ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ SnO2/pCdTe, ITO/pCdTe и In2O3/pCdTe НА ОСНОВЕ ТЕЛЛУРИДА КАДМИЯ

Утамурадова Шарифа Бекмурадовна*,
д.ф.-м.н. (DSc), профессор,
директор Научно-исследовательского института физики полупроводников
и микроэлектроники при Национальном университете Узбекистана,
Ташкент, Республика Узбекистан.
E-mail: sh-utamuradova@yandex.ru

Музафарова Султанпаша Анваровна,
к.ф.-м.н., начальник отдела
Научно-исследовательского института физики полупроводников
и микроэлектроники при Национальном университете Узбекистана,
Ташкент, Республика Узбекистан
E-mail: samusu@rambler.ru

Аннотация. Исследованы эксплуатационные параметры и коэффициент полезного действия фотопреобразователей SnO_2/pCdTe, ITO/pCdTe и In_2O_3/pCdTe. Определены реальные значения последовательного сопротивления исследуемых структур. В пленочных фотопреобразователях значительный вклад в последовательное сопротивление вносят сопротивление переходного диэлектрического слоя оксида теллура TeO_2 между полупроводником и сопротивление между тыловым омическим контактом структур.

Ключевые слова. Диэлектрический слой, последовательное сопротивление, выходные параметры.

фотопреобразователь, структура.

SERIAL RESISTANCE OF PHOTOCONVERTERS SnO_2/pCdTe, ITO/pCdTe и In_2O_3/pCdTe BASED ON CADMIUM TELLURIDE

Utamuradova Sharifa Bekmuradovna *, Doctor of Physical and Mathematical Sciences (DSc), Professor, Director of the Scientific Research Institute of Semiconductor Physics and Microelectronics at the National University of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan.

e-mail: sh-utamuradova@yandex.ru

Muzafarova Sultanpasha Anvarovna, Ph.D., Scientific Research Institute of Semiconductor Physics and Microelectronics at the National University of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan.

e-mail: samusu@rambler.ru

Annotation. The operational parameters and efficiency of the SnO2 / pCdTe, ITO / pCdTe and In2O3 / pCdTe photoconverters have been investigated. The real values of the series resistance of the structures under study have been determined. In film photoconverters, a significant contribution to the series resistance is made by the resistance of the transition dielectric layer of tellurium oxide TeO2 between the semiconductor and the resistance between the rear ohmic contact of the structures.

Keywords. Dielectric layer, series resistance, output parameters photoconverter, structure.

Введение. Эксплуатационные параметры и коэффициент полезного действия (КПД)

фотопреобразователей существенно зависят от последовательного сопротивления (R_n), которые в основном состоит из сопротивления растекания (R_s) и сопротивление базы ($R_б$). В пленочных фотопреобразователях значительный вклад в сопротивление R_n вносят сопротивление переходного диэлектрического (d) слоя между полупроводником и тыловым омическим контактом структуры.

Эффективные фотопреобразователи (ФП) структурой полупроводник-диэлектрик-полупроводник (ПДП) SnO_2/pCdTe, ITO/pCdTe и In_2O_3/pCdTe диэлектрическая прослойка (d) TeO_2 является прозрачной обычна для неосновных фотоносителей и поэтому ее сопротивление не влияет на значение $R_{n.}$ Однако, в большинстве реальных пленочных ФП толщина диэлектрической прослойки d может оказаться значительной и ее сопротивление может также быть существенным. Проанализируем основные компоненты последовательного сопротивления для каждой структуры SnO_2/pCdTe, ITO/pCdTe и In_2O_3/pCdTe в отдельности. КПД структур, а также коэффициент заполнения, фототок до толщины d ≈ 20 Å остаются постоянными, после чего их значения резко падают до нуля, а напряжение холостого хода линейно уменьшается от 0,65 до 0,60 В. Уменьшение эксплуатационных параметров структур с ростом толщины окисного слоя связано с увеличением последовательного сопротивления [4].

