
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 SnO₂/pCdTe, ITO/pCdTe и In₂O₃/pCdTe. Определены реальные значения последовательного сопротивления исследуемых структур. В пленочных фотопреобразователях значительный вклад в последовательное сопротивление вносят сопротивление переходного диэлектрического слоя оксида теллура TeO₂ между полупроводником и сопротивление между тыловым омическим контактом структур.

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

фотопреобразователь, структура.

SERIAL RESISTANCE OF PHOTOCONVERTERS SnO₂/pCdTe, ITO/pCdTe и In₂O₃/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_b). 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) $\text{SnO}_2/p\text{CdTe}$, $\text{ITO}/p\text{CdTe}$ и $\text{In}_2\text{O}_3/p\text{CdTe}$ диэлектрическая прослойка (d) TeO_2 является прозрачной обычно 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 $\text{SnO}_2/p\text{CdTe}$, $\text{ITO}/p\text{CdTe}$ и $\text{In}_2\text{O}_3/p\text{CdTe}$ в отдельности. КПД структур, а также коэффициент заполнения, фототок до толщины $d \approx 20 \text{ \AA}$ 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_n . Таким путем определенная величина последовательного сопротивления $R_n = 1,86 \text{ Ом}$. Отметим, что экспериментальное значение последовательного сопротивления для $\text{ITO}/p\text{CdTe}$ 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 $p\text{CdTe}$ ($\rho = 10^2 \text{ Ом. см}$).

ФП со структурой $\text{SnO}_2/p\text{CdTe}$. Сначала рассмотрим сопротивление растекания, аналитическое выражение которого имеет следующий вид [1,765-775]

$$R_s = \frac{R_s}{1 + \frac{R_c}{R_p}} \tag{1}$$

Где

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

$$R_p = \frac{2 \operatorname{Re}(R_c + R_1)}{(n-1)(2 \operatorname{Re} + R_1)}, R_4 = \frac{\rho_s r_s}{Sd}$$

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

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 сильнолегированным 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]].

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

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

и

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

Значение этих сопротивление вычислялись при помощи выражений (2) и (3), которые = 18,37 Ом и 5,13 Ом. Соответственно при $r_s \approx 2 \cdot 10^{-3}$ Ом.см сильнолегированного окисного слоя SnO_2 . Далее были измерены сопротивления растекания. Таким образом, окончательная оценка, проведенная по (6) дает $\rho_s \approx 2,05$ 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 $L_n \approx 10,15 \mu\text{м}$ [3] имеют $r \approx 10^2, 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Поэтому вклад сопротивления базового полупроводникового материала в R_n может оказаться значительным. Например, сопротивление слоев теллурида кадмия R — типа $R_6 \approx 1,59 \text{ Ом}$ при значениях $r_{\text{CdTe}} \approx 5 \cdot 10^2 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ и $l \approx 50 \text{ мкм}$.

Обычно полное последовательное сопротивление ФП вкладывается из:

$$R_n = R_s + R_6 + R_1 + R_6 + R_7, \tag{7}$$

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 $R_6 \approx 0,8 \text{ Ом}$ и $R_7 \approx 0,09 \text{ Ом}$ соответственно.

Итак, расчет по (7) дает для $R_n \approx 4,53 \text{ Ом}$. 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]:

$$P_{y\bar{z}} = \frac{JU}{S}$$

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

S_K — площадь контактов.

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

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

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

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 $\lg \cdot i_\phi / i_s$. Например, из эксперимента взятым значением $I_\phi = 12 \text{ mA/cm}^2$ и $i_s = 8 \cdot 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ получаем $m = 0,908$. Далее предполагая, что площадь полоски контактной сетки мала по сравнению с общей площадью элемента, получаем выражение для расстояния между этими

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

Откуда следует; чтобы снять максимальную мощность с единицы площади у фотопреобразователей 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 $\Delta J = 4 \text{ mA}$). 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

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

Проведенная оценка дает для $l_1 = 3,74 \cdot 10^{-10} \text{ см}$ с изменением интенсивности света. Таким образом, определенное значение сопротивления $R_n = 6,8 \text{ Ом}$ и почти на 2 Ом больше, чем от его расчетного значения. В расчете не учитывалось сопротивление диэлектрической прослойки между слоем SnO_2 и pCdTe .

