

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ТЕНЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

И. Г. Проценко, Ю. А. Брусенцов

ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов

Рецензент д-р техн. наук, профессор А. И. Фесенко

Ключевые слова и фразы: концентрация носителей заряда; подвижность носителя зарядов; тензорезисторы; ширина запрещенной зоны.

Аннотация: Рассмотрены существующие устройства измерения механических напряжений. Изучены факторы, влияющие на чувствительность показаний тензорезистивных чувствительных элементов на основе МДП-структуры (металл – диэлектрик – полупроводник). Осуществлен расчет выходного сигнала тензорезистивного преобразователя. Предложены варианты модернизации измерительных элементов в целях повышения чувствительности и быстродействия.

В современных отраслях науки и техники широкое распространение получили измерительные приборы для экспериментального определения механических напряжений, статического и динамического давлений. К данным типам устройств можно отнести первичные измерительные преобразователи, выполненные на основе тензорезисторов, что обусловлено их высоким быстродействием при измерениях, а также возможностью проведения дистанционного измерения параметров исследуемой среды [1].

В основу измерения деформации с помощью тензорезисторов заложен принцип, согласно которому возникающее деформационное воздействие изменяет его активное сопротивление. Эффект изменения удельного сопротивления металлического проводника под действием всестороннего сжатия был открыт в 1856 г. Уильямом Томсоном (лордом Кельвином) и в 1881 г. О. Д. Хвольсоном. Однако практическое применение данного эффекта было осуществлено Л. С. Руже [2].

Проценко Илья Григорьевич – аспирант кафедры «Материалы и технология»; Брусенцов Юрий Анатольевич – кандидат технических наук, профессор кафедры «Материалы и технология», e-mail: mit@mail.nnn.tstu.ru, ТамбГТУ, г. Тамбов.

Современная конструкция измерительного устройства представляет собой измерительный элемент из тензочувствительного материала, закрепленный на исследуемой поверхности, для включения элемента в электрическую цепь в нем имеются выводы проводников.

Проволочные тензорезисторы имеют чувствительный элемент, выполненный из тонкой проволоки диаметром от 2 до 30 мкм, полученной методами волочения или микрометаллургии – формированием литого микропровода в стеклянной изоляции с диаметром жилы от 2 до 6 мкм [3]. Данный тип чувствительного элемента отличается относительной простотой изготовления и применим для измерения статических и динамических деформаций. Это обусловлено совершенством формы сечения и поверхности чувствительной проволоки, что определяет ее динамическую стойкость и высокую деформируемость.

Основными недостатками проволочных тензорезисторов являются трудности при формировании топологии измерительной схемы сложной формы, а также существование паразитного параметра, выраженного в виде поперечной чувствительности, значительно снижающей качество проводимых измерений.

В отличие от проволочных тензорезисторов, *фольгированные* имеют топологию, сформированную из тонколистового металла – фольги толщиной 5...10 мкм, помещенной на основание из синтетической смолы или бумаги, пропитанной клеем. При этом они, как правило, обладают технико-метрологическими характеристиками, допускающими формирование топологии практически любых форм и размеров.

Элементы фольгированных тензорезисторов имеют прямоугольное сечение с более выгодным отношением периметра к площади поперечного сечения, чем в случае использования проволочных элементов, что приводит к гораздо лучшему рассеиванию тепла. Значения рабочего тока и выходного сигнала увеличиваются, при этом составляющая в виде поперечной чувствительности снижается, что позволяет минимизировать погрешность измерения [4]. Основными недостатками данных тензорезисторов являются трудности, возникающие при эксплуатации, обусловленные невозможностью подвергать измерительное устройство многократным механическим воздействиям.

Дальнейшее исследование тензоэффекта в различных материалах и, в частности в полупроводниках, позволило создать новый тип измерительных устройств – полупроводниковые тензорезисторы, которые, имея более высокий коэффициент тензочувствительности по сравнению с проволочными и фольгированными элементами, открывают новые возможности тензометрических исследований.