Эксперимент. Экспериментальные значения последовательного сопротивления найдено для этой структуры также по методу Хэнди. Для этого снимали нагрузочную характеристику трех значениях плотности света: 60 мВт/см^2 ; 180 мВт/см^2 ; и 280 мВт/см^2 ; затем на каждой кривой отмечалось точка, отличающаяся от тока короткого замыкания на 10 мА. Далее соединяя эти точки, по наклону прямой определяли величину $R_П$. таким путем определенная величина последовательного сопротивления $R_П$ = 1,86 Ом. Отметим, что экспериментальное значение последовательного структура для ITO/pCdTe также относительно мало. Это объясняется прежде всего теми факторами, которые перечислялись выше, а именно, незначительным значением сопротивления растекания R_S и диэлектрической прослойки (TeO_2), а также сравнительно малым значением сопротивления базы pCdTe (ρ = 10^2 Ом. см).

ФП со структурой SnO_2/pCdTe. Сначала рассмотрим сопротивление растекания, аналитическое выражение которого имеет следующий вид [1,765-775]

$$R_S = \frac{R_S}{1+\frac{R_c}{R_P}} \qquad (1)$$

Где

$$Rc = \left\{1 + \frac{R_1}{R_3 + \frac{1}{3}(R_3 + R_5)} + \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3}\right\} x \frac{(R_2 + R_4)}{2 + \frac{R_1 + R_2 + R_4}{R_3 + \frac{1}{2}(R_2 + R_5)}}$$

$$R_P = \frac{2\mathrm{Re}(R_C + R_1)}{(n-1)(2\mathrm{Re} + R_1)}, R_4 = \frac{\rho_S r_S}{Sd}$$

$$R_5 = R_4 \frac{r_S}{2W - r_S}$$

ρ_x – удельное сопротивление верхнего широкозонного сильнолегированного окисного слоя;S — расстояние между полосками контактной сетки;W — длина полоски контактной сетки;r_s — расстояние от контактной полоски до той точки, в которой потенциалы, созданные носителями, протекающими в направлении контактной полоски и полоски контактной сетки, равна;n — число полосок контактной сетки;R_1, R_3 — сопротивление контактной полоски и полоски контактной сетки соответственно;R_2 — сопротивление между контактной полоской и сильнолегированными окисным слоем; d — толщина окисного слоя TeO_2. Важным параметром для вычисления сопротивления растекания является r_s . значение r_s с другими геометрическими параметрами верхнего сильнолегированного окисного слоя S и W находится весьма сложном аналитическом соотношении [1,765-775]].

$$\left(\frac{2r_S}{S}\right)^2 = \frac{2W}{r_S} - 1 - 2(-W/rs - 1)^2 \ln\left[W/W - r_S\right]$$

$$\mathrm{f(k)} = \left(\frac{2r_S}{S}\right)^2$$

и

$$\mathrm{f(z)} = \frac{2W}{r_S} - 1 - 2\left(\frac{W}{r_S} - 1\right)^2 x \ln\left[\frac{W}{W - r_S}\right]$$

Значение этих сопротивление вычислялись при помощи выражений (2) и (3), которые = 18,37 Ом и 5,13 Ом. Соответственно при $r \cong 2 \cdot 10^{-3}$ Ом.см сильнолегированного окисного слоя SnO_2. Далее были измерены сопротивления растекания. Таким образом, окончательная оценка, проведенная по (6) дает $n_s \cong 2{,}05$ Ом. Как указывалось выше, другим важным компонентом последовательного сопротивления является сопротивление базы, особенно когда исходный

полупроводниковый материал высокоомный. Во всех исследуемых структурах базовым материалом служит pCdTe.

Пленки теллурида кадмия с высокой длиной диффузией неосновных носителей $L_n \cong 10_{,}15$мкм [3] имеют $r \cong 10^2{}_{,}10^3$ Ом.см. Поэтому вклад сопротивления базового полупроводникового материала в R_n может оказаться значительным. Например, сопротивление слоев теллурида кадмия P — типа $R_6 \cong 1{,}59$ Ом при значениях $r_{CdTe} \cong 5 \cdot 10^2$ Ом. см и $l \cong 50$ мкм.

