

УДК 537.222.22

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАРЯДА В РЕЗКОМ НЕСИММЕТРИЧНОМ РАВНОВЕСНОМ N-P-ПЕРЕХОДЕ

Богатов Н. М.

THE CHARGE DISTRIBUTION IN SHARP ASYMMETRICAL EQUILIBRIUM N-P-JUNCTION

Bogatov N. M.

Kuban State University, Krasnodar, Russia
e-mail: bogatov@phys.kubsu.ru

Abstract. Modeling n-p-junction is an urgent task, because theoretical models do not describe all the properties of semiconductor structures with different content of impurities. The influence of impurities on the properties of a sharp asymmetric n-p-junction was analyzed in the article. The Poisson equation in the space charge region (SCR) of the equilibrium n-p-junction was solved numerically. The electrical potential and charge density in the SCR were calculated. It is shown that the structure of SCR of sharp, highly asymmetric n-p-junction substantially differs from the model of depleted charge carriers, and includes four parts: 1 – highly doped region, wherein the main charge carriers partially compensate the charge of the ionized impurities; 2 – lowly doped region, which riched of charge carriers, that increase the charge of the ionized impurities; 3 – lowly doped region, wherein the concentrations of electrons and holes much less then the concentration of ionized impurities; 4 – lowly doped region, wherein the main charge carriers partially compensate the charge of the ionized impurities.

Keywords: semiconductor, n-p-junction, electrical potential, charge carriers.

Введение

Теория n-p-переходов в полупроводниках развивается, начиная с классической работы Шокли [1]. Современные представления о физических процессах в приборах, содержащих n-p-переходы, изложены в монографиях [2, 3]. Аналитические модели созданы для двух предельных случаев: 1 – резкого n-p-перехода со ступенчатым распределением примеси, 2 – плавного n-p-перехода с линейным распределением примеси. Для описания реальных n-p-переходов, не соответствующих этим предельным случаям, используются численные модели.

Граница, разделяющая полупроводники n и p-типа проводимости, (металлургическая граница) окружена областью пространственного заряда (ОПЗ), обедненной носителями заряда (электронами и дырками), в которой плотность заряда зависит от распределения ионизованных доноров в n-слое и ионизованных акцепторов в p-слое [1]. Для корректного расчета ширины ОПЗ необходимо учитывать концентрацию электронов и дырок в этой об-

ласти [2, 3], причем для сильно несимметричных или сверхмелко залегающих переходов расчеты могут быть выполнены только численно [4]. Большую популярность получил численный метод решения системы уравнений Шокли, предложенный в [5].

Актуальность моделирования n-p-перехода не потеряла своего значения в настоящее время [3]. В работе [6] отмечается, что несимметричность потенциального барьера фронтального близко залегающего p-n перехода создает сложности для определения параметров области объемного заряда реальных полупроводниковых структур. Влияние поверхностного заряда на величину потенциального барьера и характеристики структур с мелко залегающим диффузионным переходом изучалось в [7, 8].

С помощью численного моделирования в [9, 10] показано, что мелкий несимметричный, диффузионный n-p-переход формирует 3 области: 1 – эмиттер, имеющий плотность положительного заряда меньшую, чем концентрация ионизованных доноров; 2 – об-

Богатов Николай Маркович, д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой физики и информационных систем Кубанского государственного университета, действительный член Академии инженерных наук РФ им. А. М. Прохорова; e-mail: bogatov@phys.kubsu.ru.

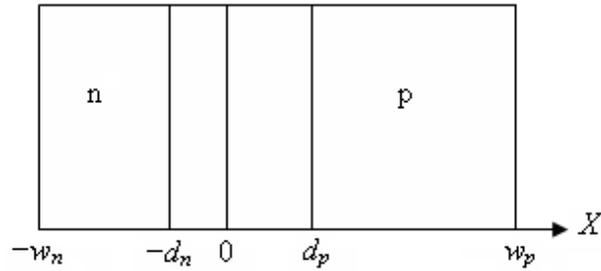


Рис. 1. Идеализированная схема n-p-перехода

ласть, обогащенную электронами, в которой концентрация электронов превышает концентрацию ионизованных примесей; 3 — область, обедненную электронами и дырками, содержащую плотность отрицательного заряда, созданного ионизованными акцепторами.