Особенностью полупроводниковых измерительных элементов является возможность изменения в широких пределах их электрофизических свойств за счет введения легирующих примесей (рис. 1), что принципиально невозможно осуществить при формировании проволочных либо фольгированных тензорезисторов. Так, при одних и тех же геометрических размерах сопротивления измерительной ячейки могут колебаться в пределах от 10 до 10^3 Ом, а коэффициент тензочувствительности от -100 до +200 и выше [5].

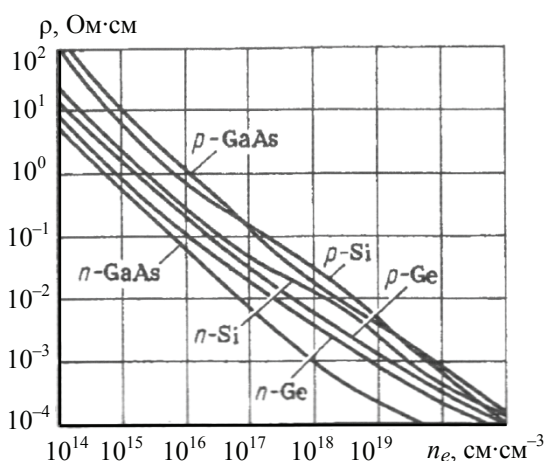


Рис. 1. Зависимость удельного сопротивления полупроводника от доли примесных атомов

Наиболее широко используются полупроводниковые тензорезисторы, изготовленные из кремния Si и германия Ge. Сформированные из них тензочувствительные элементы имеют более высокий коэффициент тензочувствительности, что позволяет измерять малые доли деформации и перемещения. Помимо этого, высокая подвижность носителей заряда позволяет практически мгновенно фиксировать изменения физических характеристик полупроводника под влиянием механических воздействий, что позволяет проводить измерения быстро меняющихся во времени величин, таких как деформация, динамические давления и вибрации [6].

В целях повышения точности измерения в настоящее время широкое распространение получили полупроводниковые гетероэпитаксиальные тензорезисторы и измерительные преобразователи на их основе, которые изготавливаются эпитаксиальным наращиванием легированного кремния на монокристаллическом упругом элементе. Такой тип формирования чувствительного элемента получил название «кремний на диэлектрике» или, в частном случае, «кремний на сапфире». Чувствительным элементом в таком измерительном устройстве является полупроводниковая пластина, помещенная на двухслойном сапфирово-титановом основании, позволяющая сформировать на своей поверхности до четырех тензочувствительных элементов [7]. Недостатком данного конструкторского решения является трудоемкость индивидуальной настройки, обеспечивающей получение высоких метрологических характеристик измерительного устройства.

При механической деформации в полупроводниковых измерительных элементах меняется пространственный заряд, а также расположение носителей заряда в точке воздействия. Вместе с этим меняется и подвижность носителей, причем данный параметр различен для каждого конкретного материала, что связано с концентрацией примесных элементов. Также немаловажным параметром является структура с разными топологическими параметрами и кристаллографическая ориентация подложки. Таким образом, в основе разработки интегрального тензочувствительного элемента на основе многослойной структуры, например МДП-структуры, лежит за-

висимость от деформации следующих основных характеристик: концентрации носителей заряда, ширины запрещенной зоны, подвижности носителей заряда.

Концентрация носителей заряда в невырожденном полупроводнике в условиях термодинамического равновесия будет определяться следующими выражениями:

$$n = N_C \exp[-(E_C - E_F)/kT];$$

$$p = N_V \exp[-(E_V - E_F)/kT],$$

где N_C , N_V – эффективные плотности состояний соответственно в зоне проводимости и валентной зоне, эВ; E_C , E_V – энергия дна соответственно зоны проводимости и потолка валентной зоны, эВ; k – постоянная Больцмана; T – температура, К; E_F – энергия уровня Ферми, эВ.

В собственном полупроводнике число электронов равно числу дырок проводимости, поэтому, приравняв выражения для концентраций носителей заряда, можно определить число собственных электронов

$$n_i = \sqrt{N_C N_V} \exp(-E_G/(2kT)),$$

где E_G – ширина запрещенной зоны, эВ.

