

Анализ релаксации фототока полуизолирующего GaAs в области температур 150–200 К

© А.П. Одринский[†]

Институт технической акустики Национальной академии наук Белоруссии,
210017 Витебск, Республика Белоруссия

(Получена 5 февраля 2014 г. Принята к печати 3 июня 2014 г.)

Рассмотрены особенности регистрации вклада характерного собственного дефекта полуизолирующего GaAs в релаксацию фототока. Представлен подробный анализ кинетики релаксации на основе аппроксимации суммой экспоненциальных составляющих. Результаты сравниваются с данными фотоэлектрической релаксационной спектроскопии.

1. Введение

Дефекты кристаллической структуры арсенида галлия интенсивно исследовались в процессе становления и развития полупроводниковой электроники [1–4]. В настоящее время, с расширением сферы его применения (формирование различного типа полупроводниковых структур квантовой электроники, опто- и микроэлектроники терагерцового диапазона, фотовольтаики и т.д.), они продолжают вызывать интерес [4–6]. Вместе с тем глубоководные дефекты в данном материале, включая собственные дефекты GaAs, изучены недостаточно [7]. Особенно это касается полуизолирующего материала, где значительное удельное сопротивление не позволяет использовать электрические способы возбуждения кристалла полем либо током для неравновесного заполнения дефектов. Здесь эффективно используют фотоэлектрическую релаксационную спектроскопию (PICTS [2]) — вариант нестационарной спектроскопии глубоких уровней (DLTS [8]) с возбуждением образца светом. На таких материалах существует также отмечавшаяся еще в ранних работах [4] проблема сопоставления данных PICTS [3] с DLTS-исследованиями низкоомного GaAs. Так, в ряде исследований электрически активных дефектов арсенида галлия различными вариантами нестационарной спектроскопии (DLTS [1], DLOS [9], PICTS [2,10,11]) в области температур 150–200 К наблюдали перезарядку дефекта известного как EL6. Вместе с тем в PICTS исследованиях при данных температурах отмечают не экспоненциальный характер релаксации фототока [12], а также наложение сигнала перезарядки нескольких дефектов [4,13,14]. В настоящей работе представлен подробный анализ регистрации перезарядки глубоководных дефектов полуизолирующего GaAs в области температур 150–200 К, соответствующей регистрации характерного, наряду с EL2, собственного дефекта арсенида галлия [10,15].

2. Условия эксперимента

Омические контакты формировались пайкой индием в планарной конфигурации на освещаемой поверхности

сти 5×10 мм образца пластины марки АГ4П (легирована индием и хромом, удельное сопротивление $\rho \sim 7 \cdot 10^7$ Ом·см). Качество контактов оценивали по вольт-амперной характеристике, которая была линейна при комнатной температуре. Световое возбуждение падало перпендикулярно поверхности образца и соответствовало плотности потока фотонов $\sim 10^{14}$ см⁻²с⁻¹. Механический модулятор задавал частоту возбуждения 25 Гц при отношении длительности светового интервала к темновому 1:4. Использовалось квазимонохроматическое возбуждение с $h\nu_0 = 1.22$ эВ (излучение ксеноновой лампы ДКСШ-500, прошедшее монохроматор типа МСД-1 при ширине входной и выходной щели 4 мм, что соответствовало диапазону энергий фотонов $\Delta h\nu \sim 0.06$ эВ). Наложение от других порядков дифракционной решетки убиралось соответствующими светофильтрами. Образец крепился на массивном алюминиевом держателе оптического криостата, резистивный нагреватель которого обеспечивал скорость нагрева ~ 2 К/мин. Измерительная установка, методики регистрации и анализа данных подробно описаны в [16]. Регистрация проводилась в процессе нагрева образца в диапазоне температур 78–330 К, с шагом 1 К. При регистрации релаксации фототока проводилось поточечное накопление и усреднение кинетики релаксации (64 реализации), содержащей 2000 отсчетов, расположенных через фиксированный интервал времени $\Delta t = 1.625 \cdot 10^{-5}$ с. Анализ проводился в диапазоне характеристических времен релаксации 10^{-2} – 10^{-4} с.

