

# ФІЗИКА

УДК 539.4

Надточий В.А., Баранюкова И.С.

<sup>1</sup> доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой физики, ГВУЗ «ДГПУ»

<sup>2</sup> студентка 2 курса (магистратура) физико-математического факультета, ГВУЗ «ДГПУ»

e-mail: kaffizik@ukr.net

## ЦЕНТРЫ РЕКОМБИНАЦИИ НА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКА

Присутствие в полупроводниковом кристалле различных дефектов типа дислокаций, вакансий, малоугловых границ и примесных атомов значительно сокращает время жизни неосновных носителей заряда  $\tau$ . В данной работе обращено внимание на подобное действие непосредственно самой поверхности, как естественного дефекта кристаллической структуры.

**Ключевые слова:** *скорость рекомбинации, равновесное состояние, дислокация, дефекты.*

### Введение

Измерения  $\tau$  в состоянии непосредственно после выращивания кристалла, а также в пластически деформированных образцах показали обратно пропорциональную зависимость  $\tau$  от содержания дислокаций. При условии, что каждая дислокация действует как рекомбинационный центр, скорость рекомбинации  $R$  должна быть пропорциональна произведению избыточного количества неосновных носителей  $\Delta p$  над равновесным значением и числу дислокаций на  $1 \text{ см}^2$ . Необходимо было установить эту связь для поверхности.

### Основная часть

Общая тенденция по миниатюризации различных полупроводниковых устройств, переход к нанометровым размерам элементов электронных схем приводит к тому, что определяющую роль в характеристиках приборов играют поверхностные свойства тонких слоев [1]. С поверхностью кристалла связана система дискретных или непрерывно распределенных энергетических уровней, происхождение которых может быть различным. Это могут быть таммовские уровни, возникающие на поверхности в результате обрыва кристаллической решетки и являющиеся следствием нарушения периодичности

---

© Надточий В.А., Баранюкова И.С., 2018

потенциала, вызванного этим обрывом. Это могут быть также энергетические уровни, связанные с примесями, локализованными на поверхности (аналогично локальным примесным уровням в объеме кристалла), или обусловленные поверхностными дефектами кристаллической решетки [2]. Наконец, поверхностные уровни могут быть связаны с адсорбцией на поверхности молекул окружающего газа. Природа поверхностных уровней должна выясняться в каждом случае для данного кристалла. В тонких образцах, толщина которых сравнима с длиной диффузионного смещения, имеет место, в основном, рекомбинация электронов и дырок на поверхности кристалла. Параметр  $s$  - скорость поверхностной рекомбинации впервые был введен Шокли [3] в виде стокового граничного условия

$$j_s = -s\Delta p_s, \quad (1)$$

где  $j_s$  — поток электронов и дырок на поверхность,  $\Delta p_s$  — избыточная концентрация неосновных носителей заряда на поверхности. В равновесном состоянии поток дырок, которые подходят к поверхности кристалла  $n$ -типа, должен равняться потоку дырок, которые перемещаются в обратном направлении. Но при отклонении от равновесного состояния эти потоки уже не компенсируют друг друга. Нарушение равновесия приводит к появлению направленного потока неравновесных носителей к поверхности. Тогда число дырок, падающих на единичную площадь поверхности за единицу времени равно  $\frac{1}{4}(\nu_t p)$ , где  $\nu_t$  — средняя тепловая скорость дырок,  $p$  — концентрация дырок. Число дырок, что ушли с поверхности за единицу времени, будет равняться  $\frac{1}{4}(r\nu_t p) + g$ , где  $r$  — вероятность отражения дырки,  $g$  — скорость возникновения дырок на единице площади поверхности. В состоянии равновесия имеем соотношение  $\frac{1}{4}\nu_t p_0 = \frac{1}{4}r\nu_t p_0 + g_0$  [3], так что

$$g_0 = \frac{1}{4}(1 - r)\nu_t p_0. \quad (2)$$

При отсутствии равновесия, но в стационарных условиях аналогично  $\frac{1}{4}\nu_t p = \frac{1}{4}r\nu_t p + g$ . Отсюда

$$g = \frac{1}{4}(1 - r)\nu_t p. \quad (3)$$

Результирующая скорость генерации неравновесных носителей тока у поверхности

$$(g - g_0) = \frac{1}{4}(1 - r)\nu_t \Delta p = s\Delta p, \quad (4)$$

где  $s = \frac{1}{4}(1 - r)\nu_t$ , имеет размерность скорости и называется скоростью поверхностной рекомбинации.

