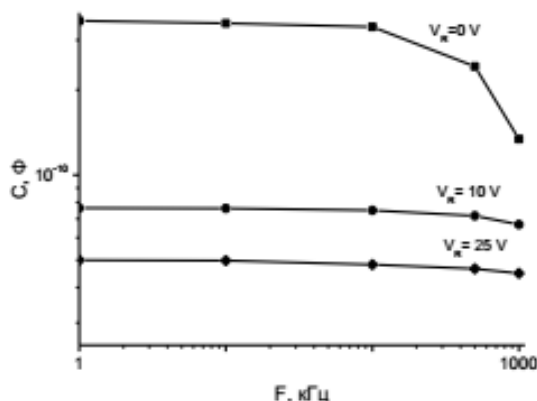


Рисунок 5- Зависимость барьерной ёмкости p - i - n -фотодиода от частоты при $T= 20$ °C.

Для обратной ВАХ p - n -перехода, в области пространственного заряда которого преобладает генерация электронно-дырочных пар, присуща степенная зависимость тока от напряжения $I_R \sim V^n$ [2]. На рис. 6 приведены ВАХ темновых токов в двойном логарифмическом масштабе. Видно, что зависимость может быть разбита на три участка. I – сублинейный, $n \sim 0,5$. Такая зависимость характерна для резкого асимметричного p - n -перехода, для которого рост I_R с напряжением связан с ростом W по степенному закону с $n=0,5$. В широкозонных полупроводниках с низкой концентрацией собственных носителей заряда n_i (таких, как Si) и большой концентрацией



генерационно-рекомбинационных центров (низкое значение τ_c) при комнатной температуре преобладает генерационный ток.

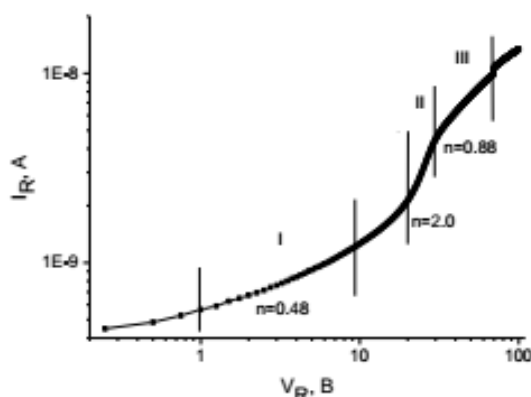


Рисунок 6 – ВАХ темновых токов при $T=20$ °C

При заданной температуре J_{gen} пропорционален ширине обедненного слоя, которая в свою очередь зависит от приложенного обратного смещения V [2]. Таким образом, следует ожидать, для резкого перехода степенную зависимость генерационного тока от приложенного напряжения с показателем степени 0,5.

$$J_{gen} = \int_0^W q|U|dx \approx q|U|W = \frac{qn_1W}{\tau_c} \quad (5)$$

$$J_{gen} \sim \frac{1}{\tau_c}; J_{gen} \sim W \sim (V_{bi} + V)^{1/2}$$

При напряжениях от 10 В до 25 В ток возрастает с ростом V и n становится больше 0,5, а $I/C \sim W$ продолжает расти по закону с $n=0,5$ (рис.2). Т.е., как было сказано ранее, включается новый механизм увеличения I_R , не связанный с увеличением W от V . Из исследований температурных зависимостей I_R (рис.7) установлено, что генерация носителей заряда на участке I происходит с уровня 0,20 эВ. На участке II при $V \sim 35-70$ В (рис.4) ток прямо пропорционален V ($n \sim 1$). На данном участке ток экспоненциально зависит от температуры, генерация носителей заряда происходит с уровня 0,26 эВ. На участке III $n \sim 2$. Такая суперлинейная зависимость, как ранее предполагалось [4], обусловлена высокой концентрацией рекомбинационно-генерационных центров и их неоднородным распределением объема кристалла.

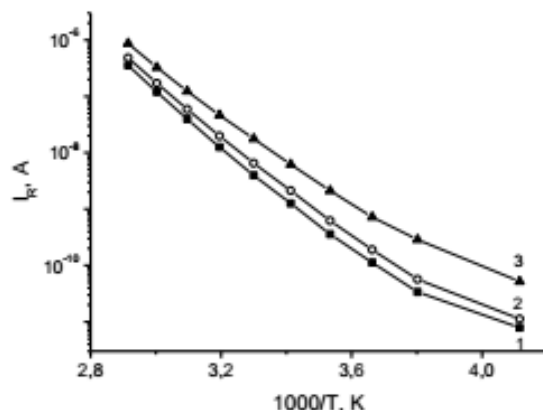


Рисунок 7 – Температурная зависимость обратного тока при различных значениях напряжения смещений, В: 1-10, 2- 20, 3-40.

Установлено, что для *p-i-n*-фотодиодов заметная зависимость величины C_b (на частоте 1 кГц) и размеров области обеднения от температуры наблюдается только при приложенных обратных напряжениях, не превышающих контактную разность потенциалов ($V_{bi} \leq 1$ В). На частотах более 100 кГц при $V \sim V_{bi}$ наблюдается уменьшение C , обусловленное проявлением влиянием диффузионной ёмкости. 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 и неоднородным распределением технологических (фоновых) примесей по объёму кристалла.

Литература

1. Горбачук Н.И., Ластовский С.Б., Оджаев В.Б., Петлицкий А.Н., Просолович В.С., Ковальчук Н.С., Филипеня В.А., Черный В.В., Шестовский Д.В., Янковский Ю.Н. Влияние γ -облучения на вольт-амперные характеристики *p-i-n*-фотодиодов // Материалы 13-й Международной научно-технической конференции «Приборостроение – 2020» Минск. 18.11-20.11.2020, БНТУ, 2020, С.325-326.
2. Sze, S.M. Semiconductor Devices: Physics and Technology / S.M. Sze, Lee M.K. – Pub. 3. – John Wiley & Sons Singapore Pte. Limited, 2012. – 582
3. Берман Л. С. Варикапы. М.-Л., издательство «Энергия», 1965. 40 С.
4. Liefing R., Wijburg R. C. M., Custer J. C., Wallinga H. Improved device performance by multistep or carbon co-implants. IEEE Trans. Electron Devices // 1994. V. ED-41. P. 50-55.