

## ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА В ИСКУССТВЕННО АНИЗОТРОПНОЙ (ПО ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ) ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ПЛАСТИНЕ С КОЛЬЦЕВЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

Гузь В. Н., Жадько И. П., Козловский С. И., Романов В. А.

Теоретически и экспериментально исследуется перераспределение электрического потенциала в монокристаллической исходно изотропной по электропроводности полупроводниковой пластине с кольцевыми электродами. Перераспределение является следствием наведенной деформацией анизотропии электропроводности.

Экспериментальные исследования, проведенные на кремниевых структурах, находятся в соответствии с расчетом.

1. В связи с проблемой создания новых типов датчиков механических величин представляет интерес исследовать перераспределение электрического потенциала в  $xу$ -плоскости исходно изотропной полупроводниковой пластины при ее одноосной упругой деформации, приводящей к анизотропии электропроводности, в случае кольцевых токовых контактов радиусами  $R_1$  и  $R_2$  соответственно (рис. 1). При приложении электрического напряжения к кольцевым омическим контактам распределение потенциала  $\varphi$  в тонкой пластине ( $R_2 - R_1 \gg d$ , где  $d$  — толщина пластины) описывается уравнениями

$$\operatorname{div} \mathbf{I} = 0, \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = 0, \quad (2)$$

$$\mathbf{E} = -\operatorname{grad} \varphi, \quad (3)$$

$$\mathbf{I} = \hat{\epsilon} \mathbf{E}, \quad (4)$$

$$\sigma_{xx} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \sigma_{yy} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0 \quad (5)$$

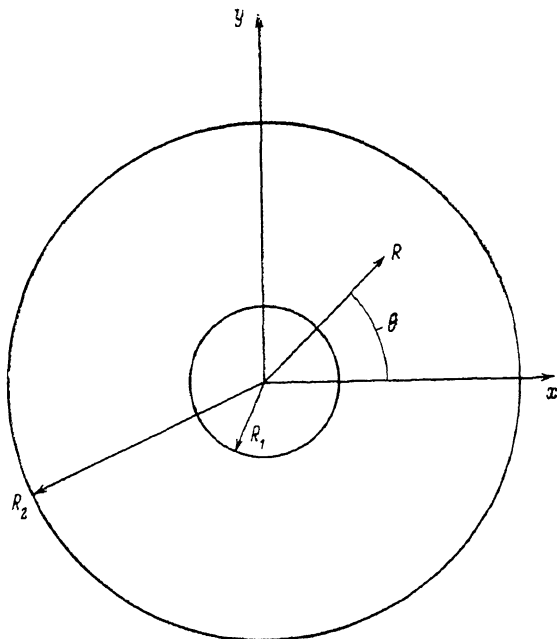


Рис. 1.

с граничными условиями

$$\varphi(x, y) = \varphi_1 \text{ при } x^2 + y^2 = R_1^2, \quad (6)$$

$$\varphi(x, y) = \varphi_2 \text{ при } x^2 + y^2 = R_2^2. \quad (7)$$

Здесь  $\mathbf{I}$  — вектор плотности тока,  $\mathbf{E}$  — вектор напряженности электрического поля,  $\hat{\epsilon}$  — тензор электропроводности, главные направления которого совпадают с осями координат. Если анизотропия электропроводности мала ( $|\epsilon| \ll 1$ ,

$\epsilon = \sigma_{xx}/\sigma_{yy} - 1$ ), что имеет место в большинстве практически важных случаев, то решение задачи (5)–(7) имеет вид

$$\varphi = \ln^{-1} z_0 \left\{ \varphi_1 \ln z + \varphi_2 \ln (z_0/z) + (\varphi_1 - \varphi_2) \frac{\epsilon \cos 2\theta}{4} \left[ 1 - \frac{z^4 + z_0^2}{z^2(z_0^2 + 1)} \right] \right\}, \quad (8)$$

где  $z_0 = R_1/R_2$ ,  $z = |R|/R_2 \leq 1$ ,  $\theta$  — угол между осью  $Ox$  и радиусом-вектором  $R$  точки, в которой определяется потенциал электрического поля.

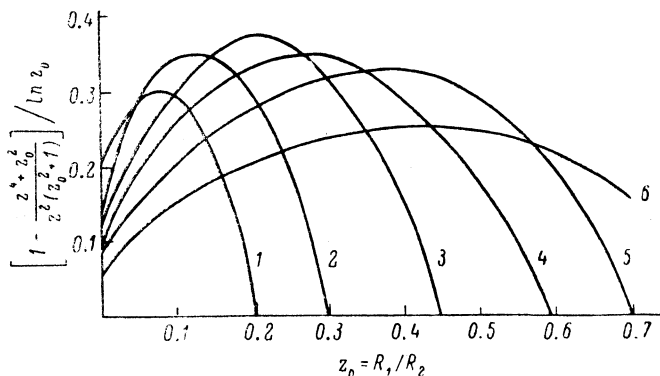


Рис. 2.

