

01;05;06

## **Определение параметров глубоких уровней по дифференциальным коэффициентам вольт-амперных характеристик**

© С.В. Булярский, М.О. Воробьев, Н.С. Грушко, А.В. Лакалин

Ульяновский государственный университет

Поступило в Редакцию 4 сентября 1998 г.

Глубокие уровни определялись в GaP светодиодах, используя дифференциальные коэффициенты вольт-амперных характеристик. Параметры, определенные по разным методикам, соответствуют друг другу. Условия измерений таковы, что их можно проводить на пластинах, что делает предлагаемые методы весьма перспективными.

Классическая работа [1] положила начало исследованию процессов рекомбинации в области пространственного заряда (ОПЗ). В дальнейших теоретических работах уточнялся вид вольт-амперных характеристик. Экспериментальные работы, как правило, ограничивались констатацией механизма переноса тока в данном диапазоне прямых смещений. И только в работах [2–4] разработаны методы обработки вольт-амперных характеристик, основанные на разделении интегральных рекомбинационных процессов на отдельные составляющие с последующим вычислением параметров глубоких центров, участвующих в рекомбинации. В настоящей работе использованы новые дифференциальные методики определения энергии активации глубоких уровней (ГУ) [4].

Дифференциальные методики позволяют выявить особенности, которые на интегральных характеристиках слабо выражены. В частности, по вольт-амперным характеристикам (ВАХ) при прямом смещении можно вычислить параметры ГУ. В настоящей работе показано на примере исследования свойств диодов зеленого свечения на основе GaP, легированного азотом.

При низком уровне инжекции тока рекомбинации в ОПЗ  $p-n$ -перехода широкозонного полупроводника, как правило, превосходят диффузионные токи. ВАХ описывается характерным выражением вида:

$$J = A(U) \exp(qU/\beta kT), \quad (1)$$

где  $\beta$  принимает значения от 1 до 2 (для диффузионных токов  $\beta = 1$ ). Подробно физические процессы рекомбинации в ОПЗ  $p-n$ -перехода изложены в работах [1–8].  $A(U)$ -коэффициент пропорциональности, зависит от параметров ГУ. Экстремумы производной дифференциального показателя наклона ВАХ ( $\beta$ ) определяются формулой

$$\beta = \frac{qJ_r}{kT} \left( \frac{\partial J_r}{\partial U} \right)^{-1}. \quad (2)$$

Ток рекомбинации ( $J_r$ ) в ОПЗ  $p-n$ -перехода, с участием нескольких глубоких двухзарядных уровней, описывается выражением [5]:

$$J_r = \sum_{m=1}^s \frac{qw c_{nm} c_{pm} n_i^2 (e^{qU/kT} - 1) N_{tm}}{2n_i \sqrt{c_{nm} c_{pm}} e^{qU/2kT} + c_{nm} n_{1m} + c_{pm} p_{1m}} \times \frac{2kT}{q(V_d - U)}, \quad (3)$$

$q$  — заряд электрона,  $w$  — ширина ОПЗ,  $s$  — число ГУ,  $n_{1m} = N_c \exp(-\frac{E_{tm}}{kT})$ ,  $p_{1m} = N_v \exp(-\frac{E_{tm}}{kT})$ ,  $c_n$ ,  $c_p$  — усредненные по всем состояниям коэффициенты захвата электрона и дырки данным центром,  $N_t$  — концентрация ГУ,  $E_t$  — положение ГУ в запрещенной зоне,  $E_{tm} = E_c - E_t$ ,  $E_{tp} = E_t - E_v$ ,  $V_d$  — диффузионный потенциал.

Формула (2) несколько отличается от выражений работы [1]. Это различие подробно рассмотрено в [6] и не будем на нем останавливаться. В работах [2–5] установлены пределы применимости выражения [3].

