

## Идентификация параметров примесных уровней в высокоомных полупроводниковых кристаллах с помощью термостимулированных токов при дозированном освещении образцов

© П.Г. Кашерининов, Д.Г. Матюхин

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

(Получена 13 октября 1997 г. Принята к печати 20 октября 1997 г.)

Предложен метод идентификации параметров примесных уровней в высокоомных (изолирующих) полупроводниковых кристаллах, позволяющий с помощью термостимулированных токов при дозированном освещении образцов, определять одновременно глубину залегания примесных уровней в запрещенной зоне кристалла ( $\Delta E$ ) и устанавливать, от края какой из разрешенных зон следует отсчитывать найденную глубину залегания уровней, что не позволило широко распространенный обычный метод термостимулированных токов.

Метод термостимулированных токов (ТСТ) основан на заполнении ловушек в кристалле электронами и дырками под действием облучения при низких температурах с последующим опустошением их при нагревании. После перезарядки примесных уровней носителями различных знаков (электронами и дырками) оказывается возможным определение глубины залегания этих перезаряженных уровней в запрещенной зоне кристалла ( $\Delta E$ ) по энергии активации захваченных на примесные уровни носителей в соответствующие разрешенные зоны кристалла по температурной зависимости ТСТ при нагревании образца. Однако при этом оказывается невозможным установить, от края какой из разрешенных зон следует отсчитывать эту найденную глубину залегания уровней ( $\Delta E$ ) [1]. При заполнении примесных уровней при облучении носителями только одного известного знака проводимости (электронами или дырками) идентификация параметров перезаряженных примесных уровней из кривых ТСТ не вызывает трудностей. Поэтому для идентификации параметров примесных уровней в кристалле достаточно выбрать условия, обеспечивающие в специального типа структурах направленное заполнение примесных уровней при освещении как носителями одного (известного) знака проводимости, так и носителями обоих знаков, измерить спектры ТСТ после соответствующих типов заполнений примесных уровней в кристалле и из сравнения произвести идентификацию параметров этих уровней.

Метод основан на измерении ТСТ в структурах металл-полупроводник-металл (МППМ) на высокоомных кристаллах после освещения структур со стороны оптически прозрачных металлических электродов (М) дозированной энергией "собственного" света ( $h\nu > E_g$ ), ( $h\nu$  — энергия светового кванта,  $E_g$  — ширина запрещенной зоны кристалла).

В настоящее время установлено, что реальные МППМ структуры, созданные холодным нанесением металлических электродов на поверхность кристалла (напылением, химическим осаждением металла и т.д.), содержат

тонкий слой естественного окисла (ТД), расположенный на поверхности кристалла между металлом и полупроводником (толщиной 20–50 Å) [2–4]. Такие структуры представляют собой в действительности структуры типа М(ТД)П(ТД)М с неинжектирующими электродами при напряженности электрических полей в приконтактных областях до  $E < 10^4$  В/см и инжектирующим при больших значениях напряженности поля в этих областях  $E > 10^4$  В/см [5,6]. Протекание фототока через слои туннельно-тонкого диэлектрика (ТД) в таких структурах сопровождается аккумуляцией в кристалле на границе с этими слоями (ТД) фотоиндуцированных зарядов носителей соответствующих знаков [3–10]. При освещении таких структур со стороны электродов сильно поглощаемым "собственным" светом через кристалл протекает фототок, обусловленный фотоносителями знака, одноименного освещаемому электроду. Эти фотоносители аккумулируются в кристалле на границе со слоями туннельно-тонкого диэлектрика (ИД) около противоположного освещаемому "темнового" электрода, захватываются на примесные уровни и образуют в кристалле у этого электрода монополярный электрический заряд знака, одноименного освещаемому электроду. При изменении величины этого заряда напряженность электрического поля в кристалле изменяется со временем от однородно распределенной по толщине кристалла (в отсутствие освещения) до резко неоднородной по толщине кристалла с областью сильного поля, локализованной в кристалле вблизи "темнового" электрода. Когда напряженность электрического поля в кристалле у темного электрода превысит некоторое критическое значение ( $E > E_{cr}$ ), электрический заряд того же знака, что и полярность "темнового" электрода, начинает инжектироваться с темного электрода в объем кристалла. С этого момента времени соответствующие примесные уровни (ловушки) в объеме кристалла заполняются носителями обоих знаков (электронами и дырками) [5,6].