Цель данной работы — определить структуру ОПЗ резкого несимметричного n-p-перехода и выяснить, может ли в этом случае существовать область, обогащенная носителями заряда.

1. Модель равновесного резкого n-p-перехода

Рассмотрим планарный резкий n-p-переход (рис. 1). ОПЗ расположена при $-d_n \leq x \leq d_p$. Концентрации ионизованных доноров $N_D(x)$ и акцепторов $N_A(x)$ задаются в виде ступенчатых функций:

$$\begin{aligned} N_D(x) &= \begin{cases} N_D, & -w_n \leq x \leq 0, \\ 0, & 0 < x \leq w_p; \end{cases} \\ N_A(x) &= \begin{cases} 0, & -w_n \leq x < 0, \\ N_A, & 0 \leq x \leq w_p. \end{cases} \end{aligned} \quad (1.1)$$

Концентрации равновесных электронов $n(x)$, дырок $p(x)$ определяются по формулам [2]

$$\begin{aligned} n(x) &= N_c e^{\frac{F - E_g + q\varphi(x)}{kT}}, \\ p(x) &= N_v e^{\frac{-F - q\varphi(x)}{kT}}. \end{aligned} \quad (1.2)$$

где N_c — эффективная плотность электронных состояний в окрестности дна зоны проводимости, F — электрохимический потенциал (уровень Ферми), отсчитанный от вершины валентной зоны в точке $x = w_p$, q — элементарный заряд, $\varphi(x)$ — потенциал внутреннего электрического поля, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура, N_v — эффективная плотность электронных состояний

в окрестности вершины валентной зоны, E_g — ширина запрещенной зоны.

Потенциал внутреннего электрического поля является решением уравнения Пуассона [2]

$$\frac{d^2}{dx^2} \varphi(x) = -\frac{q}{\varepsilon \varepsilon_0} \rho(x), \quad (1.3)$$

где ε — диэлектрическая проницаемость вещества, ε_0 — диэлектрическая постоянная, $\rho(x)$ — плотности заряженных частиц,

$$\rho(x) = p(x) - n(x) + N_D(x) - N_A(x).$$

Плотность заряда удовлетворяет условию общей электронейтральности [2]

$$\int_{-w_n}^{w_p} \rho(x) dx = 0. \quad (1.4)$$

В общем случае заряд распределен по всей длине полупроводника при $-w_n < x < w_p$, так что параметры d_n, d_p не входят в уравнения явно. В рассматриваемой структуре плотность заряда на внешних поверхностях отсутствует, поэтому

$$p(-w_n) - n(-w_n) + N_D = 0, \quad (1.5)$$

$$p(w_p) - n(w_p) - N_A = 0. \quad (1.6)$$

Для идеальной плоскопараллельной структуры из (1.3)–(1.6) следует

$$\left. \frac{d}{dx} \varphi(x) \right|_{x=-w_n} = \left. \frac{d}{dx} \varphi(x) \right|_{x=w_p} = 0. \quad (1.7)$$

Начало отсчета потенциала выбирается произвольно, положим $\varphi(w_p) = 0$. Значение F найдем, решая уравнение (1.6), а $\varphi_{wn} = \varphi(-w_n)$ — уравнение (1.5), подставив в них (1.2).

