

06;07;12

©1995

ПОЛНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРИМЕСНЫХ УРОВНЕЙ В ВЫСОКООМНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КРИСТАЛЛАХ С ПОМОЩЬЮ ТЕРМОСТИМУЛИРОВАННЫХ ТОКОВ ПРИ ДОЗИРОВАННОМ ОСВЕЩЕНИИ ОБРАЗЦОВ

П.Г.Кашерининов, Д.Г.Матюхин

Показано, что метод термостимулированных токов (ТСТ) при освещении образцов дозированной энергией излучения позволяет осуществлять полную идентификацию параметров примесных уровней в высокоомном кристалле, т. е. определять не только глубину залегания примесных уровней в запрещенной зоне кристалла (ΔE), но и от края какой из разрешенных зон следует отсчитывать эту найденную глубину уровней, что не возможно в обычном широко распространенном методе ТСТ [1].

Выявление таких возможностей ТСТ явилось логическим следствием обнаруженного и исследованного авторами эффекта пространственной перестройки напряженности электрического поля в высокоомном кристалле при освещении, сопровождающегося изменением инжекционных свойств контактов [2-5].

Исследовалась структура примесных уровней в высокоомных компенсированных кристаллах p -CdTe(Cl), выращенных по методике [6] с примесными уровнями (N_t) акцепторного и донорного типа с концентрациями $N_t > 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ($\rho = 10^8 - 10^9 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, $\mu_n \tau_n = 2.5 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{В}$, $\mu_p \tau_p = 2.5 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{В}$, где τ_n , τ_p и μ_n , μ_p — время жизни и подвижности электронов и дырок соответственно). Образцы создавались нанесением оптически прозрачных золотых электродов (М) на травленную поверхность исследуемого кристалла (П) толщиной $d = 0.25 \text{ см}$, покрытую тонким слоем естественного окисла (диэлектрика), туннельно-прозрачного для носителей тока (ТД) (в структурах типа М(ТД)П(ТД)М).

В процессе регистрации ТСТ структура охлаждалась в темноте до $T = 77 \text{ К}$, к электродам прикладывалось постоянное напряжение $U_0 = 20 \text{ В}$, структура освещалась со стороны одного из электродов постоянным по интенсивности потоком "собственного" света ($\lambda = 0.63 \text{ мкм}$) с регулируемым временем экспозиции ($t_e = 10^{-2} - 10^2 \text{ с}$).

После выключения освещения структура нагревалась со скоростью $V = 0.3 \text{ К} \cdot \text{с}^{-1}$ от $T = 77 \text{ К}$ до $T = 300 \text{ К}$, при этом регистрировалась температурная зависимость протекающего тока, из которой энергетическое положение примесных уровней в кристалле (ΔE) оценивалось соотношением $\Delta E = 23 kT_m$ [1], где T_m — температура, соответствующая пику проводимости, k — постоянная Больцмана.

Как показано [2-4], освещение такой структуры постоянным по интенсивности потоком "собственного" света со стороны одного из электродов ($x = 0$) сопровождается протеканием сквозного фототока и образованием в объеме кристалла на соответствующих примесных уровнях в первый момент монополярного электрического заряда знака, одноименного освещаемому электроду. Напряженность электрического поля в кристалле изменяется при этом со временем от однородного по толщине кристалла (в отсутствие освещения) до резко неоднородного с локализацией области "сильного" электрического поля в кристалле у темного электрода ($x = d$).

Когда напряженность электрического поля в кристалле у темного электрода превысит некоторое критическое значение ($E > E_{\text{кр}}$), с этого электрода в объем кристалла начинается инжекция носителей знака, одноименного этому темновому электроду [4,5]. С этого момента времени в объеме кристалла на соответствующих примесных уровнях образуются электрические заряды обоих знаков.

Изменяя время экспозиции и полярность освещаемого электрода, можно создавать в объеме кристалла монополярные заряды того или иного знака, определять по спектру ТСТ их глубину залегания в запрещенной зоне кристалла, устанавливая, от края какой из зон нужно отсчитывать эту энергию.