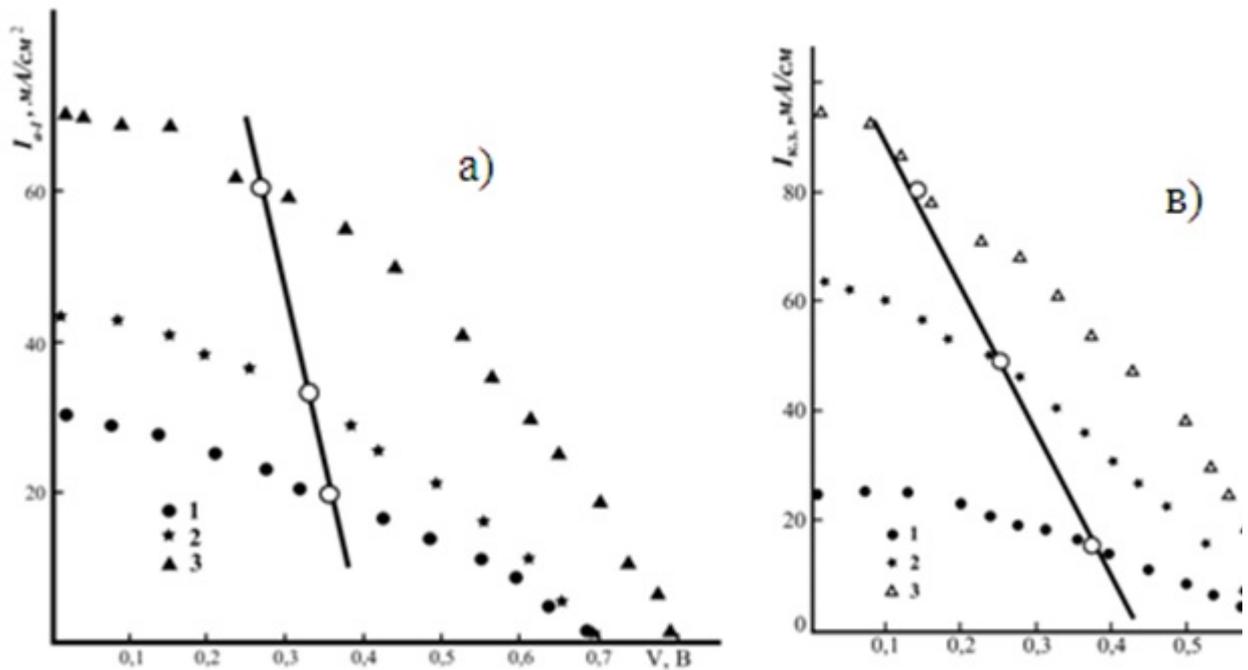


Рис. 1. Нагрузочная световая характеристика при различных уровнях освещенности. Плотность света:

1- 60 мВт/см² ;

2-180 мВт/см²; и

3-280 мВт/см².

а)- структура SnO₂/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 SnO₂/pCdTe формируется довольно при высоких температурах 350 ÷ 400⁰ С, следовательно диэлектрическая прослойка TeO₂ [5,211;6,С73-78] образуется со значительной толщиной. Со этом свидетельствует вольтежностные измерения ($d = 1000 \text{ \AA}$), а также малое значение плотности короткого замыкания в этих структурах. Поэтому разницу между $R_{\text{пзкср}}$ и $R_{\text{пвыч}}$, 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/см² следует, что в ФП со структурой SnO₂/pCdTe коэффициент заполнения имеет низкое значения $\theta = 0,35 \div 0,4$. 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 которой она станет прозрачной для неосновных носителей тока.

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

$R_S = 0,102 \text{ см}; W = 0,5; S = 0,17 \text{ см}; \rho_{\text{ITO}} = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ Ом см};$

$R_1 = 0,003 \text{ Ом}; R_2 = 0,007 \text{ Ом}; R_3 = 0,6 \text{ Ом}; R_5 = 1 \text{ Ом}; R_6 = 0,6 \text{ Ом}; R_7 = 0,07 \text{ Ом};$

Эти величины были определены таким же образом, как и для ФП со структурой SnO₂/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/см²; 180 мВт/см²; и 280 мВт/см²; 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 (TeO₂), а также сравнительно малым значением сопротивления базы pCdTe ($\rho = 10^2 \text{ Ом. см}$). 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 In₂O₃/pCdTe. Геометрические размеры полоски контактной сетки контактной полоски такие же, как у ФП со структурой ITO/pCdTe. Окисное слою In₂O₃ были однородными и имели $\rho = 5,4 \cdot 10^{-4} \text{ Ом. см}$. Расчетное значения последовательного сопротивления для этой структурой оказалось = 3,26 Ом. Результаты проведенных измерений показывают, что значения сопротивлений, из которых складывается 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

$$d \sim \left(\frac{1}{\alpha} \right)$$

поглощения света в теллуриде кадмия 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 длиной незначительна.

Таким путем рассчитанное [7] значение расстояния между полосками контактной сетки $l_j = 4,5 \cdot 10^{-1} \text{ см}$ для ФП со структурой ITO/pCdTe и $l_j = 3,75 \cdot 10^{-1} \text{ см}$ для ФП со структурой In₂O₃/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 $\text{SnO}_2/\text{pCdTe}$, ITO/pCdTe и $\text{In}_2\text{O}_3/\text{pCdTe}$. Максимальная удельная мощность получается у ФП со структурами ITO/pCdTe и $\text{In}_2\text{O}_3/\text{pCdTe}$ 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 $\text{In}_2\text{O}_3/\text{pCdTe}$, 19 % для структур $\text{SnO}_2/\text{pCdTe}$. Изготовлены ФП с $\eta = 5 — 6$ % ITO/pCdTe и $\text{In}_2\text{O}_3/\text{pCdTe}$, с $\eta = 3 — 5$ % $\text{SnO}_2/\text{pCdTe}$. Определены теоретические и экспериментальные значения последовательного сопротивления фоточувствительных структур $\text{SnO}_2/\text{pCdTe}$, ITO/pCdTe и $\text{In}_2\text{O}_3/\text{pCdTe}$ а также их оптимальные размеры. Показано, что последовательное сопротивление в основном определяется сопротивлениями толщины базы, тылового контакта $\text{Mo} — \text{pCdTe}$, 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., Вережкин А.А. Моделирование вольтамперных характеристик детекторов рентгеновского и гамма-излучения на основе структур $\text{Me} — \text{CdZnTe} — \text{Me}$. // 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 $\text{pCdTe}-\text{TeO}_2-n \text{SnO}_2$. Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering 2019, том.1, .выпуск.6с.71-76.