

Влияние стационарных процессов ионизации ловушек вблизи середины запрещенной зоны на спектр термостимулированной емкости полупроводниковых приборов

© С.В. Булярский, А.В. Жуков[†], О.С. Светухина, О.А. Трифонов

Ульяновский государственный университет,
432970 Ульяновск, Россия

(Получена 25 октября 2005 г. Принята к печати 20 января 2006 г.)

Предложен алгоритм расчета параметров глубоких центров в области пространственного заряда полупроводниковых приборов из анализа кривых термостимулированной емкости при наличии центров рекомбинации, лежащих у середины запрещенной зоны. Выполнена апробация метода на промышленных GaAs-светоизлучающих диодах АЛ-107. Результаты расчета параметров глубоких центров в исследуемых материалах соответствовали результатам других методов анализа.

PACS: 85.60.Jb; 72.20.Jv; 78.30.Fi

1. Введение

Распространенным методом определения параметров глубоких центров в области пространственного заряда (ОПЗ) полупроводниковых приборов является метод термостимулированной емкости (ТСЕ) [1–5]. Однако алгоритм метода не всегда применим для анализа особенностей электронного спектра глубоких центров в случае наличия в ОПЗ полупроводниковых приборов уровней рекомбинации у середины запрещенной зоны.

В работе предложен алгоритм расчета параметров центров захвата и рекомбинации в ОПЗ, путем выделения нестационарной составляющей из кривой термостимулированного изменения емкости ОПЗ полупроводниковых приборов.

В качестве материала для апробации выбраны промышленные GaAs-светоизлучающие диоды АЛ-107.

Измерены спектры ТСЕ образцов в интервале температур от 160 до 360 К при различных скоростях нагрева в интервале от 0.05 до 0.4 К/с. По оценкам [5], интервал температур характерен для анализа глубоких уровней с энергиями в интервале от 0.15 до 0.80 эВ. Измерения проводились на автоматизированной установке, использующей резонансный измеритель емкости на основе частотомера Ч4-34. Получаемые результаты были стабильны и хорошо воспроизводимы. На рис. 1 (кривая 1) приведена характерная зависимость производной термостимулированной емкости от температуры (при нагревании), измеренная на одном из образцов из группы. Экспериментально показано, что вид кривой 1 не зависит от первоначального заполнения ловушек в ОПЗ и скорости нагрева в интервале 0.05 до 0.2 К/с (при скоростях нагрева более 0.2 К/с форма кривой искажается, что может быть вызвано рядом факторов, в том числе неоднородным нагревом образца).

Предварительный анализ рис. 1, опирающийся на разделение экспериментальной кривой ТСЕ на составляющие нестационарных термостимулированных процессов,

согласно [3,4],

$$\frac{\partial C}{\partial T} = A \left(\frac{T}{T_m} \right)^2 \exp \left[\frac{E_t}{k} \left(\frac{1}{T_m} - \frac{1}{T} \right) \right] \times \exp \left\{ 1 - \left(\frac{T}{T_m} \right)^2 \exp \left[\frac{E_t}{k} \left(\frac{1}{T_m} - \frac{1}{T} \right) \right] \right\}, \quad (1)$$

где E_t — энергия термической эмиссии электрона с ловушки, T_m — температура, соответствующая максимуму полосы производной нестационарной емкости, обусловленной ионизацией ловушки E_t , дал оценочные значения энергий глубоких уровней: 0.48 ± 0.15 , 0.12 ± 0.05 и 0.07 ± 0.05 эВ.

Высокая погрешность, а также неоднозначность результата, связанные с трудностями разделения кривой, не позволили принять такие параметры. Кроме этого, полученные результаты даже в диапазоне погрешности противоречили практике термостимулированных измерений, в соответствии с которой и на основании оце-

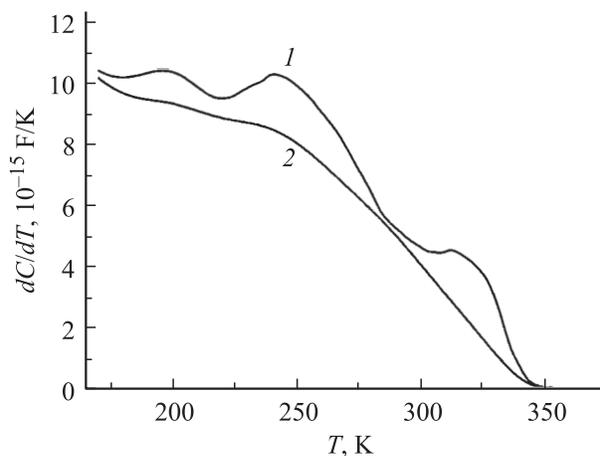


Рис. 1. Кинетика производной термостимулированной емкости диода АЛ-107, измеренной при нагревании (1) и охлаждении (2).

