

06.2;06.3

©1995

## ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В СТРУКТУРАХ С ГРАНИЦЕЙ РАЗДЕЛА ПОЛУПРОВОДНИК-ТОНКИЙ ДИЭЛЕКТРИК НА ВЫСОКООМНЫХ КРИСТАЛЛАХ С ГЛУБОКИМИ ПРИМЕСНЫМИ УРОВНЯМИ

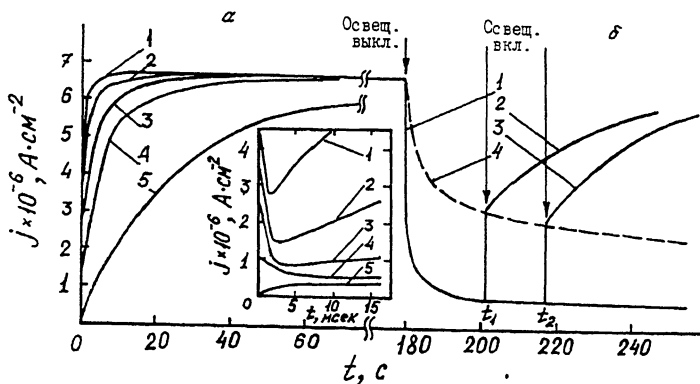
*П.Г.Кашерининов, Д.Г.Матюхин, И.Д.Ярошецкий*

В работе представлены результаты по изучению фотоэлектрических явлений в структурах с границей раздела полупроводник (П)-тонкий слой диэлектрика (ТД) типа М(ТД)П(ТД)М на высокоомных полупроводниковых кристаллах с глубокими примесными уровнями (независимость фототоков таких структур от интенсивности освещения, наличие долговременных релаксаций токов, явление остаточной проводимости, температурное гашение фотопроводимости) и приводится объяснение этих явлений эффектом фотоиндуцированной пространственной перестройки напряженности электрического поля в кристалле.

Исследовались структуры на высокоомных электрооптических кристаллах  $p$ -CdTe (С1), выращенных по методике [1] с концентрацией примесных уровней  $N_T > 10^{15} \text{ см}^{-3}$  ( $\rho = 10^8 - 10^9 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ). М(ТД)П(ТД)М структуры на этих кристаллах изготавливались путем химического осаждения оптически прозрачных золотых электродов на травленные поверхности кристалла, покрытые слоем естественного окисла (толщина кристаллов  $d = 0.25 \text{ см}$ ).

Проводилось комплексное исследование фотоэлектрических характеристик таких структур (стационарные люксамперные зависимости, релаксации фототоков при включении (выключении) освещения) и одновременно изучение распределения напряженности электрического поля в кристалле по электрооптической методике [2]. Измерения проводились при  $T = 77 \text{ К}$  в условиях отсутствия термической ионизации захваченных на примесные уровни фотоносителей. К структурам прикладывалось постоянное смещение  $V = (100-500) \text{ В}$ , освещение производилось через оптически прозрачные электроды "собственным" светом ( $\lambda = 0.63 \text{ мкм}$ ) различной интенсивности.

На рис. 1, а представлены релаксации фототоков такой структуры при освещении образца со стороны положитель-



**Рис. 1.** Релаксация токов в М(ТД)П(ТД)М структурах на высокоомных кристаллах  $p\text{-CdTe}$  с глубокими примесными уровнями при освещении: *a* — релаксации фототоков при включении освещения различной интенсивности ( $\lambda = 0.63$  мкм,  $V = 100$  В,  $T = 77$  К) со стороны анода (интенсивность светового потока уменьшается от 1 к 5); *б* — релаксация тока после выключения освещения: 1 — релаксация тока после выключения освещения. 2, 3 — релаксации фототока при повторном включении освещения через время  $t$  после его выключения (интенсивность повторного освещения соответствует интенсивности (рис. 1, *a*, 5)). 4 — изменение со временем быстрой компоненты фототока при повторном включении освещения.

ного электрода. Видно, что при включении освещения фототок увеличивается со временем от своего первоначального значения на два-три порядка в течение десятков секунд со скоростью, зависящей от интенсивности освещения, и достигает одного и того же стационарного значения, определяемого величиной приложенного к структуре напряжения при всех интенсивностях освещения.

На рис. 1, *a* (вставка) представлены релаксации этих фототоков в начальный момент времени после включения освещения. Видно, что первоначальное уменьшение фототока со временем сменяется его увеличением.

