

## ОСОБЕННОСТИ ТЕНЗОРЕЗИСТИВНОГО ЭФФЕКТА В СТРУКТУРАХ МЕТАЛЛ – ДИЭЛЕКТРИК – ПОЛУПРОВОДНИК ПРИ СТАТИЧЕСКОЙ И ПЕРЕМЕННОЙ ДЕФОРМАЦИИ

А.В. Озаренко, Ю.А. Брусенцов, А.П. Королев

Кафедра «Материалы и технология», ГОУ ВПО «ТГТУ»

Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым

**Ключевые слова и фразы:** поверхность проводимость полупроводника; структура типа металл – диэлектрик – полупроводник; тензорезистивный эффект.

**Аннотация:** Приводятся результаты исследований влияния статической и переменной упругой деформации на параметры структур типа металл – диэлектрик – полупроводник. Рассмотрены механизм образования пространственного заряда в полупроводнике и процесс дрейфа основных носителей заряда в структуре с учетом тензорезистивного и полевого эффектов. Показана возможность применения данных структур в качестве тензочувствительных элементов.

### Обозначения

$C$ – модуль упругости, Па;	$T$ – температура, К;
$e$ – заряд электрона, Кл;	$\epsilon_0$ – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума, Ф/см;
$h$ – постоянная Планка, Дж·с;	$\mu_n$ – подвижность, см <sup>2</sup> /(В·с).
$k$ – постоянная Больцмана, Дж/К;	

В настоящее время широкое распространение при измерениях механических напряжений, деформаций, давления и других неэлектрических величин получили полупроводниковые тензочувствительные элементы на основе монокристаллического кремния. Тензорезисторные датчики с чувствительными элементами на основе кремния характеризуются высокой чувствительностью, надежностью, малыми габаритами и высокопроизводительной технологией изготовления. Вместе с тем, трудоемкая индивидуальная настройка датчиков, обеспечивающая получение высоких метрологических характеристик, и необходимость формирования в них  $p$ - $n$ -переходов, изолирующих тензорезисторы друг от друга и от подложки, обуславливают ограниченность их применения. Наличие  $p$ - $n$ -переходов снижает верхнее значение рабочего температурного диапазона до 130...150 °C и не позволяет получить высокой стабильности характеристик датчиков.

Наличие указанных недостатков и интенсивное развитие различных отраслей промышленности стимулируют поиск и разработку новых типов тензочувствительных элементов (**ТЧЭ**). Современные кремниевые интегральные ТЧЭ с резистивным выходом можно разделить на две основные группы: «монополярные» и «биполярные», в которых выходной сигнал формируется при направленном движении соответственно основных и неосновных носителей заряда [1]. К монополярным ТЧЭ относится описанный в работах [2–4] первичный измерительный образователь (**ПИП**) упругих деформаций на основе структуры типа металл – диэлектрик – полупроводник (**МДП**-структурь). Однако проведенный анализ мате-

матического описания физических процессов, положенных в основу работы данного монополярного прибора, позволяет говорить о том, что полученные аналитические зависимости не учитывают специфических особенностей тензорезистивного эффекта в полупроводниках.

Цель данной работы состоит в углублении и расширении знаний о физической природе явлений, протекающих под действием статических и переменных деформаций в МДП-структурах.

Известно, что при деформации полупроводникового кристалла изменяется целый ряд электрофизических характеристик полупроводника, таких как ширина запрещенной зоны, концентрация свободных носителей заряда, удельное сопротивление и т.п. Поэтому изучение влияния деформации на процессы движения основных носителей заряда во внешнем электрическом поле представляется весьма важным.

При деформации полупроводника происходит изменение расстояний между атомами, что приводит к изменению ширины запрещенной зоны. В этом случае ширина запрещенной зоны может быть выражена соотношением

$$E_G(X) = E_G(0) - \alpha X, \quad (1)$$

где  $E_G(0)$  – ширина запрещенной зоны недеформированного полупроводника, эВ;  $\alpha$  – барический коэффициент, эВ/Па;  $X$  – механическое напряжение, Па. Необходимо отметить, что анизотропия физических свойств полупроводников приводит к тому, что значения барических коэффициентов определяются в зависимости от кристаллографической плоскости кристалла. Для кремния наибольшее изменение ширины запрещенной зоны наблюдается в случае деформации кристалла в направлении [100] [5].

