

NGHIÊN CỨU TÂM SÂU TRONG CÁC CHẤT BÁN DẪN BẰNG PHƯƠNG PHÁP DỊCH CỬA

Lê Khắc Bình, Nguyễn Thục Hiền, Phạm Quốc Triệu,
Nguyễn Quốc Tuấn

Đại học Khoa học tự nhiên - ĐHQGHN

Có nhiều phương pháp đã được đề xuất và phát triển để nghiên cứu các tâm sâu và ảnh hưởng của chúng đến tính chất điện và quang của vật liệu và dụng cụ bán dẫn. Hiện nay khi các hệ đo đã được ghép nối với các máy vi tính một cách phổ biến, việc sử dụng và khai thác các phương pháp nghiên cứu có những phát triển mới. Ở đây chúng tôi sẽ đề cập đến phương pháp điện dung quá độ để nghiên cứu tâm sâu trong các chất bán dẫn điện.

I. PHƯƠNG PHÁP ĐIỆN DUNG QUÁ ĐỘ

Khi trong một chất bán dẫn điện có các tâm sâu thì trong trạng thái dừng có một số điện tử nhất định nằm trên các mức đó. Nếu dùng một kích thích nào đó để làm sự thay đổi phân bố của điện tử trên chúng thì khi thôi kích thích, sau một thời gian các tâm đó sẽ trở lại trạng thái dừng ban đầu nhờ quá trình trao đổi điện tử giữa chúng và vùng năng lượng. Trong quá trình chuyển tiếp đó tính chất điện và quang của vật liệu thay đổi. Bằng cách nghiên cứu sự thay đổi đó có thể thu được những tính chất của tâm sâu. Một trong các cách làm thay đổi độ lấp đầy điện tử của các tâm sâu là dùng chuyển tiếp P-N hoặc hàng rào Schottky. Với một chuyển tiếp P⁺-N có tâm sâu nằm ở nửa trên của vùng cấm, điện dung trên một đơn vị diện tích của lớp ngăn được tính bằng công thức:

$$C = \left[\frac{q\epsilon_s}{2(V_d \pm V)} N_i \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

Trong đó V_d là thế khuếch tán, $\pm V$ tương ứng với thế phân cực ngược và thuận lớp chuyển tiếp, N_i là nồng độ ion trong lớp ngăn

$$N_i = (N_D + N_T) - n_T, \quad (2)$$

với N_D là nồng độ tạp chất donor, N_T là nồng độ tâm sâu và n_T là nồng độ điện tử trên tâm sâu.

Trong trường hợp tâm sâu là bẫy điện tử, khi chuyển tiếp được phân cực thuận trong thời gian đủ dài để tất cả các tâm sâu đều bắt được điện tử:

$$n_T \rightarrow N_T.$$

Nếu đột ngột phân cực ngược lớp chuyển tiếp, các hạt tải điện bị đẩy khỏi lớp ngăn, các điện tử đã bị các tâm sâu bắt được giải phóng và giảm dần theo thời gian:

$$n_T(t) = N_T \exp(-\epsilon_n t), \quad (3)$$

$$e_n = A \sigma_n T^2 \exp(-(E_c - E_T)/kT), \quad (4)$$

σ_n là tiết diện bắt điện tử của tâm sâu,
 E_T là vị trí năng lượng của tâm trong vùng cấm,
 A là hệ số phụ thuộc vào vật liệu.

Từ các công thức trên, trong trường hợp $N_T \ll N_D$ có thể suy ra biểu thức cho điện dung quá độ của lớp chuyển tiếp:

$$C(t) = C_f - C_i \exp(-e_n t). \quad (5)$$

Trong đó:

$$C_f = \left[\frac{q \epsilon_n N_D}{2(V_d + V)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

và:

$$C_i = C_f (N_T / 2N_D) \quad (7)$$

Qua đây có thể thấy trong đường điện dung quá độ $C(t)$ có chứa các thông số cơ bản của tâm sâu như E_T , N_T , σ_n . Vấn đề là làm sao để xác định được các thông số đó một cách đáng tin cậy và thuận lợi nhất.

Một trong các cách khai thác đường điện dung quá độ được Lang [1] đề ra từ năm 1974 đã được nhiều người phát triển và sử dụng dưới tên gọi quen thuộc: phương pháp DLTS (Deep Level Transient Spectroscopy). Theo phương pháp này, không cần phải đo toàn bộ đường $C(t)$ mà chỉ đo hiệu điện dung ở hai thời điểm xác định t_1 và t_2 (bằng kỹ thuật Boxcar kép) $\Delta C = C(t_1) - C(t_2)$ khi thay đổi nhiệt độ T của mẫu một cách liên tục. Đường biểu diễn của ΔC theo T (thường được gọi là phổ DLTS) có cực đại ở một nhiệt độ T_{\max} nào đó. Từ (5) có thể dễ dàng suy ra ở nhiệt độ T_{\max} đó:

$$e_n(T_{\max}) = \frac{\ln(t_2/t_1)}{t_2 - t_1} \quad (8)$$

Để có e_n ở các nhiệt độ khác, thay đổi thời điểm đo t_1 và t_2 và lại quét nhiệt độ để tìm cực đại khác. Theo (4), nếu biểu diễn sự phụ thuộc của $\ln(e_n/T^2)$ theo $1/kT_{\max}$ sẽ được một đường thẳng. Độ dốc của đường thẳng này cho phép xác định E_T và giao điểm với trục tung cho σ_n . Cực đại của phổ DLTS cho phép tính N_T .

