

06.2;06.3;07

©1993

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ВЫСОКООМНЫХ М(ТД)П(ТД)М СТРУКТУРАХ ПРИ ОСВЕЩЕНИИ

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

В работе приводятся результаты экспериментальных исследований пространственного распределения напряженности электрического поля в высокоомных М(ТД)П(ТД)М структурах, обусловленного зарядами свободных фотоносителей при протекании фототоков, и их сопоставление с теоретически рассчитанными распределениями электрического поля в МПМ [1] и МДП [2] структурах, в которых эффект фотоиндуцированной перестройки поля хорошо изучен теоретически и экспериментально.

Исследуемые образцы создавались на полуизолирующих электрооптических кристаллах p -CdTe марки ТКД (теллурид кадмия детекторынй), имеющих удельное сопротивление $\rho = 10^8 - 10^9$ Ом·см и концентрацию примесных уровней $N \leq 10^{12}$ см⁻³, выращенных по методике [3]. Образцы имели форму прямоугольных параллелепипедов (2.8 × 7 × 9 мм). Оптически прозрачные золотые электроды наносились химическим осаждением на ориентированные по кристаллографической плоскости (110) травленные грани кристалла (7 × 9 мм). Бло показано [4], что контакты такого типа содержат тонкий туннельно проницаемый для носителей диэлектрический слой, образуемый естественным окислом.

К структуре прикладывалось импульсное напряжение $V = 0 - 600$ В и производилось освещение одного из оптически прозрачных золотых электродов импульсным световым потоком ($h\nu > E_g$, $\lambda = 0.82$ мкм) регулируемой интенсивности $I = 0 - 100$ мВт/см². Измерение координатной зависимости напряженности электрического поля в кристалле осуществлялось с помощью поляризационно-оптической методики [5].

Как видно из рис. 1, *а, б*, в отсутствие освещения поле оказывалось равномерно распределенным по толщине кристалла $E = V/L = \text{const}$. Освещение структуры со стороны различных электродов сопровождается протеканием сквоз-

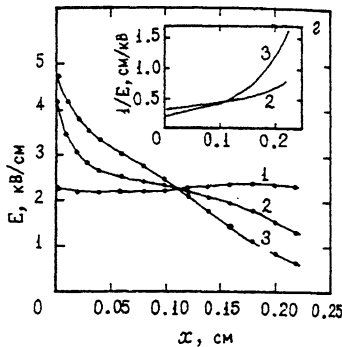
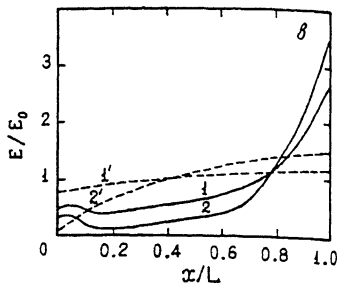
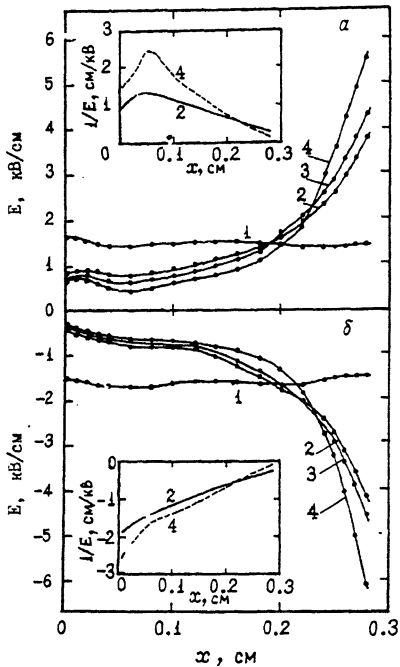


Рис. 1. Стационарные распределения напряженности электрического поля в структурах на полуизолирующем CdTe.

a и *b* — при освещении М(ТД)П(ТД)М структуры со стороны положительного (*a*) и отрицательного (*b*) электродов с интенсивностью I , мВт/см²: 1 — 0, 2 — 6, 3 — 15, 4 — 95. ($V = 400$ В).

a — при освещении со стороны положительного электрода М(ТД)П(ТД)М структуры (кривые 1, 2 — экспериментальный результат) и МПМ структуры (кривые 1', 2' — теоретический расчет) светом с интенсивностью I , мВт/см²: 1, 1' — 6; 2, 2' — 95. ($V = 300$ В).

z — в отсутствие освещения в М(ТД)П(ТД)М структуре при различной толщине ТД слоя, расположенного у электрода $x = 0$. Толщина слоя увеличивается от кривой 1 (слой естественного окисла) к 3. ($V = 500$ В). На вставке (*a*, *b*, *z*) приведены координатные зависимости функции $f = 1/E$.