Всестороннее сжатие или одноосная упругая деформация по различным кристаллографическим направлениям приводит к уменьшению ширины запрещенной зоны (рис. 2), что связано с изменением расстояния между атомами. При таких видах деформации ширина запрещенной зоны полупроводника изменяется по следующему линейному закону

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

где $E_G(0)$ – ширина запрещенной зоны недеформированного полупроводника, эВ; X – механическое напряжение, Па; α – барический коэффициент.

Стоит отметить, что барический коэффициент зависит от направления кристаллографической плоскости, испытывающей влияние механического нагружения. Наибольшее изменение ширины запрещенной зоны происходит при деформации кремниевого кристалла в продольном направлении, следовательно тензочувствительный элемент, выполненный на основе данного материала, будет обладать наивысшей чувствительностью к механическим деформациям [8].

Проанализировав выражения для ширины запрещенной зоны и концентрации носителей заряда можно сформировать выражение, определяющее полную концентрацию электронов проводимости

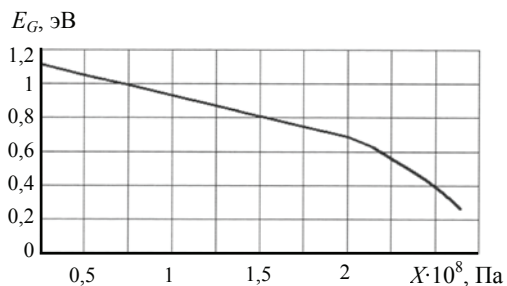


Рис. 2. Зависимость ширины запрещенной зоны полупроводника от механического напряжения

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

Увеличение механической деформации приводит к уменьшению ширины запрещенной зоны, что видно из представленной формулы, а также к увеличению свободных носителей заряда.

Подвижность носителей заряда определяет проводимость канала тензорезистивного чувствительного элемента, при этом он будет зависеть от некоторых параметров, таких как температура, рассеивание на ионизированных атомах примеси и рассеивание на акустических фонах [9].

Расчет полупроводниковых структур с произвольными уровнями легирования в различных температурных режимах можно произвести с использованием обобщенных соотношений для описания подвижности основных носителей заряда с учетом рассеивания на акустических фонах, атомах примеси, а также с учетом влияния электрического поля и температуры

$$\mu^{-1} = \mu_e^{-1} + \mu_i^{-1} + (E/v_e)^\beta,$$

где μ_e , μ_i – подвижность основных носителей заряда; E – напряженность электрического поля в проводнике, В; v_e – максимальная скорость электрона, м/с; β – эмпирический коэффициент.

На значение подвижности, определяемой рассеиванием на акустических фонах, оказывает влияние деформация при механических воздействиях на полупроводник, определяемая смещением края зоны проводимости при деформации кристаллической решетки. Иные параметры, влияющие на величину подвижности носителей заряда, зависят как от величины приложенного напряжения, так и от длины проводящего канала.

Таким образом, с учетом ограничений и влияющих факторов, подвижность носителей заряда при воздействии механической деформации будет определяться по формуле

$$\mu^{-1} = \left(\frac{\sqrt{8\pi e h^4 C}}{\frac{3}{2}(\alpha X) m_e^{\frac{5}{2}} (kT)^{\frac{3}{2}}} \right)^{-1} + \left(\frac{64 \sqrt{\pi \varepsilon_{Si}^2} (2kT)^{\frac{3}{2}}}{N_i e^3 m_e^{\frac{1}{3}}} \left[\ln \left[1 + \frac{12 \pi \varepsilon_{Si} kT}{N_i^{\frac{1}{3}} e^2} \right]^{-2} \right] \right)^{-1} + \left(\frac{\sqrt{\left(\frac{Q_S}{\varepsilon_{Si} \varepsilon_0} \right)^2 + \left(\frac{U_{SD}}{L_0 (1 + X/C)} \right)^2}}{v_e} \right)^{\frac{1}{2}},$$

где N_i , m_e – количество и масса носителей заряда соответственно; Q_S – поверхностная плотность заряда в полупроводнике; U_{SD} – разность потенциалов тензочувствительного элемента, В; L_0 – длина проводящего канала полупроводниковой структуры до деформации, мм; ε_0 – абсолютная ди-

электрическая проницаемость; ε_{Si} – диэлектрическая проницаемость кремния.

