

УДК 621.382

## ФОТОЕМКОСТНОЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ПРИМЕСЕЙ И ДЕФЕКТОВ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ

Сопряков В.И., Головня К.Ч.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

**Аннотация.** Предложен фотоемкостной метод, позволяющий контролировать параметры ловушек неосновных и основных носителей заряда в полупроводниковых структурах с малым временем жизни (1–30 нс). Метод основан на перезарядке глубоких уровней импульсным фототоком и измерении кривых релаксации высокочастотной емкости.

**Ключевые слова:** полупроводниковые структуры, глубокие примеси, фототок, высокочастотная емкость.

## PHOTOCAPACITIVE METHOD FOR MONITORING THE PARAMETERS OF IMPURITIES AND DEFECTS IN SEMICONDUCTOR STRUCTURES

Soprykov V., Golovnia K.

Belarusian national technical university  
Minsk, Belarus

**Abstract.** A photocapacitive method is proposed that makes it possible to control the parameters of traps of minority and major charge carriers in semiconductor structures with a short lifetime (1–30 ns). The method is based on recharging deep levels by a pulsed photocurrent and measuring the relaxation curves of high-frequency capacitance.

**Key words:** semiconductor structures, deep impurities, photocurrent, high-frequency capacitance

Адрес для переписки: Сопряков В.И., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь  
e-mail: vitavits@mail.ru

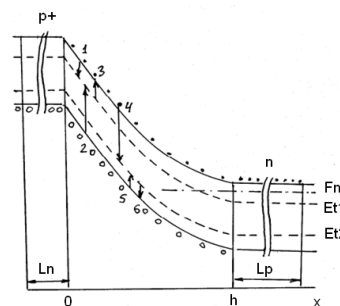
Контроль электрически активных примесей и дефектов в полупроводниковых структурах и определение их параметров играет важную роль, так как с их наличием связана величина времени жизни неосновных носителей заряда (ННЗ), а также процессы, приводящие к деградации приборов. Глубокие энергетические уровни примесей и дефектов могут быть локализованы, как в верхней, так и в нижней половине запрещенной зоны. При этом они, как правило, захватывают носители заряда из ближайшей энергетической зоны разрешенных состояний. Поэтому методом релаксационной спектроскопии после переключения напряжения на р<sup>+</sup>-n-переходе из прямого в обратное легко контролировать ловушки основных носителей заряда (ОНЗ).

Для контроля ловушек ННЗ применяется переключение из состояния с прямым током к обратному напряжению. При этом неравновесное заполнение глубоких центров, возникающее в базовой области при прямом смещении, изменяется в области пространственного заряда (ОПЗ) вследствие термической эмиссии ННЗ. Данный метод применим к изучению полупроводниковых материалов с относительно низкими концентрациями мелких примесей ( $10^{14}$  см<sup>-3</sup>) и высокими временами жизни ННЗ.

В материалах с концентрацией мелких примесей в диапазоне  $3 \cdot 10^{15}$ – $1 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>, содержащих глубокие центры (ГЦ), время жизни ННЗ может быть весьма малым (1–30 нс), что приводит к тому, что неравновесное состояние, возникающее

при прямом смещении, за время переключения исчезает. В работе предложен метод контроля полного спектра ловушек основных и неосновных носителей заряда при условии объемного фотовозбуждения электронно-дырочных пар.

Рассмотрим схему электронных переходов, возникающих при освещении обратно-смещенного р<sup>+</sup>-n-перехода с глубокими уровнями белым светом (рис. 1). При таком освещении слабо поглощаемая компонента «собственного» света в ближней инфракрасной области создает объемное возбуждение и стационарные потоки электронов и дырок  $\Delta n(x) = j_n(x)/e$  и  $\Delta p(x) = j_p(x)/e$ , где  $j_n$  и  $j_p$  – плотности электронного и дырочного фототоков.



1, 4 – процессы захвата электронов; 2, 5 – процессы захвата дырок; 3, 6 – процессы термической эмиссии соответственно электронов и дырок

Рисунок 1 – Схема электронных переходов в обратно-смещенном р<sup>+</sup>-n переходе с глубокими уровнями при освещении белым светом

В результате процессов захвата электронов и дырок на глубокие уровни (рис. 1) возникает их неравновесное заполнение. В первый момент после выключения освещения это неравновесное заполнение сохраняется, так как условие обеднения в ОПЗ устанавливается с «максвелловским» временем ( $10^{-12}$  с), значительно меньшим времени жизни ННЗ. В дальнейшем состояние заселенности глубоких уровней изменяется вследствие термической эмиссии носителей заряда (рис. 1, процессы 3, 6). Таким образом, энергетическое положение глубоких уровней  $E_{n1}$  и  $E_{n2}$ , а также сечение захвата носителей заряда могут быть отдельно определены методом изотермической релаксации емкости.

