

- [1] Матаре Г. Электроника дефектов в полупроводниках. М., 1974. 464 с.  
 [2] Любов Б. Я., Власов Н. М. // ФММ. 1979. Т. 47. В. 1. С. 140—157.  
 [3] Lugakov P. F., Shusha V. V. // Phys. St. Sol. (a). 1984. V. 86. N 2. P. 309—312.  
 [4] Hall R. N. // Phys. Rev. 1952. V. 87. N 2. P. 387—388. Shockley W., Read W. // Phys. Rev. 1952. V. 87. N 4. P. 835—842.  
 [5] Казакевич Л. А., Лугаков П. Ф., Филиппов И. М., Шуша В. В. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 4. С. 767—770.  
 [6] Еремюк В. Г., Никитенко В. П., Якимов Е. Б. // ЖЭТФ. 1977. Т. 73. В. 3. С. 1129—1139.  
 [7] Watkins G. D., Corbett J. W. // Phys. Rev. 1964. V. 134A. N 5. P. 1359—1377.  
 [8] Lee Y. H., Cheng L. J., Gerson J. D., Mooney P. M., Corbett J. W. // Sol. St. Commun. 1977. V. 2. N 1. P. 109—111.  
 [9] Lee Y. H., Corbett J. W., Brower K. L. // Phys. St. Sol. (a). 1977. V. 41. N 2. P. 637—647.  
 [10] Kazakevich L. A., Lugakov P. F. // Phys. St. Sol. (a). 1982. V. 71. N 1. P. 99—108.  
 [11] Емцев В. В., Машовец Т. В. Примеси и точечные дефекты в полупроводниках. М., 1981. 248 с.

Научно-исследовательский институт  
 прикладных физических проблем  
 им. А. Н. Севченко БГУ им. В. И. Ленина  
 Минск

Получено 6.09.1988  
 Принято к печати 17.11.1988

ФТП, том 23, вып. 4, 1989

## СРАВНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГЛУБОКИХ ЦЕНТРОВ В ВЫСОКООМНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ МЕТОДОМ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ РЕЛАКСАЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ В ВАРИАНТАХ ТЕМПЕРАТУРНОГО И ЧАСТОТНОГО СКАНИРОВАНИЯ

Омельяновский Э. М., Поляков А. Я., Тишкин М. В.

Метод фотоэлектрической релаксационной спектроскопии (ФЭРС [<sup>1</sup>], в английской аббревиатуре OTCS [<sup>2</sup>], PITS [<sup>3</sup>]) в настоящее время широко используется для анализа спектра глубоких уровней в высокоомных полупроводниковых материалах (см., например, [<sup>4-7</sup>]). Идеологически метод близок к известному методу DLTS [<sup>8</sup>]: в нем изучается температурная зависимость времени релаксации фототока диода Шоттки (ФЭРС, OTCS) или фототока структуры с омическими контактами (PITS), для экспрессного получения спектра глубоких уровней строится, как и в DLTS, температурная зависимость разности значений релаксирующего фототока в момент времени  $t_1$  и  $t_2$  ( $t_2 \gg t_1$ ). Измеряя несколько спектров с различными временными «окнами»  $t_1$  [<sup>2</sup>] или записывая при различных температурах полные кривые релаксации и строя затем спектры с выбранными значениями  $t_1$  [<sup>1</sup>], можно определить энергию ионизации  $E_i$  и сечение захвата носителей  $\sigma$  из выражения [<sup>2</sup>]

$$1/t_1 = e_n(T_m) = N_c \sigma v_t \exp(-E_i/kT_m), \quad (1)$$

где  $T_m$  — температурное положение пика в спектре,  $N_c$  — эффективная плотность состояний (для определенности — в зоне проводимости),  $k$  — постоянная Больцмана,  $v_t$  — тепловая скорость.

Представляло интерес сравнить спектры, получаемые в методе ФЭРС в стандартном варианте, и спектры, получаемые при постоянной температуре за счет изменения частоты импульсов возбуждения, как это делается в методе DLTS (см., например, [<sup>9</sup>]). Изучение данного вопроса и служит предметом настоящего сообщения.

Управляемая ЭВМ экспериментальная установка для измерения спектров ФЭРС подробно описана нами в [1]. Отличием является только использование вместо непрерывного He—Ne-лазера с механическим модулятором арсенид-галлиевого светодиода мощностью около 20 мВт, запитываемого от генератора, работа которого контролировалась ЭВМ. Спектры ФЭРС при температурной развертке записывались обычным образом [1] в диапазоне 80–400 К. При частотном сканировании временной интервал между возбуждающими импульсами изменялся от 10 мс до 1 с, регистрировалась в этом временном промежутке кри-

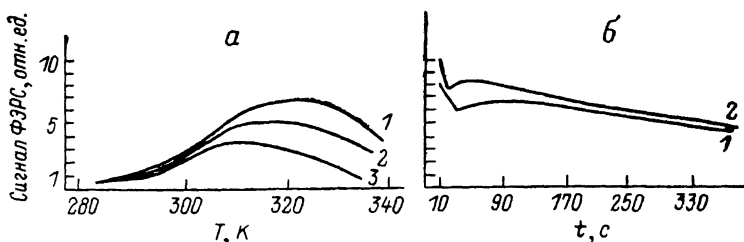


Рис. 1. Температурные спектры ФЭРС (а), полученные для различных значений временных окон  $t_1$  и  $t_2$  и частотный спектр (б) для 315 (1) и 320 К (2).

а)  $t_1$  и  $t_2$ , мс: 1 — 30 и 300, 2 — 50 и 500, 3 — 100 и 1000.

