

Надежность автомобильных электронных компонентов в условиях воздействия знакопеременных нагрузок

© С.А. Адарчин¹, В.Г. Косушкин¹, Е.Н. Адарчина²

¹ Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

² ОАО «КНИИТМУ», Калуга, 248000, Россия

Обобщенный закон Гука для кремниевого монокристаллического чувствительного элемента датчиков давления автомобильной электроники показал, что при напряжениях, возникающих в чувствительных элементах датчиков в условиях реальной эксплуатации двигателей автомобилей, могут образовываться дефекты кристаллической решетки, приводящие к гистерезису свойств приборов. Установлено, что экспериментальные данные по частотному распределению величины гистерезиса электрофизических параметров датчиков могут быть описаны законом нормального распределения случайных величин. Предложена математическая модель возникновения и изменения гистерезиса в упругих элементах датчиков микроэлектромеханических структур, используемых в автомобильной электронике. Модель построена с использованием метода полиномиальной регрессии экспериментальных данных и позволяет определять надежность промышленно выпускаемых датчиков. Показано, что для снижения величины температурного гистерезиса выходного сигнала интегральных датчиков давления необходимо устранить причины возникновения упругих механических напряжений в их структурах. Оптимизация технологического процесса изготовления датчиков (изменение технологии формирования отверстий в стекле, на которое крепилась мембрана) позволила снизить величину гистерезиса выходного сигнала датчиков до 0,01 мВ вместо 0,07 мВ по базовой технологии.

Ключевые слова: датчики давления, автомобильная электроника, дефекты и гистерезис параметров, микроэлектромеханическая структура, интегральная микросхема, надежность, дислокации.

Введение. В конъюнктуре рынка автомобильной электроники датчики физических величин представляют важнейший сегмент, ежегодные объемы которого оцениваются в миллиарды долларов и характеризуются устойчивым ростом [1, 2].

Одним из основных требований к любому типу автомобильных датчиков является их высокая надежность, которая определяется значениями вероятности безотказной работы до 0,99 и длительностью ресурса до 50...100 тыс. ч.

Из нашего практического опыта и теоретических расчетов [3] известно, что надежность автомобильных датчиков в значительной мере определяется их защищенностью от возникновения механических напряжений в их структурах. Показано, что около 50 % отказов в электронных компонентах этой группы изделий вызвано механическими воздействиями, возникающими в процессе производства, ис-

пытаний и эксплуатации [4–8]. Особое значение имеет обеспечение надлежащей защиты от механических воздействий основного элемента датчиков — полупроводниковых структур чувствительных элементов.

Вопросам минимизации механических нагрузок на изделия автомобильной электроники в настоящее время уделяется особое внимание. Остаточные механические напряжения после проведения операций сборки иногда достигают 40 % уровня разрушающего напряжения для полупроводникового кристалла [4, 5] и зачастую превышают пороговое значение уровня дефектообразования. В связи с этим еще на этапе разработки конструкции изделия и выбора технологии необходимо провести оценку возможного уровня напряжений. Так, значение механических напряжений в объеме полупроводниковых структур является совокупностью напряжений, возникающих на различных стадиях производства — от выращивания слитка монокристаллического кремния до температурных и механических испытаний готовой продукции. При воздействии термических и структурных механических напряжений в каждом из конструктивных элементов и на границе их контактирования происходят различного рода структурные изменения материала, что в итоге вызывает определенные изменения параметров компонентов, входящих в состав полупроводникового кристалла чувствительного элемента: резисторов, диодов, биполярных транзисторов, полевых транзисторов, диодов Шоттки, туннельных диодов и т. п.

Целью работы являлось установление механизмов деградации интегральных чувствительных элементов автомобильных датчиков, а также разработка методик, позволяющих определять изменение свойств полупроводниковых структур под влиянием механических напряжений, возникающих в процессе их производства и эксплуатации.

Упругие напряжения в полупроводниковых приборах. Связь электрических и механических свойств полупроводников определяют два основных явления: пьезоэффект и деформационный эффект. Пьезоэффект характерен только для тех кристаллов, которые не обладают центром инверсии. Деформационный же эффект имеет место во всех полупроводниках и связан с взаимодействием электронов с кристаллической решеткой. Физической причиной деформационного эффекта является смещение энергетических уровней при деформации и связанное с этим изменение спектра носителей тока.

