Физика и техника полупроводников, 1998, том 32, № 6

# Анализ сигналов релаксации емкости, состоящих из нескольких экспонент

© Л.С. Берман

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 17 ноября 1997 г. Принята к печати 18 ноября 1997 г.)

Разработан новый метод разделения сигнала, состоящего из нескольких экспонент, на отдельные составляющие. Выполнено моделирование для двух экспонент с близкими постоянными времени и с амплитудой одного порядка. Метод обладает высокой разрешающей способностью.

В настоящее время для определения параметров глубокоуровневых центров (ГУЦ) в полупроводниках широко используется емкостная спектроскопия, в частности метод DLTS [1]. Этот метод детально разработан для случая экспоненциальной временно́й зависимости релаксации емкости $\Delta C(t)$; однако эта зависимость может отличаться от экспоненциальной по нескольким причинам [2]. Так, при наличии нескольких ГУЦ с близкими скоростями термоэмиссии зависимость $\Delta C(t)$ описывается суммой экспонент с близкими постоянными времени, а пики DLTS сливаются в один пик. Для разделения этой суммы на отдельные составляющие был предложен ряд методов обработки результатов измерений.

а) Измерение спектров DLTS в различных временных и (или) температурных интервалах и аппроксимация этих спектров путем оптимального подбора параметров [3–6]. При использовании этих методов возможна неоднозначность определения параметров, обусловленная их большим числом. Метод многоточечной корреляции [7] очень чувствителен даже к малым шумам и погрешностям измерений.

б) Методы, основанные на записи и анализе временны́х зависимостей емкости при различных температурах $C(t, T)$. Они являются более информативными и достоверными. Метод прямого поиска [8,9] и итерационные методы [8,10] позволяют получить правильные результаты, если начальные параметры близки к истинным; в противном случае возможно определение локального минимума дисперсии, которому соответствуют значения параметров, далекие от истинных, или расхождение ряда итераций. Преобразование Фурье для двух экспонент [11,12] дает значительную погрешность уже при малом уровне шумов.

В настоящей работе выполнено моделирование зависимости $\Delta C(t)$, состоящей из 2 экспонент с близкими постоянными времени и амплитудами одного порядка, для случая двух ГУЦ с одинаковыми энергиями ионизации и с сечениями захвата основных носителей одного порядка, причем эти сечения захвата одинаково зависят от температуры. Отношение скоростей термоэмиссии для этих ГУЦ не зависит от температуры, поэтому выбор температуры измерения не позволяет улучшить разрешения. При моделировании учитываются как погрешности эксперимента, так и шумы. Релаксация емкости моделируется выражением

$$\Delta C_m(t) = [A_{1m}\exp(-e_{1m}t) + A_{2m}\exp(-e_{2m}t)](1-k_3) + (A_{1m}+A_{2m})[k_2 \pm k_1 + 2k_4(RND-0.5)], \quad (1)$$

где $A_{1m}$, $A_{2m}$, $e_{1m}$, $e_{2m}$ — соответственно амплитуды и скорости термоэмиссии для 1-го и 2-го переходных процессов, индексы $_m$ соответствуют параметрам модели.

Погрешность измерения релаксации емкости моделируется коэффициентом $k_1$. Емкость может быть измерена с высокой точностью, однако относительная погрешность измерения амплитуды релаксации емкости $\Delta C(0)$ в $2N_d/(N_{t1}+N_{t2})$ раз превышает относительную погрешность измерения самой емкости. Здесь $N_d$, $N_{t1}$ и $N_{t2}$ — соответственно концентрации легирующей примеси и двух ГУЦ.

Для нескольких экспонент с близкими постоянными времени можно выбрать режим измерений (температура, период заполняющих импульсов), при котором стационарное заполнение ГУЦ устанавливается за время порядка нескольких постоянных времени процесса. Многократное измерение и усреднение результатов позволяет исключить постоянную составляющую емкости, поэтому она моделируется коэффициентом $k_2 \gtrless 0$; значение $k_2$ выбирается из тех же соображений, что и значение $k_1$ (погрешность измерений емкости, умноженная на отношение $2N_d/(N_{t1}+N_{t2})$).

Кроме того, измеренная емкость диода меньше барьерной емкости $p-n$-перехода из-за наличия сопротивления базы диода. При $\operatorname{tg}\delta < 0.1$ эта методическая погрешность порядка $(\operatorname{tg}\delta)^2$, где $\operatorname{tg}\delta$ — тангенс угла потерь [13], она моделируется сомножителем $(1-k_3)$. Белый шум моделируется коэффициентом $2k_4(RND-0.5)$, где $RND$ — хаотический набор чисел в интервале от 0 до 1. Сглаживание погрешностей и шумов (но не постоянной составляющей емкости) моделируется путем многократного повторения переходного процесса и усреднения.

Зависимость $\Delta C(t)$ аппроксимируется выражением

$$\Delta C_a(t) = A_{1a}\exp(-e_{1a}t) + A_{2a}\exp(-e_{2a}t), \quad (2)$$

где индексы $a$ соответствуют параметрам аппроксимации.

