

ИЗМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕНЗОРЕЗИСТОРОВ ПРИ ИЗГИБЕ

С. А. Антипов, И. А. Батаронов, А. И. Дрожжин, А. М. Рощупкин

Воронежский политехнический институт, 394026, Воронеж, Россия
(Получена 19 марта 1992 г. Принята к печати 10 января 1993 г.)

Представлены результаты исследования изменения электросопротивления тензорезисторов на основе нитевидных кристаллов кремния при изгибе.

Тензорезисторы имели p -тип проводимости, длину $(0.5+5) \cdot 10^{-3}$ м, диаметр $(2-5) \cdot 10^{-5}$, удельное сопротивление $(1+6) \cdot 10^{-4}$ см \cdot м, общее электросопротивление 100—500 Ом, коэффициент тензочувствительности 80—150.

Изгиб свободных (неприклеенных) тензорезисторов осуществлялся на специально сконструированных установках по двух- и трехточечной схеме приложения сил. Обнаруженное изменение электросопротивления описано аналитически, при этом учтен неоднородный характер изменения удельного электросопротивления различных участков поперечного сечения.

При работе тензочувствительного элемента в условиях сложноедеформированного состояния с неоднородным полем по поперечному сечению тензорезистора необходимо учитывать неоднородный характер изменения удельного электросопротивления различных участков поперечного сечения. Особый интерес в связи с этим представляет исследование тензоэффекта при таком деформировании, когда среднее значение деформации по сечению тензорезистора равно нулю, так что, казалось бы, электросопротивление его не должно изменяться. Одним из таких типов деформации является изгиб, вклад которого в изменение электросопротивления тензоэлемента необходимо учитывать в сложных условиях воздействия [1].

В настоящей работе поставлена задача — исследовать изменение электросопротивления тензорезисторов при изгибе и аналитически описать полученные зависимости.

В качестве образцов для проведения эксперимента использовали тензопреобразователи, изготовленные на основе нитевидных кристаллов (НК) кремния p -типа проводимости, с ориентацией оси роста [111].

Тензорезисторы на основе НК кремния по своим параметрам не уступают лучшим образцам, изготовленным из массивного монокристалла, а по некоторым (величине предельной рабочей деформации, усталостной прочности, уровню шумов и др.) значительно превышают их. Так, прочность на разрыв НК кремния составляет $2 \cdot 10^9$ Н/м², а прочность тензорезисторов, изготовленных из массивных монокристаллов, не превышает $3 \cdot 10^8$ Н/м²; тензорезистор на основе НК выдерживает без заметного изменения свойств 10^{10} циклов нагружения и может быть изогнут с радиусом кривизны менее $2.5 \cdot 10^{-3}$ м [2].

Образцы и методики проведения эксперимента

Эксперименты проводились на тензорезисторах, изготовленных на основе НК кремния, длиной $(0.5+5) \cdot 10^{-3}$ м, диаметром $(2+6) \cdot 10^{-5}$ м.

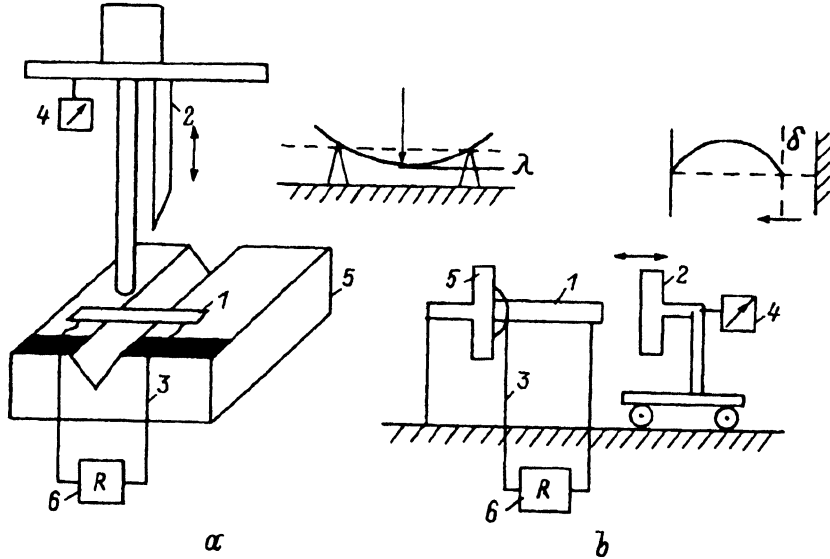


Рис. 1. Блок-схемы трех- (а) и двухточечного (б) нагружения тензорезисторов на основе НК кремния в неприклеенном состоянии. 1 — тензорезистор на основе НК кремния; 2 — нагружающий элемент; 3 — токовыводы; 4 — индикаторы перемещения; 5 — предметные столики; 6 — омметр.