Обычно полное последовательное сопротивление ФП вкладывается из:

$$R_n = R_s + R_6 + R_1 + R_6 + R_7, \qquad (7)$$

где R_6 — сопротивление между базой и тыловым контактом:

R_7 — сопротивление тылового контакта.

При помощи измерения установлено, что сопротивления R_6 и R_7 равна $R_6 \cong 0{,}8$ Ом и $R_7 \cong 0{,}09$ Ом соответственно.

Итак, расчет по (7) дает для $R_n \cong 4{,}53$ Ом. Далее следует определить оптимальные размеры контактной сетки и расстояние между ними. Это необходимо для того, чтобы получить максимальную мощность с единицы поверхности фотоэлемента [2,1356-1359]:

$$P_{yg} = \frac{JU}{S}$$

$$U = \frac{AkT}{q} \ln\left[\frac{J_t (S - S_K)}{i_S S}\right] - R_p I$$

S_k — площадь контактов.

$$\frac{I}{J_\phi} = \frac{I}{J_S (S - S_K)} = m \qquad (10)$$

то выражение для мощности с учетом (10) можно записать в виде

$$P_{yg} = i_{\Phi m}\left(1 - \frac{S_K}{S}\right)\left\{\frac{AkT}{q} \ln\left[\frac{i_{cp}(1-m)\left(1 - \frac{S_K}{S}\right)}{i_S}\right] + 1\right\} - R_{pm} i_\phi \left(1 - \frac{S_K}{S}\right)$$

Надо найти при таких размерах, контактной секи и при каком значении m удельная мощность фотоэлемента максимальна. Для этого дифференцируем выражения (11) по m и приравниваем производную нулю. При этом получаем оптимальную величину m. Если пренебречь членом S_k/S по сравнению с единицей и падением напряжения на сильнолегированном поверхностном окисном

слое (SnO_2), то получим следующее аналитическое выражение:

$$f(m) = \frac{m}{f-m} - \ln(1-m) = \ln\frac{i_\phi}{i_S} \quad ($$

Построив график функции f(m) от «m » можно найти оптимальную величину «m », которая соответствует ожидаемому значению lg • $i_Ф$/ i_S. Например, из эксперимента взятым значением $I_Ф$ = 12 мА/см^2 и i_S = 8 • 10^{-8} А/см^2 получаем m = 0,908. Далее предполагая, что площадь полоски контактной сетки мала по сравнению с общей площадью элемента, получаем выражение для расстояния между этими

$$l_1 = \sqrt[3]{t\frac{AkT}{q}}\ln\left[\frac{i_{cp}(1-m)}{i_S} + 1\Big/\frac{2}{3}\frac{P}{d}m^2 i_{cp}\right]$$

Откуда следует; чтобы снять максимальную мощность с единицы площади у фотопреоброзователей со структурой около 15 % ее поверхности должны быть покрыты токосъемными контактами.

Экспериментальные значения последовательного сопротивления определялись по методу Хэнди

[1,765-775].

Для этого изменялась нагрузочная характеристика (Рис.1.) при различных интенсивностях света. Затем на каждой кривой отмечалась точка, отличающаяся на ΔJ от тока короткого замыкания (а нашем случае ΔJ = 4 мА). Отмеченные точки соединялись прямой линией. Если это прямая линия не параллельно оси токов, то изменение напряжения пропорционально значению R_n .

При этом основным требованием является то, что значение последовательного сопротивления не моделируется

$$l_1 = \sqrt[3]{t\frac{AkT}{q}}\ln\left[\frac{i_{cp}(1-m)}{i_S} + 1\Big/\frac{2}{3}\frac{P}{d}m^2 i_{cp}\right]$$

Проведенная оценка дает для l_1 = 3,74.10^{-10} см с изменением интенсивности света. Таким образом, определенное значение сопротивления R_n = 6,8 Ом и почти на 2 Ом больше, чем от его расчетного значения. В расчете не учитывалось сопротивление диэлектрической прослойки между слоем SnO_2 и pCdTe.