ных фототоков и воспроизводимым изменением распределения электрического поля в кристалле.

На рис. 1, *a* представлены экспериментальные распределения электрического поля в М(ТД)П(ТД)М структуре и результаты выполненных в [1] теоретических расчетов профиля поля в МПМ структуре на кристалле с параметрами и геометрией, соответствующими экспериментальным образцам, и при напряжении и интенсивности освещения, совпадающих с условиями эксперимента. Из сравнения кривых следует, что в области кристалла, прилегающей к освещаемому электроду, напряженность электрического поля уменьшается значительно сильнее, чем следует из теоре-

тических расчетов; около же темнового электрода экспериментальные значения поля значительно превосходят расчетные и сильно меняются с координатой.

Эти расхождения связаны с неадекватностью модели МПМ структуры и реальной М(ТД)П(ТД)М структуры, в которой протекание сквозного туннельного фототока, согласно [6], сопровождается накоплением носителей в приэлектродных областях. Конфигурация образовавшегося у темнового электрода пространственного заряда свободных носителей определяет распределение электрического поля в исследуемой структуре.

Проводилось также сравнение характера полученных при освещении координатных зависимостей поля с теоретическими закономерностями распределения поля в МДП структуре с толстым слоем диэлектрика. Тот факт, что установившееся при освещении электрическое поле монотонно уменьшается от темнового электрода к освещаемому (рис. 1, а, б), свидетельствует о том, что во всем объеме кристалла концентрация фотоносителей (p, n) существенно превышает равновесную (p_0) в p -CdTe ($p, n \gg p_0$). Этот случай близок к рассмотренному [2] случаю обогащенного контактного слоя в МДПП структуре в отсутствие тока ($Uk \gg kT/e$, где Uk — контактная разность потенциалов), для которого получено выражение

$$[E(x)]^{-1} = \frac{e}{2kT}(a + x), \quad (1)$$

где $a = (\epsilon kT/2\pi n_k e^2)^{1/2}$; x — расстояние от границы диэлектрического слоя; n_k — концентрация носителей у контакта, не зависящая от концентрации носителей в объеме кристалла (n_0), ϵ — диэлектрическая проницаемость, e — заряд электрона.

На рис. 1, а (вставка) представлено экспериментально измеренное распределение электрического поля $E(x)$ в М(ТД)П(ТД)М структуре в виде $[E(x)]^{-1} = f(x)$. При малых интенсивностях освещения ($I = 6$ мВт/см²) эта зависимость линейна почти по всей толщине кристалла, а при большой интенсивности — лишь вблизи темнового электрода. Линейный участок может быть аппроксимирован по аналогии с (1) выражением:

$$[E(x)]^{-1} = \beta(I) \cdot [\alpha(I) + L - x], \quad (2)$$

где x — расстояние от освещаемого электрода; L — расстояние между электродами; $\beta(I)$, $\alpha(I)$ — коэффициенты, зависящие от интенсивности освещения

$$\beta(I) = \frac{d[E(x)]^{-1}}{dx} \Big|_{x=L}; \alpha(I) = [\beta(I) \cdot E(x)]^{-1} \Big|_{x=L}. \quad (3)$$

Как видно из рис. 1, а (вставка) с ростом интенсивности освещения коэффициент $\beta(I)$ и напряженность электрического поля около темного электрода ($x = L$) увеличиваются по абсолютной величине.

Различия между экспериментально наблюдаемым распределением электрического поля в исследуемой структуре и теоретическим соотношением (1), описывающим профиль поля в обогащенном контактном слое МДП структуры в отсутствие тока, связаны с абсолютным значением коэффициентов $\gamma(I)$ и $\beta(I)$.

Исследовалось темновое распределение поля в структуре с варьируемой толщиной туннельного диэлектрика, где один из электродов наносился на предварительно химически окисленную по методике [4] поверхность полупроводника. В этом случае поле неоднородно по толщине кристалла (рис. 1, в); наибольшая напряженность наблюдается у электрода с окисленной поверхностью, степень деформации распределения поля возрастает с увеличением толщины окисной пленки.

Аналогично профилю поля, установившемуся в симметричной М(ТД)П(ТД)М структуре при освещении, линейный участок зависимости $[E(x)]^{-1} = f(x)$ вблизи электрода на окисленной поверхности (рис. 1, в, вставка) может быть аппроксимирован выражением (2). Коэффициент β в этом выражении увеличивается по мере увеличения толщины ТД слоя и составляет: 1 — 0, 2 — $1.4 \cdot 10^{-3} \text{ В}^{-1}$, 3 — $1.8 \cdot 10^{-3} \text{ В}^{-1}$. Коэффициент α , соответственно: 1 — ∞ , 2 — $1.7 \cdot 10^{-1}$, 3 — $1.1 \cdot 10^{-1} \text{ см}$.