Таким образом, можно сделать вывод, что подвижность носителей заряда зависит не только от деформации, но и от величины электрического поля, а также от топологических параметров тензочувствительного элемента. Учитывая факторы, влияющие на тензочувствительный элемент на основе МДП-структуры, и известные закономерности физических процессов в полупроводниках можно сформировать зависимость выходной характеристики для данного типа преобразователя давления.

Как известно из [10], сопротивления элементарного участка проводящего канала полупроводниковой структуры имеет значение:

$$dR_k = \frac{R_k}{L} dx = \frac{\rho dx}{ZW},$$

где R_k – сопротивление проводящего канала, Ом; L , W – длина и глубина канала соответственно, см; Z – сечение канала, см; ρ – удельное сопротивление, Ом·м.

На распределение носителей заряда в проводящем канале оказывают влияние значения управляющего потенциала, а также напряжения на выходе измерительной ячейки. Данные факторы приводят к тому, что глубина области обогащенной носителями заряда у выхода тензочувствительного элемента больше, чем у входа.

При деформации чувствительного элемента происходит заметное изменение удельного сопротивления полупроводникового кристалла (тензорезистивный эффект), которое можно записать

$$\rho = \rho_0(1 + \pi X),$$

где ρ_0 – удельное сопротивление недеформированного проводника, Ом·м; π – продольный коэффициент пьезосопротивления, определяемый параметрами кристаллической решетки и типом проводимости полупроводника.

Практически доказано, что через любое сечение проводящего канала протекает ток, рассчитывающийся по формуле

$$Z = I dR_k.$$

Таким образом, величина выходного сигнала тензочувствительного преобразователя на основе МДП-структуры с учетом влияющих факторов может быть рассчитана по следующей формуле

$$I = \frac{Z\varepsilon\varepsilon_0\mu_e}{\left(1 + \frac{X}{C}\right)(1 + \pi X)L_0} \left[\frac{v_e^2}{2} + v_e \left(\frac{2kT}{e} \ln \frac{N_V}{\left(\sqrt{N_C N_V} \exp \left[\frac{-(E_G(0) - \alpha X)}{2kT} \right] \right)} \right) - v_e \right].$$

Данная математическая зависимость позволяет определить, какими параметрами полупроводниковой МДП-структуры можно варьировать в целях повышения чувствительности измерения механических деформационных воздействий. Так, например, при изменении концентрации при-

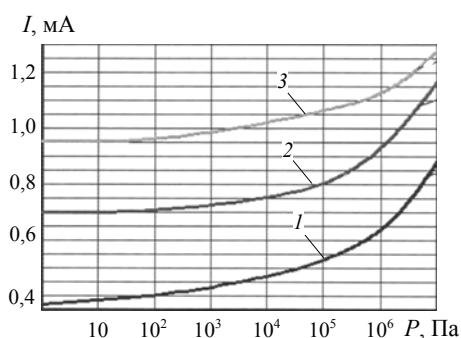


Рис. 3. Зависимость выходного тока от механических напряжений при различных концентрациях примесей:
 1 – собственный полупроводник;
 2 – $N_D = 10^{14} \text{ см}^{-3}$; 3 – $N_D = 10^{18} \text{ см}^{-3}$

ющем контроле напряженно-деформированных состояний материала, однако, и они имеют ряд ограничений, накладываемых на их использование.

Наиболее существенным недостатком является зависимость чувствительности измерения деформационного воздействия от температуры, обусловленная температурным дрейфом носителей заряда, а также их интенсивной рекомбинацией. Помимо этого стоит обратить внимание на недостатки МДП-структуры, вытекающей в основном из принципа их действия. Они заключаются в низком быстродействии, что делает невозможным измерения мгновенных значений деформационных воздействий, а также большой зависимости крутизны выходной характеристики от технологии изготовления и низкой добротности.

