

# ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В СТРУКТУРАХ С ГРАНИЦЕЙ РАЗДЕЛА ПОЛУПРОВОДНИК–ТОНКИЙ СЛОЙ ДИЭЛЕКТРИКА НА ВЫСОКООМНЫХ КОМПЕНСИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛАХ

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

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021, Санкт-Петербург, Россия  
(Поступило в Редакцию 15 ноября 1994 г.)

В работе представлены результаты по изучению фотоэлектрических явлений в структурах с туннельно-тонким диэлектрическим слоем типа металл–(туннельно-тонкий диэлектрик)–полупроводник–(туннельно-тонкий диэлектрик)–металл (М(ТД)П(ТД)М) на полуизолирующих компенсированных кристаллах CdTe (люкс-амперные зависимости, релаксации фототоков) и их объяснение эффектом фотоиндуцированной пространственной перестройки электрического поля.

Исследовались М(ТД)П(ТД)М структуры, изготовленные по методике [1], на электрооптических высокоомных компенсированных кристаллах  $p$ -CdTe(Cl) ( $\rho = 10^7$ – $10^9$  Ом·см,  $\mu_n\tau_n = 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/В,  $\mu_p\tau_p = 10^{-6}$  см<sup>2</sup>/В), выращенных методом направленной кристаллизации [2] с некоторым отклонением от стехиометрического состава (обогащенные вакансиями кадмия). Эти вакансии и их комплексы образуют в кристалле примесные уровни акцепторного и донорного типа с концентрациями  $N > 10^{15}$  см<sup>-3</sup> [3]. В структурах на таких кристаллах пространственное распределение напряженности электрического поля при протекании фототоков определяется как зарядами свободных фотоносителей, так и зарядами на примесных уровнях.

Фотоэлектрические характеристики структур при  $T = 300$  К изменялись при освещении образца “собственным” светом со стороны прозрачных электродов аналогично [4]; одновременно регистрировалось распределение напряженности и электрического поля в кристалле с помощью электрооптической методики [5].

На рис. 1,а приведено распределение напряженности электрического поля между электродами М(ТД)П(ТД)М структуры в различные моменты времени после включения и выключения освещения со стороны положительного электрода. Как видно из рисунка, характер изменения распределения поля после включения освещения фиксированной интенсивности в структурах на компенсированных кристаллах качественно остается таким же, как в структурах на “чистых” кристаллах CdTe [1,4]. Однако напряженность электрического поля у темнового электрода ( $x = d$ ) в стационарных условиях (кривая 3 на рис. 1) значительно выше, чем в структурах на “чистых” кристаллах при тех же условиях эксперимента (приложенное напряжение, интенсивность освещения). Время установления стационарного распределения электрического поля в таких структурах после включения освещения определяется временем образования стационарного заряда на примесных уровнях и на 4–5 порядков больше, чем в структурах на “чистых” кристаллах [1,4].

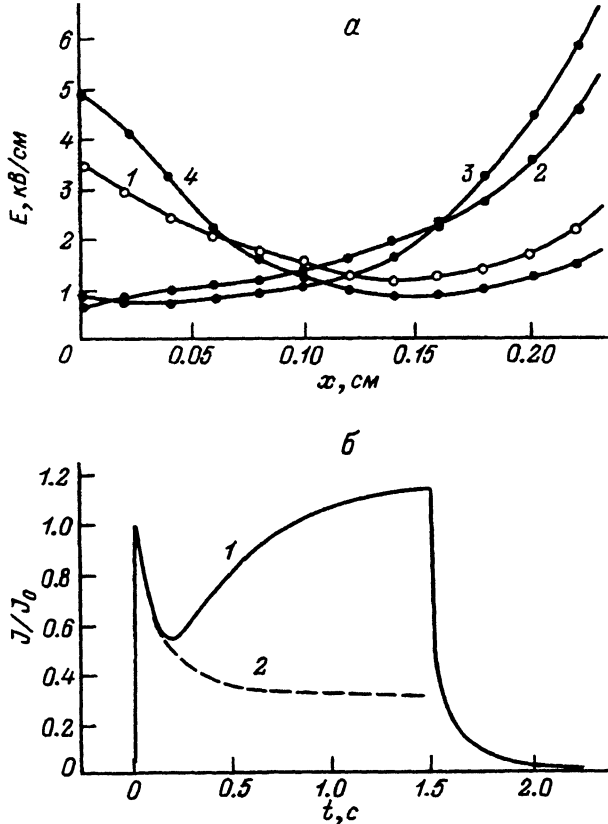


Рис. 1. Релаксация фототока в М(ТД)П(ТД)М структуре на высокоомном компенсированном кристалле CdTe ( $V = 400$  В,  $T = 300$  К).

а — распределение напряженности электрического поля между электродами структуры в различные моменты времени ( $t$ ) после освещения со стороны положительного электрода ( $x = 0$ ) световым потоком ( $\lambda = 0.63$  мкм,  $I = 10$  мВт/см<sup>2</sup>);  $t$ , с: 1 — 0, 2 — 0.1, 3 — 1.0, 4 — 0.1 после выключения света; б — релаксация фототока после включения освещения: 1 — эксперимент, 2 — расчет на основании измеренных распределений напряженности поля в различные моменты времени после включения освещения (в предположении отсутствия инжекции носителей с контактов),  $J_0$  — фототок в условиях недеформированного поля.

