

**МЕТОД КОНТРОЛЯ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ  
НЕРАВНОВЕСНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА ИЗ ИЗМЕРЕНИЙ ФОТОТОКА  
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР**

**Сопряков В.И., Полещук П.А.**

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

Контроль дефектно-примесного состава и электрофизических параметров полупроводниковых материалов является одним из важнейших направлений научных исследований в области полупроводниковой электроники. Время жизни неосновных носителей заряда ( $\tau$ ) - один из основных параметров материала, определяющий характеристики полупроводниковых приборов. Измерение  $\tau$  позволяет контролировать присутствие малых примесных концентраций и структурных дефектов в полупроводниковых материалах, поэтому определение  $\tau$  является весьма важным для технологии активных элементов полупроводниковой электроники.

Для оценки совершенства и быстродействия полупроводниковых структур существуют две группы методов. Первые основаны на изучении релаксации проводимости и заключаются в измерении времени или заряда переключения полупроводникового диода, однако измеряемые величины не могут быть однозначно связаны с  $\tau$ . Вторая группа методов заключается в измерении стационарного  $\tau$ . Измерение обратного тока насыщения позволяет рассчитать  $\tau$  в базовой области диода, однако неопределенность свойств поверхности и наличие утечек не позволяют широко использовать этот метод.

Известен метод определения диффузионной длины ( $L$ ) неосновных носителей заряда (ННЗ) и  $\tau$  из измерений фототока р-п перехода. Фототок в резком асимметричном р<sup>+</sup>-п переходе определяется диффузией дырок к переходу. Тогда если  $L_p$  много меньше толщины базы и много больше ширины ( $h$ ) области пространственного заряда (ОПЗ), фототок короткого замыкания

$$I_{кр} = eGSL, \quad (1)$$

где  $G$  - скорость генерации электронно-дырочных пар, однородная по объему,  $S$  - площадь перехода,  $e$  - заряд электрона. Отсюда, на основании соотношения Эйнштейна

$$\tau_p = L_p^2 / D_p, \quad (2)$$

где  $D_p$  - коэффициент диффузии дырок. Использование выражения (1) возможно только при условии  $L \gg h$ , а также при известном значении  $G$ . Другие методы, основанные на измерении фототока, трудоемки, так как требуют проведения дополнительных измерений для определения скоростей объемной или поверхностной генерации

носителей, коэффициента поглощения света или изготовления образцов с полупрозрачным электродом.

При использовании оптических методов на величину  $L$  и  $\tau$  существенно влияет скорость поверхностной рекомбинации, которая зависит от способа обработки поверхности и условий генерации носителей (способ возбуждения, интенсивность, спектральный состав). В настоящей работе предлагается метод, свободный от указанных недостатков и основанный на измерении зависимостей фототока и емкости р<sup>+</sup>-п- перехода от обратного смещения.

Рассмотрим р<sup>+</sup>-п переход, в котором ширина ОПЗ сравнима с диффузионной длиной ННЗ, что характерно для кремниевых структур с концентрацией мелких примесей в диапазоне  $10^{15} \dots 10^{16} \text{ см}^{-3}$  широко применяемых в технологии. Положим также, что скорость генерации электронно-дырочных пар при фотовозбуждении равномерна по объему, а электрическое поле в ОПЗ при приложенных обратных напряжениях ( $U$ ) слабое, так что дрейф и умножение носителей заряда можно не учитывать. Тогда фотогенерация носителей будет происходить как в объеме базовой области, так и в ОПЗ, однако зависимость плотности фототока ( $j$ ) от обратного смещения будет определяться только шириной ОПЗ  $h(U)$

$$j(U) = eG[L_p + h(U)]. \quad (3)$$

В случае резкого р<sup>+</sup>-п перехода

$$h(U) = [A(U + U_k)]^{1/2}, \quad (4)$$

где  $A = \sqrt{\epsilon\epsilon_0 / 2\pi e N_d}$ ,  $N_d$  - концентрация мелких доноров в базовой области, определяемая из вольт-фарадной характеристики (ВФХ),  $U_k$  - контактная разность потенциалов. Продифференцировав выражение (3) по напряжению, можно получить зависимость

$$(dj/dU)^{-2} = (2/eAG)^2 (U + U_k), \quad (5)$$

которая представляет прямую линию с напряжением отсечки, равным  $U_k$ . Из наклона этой прямой  $\Delta(dj/dU)^{-2} / \Delta U = K$  можно определить скорость генерации

$$G = 2/eA\sqrt{K}. \quad (6)$$

Тогда на основании соотношения Эйнштейна (2) из (3), (6) следует

$$\tau_p = (A^2 / D_p) [0,5\sqrt{K} j(U) - \sqrt{U + U_k}]^2. \quad (7)$$

Для расчета  $\tau_p$  из (7) значение фототока  $j(U)$  следует брать в средней точке диапазона обратных смещений.