3. Анализ результатов

В PICTS спектрах образца, представленных на рис. 1, доминировал отмеченный стрелкой пик. Расположенный относительно обособлено, он отчетливо прослеживается на наборе спектров, соответствующих характеристическому времени релаксации 10^{-2} – 10^{-4} с. На рисунке можно заметить асимметрию пика в виде полки на низкотемпературном крыле, что предполагает наличие в релаксации фототока вклада от нескольких дефектов. Используя построение спектров на основе функций улучшенного разрешения,¹ выделить вклады отдельных

[†] E-mail: odra@mail333.com

¹ Функция типа „square wave“ [17].

составляющих не удалось. Для разделения вкладов, следуя подходу работы [11], мы применили аппроксимацию зарегистрированной кинетики релаксации фототока суммой нескольких экспоненциальных составляющих. Аппроксимация проводилась последовательно в каждой температурной точке из области температур регистрации пика — $\Delta_0 T$. Использовался специально разработанный программный модуль для итерационного определения параметров модели методом согласованного градиентного спуска с возможностью изменения соотношения масштабов приращений параметров в процессе подгонки. Получаемая в результате аппроксимации модельная кривая визуально хорошо описывала форму экспериментальной кривой. На рис. 2 представлены изменения с температурой показателя степени и амплитуды экспоненциальных составляющих, полученных в результате аппроксимации кинетики релаксации суммой 2-х (использован временной интервал кинетики релаксации 2–30 мс) и 3-х экспонент (на всем интервале времени регистрации релаксации 0–30 мс). Для оценки точности аппроксимации рассчитывалось среднеквадратичное отклонение:

$$\sigma = [N^{-1} \sum_{k=1}^N (Y(t_k) - F(t_k))^2]^{1/2}, \quad (1)$$

где $F(t_k)$ — экспериментально зарегистрированная кинетика спада фототока, $Y(t_k)$ — модельная функция, $k = 1, \dots, N$ — номер узла, а N — число узлов дискретизации по времени, используемых при аппроксимации. Зависимость σ от температуры представлена на рис. 3. Заметно, что переход от 2 к 3 экспоненциальным компонентам дает уменьшение среднеквадратичного отклонения приблизительно на порядок. Поскольку дальнейшее увеличение числа компонент не давало снижения среднеквадратичного отклонения, преимущественно обусловленного присутствием определенного уровня шума в зарегистрированной кинетике, в последующем

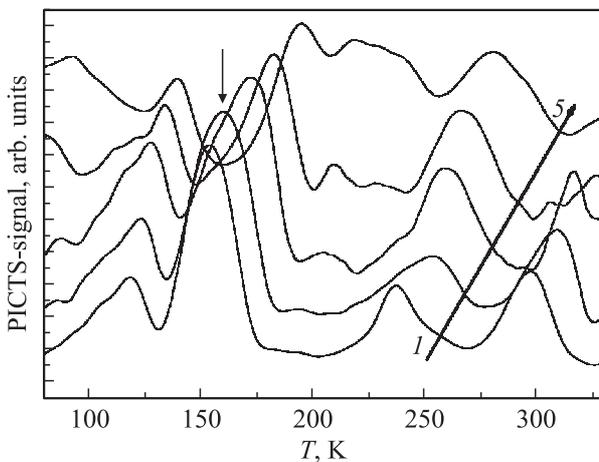


Рис. 1. PICTS спектры GaAs, соответствующие характеристическому времени релаксации: 1 — 10, 2 — 3.4, 3 — 0.9, 4 — 0.34, 5 — 0.12 мс. Спектры нормированы по высоте максимального пика и для наглядности последовательно смещены вдоль вертикальной оси.