Вследствие изменения ширины запрещенной зоны изменяется количество носителей заряда в зоне проводимости. Зависимость концентрации электронов проводимости, учитывающая изменение ширины запрещенной зоны при деформации, имеет вид

$$n_0 = \frac{N_D}{2} + \sqrt{\left(\frac{N_D}{2}\right)^2 + N_C N_V \exp\left[\frac{-(E_G(0) - \alpha X)}{kT}\right]}, \quad (2)$$

где  $N_D$  – концентрация донорной примеси, см<sup>-3</sup>;  $N_C, N_V$  – эффективные плотности состояний в зоне проводимости и валентной зоне соответственно, см<sup>-3</sup>.

В результате изменения концентрации и подвижности носителей заряда под действием деформации изменяется удельное электрическое сопротивление полупроводника (тензорезистивный эффект)

$$\rho(X) = \rho_0(1 + \pi_l X), \quad (3)$$

где  $\rho_0$  – удельное электрическое сопротивление полупроводника до деформации, Ом·см;  $\pi_l$  – продольный коэффициент пьезосопротивления, Па<sup>-1</sup>. Продольный коэффициент пьезосопротивления характеризуется параметрами кристаллической решетки, кристаллографическим направлением и типом проводимости полупроводника.

В МДП-структурах прикладываемый к изолированному электроду (затвору) потенциал вызывает появление поперечного электрического поля в полупроводнике, которое стимулирует накопление свободных носителей заряда у поверхности (полевой эффект). При этом величину электрического сопротивления обра-

зующегося проводящего канала можно регулировать за счет изменения потенциала на затворе. Количественной оценкой, характеризующей проводимость канала в зависимости от приложенного потенциала, является значение пространственного заряда под электродом  $Q_S$ .

Таким образом, в МДП-структурах возможна двойная модуляция выходного сигнала, как за счет изменения потенциала на изолированном электроде, так и за счет деформации полупроводникового кристалла. Это открывает широкие перспективы по созданию полупроводниковых приборов и датчиков с двойным управлением.

Определим зависимость выходного сигнала от механического напряжения, возникающего при статической деформации МДП-структуры.

Сопротивление элементарного участка проводящего канала структуры длиной  $dx$  определяется зависимостью

$$dR_k = \frac{R_k}{L} dx = \frac{\rho dx}{ZW}, \quad (4)$$

где  $R_k$  – сопротивление канала, Ом;  $L$  – длина канала, см;  $Z$  – ширина канала, см;  $W$  – глубина канала, см.

Однако на распределение носителей заряда в канале оказывают влияние значение управляющего потенциала  $V_G$  и напряжения на выходе (стоке) МДП-структуры  $V_D$ . Влияние данных электрических параметров приводит к тому, что глубина области обогащенной электронами у выхода больше, чем у входа (истока).

В этом случае глубина канала на расстоянии  $x$  от входа

$$W(x) = \frac{Q_S(x)}{eN_D} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{SiO_2}}{eN_D d} \left( -V_G + V(x) + \frac{2kT}{e} \ln \left( \frac{N_D}{\sqrt{N_C N_V} \exp \left[ \frac{-(E_G(0) - \alpha X)}{2kT} \right]} \right) \right), \quad (5)$$

где  $\epsilon_{SiO_2}$  – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика под управляющим электродом;  $d$  – толщина диэлектрика, см;  $V(x)$  – напряжение на расстоянии  $x$  от истока, В.

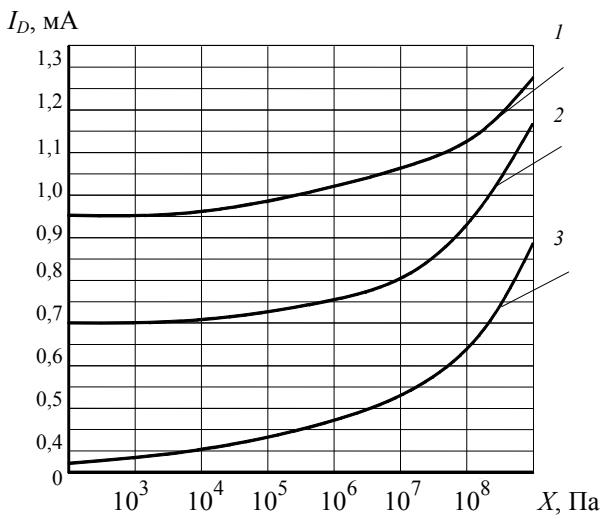
Ток, протекающий через любое сечение канала, одинаков:

$$dV = I_D dR_k. \quad (6)$$

Математическая модель выходного сигнала, учитывающая изменение длины канала при деформации, определяется интегрированием выражения (6) с граничными условиями  $V = 0$ ,  $x = 0$  и  $V = V_D$ ,  $x = L$ :

$$I_D = \frac{Z\epsilon_0 \epsilon_{SiO_2} \mu_n}{\left(1 + \frac{X}{C}\right)(1 + \pi_l X)L_0 d} \left( \frac{V_D^2}{2} + V_D \left( \frac{2kT}{e} \ln \left( \frac{N_D}{\sqrt{N_C N_V} \exp \left[ \frac{-(E_G(0) - \alpha X)}{2kT} \right]} \right) - V_G \right) \right). \quad (7)$$

На рис. 1 представлены зависимости выходного сигнала при различных значениях потенциалов на затворе, полученные при деформации МДП-структуры, изготовленной на основе кремния  $n$ -типа проводимости.



**Рис. 1. Зависимость выходного тока от механического напряжения при различных потенциалах  $V_G$  на затворе:**  
1 – 12 В; 2 – 10 В; 3 – 7 В

Из графиков видно, что с повышением значения управляющего потенциала увеличивается значение выходного тока. В области механических напряжений от  $10^3$  до  $10^7$  Па зависимость выходного тока от деформаций хорошо аппроксимируется линейной функцией, что немаловажно при проектировании ТЧЭ и тензореобразователей.

Однако представленные моделью (7) теоретические положения и полученные графические зависимости хорошо описывают лишь статические и медленно изменяющиеся во времени деформации. Поэтому, с целью построения математической модели, адекватной физическим процессам, протекающим в МДП-структуратах под действием переменных деформаций, необходимо их глубокое исследование. В качестве источника таких деформаций могут выступать ультразвуковые (УЗ) волны.

При деформации в ультразвуковом поле возникает сила, действующая на свободные носители заряда, пропорциональная волновому вектору (частоте) УЗ колебаний. Сила потенциал-деформационного взаимодействия определяется по формуле [6]

$$F = K^2 D u, \quad (8)$$

где  $K$  – волновой вектор;  $D$  – константа потенциал-деформационного взаимодействия;  $u$  – амплитуда колебаний. Константа потенциал-деформационного взаимодействия (деформационный потенциал) характеризует изменение ширины запрещенной зоны на единицу давления при всестороннем сжатии, и в первом приближении ее значение совпадает со значением барического коэффициента  $\alpha$ .

Волновой вектор зависит от частоты волны  $f$ :

$$K = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{c}, \quad (9)$$

где  $c$  – скорость распространения волны;  $\omega$  – угловая частота.

Полное значение пространственного заряда, индуцируемого под управляющим электродом за счет приложенного потенциала и с учетом заряда наведенного УЗ волной, определяется из выражения

$$Q = eN_D W(x) + \varepsilon_0 \varepsilon_{\text{Si}} \frac{F}{e} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{\text{SiO}_2}}{d} \times \\ \times \left( -V_G + V(x) + \frac{2kT}{e} \ln \frac{N_D}{\sqrt{N_C N_V} \exp \left[ \frac{-(E_G(0) - \alpha X)}{2kT} \right]} \right) + \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{\text{Si}}}{e} \left( \frac{\omega}{c} \right)^2 \alpha u, \quad (10)$$

где  $\varepsilon_{\text{Si}}$  – относительная диэлектрическая проницаемость кремния.

Окончательно зависимость выходного сигнала МДП-структурь при воздействии переменной деформации, возбуждаемой плоской упругой волной, описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} I_D = \frac{Z\mu_n}{(1 + \pi_l X)L_0} \times \\ \times \left[ \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{\text{SiO}_2}}{d} \left( \frac{V_D^2}{2} + V_D \left( \frac{2kT}{e} \ln \frac{N_D}{\sqrt{N_C N_V} \exp \left[ \frac{-(E_G(0) - \alpha X)}{2kT} \right]} - V_G \right) \right) + V_D \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{\text{Si}} \omega^2 \alpha u}{ec^2} \right]; \\ X(x, t) = X_0 e^{i(\omega t - kx)}, \end{cases} \quad (11)$$

где  $t$  – время, с.