Деформирование тензорезисторов осуществлялось по схемам двух- и трехточечного изгиба на специально сконструированных установках (рис. 1) по разработанным методикам. Особая ценность предлагаемых методик заключается в том, что образцы испытываются в свободном (ненаклеенном) состоянии, что существенно уменьшает погрешность измерения и дает возможность испытать тензорезистор с заданными параметрами в других условиях нагружения.

При трехточечном изгибе тензорезистор помещался на предметный столик, имеющий V-образную проточку (рис. 1, а), шириной $2 \cdot 10^{-3}$ м и глубиной $2.5 \cdot 10^{-3}$ м. Столик изготовлен из фольгированного стеклотекстолита, с которого травлением в месте расположения кристалла фольга удалена, а к оставшейся части фольги припаяны токовые выводы тензорезистора. Электросопротивление тензорезистора измеряется с помощью моста постоянного тока. Предметный столик может перемещаться в горизонтальной плоскости в двух взаимно перпендикулярных направлениях и поворачиваться вокруг вертикальной оси. Нагружающий элемент представляет собой пластину из нержавеющей стали, заточенную под углом 30° , толщина острия $1 \cdot 10^{-5}$ м. Пластина жестко скреплена со штоком, перемещающимся с помощью реверсивного электродвигателя и редуктора в вертикальной плоскости. Перемещение нагружающего элемента фиксируется индикатором часового типа с точностью $1 \cdot 10^{-6}$ м.

При двухточечном изгибе тензорезистор, соориентированный горизонтально, помещался между двумя параллельными вертикальными отшлифованными поверхностями (неподвижной и подвижной). Для удобства проведения эксперимента резистор иногда одним торцом закрепляли клеем «каолин» (который в дальнейшем легко разрушается, если не был подвергнут термической обработке) на неподвижную вертикальную поверхность (предметный столик). Деформирование тензорезистора осуществлялось перемещением подвижного столика воздействующего на другой торец кристалла (рис. 1, б). Перемещение столика осуществлялось с помощью микрометрического винта. Контроль за

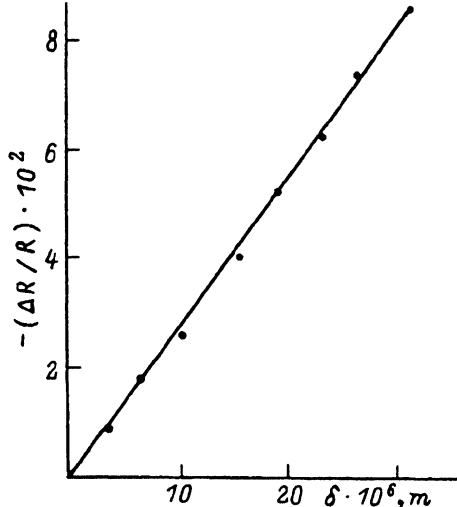


Рис. 2. Изменение электросопротивления тензорезистора с $\rho = 2 \cdot 10^{-4}$ Ом · м в зависимости от величины сближения деформирующих поверхностей δ . $R = 450$ Ом на основе НК кремния при двухточечной схеме нагружения.

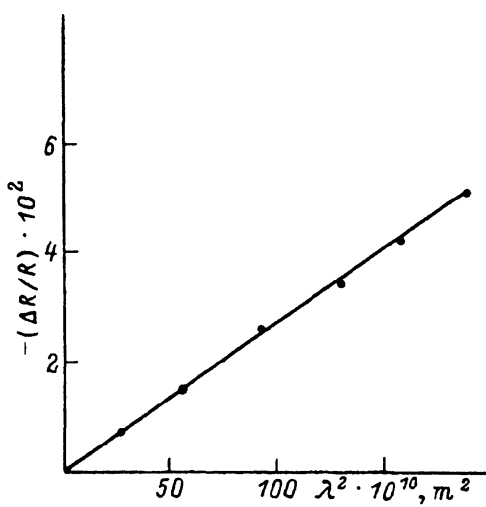


Рис. 3. Изменение электросопротивления тензорезистора с $\rho = 1.4 \cdot 10^{-4}$ Ом · м. $R = 450$ Ом на основе НК кремния для трехточечной схемы нагружения в зависимости от λ^2 , где λ — стрела прогиба.