II. PHƯƠNG PHÁP "DỊCH CỬA"

Có thể khai thác đường điện dung quá độ $C(t)$ để xác định các thông số của tâm sâu theo cách sau:

Từ (5) xét hai thời điểm t_1 và $t_2 = r t_1$, với r là một số nguyên nào đó ≥ 2 , ta có:

$$\Delta C = C(t_1) - C(t_2) = C_i [\exp(-e_n t_1) - \exp(-e_n r t_1)] \quad (9)$$

Nếu tăng dần t_1 thì ΔC sẽ đạt cực đại ở một thời điểm t_{\max} nào đó. Thời điểm này có thể xác định từ điều kiện: $\frac{d\Delta C}{dt_1} = 0$. Từ đó suy ra:

$$t_{\max} = \frac{\ln r}{(r-1)e_n} \quad (10)$$

Như vậy, nếu đo được đường $C(t)$ ở một nhiệt độ T cố định, có thể tính $\Delta C = C(t_1) - C(r t_1)$ cho các thời điểm t_1 khác nhau. Đường biểu diễn ΔC theo t_1 có cực đại ở t_{\max} thỏa mãn (10).

Nhờ đó có thể xác định ϵ_n ở nhiệt độ đo T . Bằng cách đo một số đường $C(t)$ ở các nhiệt độ khác nhau rồi làm như trên có thể biểu diễn $\ln(\epsilon_n/T^2)$ theo $1/kT$ để xác định E_T và σ_n .

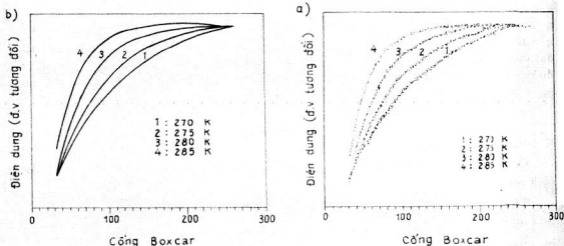
Nếu hệ đo điện dung quá độ được ghép nối với máy vi tính thì bằng kỹ thuật Boxcar có thể lấy mẫu đường $C(t)$ ở N thời điểm liên tiếp và cách đều nhau. Giá trị của $C(t)$ ở các thời điểm đó được cất giữ trong một file số liệu ứng với nhiệt độ đo. Như vậy, đường $C(t)$ không được đo liên tục theo thời gian mà gián đoạn theo $t = CS \cdot \Delta t$ với $CS = 1, 2, 3, \dots, N$; $\Delta t = T_0/N$.

T_0 là thời gian đo điện dung quá độ (trong trường hợp đang xét là thời gian phân cực ngược lớp chuyển tiếp P-N).

Từ file số liệu này máy tính có thể nhanh chóng tính $\Delta C = C(t) - C(rt)$ ở các thời điểm t liên tiếp nhau. Như vậy việc quét thời gian được thực hiện nhờ máy tính bằng cách dịch dần các cửa sampling. Từ đó chúng tôi tạm đặt tên cho phương pháp này là "phương pháp dịch cửa". Máy tính cũng xác định ngay cực đại của đường ΔC ở cửa CS_{max} nào đó và theo (10) tính được ϵ_n ở nhiệt độ T đã đo. Để thực hiện điều trên, chúng tôi đã tiến hành xây dựng một hệ đo điện dung quá độ có máy tính điều khiển phép đo, cất giữ và xử lý số liệu. Chi tiết về hệ đo đã được công bố ở [2]. Hệ đo cho phép phát hiện sự thay đổi của điện dung vào cỡ 10^{-3} pF. Khoảng nhiệt độ đo từ 80 K đến 400 K. Thời gian đo điện dung quá độ T_0 có thể thay đổi trong khoảng 0,8 đến 200 msec được chia thành 256 thời điểm ($N = 256$).

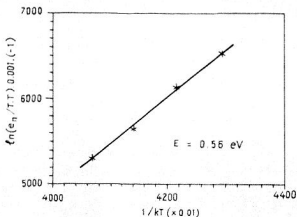
Với toàn đường điện dung quá độ $C(t)$ đo được, có thể khai thác theo nhiều cách khác nhau để xác định các thông số của tâm sâu. Ở đây để minh họa cho phương pháp dịch cửa vừa được trình bày ở trên, chúng tôi đưa ra một ví dụ đo được trên các diốt Si có pha vàng. Hình 1a cho thấy đường điện dung đo được ở các nhiệt độ khác nhau trong thời gian 25 msec.