Таким образом, как при увеличении интенсивности освещения, так и с ростом толщины слоя диэлектрика коэффициенты α и β стремятся к их значениям в МДП структуре.

При освещении структуры с несимметричными ТД слоями со стороны любого электрода электрическое поле в кристалле тесно поджимается к контакту, расположенному на окисленной поверхности.

Измерения степени локальности эффекта показали, что во всех типах структур фотоиндуцированная перестройка поля происходит строго под освещаемым участком электрода. Пространственное разрешение составляет 3–5 лин/мм.

Рис. 2, а, б иллюстрирует динамику распределения электрического поля в симметричной М(ТД)П(ТД)М структуре при освещении продолжительного электрода прямоугольными световыми импульсами (длительность фронта $3 \cdot 10^{-7} \text{ с}$). Видно, что напряженность поля в каждой точке кристалла монотонно изменяется со временем. Процесс перестройки поля после включения (выключения) освещения

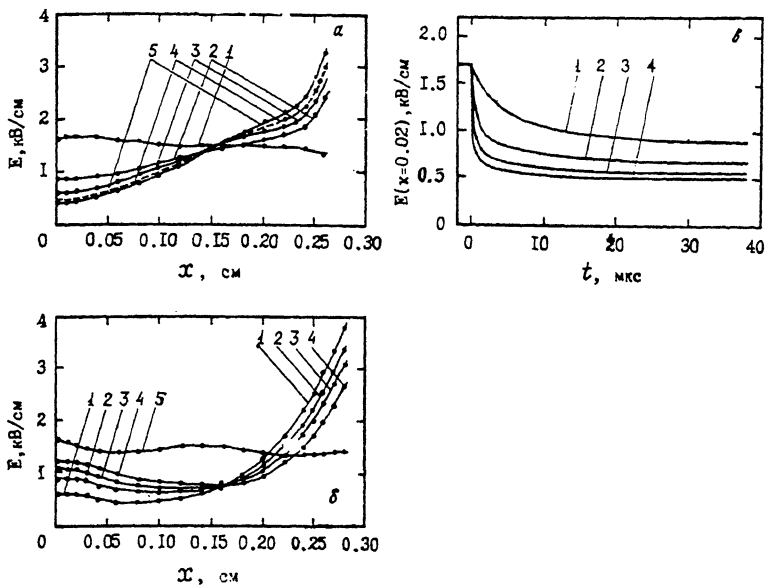


Рис. 2. Распределения напряженности электрического поля в М(ТД)П(ТД)М структурах при освещении со стороны положительного электрода $x = 0$ прямоугольным световым импульсом ($V = 400$ В):
 а — через время t после освещения образца ($L = 0.26$ см);
 t , мкс: 1 — 0 (темновое распределение поля), 2 — 2, 3 — 5, 4 — 10, 5 — 50;
 б — через время t после выключения освещения в образце ($L = 0.28$ см);
 t , мкс: 1 — 0, 2 — 5, 3 — 10, 4 — 20, 5 — 80 (совпадает с темновым распределением);
 в — напряженность поля в точке $x = 0.02$ см от освещаемого электрода как функция времени при различной интенсивности освещения I , мВт/см²: 1 — 5, 2 — 20, 3 — 50, 4 — 100.

завершается за $(2 - 3) \cdot 10^{-5}$ с. Осциллограмма изменения напряженности поля в одной из точек кристалла, приведенная на рис. 2, а, показывает, что время установления стационарного распределения поля уменьшается с увеличением интенсивности освещения.

Список литературы

[1] Кашерининов П.Г., Резников В.И., Царенков Г.В. // ФТП. 1992. Т. 26. В. 8. С. 1480-1492.
 [2] Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. М.: Наука, 1977. С. 220-222.
 [3] Матвеев О.А., Аркадьева Е.Н., Гончаров Л.А. // ДАН СССР. 1975. Т. 221. С. 321.

- [4] Hage-Ali M., Stuck R., Sharager C., Siffert P. // IEEE Trans. on Nuclear Science. 1979. V. NS-26. N 1. P. 281-283.
- [5] 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. № 1569. С.-Петербург, 1991. С. 52-59.
- [6] Гуткин А.А., Седов В.Е. // ФТП. 1976. Т. 10. В. 8. С. 1589-1591.

Физико-технический
институт им.А.Ф.Иоффе РАН
С.-Петербург

Поступило в Редакцию
3 августа 1993 г.