Как видно из рис. 1, а, характер восстановления исходного распределения поля после выключения освещения также отличается от релаксации электрического поля в структурах на “чистых” кристаллах [1]. В первый момент после выключения освещения распределения электрического поля резко изменяется; наибольшее значение напряженности поля наблюдается теперь у освещаемого электрода ( $x = 0$ ). Стационарное (темновое) распределение поля в кристалле устанавливается за время порядка 0.5 с.

На рис. 1, б приведена форма релаксации фототока в данной структуре при включении освещения, полученная экспериментально и рассчитанная на основании измеренных распределений электрического поля в различные моменты времени по методике [4]. Видно, что в начальный момент времени расчетные и экспериментальные значения фототоков совпадают, как и в случае структур на “чистых” кристаллах

[<sup>4</sup>], а в дальнейшем экспериментальные значения фототока оказываются больше расчетных и увеличиваются со временем (рис. 1, б, кривая 2). Существенное отклонение экспериментальных значений тока от расчетных наблюдается при  $t > 0.5$  с. В этом интервале времени напряженность поля у темного электрода составляет порядка 6 кВ/см.

На рис. 2,а приведены стационарные люкс-амперные зависимости структур на компенсированных кристаллах при различных значениях приложенного напряжения. Видно, что эти зависимости могут аппроксимироваться выражением  $J = A \cdot I^n$ , имеющим два различных участка: сублинейный с  $n = 0.6$  при малых интенсивностях и суперлинейный с  $n = 1.15$  при больших.

На рис. 2,б приведена форма релаксации фототока при освещении структуры прямоугольным световым импульсом с интенсивностями, соответствующими каждому из этих участков люкс-амперной зависимости. Видно, что при интенсивности светового потока  $I_1$ , соответствующей сублинейному участку, фототок уменьшается со временем

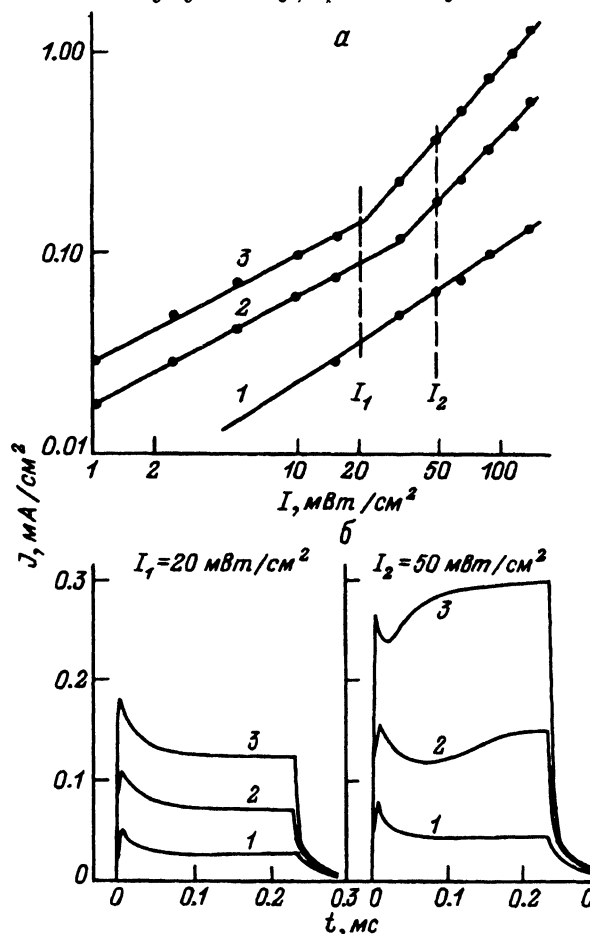


Рис. 2. Фотоэлектрические характеристики структуры.

а — стационарные люкс-амперные зависимости при  $V, В$ : 1 — 100, 2 — 300, 3 — 500; б — форма релаксации фототока при освещении структуры со стороны положительного электрода,  $V, В$ : 1 — 100, 2 — 300, 3 — 500.

при всех приложенных напряжениях аналогично релаксации фототока в структурах на "чистых" кристаллах [4]. При интенсивности освещения  $I_2$ , соответствующей суперлинейному участку люкс-амперной зависимости, фототок сначала уменьшается со временем, а затем возрастает с выходом на насыщение.

Таким образом, фотоэлектрические характеристики  $M(TD)P(TD)M$  структур на компенсированных кристаллах существенно отличаются от аналогичных характеристик структур на "чистых" кристаллах. Эти отличия связаны с различной величиной напряженности электрического поля у темного электрода ( $x = d$ ) при освещении структур в идентичных условиях эксперимента. Более высокая напряженность поля в структурах на компенсированных кристаллах обусловлена наличием в них дополнительных электрических зарядов на примесных уровнях.