На рис. 1, а, б представлена форма релаксации фототока в такой структуре при ее освещении световым потоком постоянной интенсивности ($\lambda = 0.63 \text{ мкм}$) со стороны различных электродов ($T = 77 \text{ К}$, $U_0 = 20 \text{ В}$). Видно, что первоначальное уменьшение фототока со временем, связанное с изменением распределения напряженности электрического поля в кристалле [2,3], сменяется в дальнейшем его возрастанием при любой полярности освещаемого электрода, вследствие появления инжекции носителей со стороны темного электрода при увеличении напряженности электрического поля в кристалле у этого электрода, аналогично [4,5]. Минимального значения фототок достигает через время $t_m = (1.5-2) \cdot 10^{-2} \text{ с}$ после включения освещения.

На рис. 2, а, б представлены кривые ТСТ после освещения структуры со стороны различных электродов световым

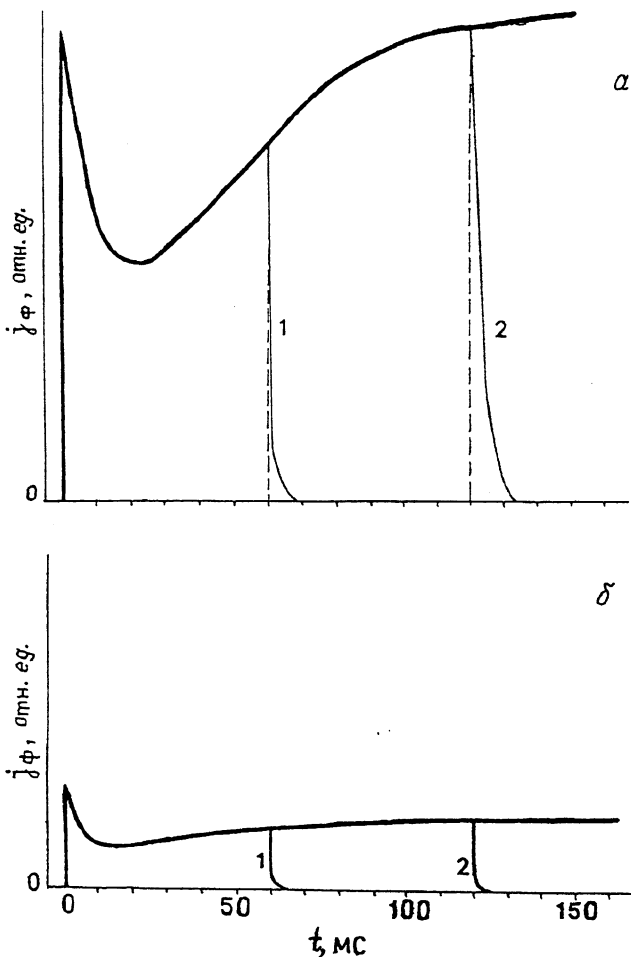


Рис. 1. Изменение фототока со временем при включении освещения в М(ТД)П(ТД)М структуре на высокоомном CdTe: *a* — со стороны отрицательного электрода, *б* — со стороны положительного электрода. Приложенное к структуре напряжение $V_0 = 20$ В, $T = 77$ К, интенсивность светового потока $I = 3$ мВт/см², $\lambda = 0.63$ мкм.

поток в течение различного времени (t_e). Как видно из рис. 2, *a*, *б*, *4*, кривые ТСТ после освещения структуры со стороны различных электродов в течение длительного времени практически идентичны, т. е. демонстрируют наличие в кристалле электрических зарядов на одних и тех же примесных уровнях (пики на кривых ТСТ при $T_m = 85$ К и $T_m = 205$ К).