Кривые ТСТ в таких структурах, измеренные после различных по величине экспозиций, будут давать ин-

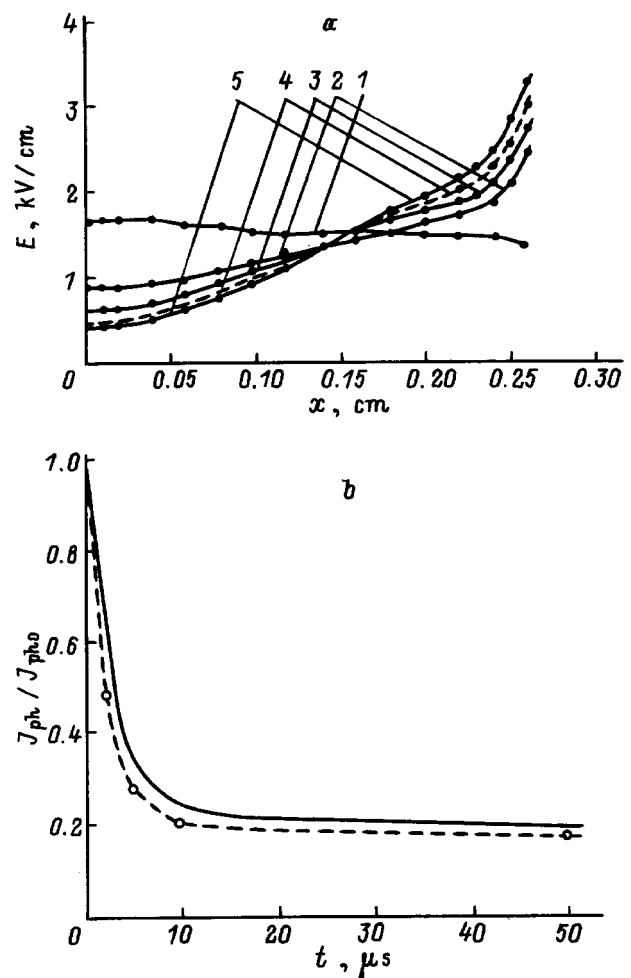
формацию о глубине залегания примесных уровней, перезаряженных носителей только одного (известного) знака проводимости (после малых экспозиций), либо носителями обоих знаков (электронами и дырками, после больших экспозиций). Время экспозиции, обеспечивающее перезарядку примесных уровней в кристалле носителями только одного знака, может быть определено из формы релаксации фототока МПМ структуры. Форма релаксации фототока в МПМ структуре при включении освещения неизменной интенсивности полностью определяется особенностями фотоиндуцированной перестройки напряженности электрического поля в объеме структуры со временем.

При этом перестройка напряженности электрического поля в кристалле со временем, как показано [5,6,8–10], имеет монотонный характер, сопровождается возрастанием напряженности электрического поля у темного электрода со временем и уменьшением его у освещаемого электрода. Воздействие же этой перестройки поля в кристалле на величину протекающего через структуру фототока неоднозначно.

Такая перестройка поля в кристалле при освещении сопровождается изменением (уменьшением) величины собранного на электроды заряда от каждой созданной светом электронно-дырочной пары у освещаемого электрода [5,10–12], что должно приводить к уменьшению фототока со временем относительно его значения при однородном распределении поля в кристалле (в условиях отсутствия освещения).