На рис. 1, *б* представлена релаксация тока в такой структуре после выключения освещения. Видно, что релаксация тока имеет две стадии. На первой стадии ток быстро уменьшается со временем в несколько раз, но остается увеличенным на пять-шесть порядков по отношению к своему стационарному темновому значению (остаточная проводимость). На второй стадии ток медленно (в течение десятков часов) уменьшается до своего стационарного темнового значения.

При повторном включении освещения через время  $t$  после его выключения фототок быстро увеличивается до некоторой определенной величины (рис. 1, *б*, 4) и затем медленно растет к своему стационарному значению.

Изучение пространственного распределения напряженности электрического поля в такой структуре показало, что при освещении ( $T = 77$  К,  $\lambda = 0.63$  мкм,  $U = (200-400)$  В) все приложенное к структуре напряжение сосредоточено на участке кристалла толщиной  $d < 50$  мкм у темнового электрода (50 мкм — пространственное разрешение установки), напряженность электрического поля в слое тонкого диэлектрика при этом составляет  $E > 10^4$  В/см. После выключения освещения распределение напряженности поля в кристалле оставалось неизменным в течение длительного времени (несколько часов).

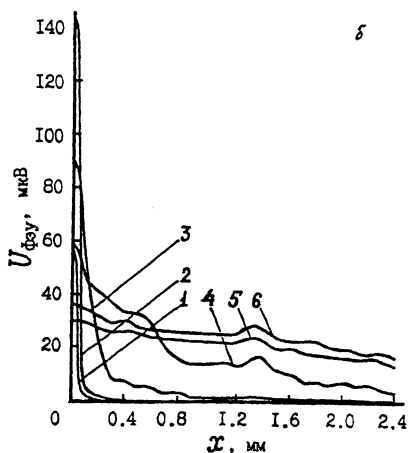
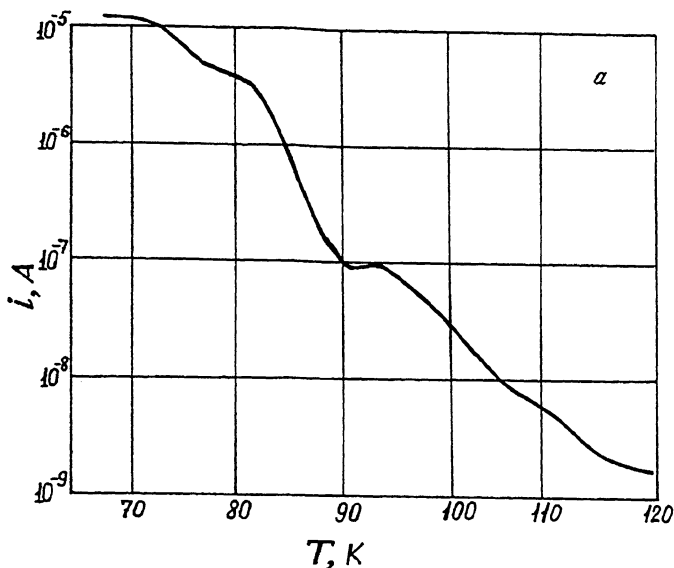
На рис. 2, а приведено изменение с температурой стационарного фототока этого образца при освещении световым потоком неизменной интенсивности ( $\lambda = 0.63$  мкм). Видно, что фототок уменьшается с увеличением температуры образца в диапазоне  $T = (77-120)$  К (температурное гашение фотопроводимости).

На рис. 2, б представлена температурная зависимость пространственного распределения поперечного электрооптического эффекта в объеме кристалла такой структуры при освещении ( $U = 400$  В) [2].

Видно, что при  $T = 77$  К приложенное к структуре напряжение сосредоточено у темнового электрода на участке кристалла толщиной  $d < 50$  мкм. При нагревании структуры ширина области электрического поля в кристалле расширяется, напряженность поля в слое диэлектрика уменьшается.

Наблюдаемые особенности изменения фототока с интенсивностью освещения, временем, температурой объясняются эффектом фотоиндуцированной пространственной перестройки напряженности электрического поля в такой структуре при протекании фототоков [3].

Уменьшение фототока со временем в первый момент после включения освещения (рис. 1, а, вставка) объясняется изменением распределения напряженности поля в кристалле в условиях неизменности инжекционных свойств контактов аналогично [4]. Дальнейшее возрастание фототока со временем связано с изменением в такой структуре инжекционных свойств темнового электрода ( $x = d$ ) вследствие возрастания около него напряженности электрического поля выше критического значения аналогично [5]. В структурах на кристаллах с глубокими примесными уровнями свободные носители, захваченные на них, термически не ионизируются и их заряд на этих уровнях накапливается со временем при любой плотности протекающего тока; его величина в пределе может ограничиваться лишь их концентрацией.