Подставим (1.1), (1.2) в (1.3) и проинтегрируем полученное уравнение, используя

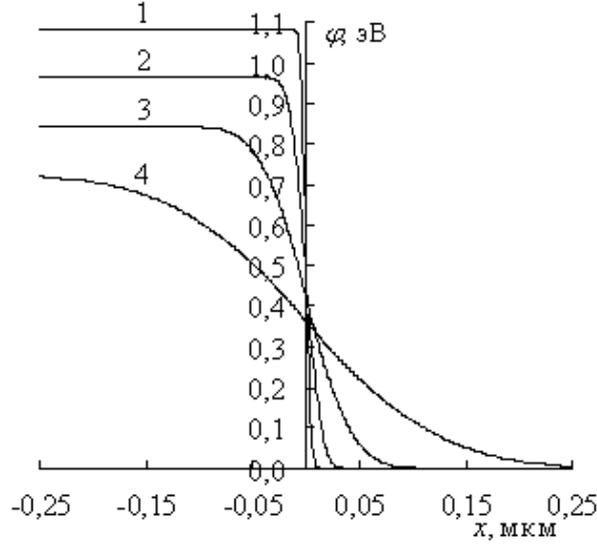


Рис. 2. Изменение потенциала электрического поля симметричного п-р-перехода: 1 — $N_D = N_A = 10^{19} \text{ см}^{-3}$, 2 — $N_D = N_A = 10^{18} \text{ см}^{-3}$, 3 — $N_D = N_A = 10^{17} \text{ см}^{-3}$, 4 — $N_D = N_A = 10^{16} \text{ см}^{-3}$

граничное условие (1.7). Результат преобразуем, используя (1.5), (1.6). Получим при $-w_n \leq x \leq 0$

$$\frac{d}{dx}\varphi = -\sqrt{\frac{2kT}{\varepsilon\varepsilon_0}} \left[2N_v e^{\frac{-F-q\varphi w_n}{kT}} \times \left(\text{ch} \left(\frac{q(\varphi - \varphi_{wn})}{kT} \right) - 1 \right) + N_D \left(e^{\frac{q(\varphi - \varphi_{wn})}{kT}} - 1 - \frac{q}{kT}(\varphi - \varphi_{wn}) \right) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (1.8)$$

при $0 \leq x \leq w_p$

$$\frac{d}{dx}\varphi = -\sqrt{\frac{2kT}{\varepsilon\varepsilon_0}} \left[2N_c \exp \left(\frac{F - E_g}{kT} \right) \times \left(\text{ch} \left(\frac{q\varphi}{kT} \right) - 1 \right) + N_A \left(\exp \left(\frac{-q\varphi}{kT} \right) - 1 + \frac{q\varphi}{kT} \right) \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (1.9)$$

Функция $\varphi(x)$ непрерывна на границе $x = 0$:

$$\varphi(x)|_{x=0-0} = \varphi(x)|_{x=0+0} = \varphi(0), \quad \frac{d}{dx}\varphi(x)|_{x=0-0} = \frac{d}{dx}\varphi(x)|_{x=0+0}. \quad (1.10)$$

Подставив (1.8) и (1.9) в (1.10), используя (1.2), (1.5), (1.6), найдем

$$\varphi(0) = \frac{N_D \varphi(-w_n)}{(N_D + N_A)} - \frac{kT(N_D - N_A)}{q(N_D + N_A)} -$$

$$-\frac{2kT}{q(N_D + N_A)} \left[N_v e^{\frac{-F-q\varphi w_n}{kT}} - N_c e^{\frac{F-E_g}{kT}} \right].$$

Потенциал внутреннего электрического поля $\varphi(x)$ находим при $-w_n \leq x \leq 0$ как численное решение уравнения (1.8) с граничным условием $\varphi(-w_n) = \varphi_{wn}$, а при $0 \leq x \leq w_p$ как численное решение уравнения (1.9) с граничным условием $\varphi(w_p) = 0$.

Таким образом, в модели не задается расположение области, обедненной носителями заряда. Зависимости $\varphi(x)$ и $\rho(x)$ являются взаимно согласованными.

2. Результаты расчетов и их обсуждение

Расчеты проведены для кремниевого п-р-перехода при температуре $T = 300 \text{ К}$. Параметры материала N_c , N_v , E_g , ε приведены в [3]. Изменение потенциала электрического поля резкого симметричного п-р-перехода показано на рис. 2, а плотности заряда — на рис. 3. Электрический потенциал и плотность заряда резкого несимметричного п-р-перехода представлены на рис. 4 и рис. 5, соответственно.