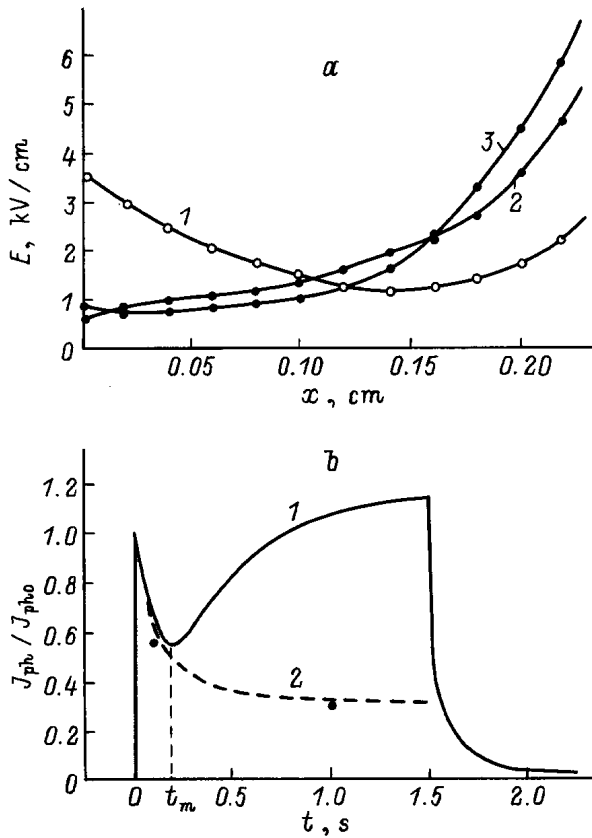
В то же время эта перестройка поля может вызывать изменение инжекционных свойств темного электрода при возрастании напряженности электрического поля вблизи этого электрода в кристалле выше определенного критического значения, что должно вызвать резкое увеличение протекающего через структуру фототока. Определяющее воздействие на ток того или иного из этих механизмов определяется характером распределения электрического поля в кристалле и его величиной у электродов структуры.

В работе проводились исследования по определению параметров примесных уровней в электрооптических изолирующих кристаллах CdTe ( $\rho = 10^7 - 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ) с различной концентрацией примесных уровней ( $N_t, \text{см}^{-3}$ ): 1 —  $N_t < 10^{14}$  ("чистые" кристаллы). 2 —  $N_t > 10^{15}$  ("компенсированные" кристаллы). МПМ структуры на этих кристаллах создавались химическим осаждением оптически прозрачных золотых электродов на травление поверхности плоскопараллельных пластин толщиной 0.25 см, площадью 0.25 см<sup>2</sup>. Измерялись форма релаксации тока при освещении МПМ структур "собственным" светом ( $\lambda = 0.63 \text{ мкм}, 0.82 \text{ мкм}$ ) со стороны электродов и пространственное распределение напряженности электрического поля в кристалле между электродами структуры в различные моменты времени после начала этого освещения  $E(x, t)$  по электрооптической методике [10] при  $T = 300 \text{ К}$ .



**Рис. 1.** Релаксация фототока в МПМ структурах на чистых кристаллах CdTe ( $N_t < 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ) после включения освещения (приложенное напряжение  $V = 400 \text{ В}$ ,  $T = 300 \text{ К}$ ). *a* — распределение напряженности электрического поля в кристалле в различные моменты времени после начала освещения структуры со стороны положительного электрода ( $\lambda = 0.82 \text{ мкм}$ ,  $I = 50 \text{ мВт/см}^2$ ). Время  $t$ , с: 1 — 0, 2 —  $2 \cdot 10^{-3}$ , 3 —  $5 \cdot 10^{-3}$ , 4 —  $10 \cdot 10^{-3}$ , 5 —  $50 \cdot 10^{-3}$ . *b* — изменение фототока ( $J_{ph}$ ) со временем (в отн. ед., где  $J_{ph0}$  — начальное значение фототока при однородной напряженности электрического поля в кристалле). Сплошная линия — эксперимент, штриховая — расчетные значения из измеренных распределений напряженности электрического поля в кристаллах в различные моменты времени после включения освещения (в предположении отсутствия инжекции со стороны электродов). Приложенное напряжение  $V_0 = 400 \text{ В}$ ,  $T = 300 \text{ К}$ .

На основании измеренного распределения поля  $E(x, t)$  в предположении отсутствия инжекции носителей со стороны электродов рассчитывалась форма релаксации фототока в структуре при включении освещения по методике [10], результаты расчетов сравнивались с экспериментально измеренными формами релаксаций токов в этих структурах.