**Рис. 2.** Температурное гашение фотопроводимости в М(ТД)П(ТД)М структурах на высокоомных кристаллах  $p$ -CdTe при освещении со стороны анода световым потоком постоянной интенсивности ( $U = 200$  В,  $\lambda = 0.63$  мкм): а — изменение стационарного фототока с температурой; б — температурная зависимость пространственного распределения поперечного электрооптического эффекта в кристалле при освещении структуры. Температура образца  $T$ , К: 1 — 80, 2 — 95, 3 — 220, 4 — 230, 5 — 255, 6 — 295.

Появление этого заряда в кристалле сопровождается увеличением напряженности электрического поля у темного электрода ( $x = d$ ) до своего предельного значения при любой плотности фототока.

Возрастание напряженности поля в кристалле около электрода со слоем тонкого диэлектрика выше некоторого критического значения вызывает инжекцию носителей в кристалл с этого электрода [6-9], которая и определяет результирующую величину протекающего тока.

Таким образом, при освещении М(ТД)П(ТД)М структуры на высокоомных кристаллах с глубокими примесными уровнями величина протекающего стационарного тока не зависит от интенсивности освещения и определяется током инжекции носителей в кристалл со стороны темного электрода. Подобный эффект, названный аномальной фотопроводимостью, экспериментально наблюдался в [10].

После выключения освещения носители, захваченные на более мелкие примесные уровни, термически ионизируются и уносятся из кристалла, напряженность поля у темного электрода при этом уменьшается. Заряд же на глубоких уровнях сохраняется и обеспечивает в течение длительного времени напряженность поля, достаточную для протекания темного инжекционного тока, превосходящего темновой ток структуры на пять-шесть порядков.

При повторном включении освещения напряженность поля у темного электрода в структуре ( $x = d$ ) увеличивается за счет появления в кристалле дополнительного заряда свободных фотоносителей. Это вызывает увеличение инжекционного тока с темного электрода и быстрое возрастание тока во внешней цепи (рис. 1, в, 4). Дальнейший рост тока связан с медленным возрастанием напряженности поля у этого электрода за счет появления в кристалле дополнительных зарядов на примесных уровнях при их перезарядке фотоносителями, что обуславливает дальнейшее увеличение инжекционного тока.

Температурное гашение фотопроводимости (рис. 2) объясняется уменьшением напряженности электрического поля у темного электрода при повышении температуры и, как следствие этого, уменьшением тока инжекции с этого электрода.

## Список литературы

- [1] Аркадьева Е.Н., Матвеев О.А., Маслова Л.В., Прокофьев С.В., Рыбкин С.М., Хусаинов А.Х. // ДАН СССР. 1975. Т. 221. С. 77-79.
- [2] Кашерининов П.Г., Кичаев А.В., Перепелицын Ю.Н., Харциев В.Е., Ярошецкий И.Д. // Фотоэлектрические явления в полупроводниковых структурах с фоточувствительным распределением электрического поля и оптоэлектронные приборы на их основе. Препринт ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН. СПб., 1991. № 1569. С. 59.
- [3] Кашерининов П.Г., Кичаев А.В., Ярошецкий И.Д. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 17. С. 48-53.
- [4] Кашерининов П.Г., Кичаев А.В., Томасов А.А., Ярошецкий И.Д. // Письма в ЖТФ. 1994. В. 18-19.
- [5] Кашерининов П.Г., Кичаев А.В., Ярошецкий И.Д. // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. В. 18. С. 16.
- [6] Green M.A., Temple V.A.K., Shewchun J. // Sol. St. Electron. 1975. V. 18. P. 745.
- [7] Green M.A., Temple V.A.K., Shewchun J. // Sol. St. Electron. 1975. V. 18. P. 745-752.
- [8] Вуль А.Я., Саченко А.В. // ФТП. 1983. Т. 17. В. 8. С. 1361-1374.
- [9] Вуль А.Я., Козырев С.В., Федоров В.И. // ФТП. 1981. V. 15. В. 1. С. 142-148.
- [10] Корсунский М.И. // Аномальная фотопроводимость и спектральная память в полупроводниковых системах. М.: Наука, 1978. С. 319.

Физико-технический  
институт им. А.Ф. Иоффе  
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию  
3 августа 1994 г.