[†] E-mail: ZhukovAV@ulsu.ru

точного выражения [3,4]

$$E_t = \gamma k T_m^2, \quad (2)$$

где параметр $\gamma = 0.12 \text{ K}^{-1}$, в этих областях температур должны ионизоваться уровни с энергиями около 0.75, 0.45 и 0.25 эВ соответственно.

Приведенные особенности позволили предполагать, что исследуемый процесс не имеет чисто нестационарный характер и обусловлен суперпозицией термостимулированной кинетики стационарной и нестационарной емкости.

2. Характер стационарных процессов термостимулированной ионизации глубоких уровней в ОПЗ полупроводниковых приборов

Стационарное изменение емкости при изменении температуры, не зависящее от заполнения глубоких уровней в ОПЗ, может быть вызвано перезарядкой центров быстрой рекомбинации, лежащих около середины запрещенной зоны. Только такие центры могут со сравнимыми скоростями обмениваться электронами с зоной проводимости и дырками с валентной зоной.

Темп ионизации таких центров в отсутствие захвата в ОПЗ обратного смещенного диода может быть представлен следующим кинетическим уравнением:

$$\frac{dn_t}{dt} = -e_n^t n_t + e_p^t (N_t - n_t), \quad (3)$$

где n_t — концентрация электронов на глубоком центре, N_t — концентрация глубоких центров, e_n^t , e_p^t — скорости эмиссии электрона в зону проводимости, дырки в валентную зону. Степень заполнения центров в стационарном случае:

$$\begin{aligned} f_t &= \frac{n_t}{N_t} = \frac{e_p^t}{e_n^t + e_p^t} \\ &= \left[1 + \frac{c_n}{c_p} \left(\frac{m_n}{m_p} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_g - 2E_t}{kT}\right) \right]^{-1}, \\ 1 - f_t &= \frac{e_n^t}{e_n^t + e_p^t} \\ &= \left[1 + \frac{c_p}{c_n} \left(\frac{m_p}{m_n} \right)^{3/2} \exp\left(\frac{E_g - 2E_t}{kT}\right) \right]^{-1}. \end{aligned} \quad (4)$$

Изменение степени заполнения глубоких центров приводит к изменению емкости. Барьерная емкость диода с глубокими центрами связана с их концентрацией следующим соотношением [5]:

$$C = \sqrt{\frac{q\epsilon_s [N_m - N_t(1 - f_t)]}{2(V_d \pm U)}}, \quad (5)$$

где N_m — полная концентрация дефектов, V_d — диффузионный потенциал, U — напряжение смещения.

Анализируя температурное изменение емкости, можно найти параметры центров, обуславливающих наблюдаемое явление. Для этого найдем производную степени заполнения:

$$\frac{df_t}{dT} = \frac{A \exp(-\delta/kT) \delta/kT^2}{[1 + A \exp(-\delta/kT)]^2}, \quad (6)$$

где

$$\delta = E_g - 2E_t, \quad A = \frac{c_n}{c_p} \left(\frac{m_n}{m_p} \right)^{3/2}.$$

Выражение (6) имеет максимум при температуре, связанной с параметром δ выражением

$$\delta = kT_{\max} \ln \left[\frac{A(\delta + 2kT_{\max})}{\delta - 2kT_{\max}} \right]. \quad (7)$$

При условии выполнения соотношения $\delta \gg 2kT_{\max}$ выражение (7) упрощается:

$$\delta = kT_{\max} \ln A. \quad (8)$$

Подставляя величину A из уравнения (8) в (6), получаем удобное выражение для производной функции заполнения, которое в качестве подгоночного параметра содержит только δ :

$$\frac{df_t}{dT} = \frac{y}{1+y}; \quad y = \exp \left[\frac{\delta}{k} \left(\frac{1}{T_{\max}} - \frac{1}{T} \right) \right]. \quad (9)$$

Это выражение удобно сопоставить с экспериментом или использовать для моделирования экспериментальной стационарной термостимулированной емкости. Из (6) следует, что

$$\frac{df_t}{dT} = \frac{1}{N_t} \frac{2(V_d + U)}{q\epsilon_s} \frac{d}{dT} C^2. \quad (10)$$

Аппроксимируя последнее выражение функцией (9), можно определить глубину залегания глубокого уровня и концентрацию центров.

