

06.2;06.3

©1994

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В СТРУКТУРАХ С ГРАНИЦЕЙ РАЗДЕЛА ПОЛУПРОВОДНИК — ТОНКИЙ СЛОЙ ДИЭЛЕКТРИКА НА ВЫСОКООМНЫХ “ЧИСТЫХ” КРИСТАЛЛАХ

*П.Г.Кашерининов, А.В.Кичаев,
А.А.Томасов, И.Д.Ярошецкий*

В работе представлены результаты по изучению фотоэлектрических явлений в структурах с границами раздела полупроводник (П) — тонкий слой диэлектрика (ТД) типа М (ТД) П (ТД) М на полуизолирующих “чистых” кристаллах CdTe (характер люкс-амперных зависимостей, форма релаксаций фототоков). Приводится объяснение наблюдаемых явлений пространственной перестройкой электрического поля в объеме кристалла при протекании фототока, экспериментально исследованной в [1].

Фотоиндуцированная перестройка напряженности поля, достаточно хорошо теоретически и экспериментально изученная в структурах типа МПМ и МДП [2-4], практически не исследована в М (ТД) П (ТД) М структурах на высокоомных кристаллах с границей раздела полупроводник-туннельно-тонкий слой диэлектрика. В настоящее время отсутствует теория, описывающая пространственное распределение напряженности электрического поля и его кинетику в таких структурах, их зависимость от плотности протекающего тока, толщины диэлектрических слоев, наличия примесных уровней в кристалле и т.д.

Воздействие фотоиндуцированной перестройки электрического поля на величину протекающего через структуру фототока может быть обусловлено двумя механизмами, действующими на ток в противоположных направлениях. Первый механизм связан с изменением величины собранного на электродах заряда от каждой из созданных светом электронно-дырочных пар. Теория расчета этого заряда разработана [5], что позволяет определить величину фототока при заданном распределении напряженности поля в кристалле и известной скорости генерации носителей [6]. Действие этого механизма приводит, как правило, к уменьшению фототока по сравнению с его значением при однородном распределении поля в структуре.

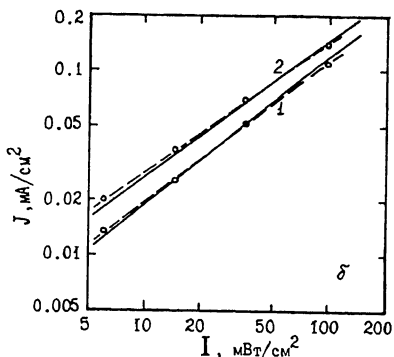
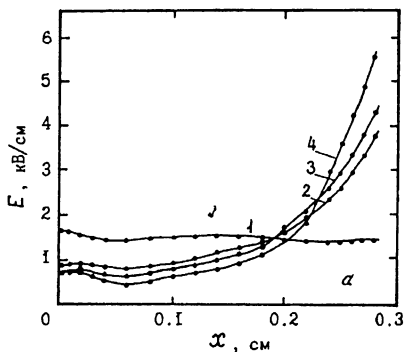


Рис. 1. Стационарные люкс-амперные характеристики М (ТД) П (ТД) М структуры. а) Стационарные распределения напряженности электрического поля при освещении положительного электрода ($x = 0$) световым потоком ($\lambda = 0.8$ мкм) различной интенсивности I , мВт/см²: 1 — 0, 2 — 6, 3 — 15, 4 — 95. Приложенное напряжение $V = 400$ В. б) Люкс-амперные зависимости структуры, измеренные экспериментально (сплошные линии) и рассчитанные в соответствии с (1) по известным распределениям поля при различных интенсивностях освещения (пунктирные линии). Приложенное напряжение V , В: 1 — 300, 2 — 400.

Другой механизм связан с возможным изменением инжекционных свойств контактов при увеличении напряженности электрического поля в приэлектродных областях структуры, по аналогии с эффектом, обнаруженным в реальных барьерах Шоттки на низкоомных кристаллах [7]. Появление инжекции с контакта приводит к возрастанию тока во внешней цепи. Качественная теория этого эффекта также разработана [8–10], но количественный расчет изменения фототока с учетом инжекции вызывает большие сложности.