Плотность заряда $\rho(x)$ нормирована на значение N_D в п-области и на значение N_A в р-области для сопоставления структур с различным уровнем легирования на одном

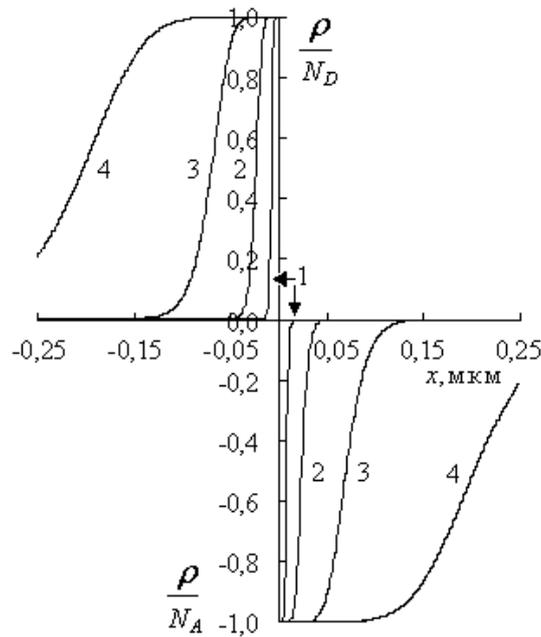


Рис. 3. Изменение приведенной плотности заряда в ОПЗ симметричного п-р-перехода: 1 — $N_D = N_A = 10^{19} \text{ см}^{-3}$, 2 — $N_D = N_A = 10^{18} \text{ см}^{-3}$, 3 — $N_D = N_A = 10^{17} \text{ см}^{-3}$, 4 — $N_D = N_A = 10^{16} \text{ см}^{-3}$

графике. В области, обедненной носителями заряда, $n, p \ll N_D$, $n, p \ll N_A$, поэтому

$$\frac{\rho(x)}{N_D} \approx 1, \frac{|\rho(x)|}{N_A} \approx 1. \quad (2.1)$$

В квазинейтральной области $\rho(x) \approx 0$ при $x \leq -d_n$, $d_p \leq x$ (вне ОПЗ).

В случае симметричного п-р-перехода границу ОПЗ можно считать резкой при $N_D = N_A = 10^{19} \text{ см}^{-3}$, $N_D = N_A = 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Распределение электронов и дырок существенно влияет на вид границы ОПЗ при $N_D = N_A = 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $N_D = N_A = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (рис. 3). Размер области, в которой выполняются равенства (2.1), оказывается меньше размера ОПЗ вследствие возрастания концентрации основных носителей заряда.

В случае резкого несимметричного п-р-перехода возникают новые закономерности в распределении электронов и дырок. В ОПЗ появляется область, обогащенная носителями заряда (электронами, рис. 5), в которой

$$n \geq N_A, \quad \frac{|\rho(x)|}{N_A} \geq 2.$$

На границе $x = 0+0$ получены следующие значения отношения $\rho(+0)/N_A$: $-1,12$ при $N_A = 10^{18} \text{ см}^{-3}$; $-26,9$ при $N_A = 10^{17} \text{ см}^{-3}$;

-357 при $N_A = 10^{16} \text{ см}^{-3}$; для каждого из этих значений N_A размер обогащенной области d_r , соответственно, равен 0 нм; 5 нм; 23 нм.

При $d_r \leq x < d_p$ расположена область, обедненная носителями заряда. Концентрация дырок возрастает при $x \rightarrow d_p$ (область плавного изменения плотности заряда), за которой следует квазинейтральная область при $d_p \leq x$.

При $-d_n < x < 0$ концентрация электронов $n < N_D$, но не является столь малой, чтобы считать эту часть ОПЗ областью с низкой проводимостью. Высокоомная часть ОПЗ, где $n, p \ll N_A$, существует только в слое с меньшей концентрацией примеси $N_A \ll N_D$.

Отмеченные закономерности обуславливают существенное отличие зависимостей $\varphi(x)$ на рис. 4 от зависимостей на рис. 2.