Để giảm thẳng giáng trên các đường đo, có thể tăng số lần đo một đường rồi thực hiện phép lấy trung bình. Cũng có thể dùng chương trình thích hợp để làm trơn các đường thực nghiệm (hình 1b).



Hình 1. Các đường điện dung quá độ của diốt Si pha vàng

Từ các đường này, nhờ máy tính thực hiện tính $\Delta C = C(t) - C(2t)$, quét thời gian t (dịch cửa), tìm cực đại của ΔC , xác định ϵ_n và biểu diễn $\ln(\epsilon_n/T^2)$ theo $1/kT$ (hình 2). Bằng phương pháp bình phương tối thiểu, máy tính làm khít các điểm thực nghiệm đó bằng một đường thẳng. Độ dốc của đường thẳng này cho phép xác định $E_0 - E_T = 0.56$ eV phù hợp kết quả đã được công bố cho tâm accepto của vàng trong Si.



Hình 2. Sự phụ thuộc của $\ln(e_n/T^2)$ theo $1/kT$

Cần nhấn mạnh rằng các công thức (8) và (10) chỉ đúng khi cầu đo điện dung có hằng số thời gian rất nhỏ ($\tau \ll t_1$). Trong hệ đo chúng tôi dùng cầu đo điện dung Boonton 72B có τ danh định vào cỡ 1 msec. Để dùng được các công thức (8) hoặc (10) cần thay đổi một số tụ mắc trong cầu (nhiều tác giả trên thế giới đã thực hiện điều này). Ở đây khi chưa sửa cầu vẫn có thể dùng phương pháp dịch cửa như đã nói, trừ bước xác định e_n không dùng công thức (10) mà phải dùng biểu thức có tính đến τ .

III. KẾT LUẬN

Với hệ đo điện dung quá độ tự động mà chúng tôi vừa xây dựng, qua việc xử lý số liệu theo các phương pháp khác nhau chúng tôi thấy phương pháp dịch cửa có những ưu điểm sau đây:

1. Có thể khống chế nhiệt độ T khi đo đường điện dung quá độ $C(t)$. Khi đã giữ được nhiệt độ không đổi có thể xác định chính xác nhiệt độ thực của mẫu, có thể tăng lần đo đường $C(t)$ lên nhiều lần, sau đó lấy trung bình để loại bỏ các thăng giáng do nhiễu, loại được sự phụ thuộc vào nhiệt độ của C_f và C_i trong (5) khi tính e_n và có thể dễ dàng loại được thành phần C_f trong đường điện dung quá độ nhờ một tụ bù trừ mắc ở lối vào của cầu đo điện dung. Sự loại trừ này đặc biệt cần thiết khi cầu đo điện dung có hằng số thời gian τ đáng kể.

2. Với hệ đo được nối với máy vi tính thì việc dịch cửa (quét thời gian) và xác định t_{max} được thực hiện một cách dễ dàng và nhanh chóng chỉ nhờ vài câu lệnh.

Công trình được hoàn thành với sự hỗ trợ của Chương trình nghiên cứu cơ bản trong lĩnh vực khoa học tự nhiên KT-04.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. D. V. Lang. L. Appl. Phys., Vol. 45 (1974), 3023.
2. Lê Khắc Bình, Nguyễn Thục Hiền, Nguyễn Quốc Tuấn, Phạm Quốc Triệu. Tài liệu Hội nghị vô tuyến điện tử toàn quốc lần thứ IV, Hà Nội, 1992, tập I, 109.

THE STUDY OF DEEP LEVEL IN SEMICONDUCTORS USING METHOD
"GATE SCANNING"

*Le Khac Binh, Nguyen Thuc Hien, Pham Quoc Trieu,
Nguyen Quoc Tuan*

College of Natural Sciences - VNU

A method for determining deep level parameters in semiconductors from the transient capacitance of a P-N junction or a Schottky barrier is described. Following this method, the whole transient capacitance curves are sampled at fixed temperatures. From each curve, the graph of the difference of capacitances at times t_2 and t_1 vs t_1 (with $r = t_2/t_1 = \text{const}$) reaches the maximum at $t_{\text{max}} = \frac{\ln r}{(r-1)\epsilon_n}$ (for exponential transient), where ϵ_n is the emission rate of elections. By virtue of this property the ϵ_n at a given temperature can be determined.

The plot of $\ln \frac{\epsilon_n}{T^2}$ vs $\frac{1}{kT}$ allows us to obtain the energy and capture section of deep levels under investigation.

This method is especially convenient when the measurement system is controlled by a microcomputer the measurement, data acquisition and analysis are then automatically carried out by a reasonable software. By keeping the temperature constant during the measurement of one transient curve, the possibility of compensation of the sample capacitance and by averaging of a sufficient number of transients.