

УДК 538.915

**ХАОТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ НА ПОВЕРХНОСТИ ВЫРОЖДЕННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ И В КОНТАКТАХ****Филимонов А. В., Бондаренко В. Б., Кораблев В. В.***Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого  
Санкт-Петербург, Россия*

**Аннотация.** В работе обсуждаются естественные неоднородности потенциала на поверхности вырожденного полупроводника и флуктуации высоты барьера в контактах металл-полупроводник. Определены характерные значения амплитуды хаотического потенциала в случае линейного экранирования электроактивной примеси. Показана зависимость данных неоднородностей от электрофизических параметров полупроводника.

**Ключевые слова:** хаотический потенциал, естественный размерный эффект, вырожденный полупроводник.

**CHAOTIC POTENTIAL ON THE DEGENERATED SEMICONDUCTOR SURFACE AND IN CONTACTS****Alexey V. Filimonov, Vyacheslav B. Bondarenko, Vadim V. Korablev***Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University  
St. Petersburg, Russia*

**Abstract.** In this paper, natural heterogeneities of the potential on the degenerated semiconductor surface are discussed as well as the barrier height fluctuations in metal-semiconductor contacts. In the case of electroactive dopant linear screening, characteristic values of chaotic potential amplitudes have been defined. The dependence is shown of these heterogeneities on semiconductor electrophysical parameters.

**Key words:** chaotic potential, natural dimensional effect, degenerated semiconductor.

*Адрес для переписки:* Филимонов А.В., ул. Политехническая, 29, г. Санкт-Петербург 195251, Россия  
*e-mail:* filimonov@rphf.spbstu.ru

Известно, что случайно распределённая примесь в легированных полупроводниках создает хаотический потенциал в объёме указанных систем [1]. Получить конкретные параметры этого потенциала возможно, например, в случае линейного экранирования [2], когда потенциальная энергия электрона в поле  $i$ -го заряженного центра, например, однозарядного донора на расстоянии  $r$  от него представляется в виде

$$U_i(r) = -\frac{e^2}{\epsilon r} \cdot \exp(-\lambda r). \quad (1)$$

В данном выражении  $\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость полупроводника,  $\lambda$  - параметр экранирования (величина обратная длине экранирования). Выявленные неоднородности сохраняют свой характер у диэлектрической поверхности полупроводника, где при высоких степенях легирования обостряется естественный размерный эффект [3, 4] – сравнимость масштабов областей пространственного заряда со средним расстоянием между примесными атомами. Однако, в условиях вырождения необходимо учитывать экранирование приповерхностного объёмного заряда примеси трёхмерным электронным (или дырочным) газом. При наличии же делокализованных двумерных носителей на поверхности полупроводниковых структур дополнительно возникает соответствующий диэлектрический отклик поверхностной подсистемы. Целью настоящего сообщения является анализ хаотического

потенциала на поверхности вырожденного полупроводника и полупроводниковых структур.

Будем рассматривать однородно легированный и вырожденный полупроводник донорного типа. В пределе низких температур свободный электронный газ в зоне проводимости такой системы при параболическом законе дисперсии характеризуется энергией Ферми  $E_F$ :

$$E_F = \frac{\hbar^2}{m^*} (3\pi^2 n)^{2/3}. \quad (2)$$

Здесь  $n$  – концентрация свободных электронов в зоне проводимости,  $m^*$  – их эффективная масса. При сильном вырождении как правило  $E_F \gg \delta U$  и можно пренебречь изменением плотности состояний на уровне Ферми. В рамках квазиклассического приближения параметр экранирования в этом случае определена как величина, обратная радиусу экранирования Томаса-Ферми:

$$\lambda = \sqrt{\frac{4\pi e^2 D(E_F)}{\epsilon}}. \quad (3)$$

В выражении (3)  $D(E_F)$  – величина плотности электронных состояний в зоне проводимости полупроводника на уровне Ферми. Теперь возможно проведения статистического анализа хаотического потенциала на свободной поверхности полупроводника [3]. Разумеется, конечный результат зависит от характера поверхностных

состояний. Если поверхность диэлектрическая, то в рамках статистического анализа амплитуда хаотического потенциала на поверхности полупроводника с уровнем легирования  $N_0$  имеет вид

$$\delta U = \frac{2e^2}{\varepsilon + 1} \sqrt{\frac{N_0}{\lambda}}. \quad (4)$$