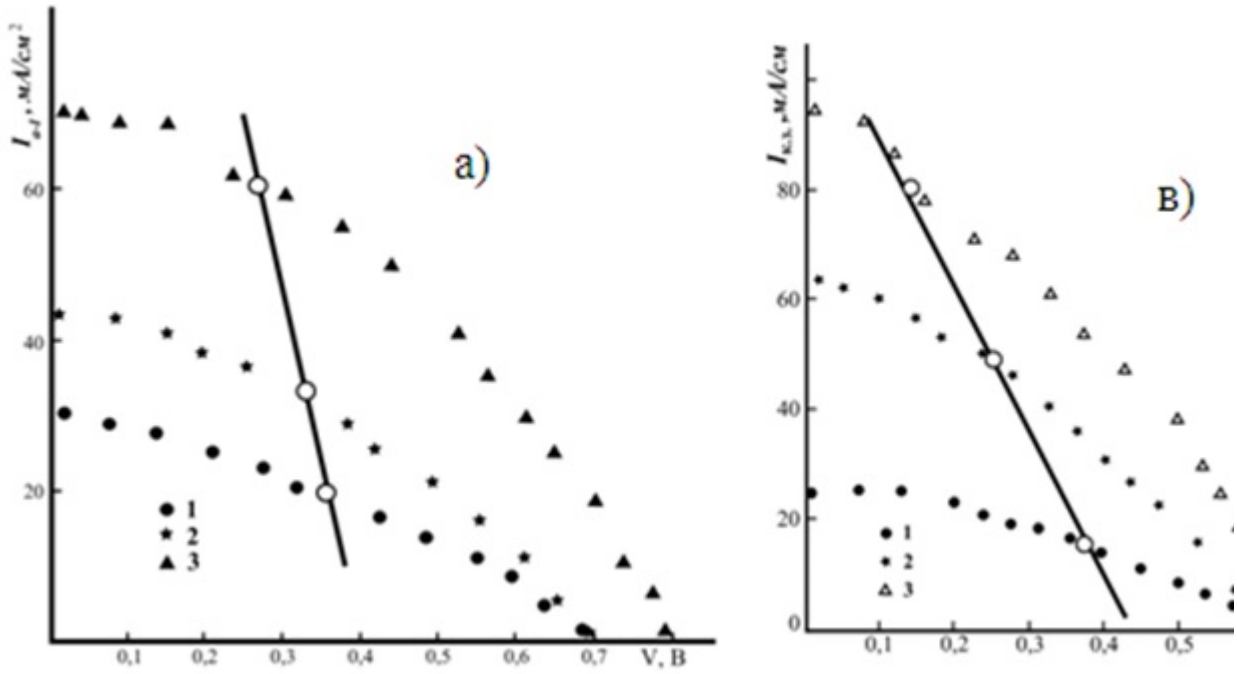


Рис. 1. Нагрузочная световая характеристика при различных уровнях освещенности. Плотность света:

1- 60 мВт/см^2 ;

2-180 мВт/см^2; и

3-280 мВт/см^2.

а)- структура SnO_2/pCdTe; в)- структура ITO/pCdTe.

При этом предполагалось, что она тонка, прозрачна для неосновных фотоносителей, а также создает дополнительный потенциальный барьер для основных носителей тока.

Однако, фоточувствительная структура SnO_2/pCdTe формируется довольна при высоких температурах 350 ÷400^0 С, следовательно диэлектрическая прослойка TeO_2 [5,211;6,С73-78] образуется со значительной толщиной. Со этом свидетельствует вольтемкостные измерения (d = 1000 Å), а также малое значение плотности короткого замыкания в этих структурах. Поэтому разницу между $R_{пэксп}$ и $R_{пвыч}$, по-видимому, можно объяснить не учетом сопротивления диэлектрической прослойки при расчете последовательного сопротивления для этой структуры.