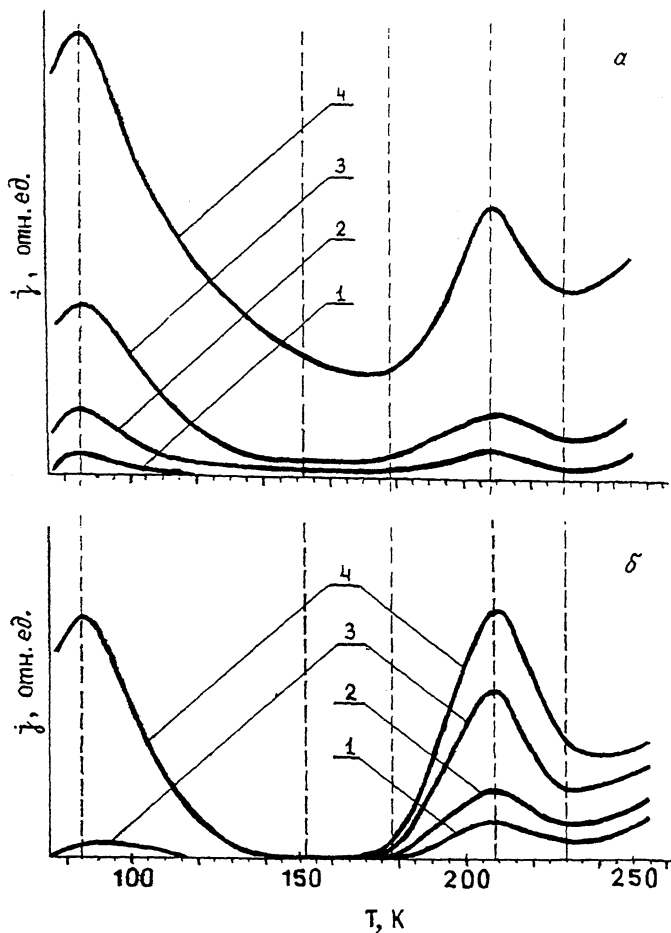


Рис. 2. Кривые ТСТ после освещения структуры со стороны электродов: а — отрицательного, б — положительного. Время экспозиции t_e , с: 1 — $6 \cdot 10^{-2}$, 2 — $12 \cdot 10^{-2}$, 3 — $25 \cdot 10^{-2}$, 4 — 200.

При уменьшении времени экспозиции (t_e) на кривых ТСТ наблюдается изменение соотношения амплитуд этих пиков при освещении структуры со стороны различных электродов (рис. 2, а, б, 1-3), а при $t_e = t_m$ на кривых ТСТ полностью пропадают некоторые пики (рис. 2, а, б, 1).

Так, после освещения структуры со стороны отрицательного электрода в течение времени ($t_e = t_m$) на кривых ТСТ наблюдается только один пик при $T_m = 85$ К ($\Delta E = 0.17$ эВ), 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). Энергетическое положение примесных уровней, соответствующих пикам ТСТ при $T_m = 85$ К и $T_m = 205$ К, соответственно ($E_c - 0.17$) эВ и ($E_v + 0.41$) эВ.

Таким образом, для выяснения, от края какой из разрешенных зон нужно отсчитывать найденную по методу [1] глубину уровня в запрещенной зоне, следует измерить ГСТ после освещения структуры со стороны каждого из электродов в течение времени $t_e = t_m$. Наблюдаемые пики на кривых ГСТ после такого освещения обусловлены ионизацией с примесных уровней носителей знака, одноименного освещаемому электроду, в соответствующую разрешенную зону.

Список литературы

- [1] Милнс А. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках. М.: Мир, 1977 (*Milnes A.G. Deep Impurities in Semiconductors. New York-London, J. Wiley & Sons, 1963*).
- [2] Кашерининов П.Г., Кичаев А.В., Ярошецкий И.Д. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 17. С. 48-53.
- [3] Кашерининов П.Г., Кичаев А.В., Томасов А.А., Ярошецкий И.Д. // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. В. 18. С. 16-19.
- [4] Кашерининов П.Г., Матюхин Д.Г., Ярошецкий И.Д. // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. В. 7. С. 44-49.
- [5] Кашерининов П.Г., Кичаев А.В., Ярошецкий И.Д. // ЖТФ. 1995. В. 10.
- [6] Аркадьева Е.Н., Матвеев О.А., Маслова Л.В., Прокофьев С.В., Рыевкин С.М., Хусаинов А.Х. // ДАН СССР. 1975. Т. 221. С. 77-79.

Поступило в Редакцию

3 августа 1995 г.