3. Моделирование смешанных процессов термостимулированной ионизации. Определение параметров глубоких уровней в ОПЗ полупроводниковых приборов

Для экспериментальной проверки модели измерялась зависимость емкости образца от его температуры при охлаждении (рис. 1, кривая 2). На рис. 2 представлена кривая производной от функции заполнения по температуре, рассчитанная по данным измерения емкости (сплошная линия). На этом же рисунке приведены результаты моделирования производной от функции заполнения по температуре выражением (9). Исходными данными для моделирования выбраны параметры глубокой ловушки $E_t = 0.72 \pm 0.05$ эВ, обнаруженной в образцах методом рекомбинационной спектроскопии [5] и

Результаты исследований разными методами

		E_{t1}	E_{t2}	E_{t3}	E_{t4}
Метод термостимулированной емкости	$E_t, \text{эВ}$	0.22	0.35	0.59	0.72
	$C_n, \text{см}^3/\text{с}$	$2.95 \cdot 10^{-14}$	$9.13 \cdot 10^{-13}$	$8.29 \cdot 10^{-9}$	$7.82 \cdot 10^{-9}$
Метод рекомбинационной спектроскопии	$E_t, \text{эВ}$	0.35	0.50	0.59	0.72
	C_n/C_p	$4.1 \cdot 10^2$	157	93	27

связанной с антиструктурным дефектом EL2 [6]. Максимально близко описывает эксперимент модельная кривая с энергией $E_t = 0.720$ эВ и значением $c_n/c_p = 27$ (рис. 2, кривая 2). Для подтверждения точности параметров аппроксимации на рис. 2 приведены результаты моделирования производной от функции заполнения ловушек с $E_t = 0.710$ эВ (кривая 1) и $E_t = 0.730$ эВ (кривая 3) с тем же значением величины c_n/c_p .

Таким образом, нестационарное изменение термостимулированной емкости в интервале температур от 170

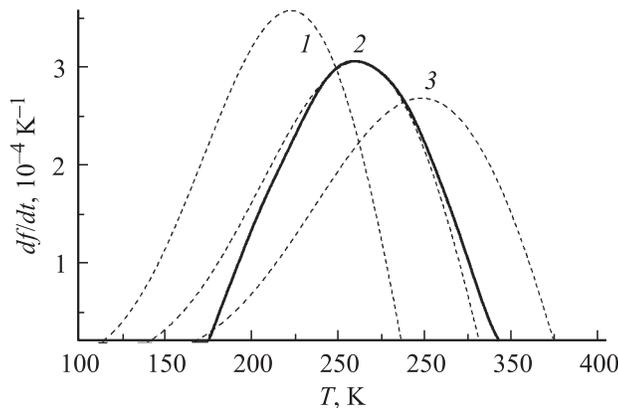


Рис. 2. Производная от функции заполнения по температуре, рассчитанная по данным измерения емкости (сплошная линия), результаты моделирования производной от функции заполнения по температуре выражением (9) (пунктирные линии). Параметры указаны в тексте.

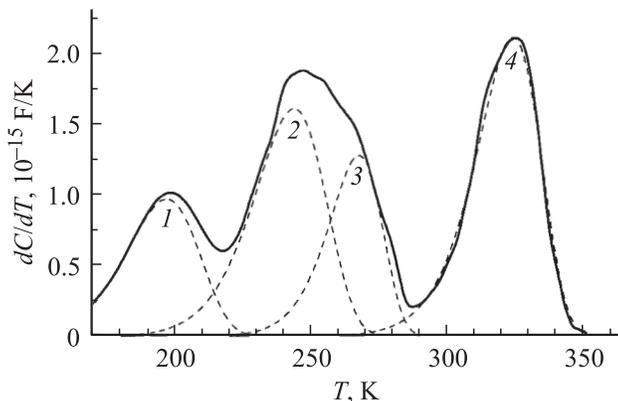


Рис. 3. Нестационарная составляющая производной емкости ОПЗ диода АЛ-107.