Из анализа нагрузочной характеристики, снятой при плотностях интегрального света 60÷280 мВт/см^2 следует, что в ФП со структурой SnO_2/pCdTe коэффициент заполнения имеет низкое значения θ = 0,35 ÷ 0,4. Такое низкое значение θ в свою очередь, убедительно показывает, что θ в таких ФП, весьма значительно. Чтобы понизить значения последовательного сопротивления надо оптимизировать параметры ФП. Для этого первую очередь, надо понизить сопротивления базового полупроводникового материала (pCdTe) и уменьшить толщину диэлектрической прослойки до такой толщины, при который она станет прозрачной для неосновных носителей тока.

ФП со структурой ITO/pCdTe. Фоточувствительная структура ITO/pCdTe была получена магнетронным распылением сильнорегированной окиси ITO[4]. Проведенный расчет для сопротивления растекания сильнолегированного окисного слоя ITO дал незначительную величину (~ 0,90 Ом), а полное последовательное сопротивления для этой структуры оказалось всего R_n = 1,76 Ом. Отметим, что при расчете R_n были использованы следующие значения параметров:

R_S = 0, 102 см; W = 0,5; S = 0,17 см; $\rho_{JTO} = 2{,}6.10^{-4}$ Ом см;

R_I = 0,003 Ом; R_2 = 0,007 Ом; R_3 = 0,6 Ом; R_5 = 1 Ом; R_6 = 0,6 Ом ; R_7 = 0,07 Ом;

Эти величины были определены таким же образом, как и для ФП со структурой SnO_2/pCdTe. Экспериментальные значения последовательного сопротивления найдено для этой структуры также по методу Хэнди [1,765-775].

Для этого снимали нагрузочную характеристику трех значениях плотности света: 60 мВт/см^2 ; 180 мВт/см^2 ; и 280 мВт/см^2 ; затем на каждой кривой отмечалось точка, отличающаяся от тока короткого замыкания на 10 мА. Далее соединяя эти точки, по наклону прямой определяли величину $R_П$. таким путем определенная величина последовательного сопротивления $R_П$ = 1,86 Ом. Отметим, что экспериментальное значение последовательного структура для ITO/pCdTe также относительно мало. Это объясняется прежде всего теми факторами, которые перечислялись выше, а именно, незначительным значением сопротивления растекания R_S и диэлектрической прослойки (TeO_2), а также сравнительно малым значением сопротивления базы pCdTe ($\rho = 10^2$ Ом. см). Для фотопреобразователей со структурой ITO/pCdTe вычисленное экспериментальное значения коэффициента заполнения составляет Q = 0,4. Этот экспериментальный факт свидетельствует еще значительном последовательном сопротивлении в фоточувствительных структурах ITO/pCdTe, на котором падает существенная доля генерированного фотонапряжения.

ФП со структурой In_2O_3/pCdTe. Геометрические размеры полоски контактной сетки контактной полоски такие же, как у ФП со структурой ITO/pCdTe. Окисное слои Jn_2O_3 были однородными и имели $\rho = 5{,}4.10^{-4}$ Ом. см. Расчетное значения последовательного сопротивления для этой структурой оказалось = 3,26 Ом. Результаты проведенных измерений показывают, что значения сопротивлений, из которых складываются последовательное сопротивление почти такие же, как у ФП со структурой ITO/pCdTe, кроме сопротивления базового проводника. Значения последовательного сопротивления для этой структуры порядка = 2 Ом. Также следует отметить повышенное значение сопротивления (~ 0,85 Ом) переходного слоя между пленкой pCdTe и тыловым контактом — Mo. Что касается экспериментального значения последовательного сопротивления, то она оказалось $R_{пэксп}$ = 3,75 Ом по методу Хэнди .

В этой фоточувствительной структуры максимальный к. п. д. также не достигнут из-за значительного последовательного сопротивления. Действительно, глубина собственного поглощения света в теллуриде кадмия $d \sim \left(\frac{1}{\alpha}\right)$ порядка 10 мкм. Следовательно, имеется возможность уменьшить толщину пленки теллурида кадмия ρ — типа до 10 ÷ 15 мкм, но при этом необходимо сохранять прежние ее электрофизические свойства и получить тыльный омический контакт с низким сопротивлением. Разница в значениях $R_{пвыч}$ и $R_{пэксп}$ объясняется, прежде всего, изменением сопротивления базы процессе изготовления структур.