Так как в переходах, полученных методом диффузии концентрация ионизированных примесей зависит от координаты, то для вычисления видоизмененных параметров  $U_k^*$  (напряжение отсечки ВФХ),  $A^*$  и  $K^*$  использовались линейные участки ВФХ  $C^{-2} = f(U)$  и зависимости (5), расположенные в области высоких напряжений. При вычислении  $\tau_p$  значение  $j(U)$  необходимо также брать в средней точке линейного участка зависимости (5).

Измерения проводились при нормальной температуре на постоянном токе при освещении образца со сколотыми боковыми гранями вдоль плоскости р-п перехода лампой накаливания через сферическое зеркало. Фототок определялся путем вычитания темнового тока из полного. Длина поглощения собственного света, рассчитанная из данных измерения фототока, составила 0,6 см, что при площади образцов 0,04 см<sup>2</sup> обеспечивало условие однородной генерации. Барьерная емкость перехода ( $C$ ) измерялась на частоте 1 МГц прибором Е7-12.

Предложенным методом были исследованы четыре серии кремниевых р<sup>+</sup>-п структур с концентрацией фосфора в диапазоне  $(3 \dots 5) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ : 1, 2 изготовленные ионным внедрением бора (2 – облученные электронами); 3, 4 – изготовленные диффузией бора (4 – с примесью золота). Результаты измерений представлены на рисунках 1 и 2, где номера кривых соответствуют номерам серий образцов. Как видно, напряжения отсечки  $U_k^*$  на ВФХ и зависимостях фототока совпадают, что

подтверждает результаты теоретического анализа. Значения  $\tau_p$  для различных серий составляют: 1 – 100 нс (ионное легирование), 2 – 13 нс (облученные электронами); 3–320 нс (диффузия), 4–45 нс (с примесью золота). Как видно, метод дает результаты, хорошо коррелирующие с технологией изготовления и дефектно-примесным составом, что может быть использовано для контроля их влияния.

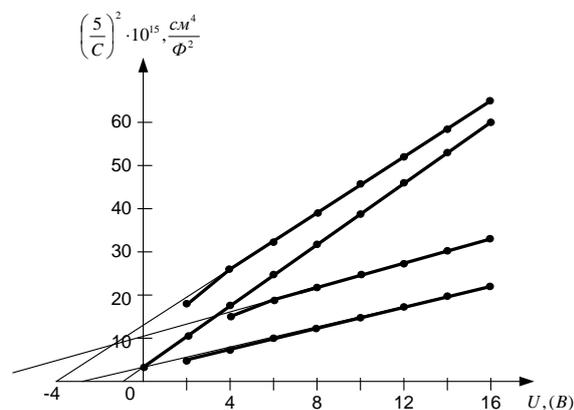


Рисунок 1

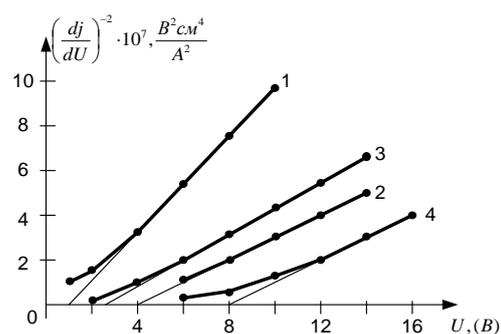


Рисунок 2

УДК 543.645:57.033

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЕМКОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БИОАНАЛИЗАТОРОВ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОДНЫХ БИОСЕНСОРНЫХ УСТРОЙСТВ

Плескачевский Ю.М.<sup>1</sup>, Реутская О.Г.<sup>1</sup>, Люцко К.М.<sup>1</sup>, Песнякевич А.Г.<sup>2</sup>, Таратын И.А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет  
Минск, Республика Беларусь

<sup>3</sup>ОАО «Минский НИИ радиоматериалов»  
Минск, Республика Беларусь

Передача сигнала и общие характеристики биоанализаторов часто определяются топологией и составом иммобилизирующей поверхности, которая выполняет функцию контакта между чувствительным элементом и биологическим образцом. Наиболее распространенные методы модифика-

ции поверхности, различные механизмы электрохимического взаимодействия и выбор молекул рецептора распознавания влияют на предельную чувствительность датчика в целом. Существуют различные методы электрохимического обнаружения биоорганизмов. При измерении электриче-