Таким образом, в структуре ОПЗ резко сильно несимметричного п-р-перехода, как и мелкого несимметричного диффузионного п-р-перехода следует выделить четыре части: 1 — высоколегированную область, в которой основные носители заряда частично компенсируют заряд ионизованных примесей; 2 — низколегированную область, обогащенную носителями заряда, увеличивающими заряд ионизованных примесей; 3 — низколеги-

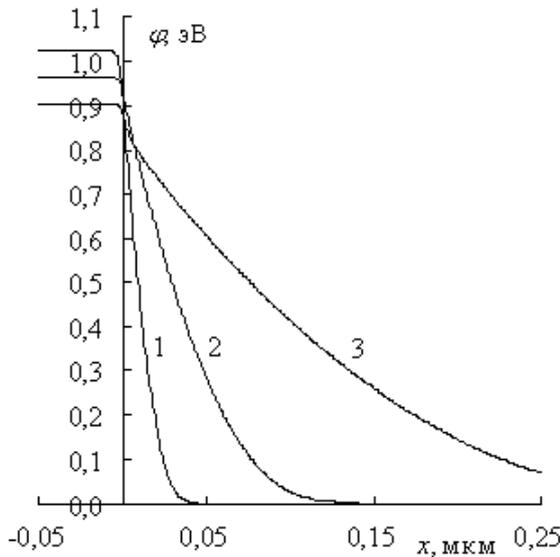


Рис. 4. Изменение потенциала электрического поля несимметричного p-p-перехода: 1 — $N_D = 10^{19} \text{ см}^{-3}$, $N_A = 10^{18} \text{ см}^{-3}$, 2 — $N_D = 10^{19} \text{ см}^{-3}$, $N_A = 10^{17} \text{ см}^{-3}$, 3 — $N_D = 10^{19} \text{ см}^{-3}$, $N_A = 10^{16} \text{ см}^{-3}$

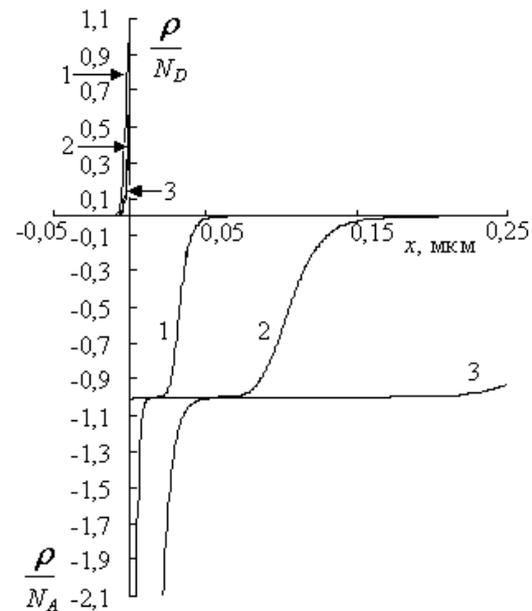


Рис. 5. Изменение приведенной плотности заряда в ОПЗ резкого несимметричного p-p-перехода: 1 — $N_D = 10^{19} \text{ см}^{-3}$, $N_A = 10^{18} \text{ см}^{-3}$, 2 — $N_D = 10^{19} \text{ см}^{-3}$, $N_A = 10^{17} \text{ см}^{-3}$, 3 — $N_D = 10^{19} \text{ см}^{-3}$, $N_A = 10^{16} \text{ см}^{-3}$

рованную область, обедненную электронами и дырками, содержащую плотность заряда, созданного ионизованными примесями; 4 — низколегированную область, где основные носители заряда частично компенсируют заряд ионизованных примесей.

Литература

1. Shockley W. The theory of p-n junctions in semiconductors and p-n junction transistors // Bell Syst. Tech. J. 1949. Vol. 28. No. 7. P. 435–439.
2. Zu C. Физика полупроводниковых приборов. Кн. 1. М.: Мир. 1984. 456 с.
3. Pulfrey D.L. Understanding Modern Transistors and Diodes. Cambridge University Press, 2010. 335 p.
4. Redfield D. Revised model of asymmetric p-n junctions // Applied Physics Letters. 1979. Vol. 35, July 15. P. 182–184.
5. Pfitzner A. Numerical solution of the one-dimensional phenomenological transport equation set in semiconductors // Electron Technology. 1977. Vol. 10. No. 4. P. 3–21.
6. Шевченко А.И., Мазинов А.С., Писаренко Л.Д. Численно-аналитический подход и рабочие характеристики фронтальных p-n переходов // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. Спец. выпуск. 2013. Т. 1, № 8 (114). С. 182–186.
7. Богатов Н.М., Матвеев М.П., Першин Н.В., Родоманов Р.Р. Определение времени захвата неравновесного поверхностного заряда в полупроводниковых структурах по спаду тока короткого замыкания // Известия высших учебных заведений. Северо-кавказский регион. Естественные науки. 2008. № 6. С. 39–41.
8. Богатов Н.М., Матвеев М.П., Першин Н.В., Родоманов Р.Р. Определение времени захвата неравновесного поверхностного заряда в полупроводниковых структурах по спаду фотоэдс // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2008. № 2. С. 57–61.
9. Богатов Н.М. Анализ влияния легирующих примесей на эффективность солнечных элементов из монокристаллического кремния // Электронная техника. Сер. 6. Материалы. 1991. Вып. 6 (260). С. 48–53.
10. Богатов Н.М. Анализ влияния рекомбинации в области пространственного заряда на вольт-амперную характеристику кремниевых солнечных элементов // Гелиотехника. 1990. № 6. С. 49–53.