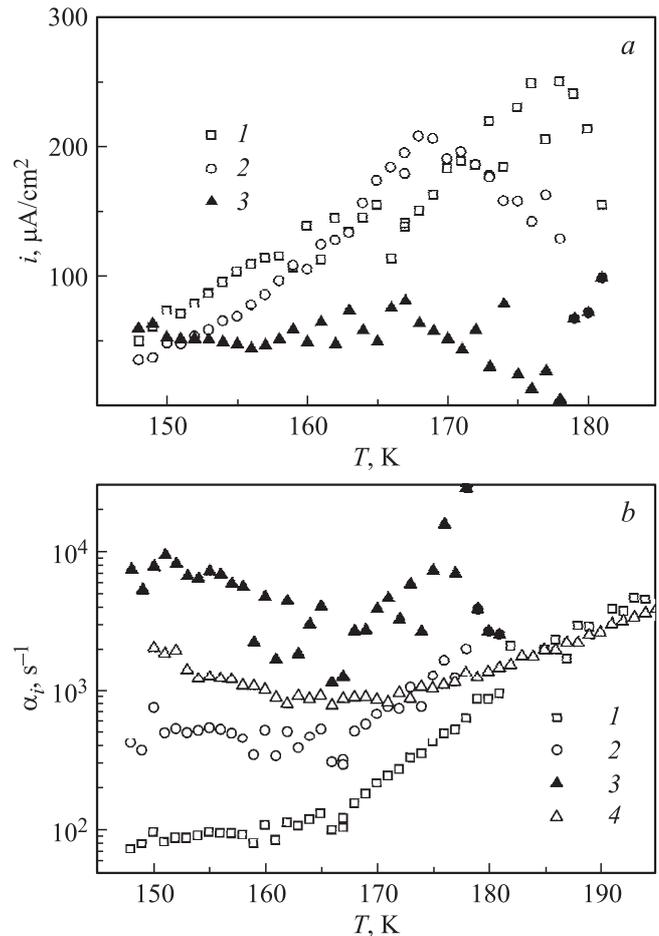


Рис. 2. Изменение с температурой амплитуды (а) и показателя степени (б) экспоненциальных составляющих кинетики релаксации фототока. Зависимости соответствуют: 1 — α -компоненте, 2 — β -компоненте, 3 — γ -компоненте, 4 — оценке $1/\tau$ по начальному наклону кривой спада.

анализе в основном использовали² модельную функцию:

$$Y(t) = A_0 \exp(-at) + B_0 \exp(-bt) + D_0 \exp(-\gamma t) + C_0, \quad (2)$$

где $\alpha < \beta < \gamma$.

На рис. 2 заметны изменения характера зависимости параметров модели от температуры. Можно выделить низкотемпературный участок 140–168 К, обозначим его I, и высокотемпературный — II при $T > 168$ К. На участке I наблюдается некоторый рост с температурой наименьшего показателя степени α , сменяющийся более сильной зависимостью на участке II. Показатель степени следующей компоненты (назовем β -компонента) практически не изменяется на I участке. Далее, на участке II заметен также рост β , вплоть до значений, сравнимых с наибольшим показателем — γ , что приводило к нестабильной работе алгоритма аппроксимации, связанной с известной проблемой разделения вкладов экспоненциальных составляющих с

² За исключением высокотемпературного части области $\Delta_0 T$, где использовалась двухкомпонентная модель.

близкими значениями показателя степени [18]. Компоненту с наибольшим показателем степени — γ следует сопоставить с уменьшением концентрации свободных носителей, ограничивающим обнаружимость возможно присутствующих более быстрых процессов, связанных с релаксацией неравновесного заполнения дефектов. Амплитуда γ -компоненты на низкотемпературном крае области $\Delta_0 T$ составляла $\sim 15\%$ общей амплитуды релаксации фототока (см. рис. 2, *a*). С повышением температуры доля этой компоненты уменьшалась, составляя лишь незначительную часть общего процесса релаксации на высокотемпературном крае $\Delta_0 T$. Учитывая, что использовалось световое возбуждение из области примесного поглощения GaAs, можно считать, что при этих температурах релаксация фототока не содержит существенного вклада, связанного с изменением неравновесного заполнения дефектов, характеризующихся релаксацией более быстрой, чем $1/\tau_n$, и основную долю релаксации фототока составляют компоненты с показателями степени $< \gamma$. На рис. 2, *b* приведена также оценка величины $1/\tau_n$ по начальному участку кинетики релаксации, где τ_n — время жизни свободных носителей. Эта оценка занижена в сравнении с величиной γ , что хорошо согласуется с использованным характером фотовозбуждения из области примесного поглощения, с энергией фотонов, меньшей ширины запрещенной зоны. В этих условиях основным поставщиком неравновесных свободных носителей является изменение зарядового состояния дефектов при освещении. Соответственно можно полагать, что процесс релаксации также будет содержать значительную составляющую термоэмиссии с дефектов, в том числе и в начальный момент после прекращения фотовозбуждения, что объясняет разницу в значениях γ и $1/\tau_n$.