нагружением осуществлялся с помощью оптического микроскопа, а величина электросопротивления контролировалась цифровым омметром.

Результаты эксперимента

Как при двух-, так и при трехточечном изгибе электросопротивление тензорезистора на основе НК кремния уменьшается, причем при двухточечном изгибе относительное уменьшение электросопротивления составляет величину (1—10%) и линейно возрастает с уменьшением расстояния между торцами (рис. 2), тогда как при трехточечном — это уменьшение пропорционально квадрату стрелы прогиба (рис. 3), причем зависимость круче для тензоэлементов с большей величиной удельного электросопротивления, а следовательно, и коэффициента тензочувствительности. Иногда в области больших или очень малых деформаций указанная зависимость отклоняется от линейной. Полученные результаты обработаны на ЭВМ с использованием метода наименьших квадратов. Впервые обнаружена релаксация электросопротивления в нагруженных несклеенных тензорезисторах (рис. 4). В ранних работах изменение электросопротивления в нагруженных приклеенных тензорезисторах на основе НК кремния относили за счет релаксационных процессов и ползучести связующего материала [1, 2].

Релаксацию электросопротивления наблюдали при трехточечной схеме нагружения как в деформированном состоянии, так и сразу после разгрузки; глубина и время обнаруженной релаксации были примерно на порядок меньше, чем в случае деформирования приклеенного тензорезистора. Глубина релаксации составляет сотые доли процента относительного изменения электросопротивления, а время — порядка сотен секунд. С ростом стрелы прогиба глубина релаксации возрастает, причем процесс идет интенсивнее, тогда как для малых деформаций возможно наблюдение времени задержки; кроме того, обнаруженный эффект при повторных испытаниях (циклических нагружениях) уменьшается.

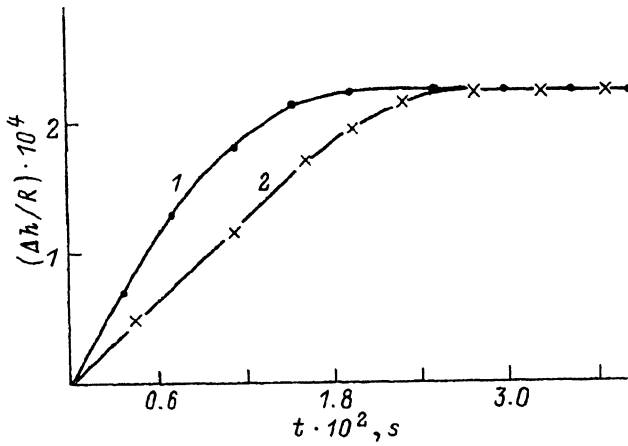


Рис. 4. Изменение электросопротивления неприклеенного тензорезистора на основе НК кремния с $\rho = 2.0 \cdot 10^{-4}$ Ом · м со временем. $R = 102$ Ом при трехточечном изгибе, стрела прогиба $26 \cdot 10^{-6}$ м (1) и $14 \cdot 10^{-6}$ м (2).

Теория изменения электросопротивления тензорезистора при изгибе и обсуждение результатов эксперимента

Расчет с целью сопоставления полученных результатов с результатами эксперимента проведем для тензорезистора, изготовленного на основе НК кремния. Полученные результаты останутся справедливыми при деформировании изгибом резисторов в форме стержня с отношением длины к параметру $100 : 1$.

Рассмотрим слабый однородный изгиб, вызванный приложенными к концам НК изгибающими моментами (рис. 5). Выберем начало декартовой системы координат в центре инерции поперечного сечения НК, ось Ox — вдоль оси НК, а ось Oz — в плоскости изгиба. В рассматриваемых условиях чистого изгиба каждый элемент объема НК деформируется так же, как и при простом одноосном нагружении, с деформацией вдоль оси x , равной $\varepsilon = \Omega z$, где Ω — кривизна оси изогнутого НК [3]. В таком случае изменение удельного электросопротивления указанного элемента объема описывается зависимостью $\rho(\varepsilon)$, полученной при одноосном растяжении (сжатии) НК. Однако при изгибе изменение величины ρ имеет разный знак с разных сторон от нейтральной поверхности. Для практических целей бывает достаточно использовать квадратную аппроксимацию зависимости $\rho(\varepsilon)$ [4]:

$$\rho(\varepsilon) = \rho_0 (1 + K_1 \varepsilon + K_2 \varepsilon^2), \quad (1)$$

где ρ_0 — удельное электросопротивление недеформированного НК, K_1 и K_2 — коэффициенты тензочувствительности первого и второго порядков.