I. $k_1 = 2 \cdot 10^{-4}$, $k_2 = 2 \cdot 10^{-4}$, $k_3 = 10^{-2}$, $k_4 = 10^{-3}$

| $A_{1m}$ | $A_{1a}$ | | $e_{1m}$ | $e_{1a}$ | | $A_{2m}$ | $A_{2a}$ | | $e_{2m}$ | $e_{2a}$ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | | 1 | 2 | | 1 | 2 | | 1 | 2 |
| 5 | 4.997 | 5.006 | 2 | 1.994 | 1.995 | 10 | 9.856 | 9.851 | 1 | 0.997 | 0.997 |
| 5 | 5.390 | 5.386 | 2 | 1.974 | 1.974 | 10 | 9.462 | 9.466 | 1.4 | 1.386 | 1.386 |
| 5 | 4.950 | 4.968 | 2 | 2.000 | 2.000 | 10 | 9.899 | 9.901 | 0.5 | 0.499 | 0.500 |

II. $k_1 = 2 \cdot 10^{-3}$, $k_2 = 2 \cdot 10^{-3}$, $k_3 = 10^{-2}$, $k_4 = 10^{-2}$

| $A_{1m}$ | $A_{1a}$ | | $e_{1m}$ | $e_{1a}$ | | $A_{2m}$ | $A_{2a}$ | | $e_{2m}$ | $e_{2a}$ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | | 1 | 2 | | 1 | 2 | | 1 | 2 |
| 5 | 5.355 | 5.312 | 2 | 1.970 | 1.972 | 10 | 9.526 | 9.574 | 1 | 0.976 | 0.979 |
| 5 | 4.955 | 4.990 | 2 | 2.007 | 1.994 | 10 | 9.927 | 9.981 | 0.5 | 0.496 | 0.498 |

III. $k_1 = 2 \cdot 10^{-2}$, $k_2 = 2 \cdot 10^{-2}$, $k_3 = 10^{-2}$, $k_4 = 0.1$

| $A_{1m}$ | $A_{1a}$ | | $e_{1m}$ | $e_{1a}$ | | $A_{2m}$ | $A_{2a}$ | | $e_{2m}$ | $e_{2a}$ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | | 1 | 2 | | 1 | 2 | | 1 | 2 |
| 5 | 5.456 | 5.218 | 2 | 2.094 | 2.090 | 10 | 9.734 | 10.134 | 0.5 | 0.462 | 0.469 |

*Примечание.* 1 — метод возвратных последовательностей, 2 — метод Ньютона–Рафсона.

Был использован метод возвратных последовательностей (МВП) [14], который является модификацией метода моментов (ММ) [15,16]. Оба метода используют последовательность значений переходного процесса, равноотстоящих во времени, но МВП исходит из **конечного** числа этих значений, что исключает погрешность ММ, обусловленную "отсеканием" медленной части процесса. При отсутствии погрешностей измерений и шумов МВП позволяет определить значения параметров с погрешностью лишь самого компьютера. Была составлена автоматизированная программа расчетов. Были использованы от 120 до 160 значений $\Delta C_m(t)$ в интервале $0 \leqslant t \leqslant t_1$, где $t_1$ определялось из условия $\Delta C_m(t_1) \simeq 0.4\Delta C(0)$. Результаты, полученные МВП, уточнялись методом Ньютона–Рафсона [9–11]. Типичные результаты моделирования приведены в таблице. Анализ этих результатов позволяет сделать следующие выводы.

1. Метод возвратных последовательностей обладает высокой разрешающей способностью.

2. При заданной чувствительности измерительной аппаратуры и при выполнении неравенства $N_{t1} + N_{t2} \ll N_d$ разрешающая способность метода улучшается с увеличением отношения $(N_{t1}+N_{t2})/N_d$ и (или) отношения $e_1/e_2$.

3. Уточнение результатов методом Ньютона–Рафсона не дает существенного улучшения аппроксимации. В некоторых случаях аппроксимация ухудшается (хотя и незначительно). Минимум дисперсии не всегда точно соответствует наилучшей аппроксимации.

## Список литературы


[1] D.V. Lang. J. Appl. Phys., **45**, 3023 (1974).
[2] Л.С. Берман, А.А. Лебедев. *Емкостная спектроскопия глубоких центров в полупроводниках* (Л., Наука, 1981).
[3] R. Langfeld. Appl. Phys. A **44**, 107 (1987).
[4] I. Thurzo, D. Pogany, K. Gmucova. Sol. St. Electron., **35**, 1737 (1992).
[5] T.R. Hanak, R.K. Ahrenkiel, M.L. Timmons. J. Appl. Phys., **67**, 4126 (1990).
[6] H.K. Kim, T.E. Schlesinger, A.G. Milnes. J. Electron. Mater., **17**, 187 (1988).
[7] K. Dmowski. J. Appl. Phys., **71**, 2259 (1992).
[8] Д. Химмельблау. *Анализ процессов статистическими методами* (М., Мир, 1973).
[9] Б. Банди. *Методы оптимизации* (М., Мир, 1988).
[10] Е.Н. Львовский. *Статистические методы построения эмпирических формул* (М., Высш. шк., 1988).
[11] M. Okuyama, H. Tanakura, Y. Hamakawa. Sol. St. Electron., **26**, 689 (1983).
[12] S. Weiss, R. Kassing. Sol. St. Electron., **31**, 1733 (1988).
[13] L.S. Berman. *Purity control of semiconductors by the method of capacitance transient spectroscopy* (St.-Petersburg, ELIS, 1995) p. 114.
[14] А.И. Макушевич. *Возвратные последовательности* (М., Наука, 1975) с. 46.
[15] P.D. Kirchner, V.J. Schaff, G.N. Naracas, L.F. Eastmen, T.J. Chappel, C.M. Ransom. J. Appl. Phys., **52**, 6462 (1981).
[16] K. Ikossi-Anastasiou, K.P. Roenker. J. Appl. Phys., **61**, 182 (1987).


*Редактор Т.А. Полянская*

## Analysis of multitexponential capacitance transient signal

L.S. Berman

A.F. Ioffe Physico-Technical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St.Petersburg, Russia

**Abstract** A new method of dividing the multiexponential transient process into separate exponential components was developed. Simulation of two exponents with amplitudes of the same order and the close time constants was fulfilled. The method is of high resolution ability.

E-mail: mega@pulse. pti.spb. su