Преимущественное влияние на ток первого или второго механизма определяется характером распределения электрического поля в кристалле и его величиной у электродов структуры. Результирующее воздействие может меняться с изменением величины приложенного напряжения, интенсивности и продолжительности освещения, температуры и других факторов, что и определяет особенности фотоэлектрических характеристик таких структур.

Исследования проводились на М (ТД) П (ТД) М структурах, созданных напылением оптически прозрачных золотых электродов на травленую поверхность “чистых” кристаллов p -CdTe (толщиной $d = 0.25$ см, $\rho = 10^8 - 10^9$ Ом·см; $\mu_n = 800$ см²/В·с; $\mu_p = 80$ см²/В·с; $\tau_{n,p} = 3 \cdot 10^{-7}$ с,

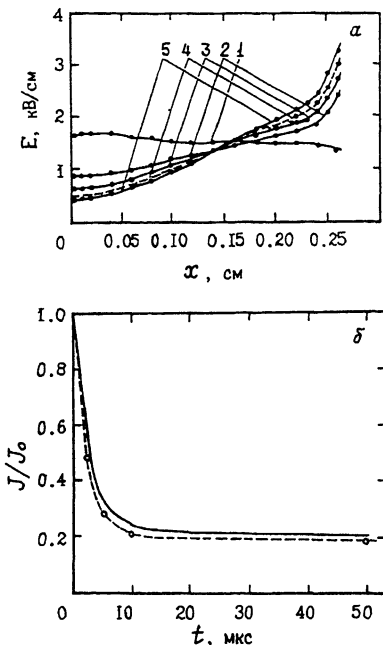


Рис. 2. Изменение фототока в М (ТД) П (ТД) М структуре со временем после включения освещения (приложенное напряжение $V = 400$ В). а) Распределение напряженности электрического поля в кристалле в различные моменты времени (t) после освещения структуры со стороны положительного электрода ($x = 0$) световым потоком интенсивности $I = 50$ мВт/см² · t , мкс: 1 — 0,2 — 2, 3 — 5, 4 — 10, 5 — 50. б) Изменение фототока со временем (в относительных единицах, где J_0 — начальный фотоотклик в условиях недеформированного поля). Сплошная линия — эксперимент; пунктирная — расчет по известным распределениям поля в различные моменты времени.

с концентрацией достаточно мелких примесных уровней $n < 10^{12}$ см⁻³). Кристаллы CdTe выращивались по методике [11]; освещение вызывает появление в их объеме лишь зарядов свободных фотоносителей при неизменном значении времени жизни носителей ($\tau(I) = \text{const}$). Диэлектрические слои между поверхностью полупроводника и металлическими электродами в таких структурах представляют собой слои естественного окисла [12,13]. К электродам прикладывалось постоянное напряжение, структура освещалась со стороны положительного электрода сильно поглощаемым светом ($\lambda = 0.8$ мкм), вызывающим перестройку электрического поля. Определение распределения напряженности поля между электродами структуры ($E = E(x)$) произво-

дилось по методике [14], основанной на измерении величины поперечного электрооптического эффекта. По координатным зависимостям $E = E(x)$, соответствующим различным моментам времени после включения освещения различной интенсивности, рассчитывались токовые характеристики структур (стационарные люкс-амперные зависимости и форма релаксации фототока) и сравнивались с экспериментально измеренными.

Расчет плотности фототока проводился в дрейфовом приближении при следующих предположениях: 1) кванты падающего света поглощаются около освещаемого электрода ($x = 0$); каждый из них создает в кристалле одну электронно-дырочную пару, 2) параметры μ и τ известны и не изменяются при освещении; 3) инжекция носителей в кристалл со стороны электродов отсутствует.

Зависимость фототока от интенсивности освещения $J(I)$, согласно [5,6], может быть описана через известное распределение напряженности электрического поля в кристалле $E(x)$, соотношением (1):

$$J = Q \cdot I \cdot k_D = \frac{q_0}{d} k_D I \int_0^d \exp \left(-\frac{1}{\tau} \int_0^x \frac{dx}{E(x)\mu} \right) dx \quad (1)$$

$$Q = \frac{q_0}{d} \int_0^d \exp \left(-\frac{t}{\tau} \right) dx; \quad t = \int_0^x \frac{dx}{E(x)\mu}$$

где d — расстояние между электродами структуры; q_0 — заряд, созданный поглощенным квантом света, Q — величина заряда, собранного на электроды структуры от каждой созданной светом электронно-дырочной пары; k_D — коэффициент, учитывающий влияние поверхностной рекомбинации на величину собранного заряда, зависящий от напряженности электрического поля у поверхности кристалла, скорости поверхностной рекомбинации (s), коэффициента поглощения в кристалле падающего излучения (α), температуры и др. [15].