Если рассмотреть плоскую поверхность образца, по всему объему которого со скоростью  $R_g$  равномерно генерируются неравновесные носители заряда, тогда распределение концентрации избыточных дырок определяется уравнением

$$D \frac{d^2 \Delta p}{dx^2} = \frac{\Delta p}{\tau_p} - R_g, \quad (5)$$

где  $x$  — расстояние от поверхности до некоторой точки в полупроводнике. Влияние поверхностной рекомбинации учтем через граничное условие при  $x = 0$ , где справедливо соотношение

$$D \frac{d\Delta p}{dx} = s\Delta p. \quad (6)$$

В качестве второго граничного условия примем, что  $\Delta p \rightarrow R_g\tau_p$ , если  $x \rightarrow \infty$ . Тогда решение, удовлетворяющее уравнению (5), будет иметь вид

$$\Delta p = \Delta p_1 \exp\left(-\frac{x}{L_p}\right) + R_g. \quad (7)$$

Используя граничное условие при  $x = 0$ , получим

$$-\frac{D\Delta p_1}{L_p} = s(\Delta p_1 + R_g\tau_p), \quad (8)$$

откуда

$$\Delta p_1 = -\frac{sR_g\tau_p^2}{L_p + s\tau_p}, \quad (9)$$

так как  $D/L_p = L_p/\tau_p$ . Таким образом, имеем

$$\Delta p = R_g\tau_p \left[ 1 - \frac{s\tau_p \exp\left(-\frac{x}{L_p}\right)}{L_p + s\tau_p} \right]. \quad (10)$$

Уменьшение величины  $\Delta p$  вблизи поверхности, обусловленное поверхностной рекомбинацией, сказывается только на расстояниях не более диффузионной длины  $L_p$  от поверхности. Степень уменьшения  $\Delta p$  зависит от соотношения  $s/\nu_p$ , где  $\nu_p$  — скорость, равная  $L_p/\tau_p$ . Если  $s \gg \nu_p$ , то  $\Delta p_0$  очень мало и уменьшение концентрации избыточных дырок вблизи поверхности будет значительным.

Таким образом, введение дефектов структуры в приповерхностный слой кристаллов может значительно уменьшить время жизни  $\tau$  и диффузионную длину пробега  $L_D$  неравновесных носителей заряда. Для многих полупроводниковых приборов (диодов, транзисторов, твердотельных инжекционных лазеров, оптоэлектронных приборов) эти параметры определяют рабочие характеристики и работоспособность. С другой стороны, контролируя изменение  $\tau$  и  $L_D$  под действием внутренних и внешних факторов, можно исследовать процессы дефектообразования, отклонения электрофизических характеристик в кристаллах от первоначальных значений и явления деградации во времени. Поскольку внешнее действие на кристалл (облучение частицами высоких энергии, легирование примесями, деформация при низких температурах) возбуждает генерацию дефектов в приповерхностных слоях, то в процессе измерений  $\tau$  и  $L_D$  необходимо учитывать влияние самой поверхности, где скорость рекомбинации  $s$  может быть значительной и близкой к скорости рекомбинации неравновесных электронов и дырок в приповерхностном слое. Поэтому определение  $s$  должно быть сопутствующим процессом при измерениях  $\tau$  и  $L_D$  [4].

## Выводы

Введение дефектов в поверхностные слои кристаллов при технологических обработках ухудшает качественные характеристики приборов на их основе. Кроме того, сама поверхность вносит дополнительные изменения в свойства приповерхностных слоев, снижая время жизни неравновесных носителей заряда и диффузионную длину пробега  $L_D$ . Поэтому для увеличения процента выхода готовой продукции высокого качества следует удалять приповерхностные дефектные слои химическим травлением и защищать поверхность диэлектрическими покрытиями.

## Литература

1. *Снитко О.В. и др.* Проблемы физики поверхности полупроводников / О.В. Снитко, А.В. Саченко, В.Е. Примаченко [и др.]. — К.: Наукова думка. — 1981. — 304 с.
2. *Shockley W.* On the surface states associated with a periodic potential / W. Shockley // *Physical Review*. — 1939. — Vol. 56, №4. — P. 317–323.
3. *Смит Р.* Полупроводники / Р. Смит. — М.: Мир — 1982. — 560 с.
4. *Уколов А.И.* Распределение дефектов в тонких полупроводниковых пластинах при низкотемпературной деформации / А.И. Уколов, В.А. Надточий, Н.К. Нечволод // *ФТВД*. — 2013. — Т.23, №4. — С. 83–91.

**Nadtochiy Viktor A., Baranyukova Irina S.**

Donbas State Pedagogical University, Sloviansk, Ukraine.

**Recombination centers on the surface of a semiconductor**

The presence of various defects in the semiconductor crystal such as dislocations, vacancies, small-angle boundaries, and impurity atoms significantly reduces the lifetime of minority carriers of charge  $\tau$ . In this paper attention is drawn to a similar action directly on the surface itself, as a natural defect in the crystal structure.

**Keywords:** *recombination rate, equilibrium state, dislocation, defects.*