Зависимость от температуры показателя степени более медленных α - и β -компонент релаксации при температуре выше ~ 168 К (II участок) типична для

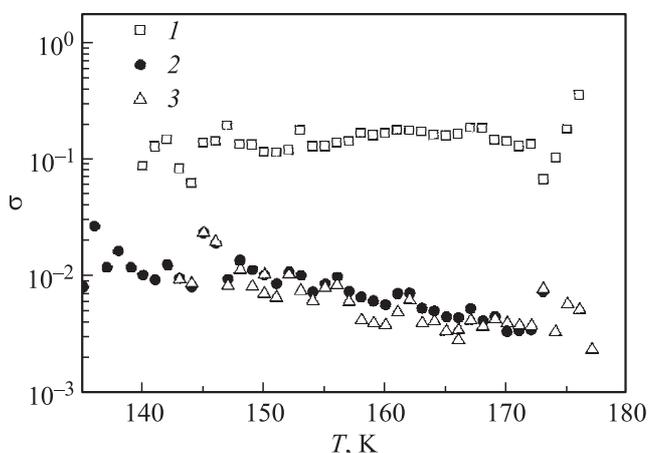


Рис. 3. Оценка точности аппроксимации кинетики релаксации фототока модельной функцией — суммой постоянной составляющей и 1 — двух, 2 — трех, 3 — четырех экспоненциальных компонент.

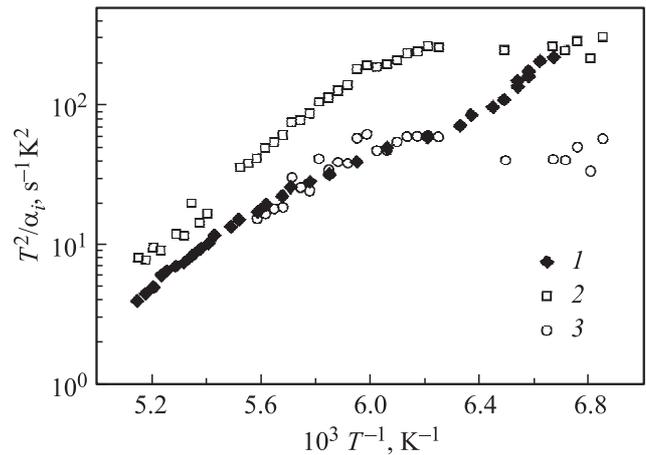


Рис. 4. Зависимость от температуры характеристического времени перезарядки дефекта с учетом T^2 коррекции: 1 — по данным PICTS и аппроксимации модельной функцией, 2 — для α -компоненты, 3 — для β -компоненты.

термоэмиссии неравновесного заполнения дефекта. На рис. 4 представлено сравнение данных аппроксимации и PICTS-анализа. Заметно хорошее соответствие графика Аррениуса с таковым для β -компоненты в области температур выше ~ 168 К. При $T > 180$ К, где амплитуда β -компоненты существенно снижается, заметна тенденция графика Аррениуса на сближение с добавочной α -компонентой, обнаруженной аппроксимацией. Таким образом, изменение с температурой кинетики релаксации фототока при температурах выше ~ 168 К можно представить как обусловленную вкладом термоэмиссии с двух дефектов, с близкими значениями энергии термоактивации: 364 мэВ для β -компоненты и 364 мэВ для α -компоненты. Это обстоятельство, а также убывающий характер зависимости от температуры амплитуды β -компоненты на II температурном участке (см. рис. 2, *a*) вызывает сомнения в независимом характере обнаруженных процессов термоэмиссии, или, иными словами, возможности сопоставления их и релаксации неравновесного заполнения независимых дефектов, типа ловушек. Действительно, для случая релаксации неравновесного заполнения n_1 и n_2 двух ловушек различной природы вследствие термоэмиссии, кинетику процесса в приближении пренебрежения перезхватом и линейной рекомбинации можно описать системой дифференциальных уравнений:

$$dn_1/dt = -e_1 \cdot n_1, \tag{3}$$

$$dn_2/dt = -e_2 \cdot n_2, \tag{4}$$

$$dn/dt = -n/\tau + e_1 \cdot n_1 + e_2 \cdot n_2, \tag{5}$$

где n — концентрация свободных носителей, τ — время жизни свободных носителей, e_1 и e_2 — скорости термоэмиссии с соответствующих дефектов. Решение (3) и (4) представимо:

$$n_i(t) = n_{i0} \exp(-e_i t), \tag{6}$$

где $i = 1, 2$. Здесь n_{i0} — заполнение дефекта неравновесными носителями заряда на момент прекращения

фотовозбуждения. Тогда изменение концентрации свободных носителей

$$n(t)/n_0 = (1 - B_1 - B_2) \exp(-t/\tau) + B_1 \exp(-e_1 t) + B_2 \exp(-e_2 t), \quad (7)$$

где n_0 — концентрация неравновесных свободных носителей в условиях стационарного фотовозбуждения, и введено обозначение соответствующих амплитуд:

$$B_i \equiv (n_{i0} e_i / n_0) / (1/\tau - e_i). \quad (8)$$

При условии достижения состояния стационарного фотовозбуждения³ $dn_i/dt, dn/dt = 0$ можно считать:

$$n_0 = g_1 \tau, \quad n_{i0} = N_1 / (1 + (e_i + e_{in}^0) / e_{ip}^0), \quad (9)$$

где e_{in}^0 и e_{ip}^0 — скорости оптического опустошения и заполнения дефекта. Подставляя n_0, n_{i0} в (8) и пренебрегая не зависящим от температуры темпом оптического опустошения e_{in}^0 , получим

$$B_i = (N_i e_i / g_1) / [(1 + e_i / e_i^0)(1 - e_i \tau)]. \quad (10)$$

В области температур регистрации перезарядки $\Delta_0 T$, при изменении e_i от значений, близких к нулю до меньших, но сравнимых с $1/\tau$, функция B_i возрастает и не имеет экстремумов. Таким образом, убывающий характер температурной зависимости амплитуды β -компоненты (см. рис. 2, а) плохо согласуется с интерпретацией этой компоненты релаксации как обусловленной термоэмиссией с независимого дефекта.

Полученное значение энергии активации термоэмиссии для α - и β -компонент не значительно отличается от таковой для EL6 — 0.35 эВ по данным DLTS на низкоомном GaAs [1]. Сложный характер релаксации неравновесного заполнения глубоководных дефектов в рассматриваемой области температур 150–200 К отмечался и в DLTS исследованиях низкоомного GaAs [15,19], где обнаруживалась некоторая связанность дефектов, регистрируемых в относительно узкой области температур, фактически совместно. Это дало основания объединить их в группу дефектов EL6 [15,20]. В свете вышесказанного обнаруженный в настоящей работе сложный характер релаксации фототока не является значительным исключением. Если полагать корректной работу процедуры аппроксимации на низкотемпературном участке $\Delta_0 T$, где величина $1/\alpha$ становится сравнимой с длительностью темнового периода регистрации кинетики релаксации, что планируется выяснить в дальнейших исследованиях, изменение характера температурной зависимости показателей степени экспоненциальных компонент релаксации можно объяснить участием дополнительного к термоэмиссии механизма изменения неравновесного заполнения дефекта. В любом случае убывание с нагревом амплитуды β -компоненты (см. рис. 3, а) на высокотемпературном участке $\Delta_0 T$ не согласуется с предположением регистрации независимого процесса термоэмиссии.

³ Отметим, что при выбранных условиях светового возбуждения, на II участке $\Delta_0 T$ насыщение фототока наблюдалось.