References

1. Shockley W. The theory of p-n junctions in semiconductors and p-n junction transistors. *Bell Syst. Tech. J.*, 1949, vol. 28, no. 7, pp. 435–439.
2. Zee S. *Physics of semiconductor devices*. Book 1. Moscow, Mir Publ., 1984, 456 p.
3. Pulfrey D.L. *Understanding Modern Transistors and Diodes*. Cambridge University Press, 2010, 335 p.
4. Redfield D. Revised model of asymmetric p-n junctions. *Applied Physics Letters*, 1979, vol. 35, July 15, pp. 182–184.
5. Pfitzner A. Numerical solution of the one-dimensional phenomenological transport equation set in semiconductors. *Electron Technology*, 1977, vol. 10, no. 4, pp. 3–21.
6. Shevchenko A.I., Mazinov A.S., Pisarenko L.D. Chislenno-analiticheskiy podkhod i rabochie kharakteristiki frontal'nykh p-n perekhodov [Numerical and analytical approach and performance the frontal p-n junction]. *Energoberegenie. Energetika. Energoaudit* [Energy saving. Energy. Energy audit], 2013, vol. 1, no. 8 (114), Sp. Iss. – “Pribory i ustroystva silovoy energetiki”, pp. 182–186. (In Russian)
7. Bogatov N.M., Matveyakin M.P., Pershin N.V., Rodomanov R.R. Opredelenie vremeni zahvata neravnovesnogo poverhnosnou zaryada v poluprodnikovykh strukturah po spadu toka korotkogo замыканиya [The timing of the capture of nonequilibrium surface charge in semiconductor structures from the decay of short circuit current]. *Izvestia vyshykh uchebnykh zavedeniy, Severo-kavkazskiy region. Estestvennyye nauki* [News of higher educational institutions. The North Caucasus region. Science], 2008, no. 6, pp. 39–41. (In Russian)
8. Bogatov N.M., Matveyakin M.P., Pershin N.V., Rodomanov R.R. Opredelenie vremeni zahvata neravnovesnogo poverhnosnou zaryada v poluprodnikovykh strukturah po spadu fotoeds [The timing of the capture of nonequilibrium surface charge in semiconductor structures from the decay of the thermo-EMF]. *Ekologicheskii vestnik nauchnykh centrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva* [Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation], 2008, no. 2, pp. 57–61. (In Russian)
9. Bogatov N.M. Analiz vliyaniya legiruyuschih primesey na effektivnost solnechnykh elementov iz monokristallicheskogo kremniya [Analysis of the influence of dopants on the efficiency of solar cells made from monocrystalline silicon]. *Elektronnaya tehnika. Ser. 6. Materialy* [Electronic equipment. Ser. 6. Materials], 1991, no. 6 (260), pp. 48–53. (In Russian)
10. Bogatov N.M. Analiz vliyaniya rekombinacii v oblasti prostranstvennogo zaryada na voltampernuyu harakteristiku kremnievykh solnechnykh elementov [Analysis of the effect of recombination in the space charge region on the current-voltage characteristics of silicon solar cells]. *Geiotekhnika* [Solar energy equipment], 1990, no. 6, pp. 49–53. (In Russian)