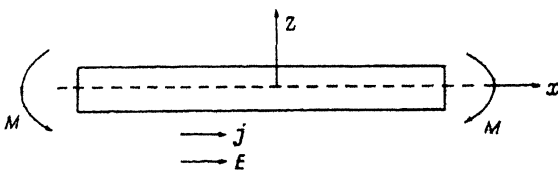
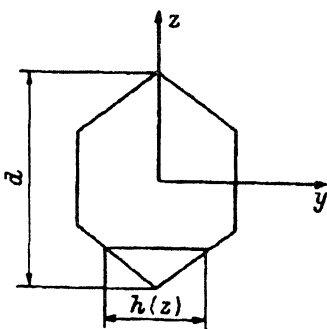


Рис. 5. Схема однородного изгиба тензорезистора на основе НК кремния. M — изгибающий момент, E — вектор напряженности электрического поля, j — вектор плотности тока.

Рис. 6. Поперечное сечение тензорезистора на основе НК кремния, d — диаметр кристалла.

Сопrotивление НК можно определить как сопротивление системы параллельно соединенных проводников с сечением dS и электропроводностью $\sigma(\epsilon) dS$, откуда следует

$$R = \frac{\rho L_{tc}}{S_{tc}} = \frac{L_{tc}}{\sigma S_{tc}} = \frac{L_{tc}}{\int \sigma(\epsilon) dS} \quad (2)$$



Поскольку деформация ϵ не зависит от координаты y , обозначив толщину НК вдоль Oy на уровне с координатой z как $h(z)$ (рис. 6), можно выполнить интегрирование по y в (2):

$$R^{-1} = \frac{1}{L_{tc}} \int_{-d/2}^{d/2} \frac{h(z) dz}{\rho(\epsilon)} \quad (3)$$

где d — диаметр НК вдоль оси z (рис. 2). Переходя в интеграле (3) к новой переменной $\epsilon = \Omega z$, получим

$$R = \frac{2L_{tc}\epsilon_0}{d \int_{-\epsilon_0}^{\epsilon_0} \frac{h(\epsilon) d\epsilon}{\rho(\epsilon)}} \quad (4)$$

где $\epsilon_0 = \Omega d/2$ — максимальная деформация растяжения при изгибе НК. Для заданной зависимости $\rho(\epsilon)$ и для формы НК $h(z)$ по формуле (4) устанавливается зависимость сопротивления НК от величины деформации изгиба. Рассмотрим эту зависимость более подробно, используя аппроксимацию (1). В том же приближении, и в формуле (1), для удельной электропроводности запишем

$$\sigma(\epsilon) = \frac{1}{\rho(\epsilon)} \cong \frac{1}{\rho_0(1 + K_1\epsilon + K_2\epsilon^2)} \frac{1}{\rho_0} [1 - K_1\epsilon + (K_1^2 - K_2)\epsilon^2] \quad (5)$$

Подставляя данное выражение в (3) и заменяя $\epsilon = \Omega z$, получим

$$R^{-1} = \frac{1}{L_{tc}\rho_0} \left[\int_{S_{tc}} dS - K_1\Omega \int_{S_{tc}} z dS + (K_1^2 - K_2)\Omega^2 \int_{S_{tc}} z^2 dS \right]$$

Здесь первый интеграл равен площади S_{tc} поперечного сечения НК, второй — нулю в силу выбора начала координат в центре инерции сечения, а третий — моменту инерции сечения J_y относительно оси y [3]. В результате получим

$$R = \frac{R_0}{1 + (K_1^2 - K_2) \frac{J_y}{S_{tc}} \Omega^2}$$

откуда в силу малости второго слагаемого в знаменателе можно записать

$$R = R_0 \left[1 - (K_1^2 - K_2) \frac{J_y}{S_{tc}} \Omega^2 \right] \quad (6)$$

Наконец, для относительного изменения сопротивления НК будем иметь формулу

$$\frac{\Delta R}{R_0} = - (K_1^2 - K_2) \frac{J_y}{S_{fc}} \Omega^2. \quad (7)$$

Для оценки соотношения K_2 и K_1 заметим, что квадратичный эффект изменения сопротивления с деформацией у полупроводника становится той же величины, что и линейный эффект, при деформациях $\varepsilon \sim 0.01$, откуда $|K_2| \sim 100 K_1 \sim K_1^2$. Однако характер изменения сопротивления таков, что $K_2 < 0$. Таким образом, линейный и квадратичный эффекты в формуле (7) имеют одинаковый порядок величины и влияют на R одинаково (в сторону уменьшения). Поэтому целесообразно ввести обозначение

$$K_u = K_1^2 + |K_2| \quad (8)$$

для коэффициента тензочувствительности при изгибе.