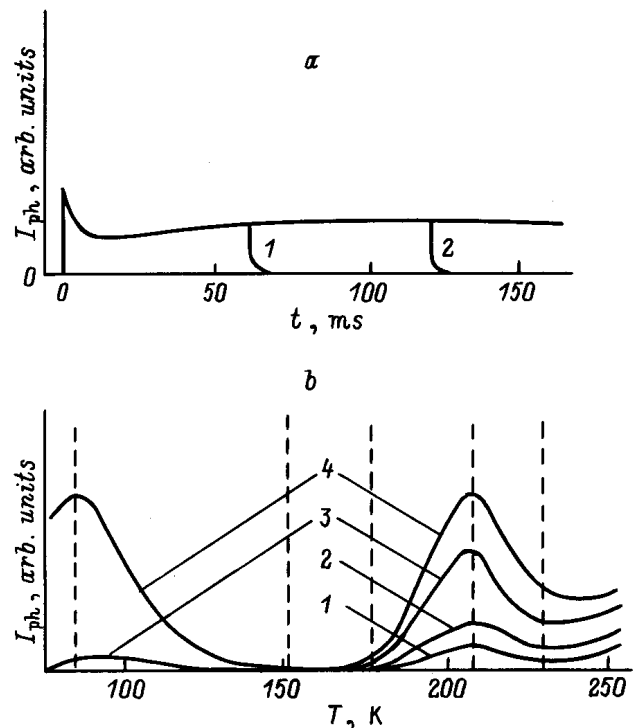
**Рис. 2.** Релаксация фототока в МПМ структурах на компенсированных кристаллах CdTe после включения освещения (приложенное напряжение  $V_0 = 400$  В,  $T = 300$  К). *a* — распределение напряженности электрического поля в кристалле в различные моменты времени после начала освещения структуры со стороны положительного электрода ( $\lambda = 0.82$  мкм,  $I = 10$  мВт/см<sup>2</sup>). Время  $t$ , с: 1 — 0, 2 — 0.1, 3 — 1.0. *b* — релаксация фототока в МПМ структурах после включения освещения (в отн. ед., где  $J_{ph0}$  — начальное значение фототока). 1 — эксперимент, 2 — расчетные значения из измеренных распределений напряженности электрического поля в кристалле в различные моменты времени после включения освещения (в предположении отсутствия инжекции со стороны электродов).

Проводилось изучение спектров ТСТ после дозированного освещения структур со стороны различных электродов при  $T = 77$  К.

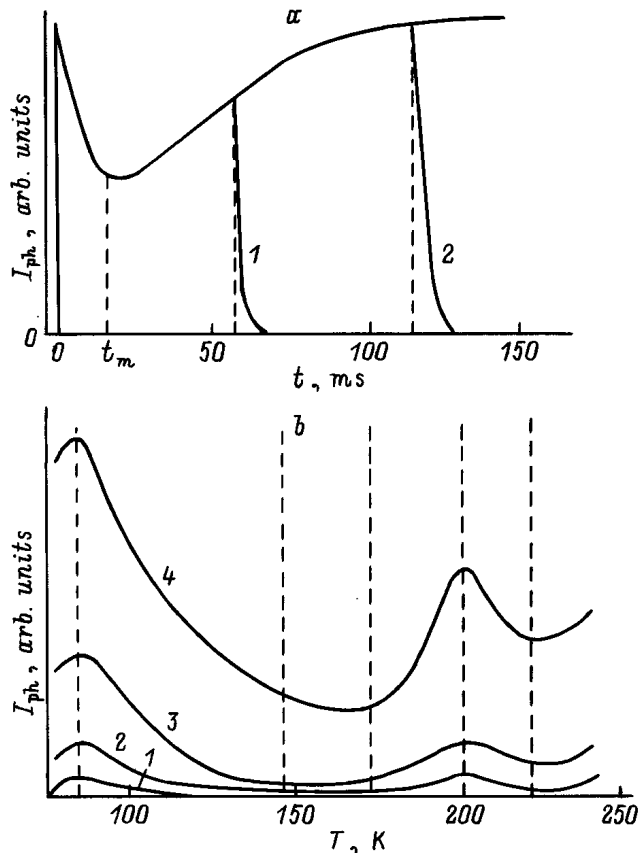
На рис. 1,2 приведено распределение напряженности электрического поля в объеме кристалла МПМ структур (между электродами) в различные моменты времени после начала освещения, форма релаксации фототоков в структурах, экспериментально измеренная и рассчитанная на основании измеренного распределения электрического поля в различного типа кристаллах при  $T = 300$  К. Как видно из рис. 1,2, *a*, напряженность электрического поля у темного электрода ( $x = d$ , где  $x$  — толщина кристалла  $0 < x < d$ ,  $d$  — расстояние между электродами структуры) в условиях стационарного освещения при сходных режимах значительно выше в структурах