$z = |R|/R_2$ : 1 — 0.2, 2 — 0.3, 3 — 0.45, 4 — 0.6, 5 — 0.7, 6 — 0.8.

Проанализируем выражение (8). Если проводимость пластины изотропна (в отсутствие одноосного механического напряжения  $\sigma_{xx} = \sigma_{yy}$ ,  $\epsilon = 0$ ), то эквипотенциальные линии представляют собой концентрические окружности с логарифмической зависимостью величины потенциала от модуля радиуса вектора.

В анизотропном случае (при наличии деформации) линии равного потенциала будут иметь вид эллипсов, вытянутых в направлении максимального значения электропроводности.

Таким образом, в изотропном случае разность потенциалов между точками, размещенными на заданной концентрической окружности, будет отсутствовать, а при механической деформации пластины между этими точ-

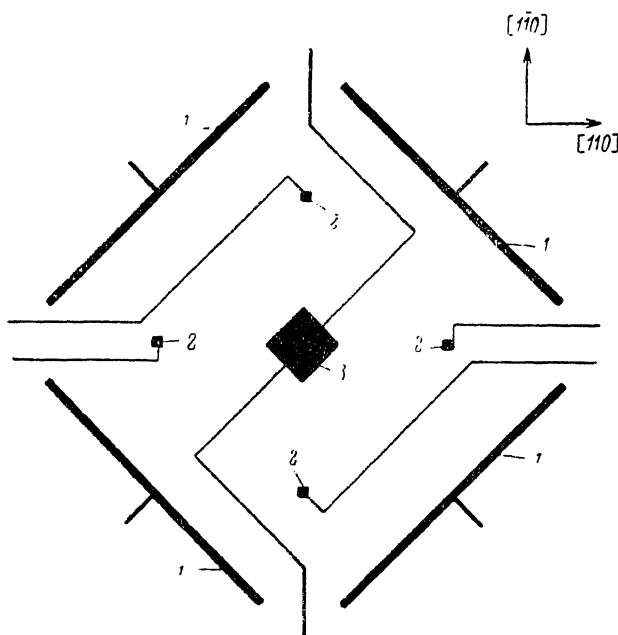


Рис. 3. Топология чувствительного элемента и его кристаллографическая ориентация.

ками появится разность потенциалов, величина которой, согласно (8), будет зависеть от ряда параметров.

В частности, при прочих равных условиях максимальная разность потенциалов будет возникать между теми исходно эквипотенциальными точками, которые лежат на координатных осях, т. е. в направлении главных компонент тензора электропроводности ( $\cos 2\theta = \pm 1$ ).

Определим значения  $R_1$  и  $R_2$ , а также положения точек на плоскости кольца, ограниченного контактами, для случая, когда разность потенциалов  $\Delta\varphi$  между

точками будет максимальна при заданной величине  $\epsilon$ . Для этого необходимо определить величины  $z$  и  $z_0$ , при которых алгебраическое выражение в последнем слагаемом формулы (8) достигает своего максимального значения. На рис. 2 изображена зависимость этого выражения от величин  $z$  и  $z_0$ . Как видно из рисунка, максимальное значение, равное 0.38, достигается при  $z_0 = R_1/R_2 = 0.2$  и  $z = |R|/R_1 = 0.5$ . В этих условиях значение разности потенциалов между любыми двумя точками, лежащими на пересечении осей  $Ox$  и  $Oy$  с окружностью оптимального радиуса, будет, согласно (8), определяться выражением

$$\delta\varphi_{\max} = 0.19 (\varphi_1 - \varphi_2) \epsilon. \quad (9)$$

2. Для экспериментальной проверки приведенных выше расчетов методами интегральной технологии были изготовлены датчики давления на основе стан-

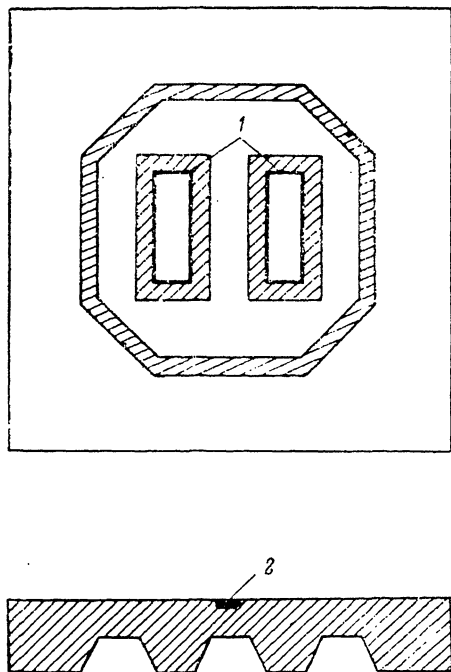


Рис. 4. Конструкция полупроводниковой мембраны.