до 350 К в исследуемом материале обусловлено ионизацией центров быстрой рекомбинации с энергией глубоких уровней $E_t = 0.720$ эВ.

Для дальнейшего анализа из первоначальной кривой производной емкости ОПЗ диодов (рис. 1, кривая 1) выделена нестационарная составляющая вычитанием стационарной (рис. 1, кривая 2). Результат вычитания приведен на рис. 3.

Полученная кривая производной нестационарной ТСЕ без существенных затруднений разделяется на составляющие (рис. 3), опираясь на выражение (1). Результат разложения представил собой 4 полосы, соответствующие уровням с глубинами залегания $E_{t1} = 0.22$, $E_{t2} = 0.35$, $E_{t3} = 0.59$ и $E_{t4} = 0.72$ эВ.

В соответствии с [6,7] центр $E_{t1} = 0.22$ эВ идентифицирован как комплекс, содержащий вакансию мышьяка и связанный с наличием кремния (ловушка EL8), $E_{t2} = 0.35$ эВ идентифицирован как ловушка EL6, центр $E_{t3} = 0.59$ эВ связан с атомами кислорода, $E_{t4} = 0.72$ эВ, как уже отмечалось, обусловлен ловушкой EL2.

В таблице приведены значения концентраций данных центров в исследуемых образцах и величины коэффициентов захвата. Для сравнения здесь же приведены параметры центров, рассчитанные методом рекомбинационной спектроскопии [5].

4. Заключение

Таким образом, в работе предложен алгоритм расчета параметров глубоких центров в ОПЗ полупроводниковых приборов из анализа кривых термостимулированной емкости при наличии центров рекомбинации, лежащих у середины запрещенной зоны. Выполнено моделирование стационарной составляющей термостимулированной емкости. Результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальной зависимостью стационарной термостимулированной емкости, вызванной перезарядкой глубокого центра $E_t = 0.720$ эВ в ОПЗ GaAs-светодиодов АЛ-107. Выделена нестационарная составляющая кривой производной емкости ОПЗ исследуемых диодов. Результаты расчета параметров глубоких центров в исследуемых материалах с применением предлагаемого алгоритма удовлетворительно соответствуют результатам метода рекомбинационной спектроскопии.

Список литературы

- [1] M.G. Buchler. Sol. St. Electron., **69**, 193 (1972).
- [2] С.В. Булярский, С.И. Радауцан. ФТП, **15**, 1433 (1981).
- [3] С.В. Булярский, Н.С. Грушко, Г.С. Кортченко, И.П. Молодян. Деп. ВИНТИ. № 6668-73 (1973).
- [4] Е.В. Вергопрахо, Г.С. Сальман. *Термостимулированные процессы в полупроводниках* (М., Наука, 1972).
- [5] С.В. Булярский, Н.С. Грушко. *Генерационно-рекомбинационные процессы в активных элементах* (М., МГУ, 1995).
- [6] G. Martin, S. Makram-Ebeid. Phys. Rev. Lett., **54**, 2 (1986).
- [7] А. Милнс. *Глубокие уровни в полупроводниках* (М., Мир, 1978).
- [8] О. Маделунг. *Физика полупроводниковых соединений элементов III и V групп* (М., Мир, 1967).

Редактор Л.В. Беляков

Effect of stationary ionization processes at the centre of the bandgap on the thermo-induced capacitance of semiconductor devices

S.V. Bulyarskiy, A.V. Zhukov, O.S. Svetukhina,
O.A. Trifonov

Ulyanovsk State University,
432970 Ulyanovsk, Russia

Abstract An algorithm is proposed for the calculation of the deep centre parameters in the space-charge region of semiconductor devices based on the analysis of the curves of thermo-induced capacitance in the presence of recombination centres lying at the centre of the bandgap. A practical approval of the method proposed has been performed on industrial GaAs AL-107 LEDs. Results of the calculations of the deep centre parameters in the materials under study correspond to those obtained by other analysis techniques.