Для НК, имеющего в сечении правильный шестиугольник, момент инерции сечения не зависит от ориентации оси и $J = \frac{5\sqrt{3}}{256} d^4$, а $S_{fc} = \frac{3\sqrt{3}}{8} d^2$, где d выбрано таким же образом, как и на рис. 6. Тогда формула (7) с учетом обозначения (8) приобретает вид

$$\frac{\Delta R}{R} = - \frac{5K_u d^2}{96} \Omega^2. \quad (9)$$

В реальных схемах нагружения НК величина Ω не остается постоянной по длине НК. Однако, поскольку характерный масштаб изменения составляет $\sim L_{fc}$, что намного превышает диаметр НК d , такую неоднородность электросопротивления можно учесть в рамках формулы (6), полагая поперечные размеры НК бесконечно малыми. Тогда сопротивление единицы длины НК $\sim \Omega_2(x)$, а полное сопротивление НК вычисляется по формуле (6), где вместо Ω^2 следует поставить $\Omega^2 = \alpha \Omega_0^2$, Ω_0 — максимальное значение кривизны на рабочем участке НК, а коэффициент $\alpha < 1$ учитывает неоднородность кривизны НК:

$$\alpha = \frac{1}{L_{fc} \Omega_0^2} \int \Omega^2(x) dx.$$

В общем случае коэффициент α включает в себя также геометрический фактор, учитывающий конкретные условия токоподвода: длина L_{fc} измерения электросопротивления может не совпадать с длиной L_0 изогнутого участка НК.

Рассмотрим конкретные схемы нагружения.

1. *Двухточечный изгиб*. В приближении слабого изгиба в этом случае имеем

$$\Omega_0 = \frac{2\pi}{L_0} \sqrt{\frac{\delta}{L_0}} \quad [6], \text{ где } \delta \text{ — смещение опоры при осевом сжатии НК. Из формулы}$$

(9) тогда получаем

$$\frac{\Delta R}{R} = - \frac{5\pi^2}{24} \frac{\alpha K_u d^2}{L_0^3} \delta. \quad (10)$$

При этом распределение $\Omega(x) = \Omega_0 \cos(\pi x/L_0)$ [6], и в этом случае получим $\alpha = 1/2$. Отметим, что зависимость изменения электросопротивления от смещения δ в (10) линейная, что соответствует эксперименту (рис. 2).

2. Трехточечный изгиб. При условии слабого изгиба $\Omega = 12\lambda/L_0^2$, где λ — стрела прогиба. В таком случае формула (9) дает следующий результат:

$$\frac{\Delta R}{R} = -\frac{15}{2} \frac{\alpha K_u d^2}{L_0^2} \lambda^2. \quad (11)$$

Распределение кривизны НК при трехточечном изгибе $\Omega(x) = \Omega_0 [1 - (2|x|/L_0)]$, что при $L_0 = L_{tc}$ дает $\alpha = 1/3$. Отметим, что зависимость (11) со стрелы прогиба квадратичная, что соответствует полученной на опыте (рис. 3).

Кроме того, оценка по формуле (11) дает порядок значения $K_2 \sim 10^4$, что хорошо согласуется с отмеченным выше соотношением величин K_1 и K_2 .

Выводы. Результаты проведенного расчета хорошо согласуются с результатами эксперимента, а предложенные методики деформации двух- и трехточечным изгибом в совокупности с результатами расчета по относительному изменению электросопротивления [см. формулы (10) и (11)] могут быть положены в основу определения коэффициента тензочувствительности (K_u) тензорезистора, причем данный способ определения K_u дает возможность дальнейшего использования тензоэлемента и, самое главное, осуществляется в отсутствие связующего материала (клея).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Н. П. Клокова. Тензорезисторы. М. (1990).
- [2] А. И. Дрожжин, Н. К. Седых, И. В. Сидельникова. Метрология, 1, 55 (1980).
- [3] Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Теория упругости. М. (1987).
- [4] А. Л. Полякова. Деформация полупроводников и полупроводниковых приборов. М. (1979).
- [5] Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Электродинамика сплошных сред. М. (1982).
- [6] В. В. Дежин, А. П. Ермаков, А. Б. Парфенов, С. А. Антипов, И. Л. Батаронов, А. И. Дрожжин, А. М. Рощупкин, М. И. Старовиков. Деп. в ВИНТИ. М. (1989). № 6403-В89.

Редактор Т. А. Полянская