Стоит отметить также невозможность производить измерения характеристик многоступенчатых технологических процессов, находящих все более широкое распространение в современной промышленности. Поэтому целесообразно в целях устранения указанных ранее недостатков тензочувствительных элементов на основе МДП-структур с использованием полупроводниковых материалов, например кремния, внести несколько предложений относительно усовершенствования полупроводниковых тензочувствительных измерительных элементов.

Для повышения чувствительности и быстродействия проводимых измерений целесообразным является изменение конструкции измерительной ячейки. Выполнение на основе двух чувствительных слоев, например из стехиометрического диоксида ванадия, и слоя диоксида ванадия, легированного титаном [12], обеспечивает проведение измерения с достаточно большой чувствительностью и позволяет осуществить двухступенчатое изменение выходного сигнала при двух различных режимах работы измерительного устройства.

Увеличение числа чувствительных слоев, легированных по катионной подрешетке соответствующими примесями, обеспечит многоточечную индикацию деформационных величин, протекающих даже при минимальных промежутках времени. Помимо этого, представленные материалы имеют высокую температурную стабильность, что позволяет использовать

месных элементов наблюдается плавное изменение выходного параметра (рис. 3), что обуславливается ростом вероятности столкновения электронов проводимости с примесными атомами, то есть наблюдается увеличение рассеивания носителей на ионах данных примесей [11].

Как было отмечено ранее, использование тензочувствительных элементов МДП-структуры, выполненных на основе полупроводникового материала, находит широкое применение при неразрушающем

измерительное устройство на их основе при высоких температурах, расширяя тем самым диапазон измерений.

В настоящее время, в целях устранения указанных выше недостатков проводятся экспериментальные и теоретические эксперименты по получению материалов, обладающих многоступенчатыми измерительными характеристиками, а также разработка тензочувствительного преобразователя на их основе.

Список литературы

1. Клокова, Н. П. Тензорезисторы: теория, методики расчета, разработки / Н. П. Клокова. – М. : Машиностроение, 1990. – 224 с.
2. Глаговский, Б. А. Электротензометры сопротивления / Б. А. Глаговский, И. Д. Пивен. – Л. : Энергия, 1972. – 88 с.
3. Тисенко, Н. Г. Микропроволока для термокомпенсированных тензодатчиков / Н. Г. Тисенко, Г. Х. Боркунский. – М. : Машиностроение, 1968. – 92 с.
4. Тензодатчики для экспериментальных исследований / Н. П. Клокова [и др.]. – М. : Машиностроение, 1972. – 152 с.
5. Полупроводниковые тензодатчики / под ред. М. Дина. – М.-Л. : Энергия, 1985. – 213 с.
6. Баринов, И. Н. Полупроводниковый чувствительный элемент на основе структуры «кремний на диэлектрике» для высокотемпературного датчика давления / И. Н. Баринов // Датчики и системы. – 2004. – № 12. – С. 39 – 41.
7. Кремниевые двухстоковые полевые транзисторы / Г. Г. Бабичев [и др.] // Журн. техн. физики. – 2000. – Т. 70, № 10. – С. 45 – 49.
8. Бахадырханов, М. К. Влияние одноосного сжатия на фотопроводимость сильнокомпенсированного Si, (B, Mn) / М. К. Бахадырханов, Х. М. Илиев, Х. Ф. Зикриллаев // Письма в «Журнал технической физики». – 1998. – Т. 24, № 22. – С. 23 – 28.
9. Бонч-Бруевич, В. Л. Физика полупроводников : учеб. пособие / В. Л. Бонч-Бруевич, С. Г. Калашников. – М. : Наука, 1977. – 672 с.
10. Петровский, И. И. Электронная теория полупроводников. Введение в теорию : учеб. пособие / И. И. Петровский. – Минск : Высшая школа, 1964. – 250 с.
11. Озаренко, А. В. Разработка полупроводниковых тензочувствительных элементов для систем неразрушающего контроля напряженно-деформированного состояния материалов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.11.13 / А. В. Озаренко. – Тамбов, 2008. – 16 с.
12. Пат. 843030 Российская Федерация, МПК⁵ H 01 L 31/10, G 01 K 7/02. Устройство для контроля и регулирования температуры / Сукацкас Ю. И., Гечяускас С. И., Алексеюнас А. А., Балейшис С. А., Бондаренко В. М. ; заявитель и патентообладатель Ордена Трудового Красного Знамени ин-т физики и полупроводников АН Литовской ССР ; № 2851902/18-25 ; заяв. 24.12.1979 ; опубл. 30.06.1981, Бюл. № 24. – 4 с.