Значение фототока определяется генерацией электронно-дырочных пар в слоях с шириной, равной диффузионным длинам ННЗ в областях электронейтральности ( $L_p, L_n$ ), а также в области пространственного заряда ( $h$ )

$$j = j_n(x) + j_p(x) = e\Delta n(x) + e\Delta p(x),$$

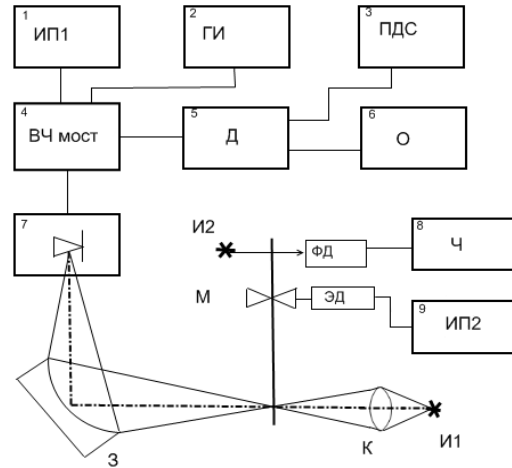
где  $\Delta n(x) = G(L_n + x)$ ,  $\Delta p(x) = G(L_p + h - x)$ ,  $G$  – скорость генерации электронно-дырочных пар. В общем случае фототок зависит от координаты, однако можно показать, что неоднородность заполнения глубокого уровня незначительна, и для оценок можно использовать среднее значение фототока, определяемое из опыта.

В результате решения уравнения непрерывности получены аналитические выражения для концентрации электронов и дырок на глубоких центрах, которые могут быть использованы для оценки их концентрации.

Для наблюдения и регистрации кривых релаксации емкости при постоянной температуре после перезарядки глубоких центров электрическим смещением или фотовозбуждением был собран макет измерительной установки (рис. 2).

Задание электрических режимов образца осуществляется источником постоянного обратного напряжения в диапазоне 0–50 В (1) и генератором импульсов для переключения смещения от нулевого к обратному (2). Сигнал разбаланса моста представляет последовательность радиоимпульсов с несущей частотой 1МГц и огибающей, представляющей кривую релаксации емкости. Образец помещался в криостат с регулируемой температурой в диапазоне 77–273 °К. Для контроля параметров ловушек ННЗ необходимо, чтобы световые импульсы могли подаваться на образец с различной частотой. Для этого используется модулятор света, состо-

ящий из диска с вырезами (М), вращаемого электродвигателем постоянного тока (ЭД). Частота световых импульсов могла регулироваться в диапазоне 10–1000 Гц и выбиралась из соотношений оптимального заполнения импульса переходным процессом.



- 1 – источник постоянного смещения образца;
- 2 – генератор импульсов; 3 – потенциометр двухкоординатный самопишущий;
- 4 – высокочастотный мост полных проводимостей;
- 5 – детектор; 6 – осциллограф; 7 – криостат;
- 8 – частотомер; 9 – регулируемый источник постоянного тока. ЭД – электродвигатель постоянного тока; М – модулятор света (диск с вырезами); ФД – фотодиод (источник опорного напряжения); И1, И2 – источники света (лампы накаливания); К – конденсор; З – сферическое зеркало

Рисунок 2 – Функциональная схема установки для измерения релаксации емкости при фотовозбуждении

Образцы  $p^+n$ - и  $n^+p$ -переходов представляли квадратные или прямоугольные пластинки толщиной 300 мкм и площадью 1–10 мм<sup>2</sup> со сколотыми боковыми гранями. Оценка фототока на образцах различной формы при подсветке грани показала, что длина поглощения «собственного» света составляла 0,6 см, что обеспечивало условия равномерной генерации в объеме. В результате контроля  $n^+p$ -переходов на базе кремния р-типа ( $p = 1,5 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>), облученных электронами с энергией 3,7 МэВ, найдены пять глубоких центров:  $E_v + 0,18$  эВ;  $E_v + 0,35$  эВ;  $E_c - 40$  эВ;  $E_c - 22$  эВ;  $E_c - 0,17$  эВ, из которых только один ( $E_v + 0,18$  эВ) не перезаряжался под действием света, что указывает на асимметрию сечений захвата электронов и дырок  $\sigma_p \ll \sigma_n$ .