На рис. 1, а, б для М (ТД) П (ТД) М структуры на “чистом” высокоомном p -CdTe приведены измеренные стационарные распределения напряженности электрического поля и рассчитанные по ним с помощью формулы (1) значения фототоков при различных интенсивностях освещения (в расчете принималось: $s = 7 \cdot 10^5$ см/с, $\alpha = 3 \cdot 10^4$ см $^{-1}$), а также экспериментально измеренные стационарные зависимости $J = J(I)$. Расчетные и экспериментальные люкс-амперные

зависимости, как видно из рис. 1, б, имеют достаточно хорошее совпадение и описываются выражением $J = A \cdot I^n$, где $n < 1$, т.е. имеют сублинейный вид. Полученный на экспериментальных и расчетных кривых показатель степени $n = 0.7 - 0.8$ характеризует зависимость $J = J(I)$ для случая, когда изменение распределения поля при освещении определяется только зарядом свободных фотоносителей.

На рис. 2, а, б приведены распределения напряженности поля в различные моменты времени (t) после включения освещения фиксированной интенсивности и рассчитанная по ним форма релаксации фототока. Значение фототока в каждый момент времени находилось по формуле (1).

Как видно из рис. 2, б, рассчитанное изменение фототока во времени хорошо совпадает с экспериментально измеренным.

Таким образом, в М (ТД) П (ТД) М структурах на "чистых" высокоомных кристаллах характер люкс-амперных зависимостей и форма релаксации фототока определяются эффектом фотоиндуцированной перестройки электрического поля в кристалле при неизменности инжекционных свойств контактов.

Список литературы

- [1] *Кашерининов П.Г., Кичаев А.В., Ярошецкий И.Д.* // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 17. С. 48-53.
- [2] *Ламперт М., Марк П.* Инжекционные токи в твердых телах. М.: Мир, 1973. 416 с.
- [3] *Кашерининов П.Г., Резников Б.И., Царенков Г.В.* // ФТП. 1992. Т. 26. В. 8. С. 1480-1492.
- [4] *Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г.* Физика полупроводников. М.: Наука, 1990.
- [5] *Cavalleri G., Gatti E., Fabri G., Svelto V.* // Nuclear Instr. and Meth. 1971. V. 92. P. 137-141.
- [6] *Кашерининов П.Г., Сладкова В.А.* // ФТП. 1980. Т. 14. В. 9. С. 1739-1746.
- [7] *Green M.A., Temple V.A.K., Shewchun J.* // Solid State Electron. 1975. V. 18. P. 745.
- [8] *Малазов Б.А., Покалякин В.М., Степанов Г.В.* // Микроэлектроника. 1980. В. 9. С. 132.
- [9] *Вуль А.Я., Федоров В.И. и др.* // ФТП. 1981. Т. 15. С. 525.
- [10] *Вуль А.Я., Козырев С.В., Федоров В.И.* // ФТП. 1981. Т. 15. С. 1428.
- [11] *Аркадьева Е.Н., Матвеев О.А. и др.* // ДАН СССР. 1975. Т. 221. С. 77.
- [12] *Hage-Ali M., Stuck R., Scharager C., Siffert P.* // IEEE Trans. on Nucl. Sci. 1979. NS 26. N 1. P. 281-300.
- [13] *Зеленина Н.К., Маслова Л.В., Матвеев О.А., Томасов А.А.* // ФТП. 1984. Т. 18. В. 1. С. 68-71.

- [14] *Кашерининов П.Г., Кичаев А.В.* и др. Препринт ФТИ им. А.Ф.Иоффе. N 1569, 1991. 58 с.
- [15] *Гуткин А.А., Седов В.Е.* // ФТП. 1975. Т. 9. В. 9. С. 1761-1765.
- [16] *Као К., Хуанг В.* Перенос электронов в твердых телах. М.: Мир, 1984, т. 1. 350 с.; т. 2, 368 с.

Поступило в Редакцию
10 июня 1994 г.