4. Заключение

Таким образом, в отличие от работы [11], мы получили хорошее соответствие результатов распространенного DLTS-анализа и анализа на основе аппроксимации модельной функцией суммы экспоненциальных составляющих релаксации фототока, по крайней мере на высокотемпературном крае рассмотренной области регистрации перезарядки дефектов. Подробное изучение изменений с температурой кинетики релаксации фототока на основе аппроксимации модельной функцией в данной области температур обнаружило сложный характер процесса релаксации, который можно представить двумя экспоненциальными компонентами, сопоставимыми с термоэмиссией. Их относительные вклады в регистрируемый сигнал релаксации изменялись с температурой. Характер температурных зависимостей параметров экспоненциальных компонент не поддается интерпретации как процесс термоэмиссии с независимых локальных уровней.

Список литературы

- [1] G.M. Martin, A. Mitonneau, A. Mircea. *Electron. Lett.*, **13** (7), 191 (1977).
- [2] Ch. Hurter, M. Boilou, A. Mitonneau, D. Bois. *Appl. Phys. Lett.*, **32**, 821 (1978).
- [3] J.C. Bourgoin, H.J. von Bardeleben, D. Stievenard. *J. Appl. Phys.*, **64**, 65 (1988).
- [4] J.C. Abele, R.E. Kremer, J.S. Blakemore. *J. Appl. Phys.*, **62** (6), 2432 (1987).
- [5] Jun Xia, Andreas Mandelis. *Semicond. Sci. Technol.*, **24**, 125 002 (2009).
- [6] E.I. Shmelev, A.V. Klyuev, A.V. Yakimov. *Fluctuation and Noise Lett.*, **12**, 1350 008 (2013).
- [7] E.G. Seebauer, M.C. Kratzer. *Charged Semiconductor Defects* (London, Springer Verlag, 2009).
- [8] D.V. Lang. *J. Appl. Phys.*, **45**, 3023 (1974).
- [9] A. Chantre, G. Vincent, D. Bois. *Phys. Rev. B*, **23**, 5335 (1981).
- [10] K. Yasutake, H. Kakaiuchi, A. Takeuchi, K. Yoshii, H. Kawabe. *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, **8**, 239 (1997).
- [11] J.S.P. Maria Brasil, P. Motisuke. *J. Appl. Phys.*, **68** (7), 3370 (1990).
- [12] P.K. Giri, Y.N. Mohapatra. *J. Appl. Phys.*, **78** (1), 262 (1995).
- [13] C. Longeaud, J.P. Kleider, P. Kaminski, R. Kozlowski, M. Pawlowski, J. Cwirko. *Semicond. Sci. Technol.*, **14**, 747 (1999).
- [14] A. Castaldini, A. Cavallini, L. Polenta, C. Canali, F. Nava. *Proc. 5th Eur. Gallium Arsenide and related III–V compounds Applications Simpos.* (Bologna, Italy, 1997) p. 315.
- [15] C.V. Reddy, Y.L. Luo, S. Fung, C.D. Beling. *Phys. Rev. B*, **58**, 1358 (1998).
- [16] И.А. Давыдов, А.П. Одринский. Деп. в ВИНТИ 27.06.90, № 6285-B90 (М., 1990).
- [17] A.A. Istratov, O.F. Vyvenko, H. Hieslmair, E.R. Weber. *Meas. Sci. Technol.*, **9**, 477 (1998).
- [18] A.A. Istratov, O.F. Vyvenko. *Rev. Sci. Instrum.*, **70** (2), 1233 (1999).

- [19] H. Shiraki, Y. Tokuda, K. Sassa. J. Appl. Phys., **84**, 3167 (1998).
[20] A. Cavallini, L. Polenta. J. Appl. Phys., **98**, 023 708 (2005).

Редактор А.Н. Смирнов

The analysis of photocurrent relaxation of semi-insulating GaAs in the temperature range 150–200 K

A.P. Odrinsky

Institute Technical acoustics
National Academy of Sciences Belarus,
210717 Vitebsk, Belarus

Abstract The peculiarities of the registration of a contribution of characteristic native defect in semi-insulated GaAs to the photocurrent relaxation are considered. Detailed analysis of transient relaxation on the basis of approximation by sum exponential components is presented. The data of photo-induced current transient spectroscopy are comparing with results of approximation.