Как показано [6-10], при достаточно высокой напряженности электрического поля в кристалле у электрода со слоем тонкого диэлектрика с этого электрода в объем кристалла начинается инжекция носителей, знак которых соответствует полярности этого электрода. В структурах на компенсированных кристаллах напряженность поля у темного электрода может достигать критического значения, обуславливающего появление инжекционного тока. Инжекция вызывает возрастание тока во внешней цепи (рис. 1, б, кривая 1), при этом стационарная люкс-амперная зависимость становится суперлинейной ( $n > 1$ ).

При малых интенсивностях освещения напряженность поля  $E(x = d)$  меньше критической и люкс-амперная зависимость сублинейна ( $n = 0.6$ , тогда как для структур на "чистых" кристаллах  $n = 0.8$  [4]).

Форма релаксации фототока при включении освещения с интенсивностью, соответствующей суперлинейному участку, имеет сложный характер и определяется изменением напряженности поля у темного электрода, которая, как видно из рис. 1, а, монотонно увеличивается со временем. Пока  $E(x = d)$  меньше критического значения, фототок будет уменьшаться со временем, аналогично случаю структур на "чистых" кристаллах. С момента, когда  $E(x = d)$  превысит критическое значение, фототок начинает возрастать.

При малых приложенных напряжениях ( $V = 100$  В)  $E(x = d)$  не достигает критической величины во всем исследованном диапазоне интенсивностей освещения; фототок при этом только уменьшается со временем после включения освещения, а стационарная люкс-амперная зависимость сублинейна (рис. 2, а, кривая 1).

При инжекции носителей со стороны темного электрода в кристалле появляются свободные носители обоих знаков и соответственно заряды обоих знаков на примесных уровнях, уравнивающие друг друга при неизменной величине результирующего заряда в объеме кристалла. В случае, когда после выключения освещения примесные уровни, захватившие фотоносители (дырки), термически освобождаются от захваченных носителей быстрее, чем уровни, захватившие инжектированные носители (электроны), в объеме кристалла после выключения освещения образуется отрицательный заряд. Область сильного электрического поля смещается при этом к положительному электроду в соответствии с рис. 1, а. Стационарное (темновое) распределение напряженности поля устанавливается после термической ионизации электронов.

- [1] *Кашерининов П.Г., Кичаев А.В., Ярошецкий И.Д.* // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. Вып. 17. С. 48–53.
- [2] *Аркадьева Е.Н., Матвеев О.А., Маслова Л.В. и др.* // ДАН СССР. 1975. Т. 221. С. 77.
- [3] *Agrinskaia N.V., Arkadeva E.N.* // Phys. Stat. Sol. (b). 1987. Vol. 143. P. K103–K105.
- [4] *Кашерининов П.Г., Кичаев А.В., Томасов А.А., Ярошецкий И.Д.* // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. Вып. 18. С. 16.
- [5] *Кашерининов П.Г., Кичаев А.В., Перепелицын Ю.Н. и др.* / Препринт ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН. № 1569. С.-Пб., 1991. 58 с.
- [6] *Green M.A., Shewchun J.* // Sol. St. Electron. 1974. Vol. 17. P. 349–365.
- [7] *Green M.A., Temple V.A.K., Shewchun J.* // Sol. St. Electron. 1975. Vol. 18. P. 745.
- [8] *Малахов Б.А., Покалякин В.М., Степанов Г.В.* // Микроэлектроника. 1980. Вып. 9. С. 132.
- [9] *Вуль А.Я., Федорова В.И., Бирюлин Ю.Ф. и др.* // ФТП. 1981. Т. 15. С. 525.
- [10] *Вуль А.Я., Козырев С.В., Федоров В.И.* // ФТП. 1981. Т. 15. С. 142.

01;12  
© 1995 г.

*Журнал технической физики, т. 65, в. 9, 1995*

## О ВЛИЯНИИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПРОВОДИМОСТИ НА РАВНОВЕСИЕ ШАРА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

*В.В.Бережнов, В.А.Семенов*

Пермский государственный университет, Пермь, Россия  
(Поступило в Редакцию 20 июля 1994 г.)

### Введение

В работах [1–3] экспериментально и теоретически показана возможность и определены основные условия реализации электростатического подвеса в жидком диэлектрике без динамического управления потенциалами электродов. При этом для уменьшения влияния проводимости жидкости подвес осуществлен в низкочастотном переменном электрическом поле. В настоящей работе представлены результаты исследования равновесия тела в постоянном электрическом поле при протекании электрического тока. В этом случае появляются дополнительные условия равновесия, поскольку электрическая сила, действующая на тело, обусловлена взаимодействием с полем не только поляризационных, но и свободных зарядов, возникающих на его поверхности.

### Теория

Рассмотрим равновесие диэлектрического шара, погруженного в слабопроводящую изолирующую жидкость, вблизи отверстия, высверленного в пластине горизонтального плоского конденсатора, подключенного к источнику постоянного высокого напряжения (рис. 1). На шар действуют электрическая  $F_1$  и гравитационная  $F_2$  силы, которые при определенных значениях параметров могут уравновесить друг друга. Найдем условия этого равновесия.