С целью получения максимальной мощности с единицы поверхности также были рассчитаны размеры контактной площади в последних двух структурах, при заданных их электрофизических, геометрических параметрах. В этом случае расчет контактной площади сводится к определению расстояния между полосками контактной сетки, так как толщина контактной сетки по сравнению с их длиною незначительна.

Таким путем рассчитанное [7] значение расстояния между полосками контактной сетки $l_i = 4{,}5.10^{-1}$ см для ФП со структурой JTO/pCdTe и $l_i = 3{,}75.10^{-1}$ см для ФП со структурой Jn_2O_3/pCdTe

несомненно. Далее вычисляем эффективную площадь полосок контактных сеток. Добавляя Ш образное площадь собирающий контактной полосы, находим общую поверхности токосъемных контактов.

Резюме. Рассчитаны значения фототока, напряжения холостого хода и предельного к. п. д. фоточувствительных структур SnO_2/pCdTe, ITO/pCdTe и In_2O_3/pCdTe. Максимальная удельная мощность получается у ФП со структурами ITO/pCdTe и In_2O_3/pCdTe в том случае, когда токосъемными контактами покрыта 10 ÷15% поверхность.

Проведенные расчеты для этих структур составляют: к.п.д 21,6 % для структур ITO/pCdTe и In_2O_3/pCdTe, 19 % для структур SnO_2/pCdTe. Изготовлены ФП с η = 5 — 6 % ITO/pCdTe и In_2O_3/pCdTe, с с η = 3 — 5 % SnO_2/pCdTe. Определены теоретические и экспериментальные значения последовательного сопротивления фоточувствительных структур SnO_2/pCdTe, ITO/pCdTe и In_2O_3/pCdTe а также их оптимальные размеры. Показано, что последовательное сопротивление в основном определяется сопротивлениями толщины базы, тылового контакта Mo — pCdTe, а также сопротивлением диэлектрической прослойки TeO_2

Литература

1. Xandy R.T. «Theoretical analysis of the series resistance of a solar cell» sol st. electron N 8, pp 765-775, 1967

2. Бардина Н.М, Зайцева А.К. Выбор оптимальных размеров и нагрузки кремниевого фотоэлемента при различных вариантах токоотводов Радиотехника и электроника, 1965г. т.10 в.7 стр. 1356-1359.

3. Labrets J. , Domincuez E., Lora Yamayo E., Arjona F. Thin oxide silicon dioxide — silicon MIS solar cells. Photovoltaic solar energy conf. proc. 3 rd inst. Conf. Cannes 1980.

4. Музафарова С.А.Исследование фоточувствительных ПДП структур на основе теллурида кадмия. Кандидатская диссертация **1983**.Ташкент.

5. Алиев А.А., Мирсагатов Ш.А., Музафарова С.А., Абдувайитов А.А. Исследование примесного состава и химического состояния синтезированных пленок теллурида кадмия на молибденовых подложках из паровой фазы методом ЭОС.// Сб.труд. Фундаментальные и прикладные вопросы физики, Ташкент, 2004.-С.211.

6. Кутиний Д.В., Кутиний В.Е., Рыбка А.В., Шляхов И.Н., Захарченко А.А., Кутиний К.В., Веревкин А.А. Моделирование вольтамперных характеристик детекторов рентгеновского и гамма-излучения на основе структур Me — CdZnTe — Me. // Вестник Харьковского университета, **2007,** № 777, вып.2(34). — С73-78.

7. Васильев А.М. Ландсман А.П. Полупроводниковые фотопреобразователи М, Сов. радио 1970 Ш.Б.Утамурадова, С.А.Музафарова. Влияние дозы g — облучения на механизм переноса тока фотоприемников с пдп структурой pCdTe-TeO_2-n SnO_2. Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering 2019,том.1,.выпуск.6с.71-76.