Из формулы (2) следует, что дифференциальный показатель наклона ВАХ ( $\beta$ ) содержит параметры ГУ (энергии их термической активации), которые могут быть найдены. По максимумам ( $U_{0m}$ ) зависимости производной ( $\beta$ ) по напряжению прямого смещения находим

$$E_{tm} = \frac{E_g - qU_{0m}}{2} + \delta. \quad (4)$$

Полагаем, что ГУ лежит выше середины запрещенной зоны и  $c_p p_1 \ll c_n n_1$ ,  $\delta = \frac{kT}{2} \ln \left( \frac{c_n N_c}{c_p N_v} \right)$ . Данная величина, как и коэффициенты

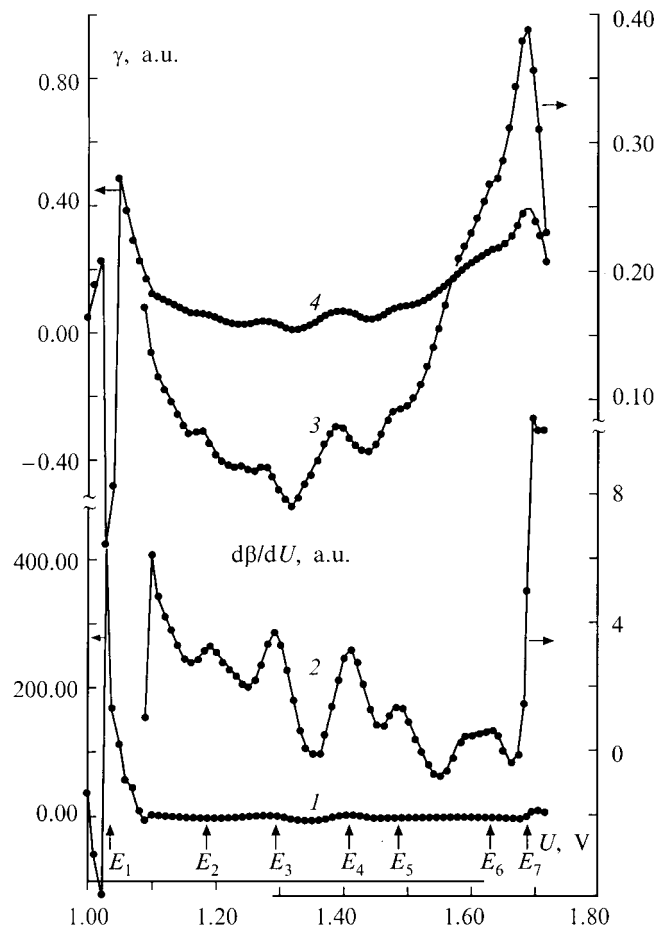
Энергии активации ГУ, определенные разными методами для GaP светодиодов (образец 5–2).

Метод	$E_7$ , eV	$E_6$ , eV	$E_5$ , eV	$E_4$ , eV	$E_3$ , eV	$E_2$ , eV	$E_1$ , eV	$E_8$ , eV	$E_9$ , eV	$E_{10}$ , eV
TCE		0.35				0.53	0.63	0.66	0.81	1.0
$R_{np}$	0.29	0.33			0.48	0.56	0.61			
$\frac{d\beta}{dU}$	0.27	0.32	0.38	0.42	0.48	0.52	0.61			
$\gamma$	0.26	0.30	0.37	0.41	0.46	0.54	0.61			

захвата, как правило, неизвестна. Но отношения коэффициентов захвата можно определить, измеряя температурные зависимости прямого тока [2,3]. Если допустить, что  $c_n/c_p = 100$ , то при  $T = 300$  К систематическая ошибка  $\delta \approx 0.04$  eV для GaP. На рисунке (кривые 1 и 2) приведены экспериментальные зависимости  $\frac{d\beta}{dU}$ , измеренные на светодиодах зеленого свечения. Измерения выполнены на установке, управляемой ПЭВМ. Напряжение прямого смещения изменялось с шагом, равным 0.01 V. В этом случае на пиках производной можно получить несколько экспериментальных точек. Повторные измерения хорошо воспроизводились. Светодиоды одной серии показывали одинаковые результаты. Таким образом, можно говорить о достоверности полученных экспериментальных кривых. Кривые приведены в разных масштабах, так как вклад различных центров в рекомбинационный процесс не равнозначен. Из кривой 1 видно, что максимальный вклад в рекомбинацию вносит  $E_1$ . Значительно меньший вклад вносит  $E_7$ , а также другие рекомбинационные уровни. Энергии активации, определенные по формуле (4), приведены в таблице.