1 — островки, 2 — положение чувствительного элемента.

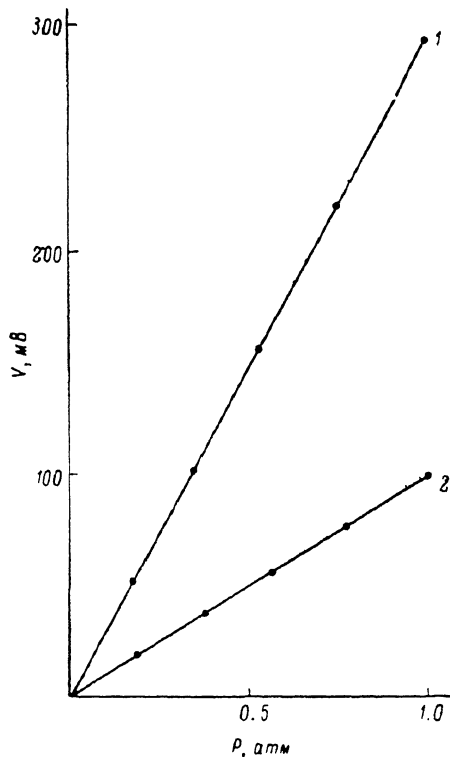


Рис. 5. Нагрузочные характеристики датчиков давления с чувствительными элементами двух топологий.

1 — тензорезистивный элемент, 2 — пьезодевой чувствительный элемент.

дартной пластины  $n$ -кремния. Чувствительный элемент был сформирован на поверхностном  $p$ -слое (диффузия бора, толщина  $\sim 3$  мкм,  $\rho_s = 250$  Ом/□). Конструкция элемента и его кристаллографическая ориентация схематически показаны на рис. 3. Четыре омических контакта (1) алюминиевой разводкой электрически соединены между собой и образуют внешний токовый электрод в виде квадрата. Внутри ограниченной им области находится четыре исходно эквипотенциальных зондовых электрода (2) и внутренний токовый электрод (3). Омические контакты 1—3 образованы имплантацией бора с  $\rho_s = 60$  Ом/□. Хотя использованная форма токовых контактов отличается от кольцевой, однако, как показывает анализ, и в этом случае оптимальная разность потенциалов, возникающая при деформации, также определяется формулой (9), если положения зондовых электродов выбраны в соответствии с результатами вышеприведенного расчета (при этом следует положить  $R_{1,2} \approx 0.6 l_{1,2}$ , где  $l_{1,2}$  — длина стороны квадрата внутреннего и соответственно внешнего токовых контактов).

Чувствительный элемент размещался в центре профилированной с двумя жесткими островками мембраны типа описанной в [1] (рис. 4), которая трансформировала равномерно распределенную по поверхности мембраны нагрузку в одноосную деформацию ее центральной части. В отличие от [1] два одинаковых островка располагались симметрично относительно центра мембраны.

Для приведенной на рис. 3 кристаллографической ориентации чувствительного элемента, подвергнутого одноосной деформации в направлении [110], величина  $\epsilon$  связана с величиной механического напряжения  $X$  соотношением

$$\epsilon \approx \Pi_{44} X, \quad (10)$$

где  $\Pi_{44}$  — сдвиговый пьезорезистивный коэффициент.

Провести расчет величины  $X$  в центральной части профилированной мембраны при равномерном нагружении ее поверхности представляет значительные трудности. Поэтому для экспериментальной проверки соотношения (9) были изготовлены аналогичным образом тестовые структуры, у которых чувствительный элемент представлял собой квадратную мостовую схему тензорезисторов, ориентированных вдоль направлений [110]. Зависимость выходного напряжения  $\delta\varphi$  мостовой схемы связана с величинами  $X$  и напряжением питания моста  $(\varphi_1 - \varphi_2)$  соотношением

$$\delta\varphi = 0.5 (\varphi_1 - \varphi_2) \Pi_{44} X^2 \quad (11)$$

Следовательно, чувствительность датчика давления с чувствительным элементом в виде тензорезистивного моста в 2.63 раза должна превышать чувствительность датчика давления с чувствительным элементом кольцевой топологии при прочих равных условиях.

На рис. 5 показаны нагрузочные характеристики датчиков давления с чувствительными элементами обоих типов. Как видно из сравнения характеристик, экспериментальное значение чувствительной мостовой схемы в 2.93 раза превосходит чувствительность кольцевой, что совпадает с результатами расчета относительной чувствительности элементов по формулам (9)—(11).

#### Список литературы

- [1] Wilner L. B. // ISA Trans. 1978. V. 17. N 1. P. 83.

Институт полупроводников АН УССР  
Киев

Получена 11.09.1989  
Принята к печати 25.09.1989