на компенсированных кристаллах ( $N_t > 10^{15}$  см<sup>-3</sup>). Как видно из рис. 1, *b*, форма релаксации фототока в структурах на чистых кристаллах ( $N_t < 10^{14}$  см<sup>-3</sup>) совпадает с расчетной и определяется только фотоиндуцированной перестройкой напряженности электрического поля в кристалле в условиях неизменности инжекционных свойств контактов. В случае компенсированных кристаллов (рис. 2, *b*) расчетные и экспериментальные значения фототока совпадают только в начальный момент времени, в дальнейшем экспериментально измеренные значения фототока значительно превышают расчетные из-за начала инжекции носителей в кристалл со стороны темного электрода. Минимальное значение экспериментально измеренного фототока в структурах на компенсированных кристаллах ( $N_t > 10^{15}$  см<sup>-3</sup>) наблюдается при  $t = t_m$ . В течение этого времени ( $0-t_m$ ) в кристалле присутствует только монополярный электрический заряд знака, одноименного освещаемому электроду.

В работе исследовались спектры ТСТ на высокоомных "чистых" кристаллах ( $N_t < 10^{14}$  см<sup>-3</sup>), описанных выше. В процессе регистрации ТСТ структура охлаждалась в темноте до  $T = 77$  К, к электродам прикладывалось постоянное напряжение  $U_0 = 20$  В с выдержкой в темноте в течение  $t = 1$  мин; структура освещалась со



**Рис. 3.** Термостимулированные токи (ТСТ) после освещения МПМ структуры на CdTe со стороны положительного электрода (при  $T = 77$  К,  $V_0 = 20$  В,  $I = 3$  мВт/см<sup>2</sup>,  $\lambda = 0.63$  мкм): *a* — форма релаксации фототока структуры после включения освещения ( $V_0 = 20$  В,  $T = 77$  К,  $I = 3$  мВт/см<sup>2</sup>,  $\lambda = 0.63$  мкм). *b* — термостимулированные токи (ТСТ) после освещения МПМ структуры в течение различных промежутков времени  $t$ , с: 1 —  $6 \cdot 10^{-2}$ , 2 —  $12 \cdot 10^{-2}$ , 3 —  $25 \cdot 10^{-2}$ , 4 — 200.



**Рис. 4.** Термостимулированные токи (ТСТ) после освещения МПМ структуры на CdTe со стороны отрицательного электрода (при  $T = 77$  К,  $V_0 = 20$  В,  $I = 3$  мВт/см<sup>2</sup>,  $\lambda = 0.63$  мкм): *a* — форма релаксации фототока структуры после включения освещения ( $V_0 = 20$  В,  $T = 77$  К,  $I = 3$  мВт/см<sup>2</sup>,  $\lambda = 0.63$  мкм). *b* — термостимулированные токи (ТСТ) после освещения МПМ структуры в течение различных промежутков времени  $t$ ; 1 —  $6 \cdot 10^{-2}$ , 2 —  $12 \cdot 10^{-2}$ , 3 —  $25 \cdot 10^{-2}$ , 4 — 200.

стороны различных электродов постоянным по интенсивности потоком собственного света ( $\lambda = 0.63$  мкм,  $I = 10^{-2}$  Вт/см<sup>2</sup>), при этом регистрировалась форма релаксации фототока (рис. 3, 4, *a*). Видно, что при  $T = 77$  К форма релаксации фототока в структурах на чистых кристаллах ( $N_i < 10^{14}$  см<sup>-3</sup>) имеет вид, аналогичный рис. 2, *b* с  $t_m = 10$  мс. Через оптический затвор производилось дозированное освещение структуры этим световым потоком со стороны различных электродов с временем экспозиции ( $t_e = 10^{-2} - 10^2$  с). После выключения освещения образец выдерживался в темноте в течение  $t = 1$  мин., потом структура нагревалась со скоростью  $S = 0.3$  К/с от  $T = 77$  до 300 К, при этом регистрировалась температурная зависимость протекающего тока (ТСТ), из которой энергетическое положение примесных уровней в кристалле ( $\Delta E$ ) оценивалось из соотношения  $\Delta E = 23kT_m$  [1], где  $T_m$  — температура, соответствующая пику проводимости,  $k$  — постоянная Больцмана.