Если же на поверхности вырожденного полупроводника имеется делокализованный поверхностный заряд, то при высокой плотности поверхностных состояний  $D_s$  (порядка  $10^{14} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$  и более) для определения параметров хаотического потенциала имеется возможность воспользоваться методом электростатических изображений. В этом случае флуктуациям поверхностного потенциала соответствуют флуктуации плотности поверхностного заряда  $\delta\sigma \approx eD_s\delta U$  и, следовательно,

$$\delta U = \frac{1}{D_s} \sqrt{\frac{\lambda N_0}{\pi}}. \quad (5)$$

Аналогичным образом можно оценить величину неоднородности потенциала в контакте металл-полупроводник. Известно, что изменение эффективной высоты барьера в контакте связана с величиной напряженности электрического поля у границы раздела. Произведя необходимые вычисления с использованием ранее разработанного алгоритма [3], получаем

$$\delta U_{\text{eff}} = \frac{e^2 \lambda}{\varepsilon}. \quad (6)$$

Таким образом, величина  $\delta U_{\text{eff}}$  примерно равна кулоновской энергии в диэлектрической среде с проницаемостью  $\varepsilon$  однозарядного центра на расстоянии длины экранирования от него.

Подведём некоторые итоги приведенного исследования. Прежде всего следует отметить растущие степенные зависимости рассчитанных величин  $\delta U$  и  $\delta U_{\text{eff}}$  от уровня легирования. При практически полной ионизации доноров выполняется условие  $n \approx N_0$ . Соответственно, при отсутствии на свободной поверхности полупроводника делокализованного заряда  $\delta U(N_0) \propto N_0^{5/12}$  (соотношение (4)). На проводящей же поверхности согласно (5) зависимость оказывается несколько более сильной:  $\delta U(N_0) \propto N_0^{7/12}$ . Но наиболее слабой функцией от  $N_0$  является величина характерных неоднородностей эффективного барьера в контактах металл-полупроводник. Проведённый анализ показал, что  $\delta U_{\text{eff}}$

(выражение (6)) пропорционально корню шестой степени из  $N_0$ . Другими словами, в широком диапазоне вырождения полупроводника величины флуктуаций эффективного барьера остаются практически на одном и том же уровне. При типичных значениях электрофизических параметров полупроводниковых соединений  $\text{Al}^{\text{III}}\text{V}^{\text{V}}$  ( $\varepsilon \sim 10$ ,  $m^* \sim 0.1 \cdot m$  [5],  $m$  – масса покоя электрона) и уровня легирования порядка  $10^{20} \text{ см}^{-3}$  указанные естественные неоднородности барьера характеризуются величиной около 50 мэВ. Имеются также различия в зависимости величин  $\delta U$  и  $\delta U_{\text{eff}}$  от диэлектрического отклика полупроводника. С учётом условия  $\varepsilon \gg 1$  очевидно, что при локализованном поверхностном заряде  $\delta U(\varepsilon) \propto \varepsilon^{-3/4}$ . На проводящей поверхности соответствующая зависимость существенно слабее ( $\propto \varepsilon^{-1/4}$ ). В контакте же металл-полупроводник зависимость  $\delta U_{\text{eff}}$  от диэлектрической проницаемости полупроводника оказалась наиболее сильно убывающей:  $\delta U_{\text{eff}}(\varepsilon) \propto \varepsilon^{-3/2}$ . Последний факт позволяет значительно нивелировать рассматриваемые неоднородности барьера в контакте при использовании полупроводниковых материалов с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon \gg 10$ .

Работа выполнена в рамках Государственного задания на проведение фундаментальных исследований (код темы FSEG-2023-0016).

#### Литература

1. Шкловский, Б. И. Электронные свойства легированных полупроводников. / Б. И. Шкловский, А. Л. Эфрос. – М.: Наука, 1979. – 416 с.
2. Бонч-Бруевич, В. Л. Электронная теория неупорядоченных полупроводников. / В. Л. Бонч-Бруевич, И. П. Звягин, Р. Кайпер, А. Г. Миронов, Р. Эндерлайн, Б. Эссер. – М.: Наука, 1981. – 384 с.
3. Бондаренко, В. Б. Анализ естественных неоднородностей потенциала у поверхности примесного полупроводника. / В. Б. Бондаренко, М. В. Кузьмин, В. В. Кораблев // Физика и техника полупроводников. – 2001. – Т 35, вып. 8. – С. 964–968.
4. Бондаренко, В. Б. Естественные неоднородности потенциала на поверхности полупроводника при равновесном распределении примеси. / В. Б. Бондаренко, С. Н. Давыдов, А. В. Филимонов // Физика и техника полупроводников. – 2010. – Т 44, вып. 1. – С. 44–47.
5. Sze, S. M. Physics of Semiconductor Devices. / S. M. Sze. – Bell Laboratories, Incorporated Murray Hill, New Jersey A Wiley-Interscience Publication John Wiley & Sons. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, 1981.