References

1. Klokov N.P. *Tenzorezistory: teoriya, metodiki rascheta, razrabotki* (Gages: theory, calculation methods, design), Moscow: Mashinostroenie, 1990, 224 p.

2. Glagovskii B.A., Piven I.D. *Elektrotenzometry soprotivleniya* (Elektrotenzometry resistance), Leningrad : Energiya, 1972, 88 p.
 3. Tisenko N.G., Borkunskii G.Kh. *Mikroprovoloaka dlya termokompensirovannykh tenzodatchikov* (Microwires for temperature-compensated strain gages), Moscow: Mashinostroenie, 1968, 92 p.
 4. Klokov N.P., Lukashnik V.F., Vorob'eva L.M., Volchek A.B. *Tezodatchiki dlya eksperimental'nykh issledovaniy* (Tezodatchiki for experimental research), Moscow: Mashinostroenie, 1972, 152 p.
 5. Din M. (Ed.) *Poluprovodnikovye tenzodatchiki* (Semiconductor strain gauges), Moscow, Leningrad: Energiya, 1985, 213 p.
 6. Barinov I.N. *Datchiki i sistemy*, 2004, no. 12, pp. 39-41.
 7. Babichev G.G., Kozlovskii S.I., Romanov V.A., Sharan N.N. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 2000, vol. 70, no. 10, pp. 45-49.
 8. Bakhadyrhanov M.K., Iliev Kh.M., Zikrillaev Kh.F. *Pis'ma v «Zhurnal tekhnicheskoi fiziki»*, 1998, vol. 24, no. 22, pp. 23-28.
 9. Bonch-Bruevich V.L., Kalashnikov S.G. *Fizika poluprovodnikov* (Physics of Semiconductors), Moscow: Nauka, 1977, 672 p.
 10. Petrovskii I.I. *Elektronnaya teoriya poluprovodnikov. Vvedenie v teoriyu* (Electron theory of semiconductors. Introduction in theory), Minsk: Vysshaya shkola, 1964, 250 p.
 11. Ozarenko A.V. *PhD dissertation (Eng.)*, Tambov, 2008, 17 p.
 12. Sukatskas Yu.I., Gechyauskas S.I., Alekseyunas A.A., Baleishis S.A., Bondarenko V.M., Order of the Red Banner Institute of Physics and Semiconductors, Academy of Sciences of the Lithuanian SSR, *Ustroistvo dlya kontrolya i regulirovaniya temperatury* (Device for temperature control), Russian Federation, Pat. 843030.
-

Measuring Mechanical Strains and Stresses by Semiconductor Gage Elements

I. G. Protsenko, Yu. A. Brusentsov

Tambov State Technical University, Tambov

Key words and phrases: bandgap; carrier concentration; charge carrier mobility; strain gages.

Abstract: The existing measuring devices of mechanical stresses have been studied. The factors affecting the sensitivity indications of tensor resistive sensitive elements based on the MIS structure (metal–insulator–semiconductor) have been analyzed. Calculation of output signal for tensor resistive transducer has implemented. The options to modernize the measuring elements to improve the sensitivity and speed have been proposed.

© И. Г. Проценко, Ю. А. Брусенцов, 2014

Статья поступила в редакцию 12.06.2013 г.