На рис. 3, 4, *b* представлены температурные зависимости ТСТ; видно, что после освещения образца в течение длительного времени со стороны различных электродов вид кривых ТСТ практически идентичен. При уменьшении времени экспозиции ( $t_e$ ) на кривых ТСТ наблюдается изменение соотношения амплитуд этих пиков при освещении структуры со стороны различных электродов (рис. 3, 4, *b*, кривые 1–3). Так, после освещения структуры со стороны отрицательного электрода в течение времени ( $t_e = 2 \cdot 10^{-2}$  с) на кривых ТСТ наблюдается только один пик при  $T_m = 85$  К ( $\Delta E = 0.17$  эВ, см. рис. 4, *b*, кривая 1), а после освещения со стороны положительного электрода в течение того же времени на кривых ТСТ остается только один пик при  $T_m = 205$  К ( $\Delta E = 0.41$  эВ, см. рис. 3, *b*, кривая 1). Энергетическое положение примесных уровней, соответствующих пикам ТСТ при  $T_m = 85$  и 205 К соответственно:  $E_c - 0.17$  эВ и  $E_v + 0.41$  эВ.

Таким образом, для полного определения параметров примесных уровней в исследуемом кристалле с помощью ТСТ метода необходимо создать на нем МПМ структуру, измерить форму релаксации фототока при выбранной интенсивности освещения ( $T = 77$  К), определить ( $t_m$ ), измерить ТСТ после освещения структуры со стороны одного из электродов в течение времени  $t_e < t_m$  и  $t_e \gg t_m$ , определить глубину залегания уровней в кристалле из этих спектров в соответствии [1]. Из сопоставления спектров ТСТ после этих экспозиций определить параметры всех наблюдаемых уровней.

## Список литературы

- [1] A.G. Milnes. *Deep Impurities in Semiconductors* (N. Y.—London, J. Wiley & Sons, 1963).
- [2] В.И. Стриха, Е.В. Бузанева, И.А. Радзиевская. *Полупроводниковые приборы с барьером Шоттки* (М., Сов. радио, 1974).
- [3] M.A. Green, J. Shewchun. *Sol. St. Electron.*, **17**, 349 (1974).
- [4] M.A. Green, V.A.K. Temple, J. Shewchun. *Sol. St. Electron.*, **18**, 745 (1975).
- [5] П.Г. Кашерининов, А.В. Кичаев, А.А. Томасов, И.Д. Ярошецкий. *Письма ЖТФ*, **20**, № 18, 16 (1994).
- [6] П.Г. Кашерининов, А.В. Кичаев, И.Д. Ярошецкий. *ЖТФ*, **65**, № 9, 193 (1995).
- [7] А.А. Гуткин, В.Е. Седов. *ФТП*, **9**, 1761 (1975).
- [8] П.Г. Кашерининов, А.В. Кичаев, И.Д. Ярошецкий. *Письма ЖТФ*, **19**, № 17, 48 (1993).
- [9] П.Г. Кашерининов, Д.Г. Матюхин, И.Д. Ярошецкий. *Письма ЖТФ*, **21**, № 7, 44 (1995).
- [10] П.Г. Кашерининов, А.В. Кичаев, А.А. Томасов. *ФТП*, **29**, 2092 (1995).
- [11] G. Cavalleri, E. Gatti, G. Fabri, V. Svelto. *Nucl. Instr. a. Meth.*, **92**, 137 (1971).
- [12] G. Fabri, V. Svelto. *Nucl. Instr. a. Meth.*, **35**, 33 (1965).

Редактор В.В. Чалдышев

**Identification of the parameters of impurity levels in high-resistivity semiconductor crystals by means of thermally stimulated currents with dosed illumination of the samples**

P.G. Kasherininov, D.G. Matyukhin

A.F. Ioffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St.Petersburg, Russia

**Abstract** Suggested is the method of identification of the parameters of the impurity levels in high-resistivity crystals by means of thermally stimulated currents (TSC) with illumination of the sample by dosed radiant energy. In this way, it permits to determine not only the depth  $\Delta E$  of the impurity level in the band gap of the crystal but also to calculate the depth of the level from the edge of each of the band gaps an achievement that is not possible in the widely-used ordinary TSC-method.