Из формул видно, что в случае воздействия статических деформаций при  $\omega \rightarrow 0$  система уравнений (11) преобразуется к виду (7).

Таким образом, полученные аналитические зависимости позволяют моделировать процессы, протекающие в МДП-структурьах при статических и переменных деформациях. С практической точки зрения проведенные исследования являются теоретической основой для разработки измерительных преобразователей широкого диапазона деформаций на основе МДП-структурь.

#### Список литературы

1. Кремниевые двухстоковые полевые тензотранзисторы / Г.Г. Бабичев [и др.] // Журн. техн. физики. – 2000. – Т. 70, вып. 10. – С. 45–49.
2. Моделирование первичного измерительного преобразователя в системах оперативного контроля упругих деформаций / А.В. Кочетков [и др.] // Математические методы в технике и технологиях : сб. тр. 15-й Междунар. науч. конф. – Тамбов, 2002. – Т. 7. – С. 46–47.
3. Первичный измерительный преобразователь упругих деформаций / А.В. Кочетков [и др.] // Вестн. Тамб. гос. ун-та. Сер. Естеств. и техн. науки. – Тамбов, 2003. – Т. 8, вып. 4. – С. 702–703.
4. Кочетков, А.В. Первичный измерительный преобразователь в системах оперативного контроля упругих деформаций / А.В. Кочетков, А.П. Королев, В.П. Шелохвостов // Актуальные проблемы современной науки : сб. тр. 4-й Междунар. конф. молодых ученых и студентов. – Самара, 2003. – С. 11–12.
5. Бахадырханов, М.К. Влияние одноосного сжатия на фотопроводимость сильнокомпенсированного Si <B, Mn> / М.К. Бахадырханов, Х.М. Илиев, Х.Ф. Зикриллаев // Письма в журн. техн. физики. – 1998. – Т. 24, вып. 22. – С. 23–28.
6. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / под ред. И. П. Голяминой. – М. : Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.

# **Peculiarities of Tensoresistive Effect in Metal – Dielectric – Semiconductor Structures under Static and Non-Uniform Deformation**

**A.V. Ozarenko, Yu.A. Brusentsov, A.P. Korolev**

*Department «Materials and Technology», TSTU*

**Key words and phrases:** metal – dielectric – semiconductor type structure; surface conductivity of a semiconductor; tensoresistive effect.

**Abstract:** The results of the research into the effects of static and non-uniform deformation on the parameters of metal – dielectric – semiconductor type structures are given. The mechanism of forming space charge in a semiconductor as well as the process of drift of main bearers of charge in the structure with regard for tensoresistive and field effects are considered. The possibility of applying these structure as tensosensitive elements is shown.

---

## **Besonderheiten des piezoresistiven Effektes in den Strukturen Metall – Dielektrikum – Halbleiter bei der statischen und variablen Deformation**

**Zusammenfassung:** Es werden die Ergebnisse der Forschungen des Einflusses der statischen und variablen elastischen Deformation auf die Parameter der Strukturen des Typs Metall – Dielektrikum – Halbleiter angeführt. Es sind der Mechanismus der Bildung der Raumladung im Halbleiter und der Prozess der Drift der Hauptträger der Ladung in der Struktur unter Berücksichtigung der Piezoresistiv- und Feldeffekte untersucht. Es ist die Möglichkeit der Anwendung dieser Strukturen als die piezoempfindlichen Elemente aufgezeigt.

---

## **Particularités de l'effet tensorésistif dans les structures métal – diélectric – semi-conducteur lors de la déformation statique et alternatif**

**Résumé:** Sont cités les résultats des études de l'influence de la déformation souple statique et alternatif sur les paramètres des structures métal – diélectric – semi-conducteur. Sont examinés le mécanisme de la formation de la charge spatiale dans le semi-conducteur et le processus de la dérive des porteurs essentiels de la charge dans la structure compte tenu des effets tensorésistifs et ceux des champs. Est montrée la possibilité de l'application des structures données en qualité des éléments tensosensibles.

---