вая релаксации, далее строилась зависимость коррелятивной функции  $S$  вида [10]

$$S = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) f(t) dt \quad (2)$$

от длительности промежутка времени между импульсами  $T$ . В (2)  $i(t)$  — зависящий от времени релаксирующий фототок, а весовая функция  $f(t)$  была выбрана в виде [10]

$$f(t) = \begin{cases} 1 & \text{для } 0 \leq t \leq T/2, \\ -1 & \text{для } T/2 < t < T. \end{cases} \quad (3)$$

В соответствии с [1, 2] временная зависимость фототока в методе ФЭРС дается выражением

$$i(t) = A e_n \exp(-e_n t), \quad (4)$$

где  $A$  — константа, в которую входят глубина проникновения света и толщина области пространственного заряда, концентрация ловушек, а также площадь барьера или светового пятна. В таком случае интегрирование (2) дает для положения максимума ( $T_{\max}$ ) зависимости  $S(T)$  формулу

$$T_{\max} = 2.5/e_n. \quad (5)$$

Экспериментальные исследования проводились на образце нелегированного полуизолирующего GaAs с удельным сопротивлением  $\sim 1 \cdot 10^8$  Ом·см. Барьер Шоттки был создан вакуумным напылением золота, тыльный омический контакт получен выплавлением индия. В температурных спектрах в заметной концентрации обнаружен лишь один центр, дававший пик при температуре  $\sim 320$  К (см. рис. 1, а, где показано несколько спектров для различных значений временных «окон»  $t_1$  и  $t_2$ ). Частотные спектры, снятые для этого же образца при двух различных температурах, показаны на рис. 1, б. Температурные зависимости коэффициентов эмиссии, вычисленных из (1) и (5), сравниваются на рис. 2. Определенные из этих зависимостей значения  $E_c$  и  $\sigma$  оказались в случае температурного сканирования равными 0.78 эВ и  $2 \cdot 10^{-12}$  см<sup>2</sup>, а в случае частотного сканирования — соответственно 0.79 эВ и  $4 \cdot 10^{-12}$  см<sup>2</sup>. Как видно, имеется вполне удовлетворительное согласие между результатами, полученными двумя различными способами.

В заключение хотелось бы указать на ряд сложностей, связанных с частотным методом. Во-первых, как следует из рис. 1, б, частотный спектр достаточно пологий, и определение точного положения максимума представляет определенную трудность. Во-вторых, наши эксперименты показывают, что для достижения насыщения в амплитуде релаксации, связанной с глубоким центром, требуется довольно большая длительность возбуждающего импульса: в исследованном случае  $t_n$  должно быть больше 100 мс. По-видимому, это связано с низкой концентрацией фотоносителей, приводящей к медленному перезаполнению ловушек в соответствии с известным выражением [9]

$$N_t = N_{t0} [1 - \exp(-\sigma_n v_i t_n n)], \quad (6)$$

где  $N_t$  — концентрация перезаполненных центров,  $N_{t0}$  — полная концентрация центров,  $n$  — концентрация свободных фотоэлектронов.

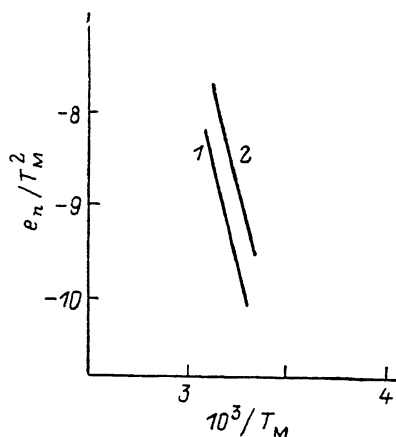


Рис. 2. Температурные зависимости величины  $e_n/T_M^2$ , вычисленные из температурного (1) и частотного (2) сканирования.

Наконец, отметим, что в исследованном образце в кривых релаксации фототока наблюдался участок неизвестного происхождения с постоянной времени релаксации около 2 мс, не зависящей от температуры. Существование таких релаксаций ограничивает сверху диапазон частот, в которых возможно сканирование в изотермическом варианте метода ФЭРС.

В заключение мы благодарим Д. Ференци и Л. Дожа из Института технической физики (г. Будапешт) за полезное обсуждение результатов работы.

#### Л и т е р а т у р а

- [1] Омеляновский Э. М., Поляков А. Я., Райхштейн В. И., Рытова Н. С. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 8 С. 1428—1432.
- [2] Hurtes Ch., Boulou M., Mittonneau A., Bois D. // Appl. Phys. Lett. 1978. V. 32. N 12. P. 821—824.
- [3] Balland J. C., Zielinger J. P., Noguet C., Tapiero M. // J. Phys. D. 1986. V. 19. N 1. P. 57—70.
- [4] Fairman R. D., Morin F. J., Oliver J. R. // Inst. Phys. Conf. Ser. N 45. London—Bristol, 1979. P. 134—140.
- [5] Yoshie O., Kamihara M. // Japan. J. Appl. Phys. 1985. V. 24. N 2. P. 431—434.
- [6] Омеляновский Э. М., Поляков А. Я., Фридман В. И., Шелепкина Г. В. // ФТП. 1985. Т. 19. В. 4. С. 735—739.
- [7] Омеляновский Э. М., Марков А. В., Освенский В. Б., Поляков А. Я., Ковальчук И. А. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 1. С. 205—208.
- [8] Lang D. V. // J. Appl. Phys. 1974. V. 45. N 8. P. 3023—3028.
- [9] Lannoo M., Bourgoin J. // Point Def. in Semicond. V. II. N. Y., 1981. 231 p.
- [10] Ferenzi G. // Acta Phys. Polon. 1985. V. 67. N 1. P. 143—146.

Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности  
Москва

Получено 20.10.1988

Принято к печати 17.11.1988