Недостатком данного метода является необходимость вычисления второй производной от экспериментальных данных, что требует применения специальных численных методов. Поэтому удобнее использовать другой дифференциальный коэффициент, определение которого требует вычисления только первой производной:

$$\gamma = \left( \frac{\partial R_{np}}{\partial U} \right) \frac{2kT}{q} \frac{1}{R_{np}}. \quad (5)$$



Дифференциальные коэффициенты ВАХ. Номер экстремума соответствует номеру уровня (см. таблицу).

Приведенная скорость рекомбинации  $R_{np}$  вычисляется из экспериментальных данных и определяется следующей формулой [4]:

$$R_{np} = \frac{J}{qwSn_i \left[ \exp\left(\frac{qU}{2kT}\right) - 1 \right]} \cdot \frac{q(V_d - U)}{2kT}. \quad (6)$$

Связь этой величины с параметрами ГУ устанавливается формулой [2,3]:

$$R_{np} = \frac{c_n c_p n_i N_t \left[ \exp\left(\frac{qU}{2kT}\right) + 1 \right]}{2n_i \sqrt{c_n c_p} \exp\left(\frac{qU}{2kT}\right) + n_1 c_n + p_1 c_p}. \quad (7)$$

Напряжение, при котором коэффициент (5) становится минимальным (см. рисунок, кривые 3, 4), позволяет определять энергию активации ГУ по формуле (4). При этом должны выполняться определенные условия, полученные в работе [4]. Для ГУ, возникающих при изготовлении промышленных полупроводниковых приборов, данные условия выполняются. Функция вида (4) имеет минимумы в точках  $U_{0m}$ . Амплитуда каждого минимума будет отличаться в зависимости от вклада конкретного ГУ в общий рекомбинационный ток. Из рисунка (кривые 3, 4) видно, что основной вклад в рекомбинационный процесс вносят уровни  $E_1$ ,  $E_3$ ,  $E_6$ ,  $E_7$ . Энергии активации данных уровней приведены в таблице.

Результаты определения энергий активации по дифференциальным параметрам сопоставляются в таблице с данными емкостной спектроскопии и методом разделения скорости рекомбинации на составляющие, описанным ранее в работах [2–4]. Данные независимых экспериментов хорошо согласуются между собой, что говорит о достоверности параметров ГУ, полученных с использованием дифференциальных методик. Измерения проводятся при фиксированной температуре, чаще всего комнатной. Условия измерений таковы, что их можно выполнять непосредственно на пластинах, до их разделения и корпусирования. Эти несомненные преимущества делают данные методики весьма перспективными.

## Список литературы

- [1] *Sah S.T., Noyce R.N., Shockley W.* // Proc. IRE. 1957. N 14. P. 1228.
- [2] *Булярский С.В., Грушко Н.С.* Физические принципы функциональной диагностики  $p-n$  переходов с дефектами. Кишинев: Штиинца, 1992. С. 235.
- [3] *Булярский С.В., Грушко Н.С.* Генерационно-рекомбинационные процессы в активных элементах. М.: МГУ, 1995. С. 399.
- [4] *Булярский С.В., Грушко Н.С., Лакалин А.В.* // Заводская лаборатория. 1997. № 7. С. 25–31.

- [5] Булярский С.В., Грушко Н.С., Лакалин А.В. // Тез. межд. конф. Центры с глубокими уровнями в полупроводниках и полупроводниковых структурах. Ульяновск, 1997. С. 65–66.
- [6] Булярский С.В., Грушко Н.С., Сомов А.И., Лакалин А.В. // ФТП. 1997. Т. 31. С. 1148–1150.
- [7] Булярский С.В., Радауцан С.И. // ФТП. 1981. Т. 15. С. 1443–1446.
- [8] Булярский С.В., Стратан И.В., Грушко Н.С. // ФТП. 1987. Т. 21. С. 1730–1732.