Кристаллическая решетка большинства полупроводников обладает кубической симметрией, и если полупроводник подвергнуть произвольной деформации, то его симметрия в общем случае понижается. Это приводит к смещению энергетических уровней, к пере-

распределению носителей тока между ними и к изменению электрических характеристик полупроводника.

Так, в кремнии зона проводимости имеет шесть эквивалентных минимумов Δ , расположенных в направлениях $[100]$, $[010]$, $[001]$, $[\bar{1}00]$, $[0\bar{1}0]$, $[00\bar{1}]$. В недеформированном полупроводнике эти минимумы находятся при $k = 0,8k_{\max}$, где k — волновой вектор электрона; $|k_{\max}| = 2\pi/a_0$ (a_0 — постоянная решетки).

Валентная зона в кремнии имеет максимум при $k = 0$. В вершине валентной зоны имеет место двукратное вырождение по энергии. Кроме того, существует еще одна ветвь валентной зоны, которая смещается вниз за счет спин-орбитального взаимодействия. Для кремния величина этого смещения составляет 0,04 эВ [8].

Для нахождения спектра электронов в деформированной структуре можно использовать теорию возмущений. Энергия электрона в недеформированной структуре в n -зоне является функцией волнового вектора $E_0^{(n)}(k)$. В деформированной структуре энергия также оказывается функцией деформации $E_0^{(n)}(k, \varepsilon_{ik})$. Изменение энергии по теории возмущений можно представить в виде

$$\Delta E^{(n)}(k, \varepsilon_{ik}) = E^{(n)}(k, \varepsilon_{ik}) - E_0^{(n)}(k) = \sum_{i,j} D_{ij}^{(n)} \varepsilon_{ij}, \quad (1)$$

где $D_{ij}^{(n)}$ — константы деформационного потенциала; ε_{ij} — компоненты тензора коэффициента упругости.

Число компонент тензора $D_{ij}^{(n)}$, отличных от нуля, определяется симметрией полупроводника и соответствующего минимума, смещение которого рассматривается.

Будем считать, что при деформации каждый экстремум зоны проводимости смещается как единое целое. Величина этого смещения в системе координат, совпадающей с главными осями тензора $D_{ij}^{(n)}$, будет определяться как

$$\Delta E(\varepsilon) = D_{11}\varepsilon_{11} + D_{22}\varepsilon_{22} + D_{33}\varepsilon_{33}. \quad (2)$$

Если принять обозначения $D_{11} = D_{22} = \theta_d$, $D_{33} - D_{11} = \theta_u$ и через них выразить смещение:

$$\Delta E(\varepsilon) = \theta_d (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}) + \theta_u \varepsilon_{33}, \quad (3)$$

то будет ясен физический смысл констант θ_d и θ_u . Первая из них характеризует влияние всестороннего сжатия, а вторая — влияние одноосной деформации.

Для минимума зоны проводимости кремния вдоль направления [100] смещение под действием деформации может быть записано как

$$\Delta E_1[100] = \theta_d \Delta + \theta_u \varepsilon_{11}, \quad (4)$$

где $\Delta = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}$ — изменение объема при деформации. Для кремния $\theta_u = 8,6$ эВ, $\theta_d = 5,4$ эВ [8, 9].

Аналогичными формуле (4) выражениями могут быть записаны смещения остальных минимумов зоны проводимости.

Полученные по методике [10] значения механических температурных напряжений для кремниевых структур чувствительных элементов $\approx 5 \cdot 10^6$ Па. Проведенные с учетом этих значений расчеты показали, что положение уровней зоны проводимости изменилось на величину $\approx 4,5 \cdot 10^{-4}$ эВ.

Изменение уровней в валентной зоне под действием деформации носит более сложный характер, так как вершина валентной зоны в точке $k = 0$ имеет вырождение.

В недеформированной полупроводниковой структуре энергия дырок описывается следующим образом:

$$E_{1,2}(k) = Ak^2 \pm \sqrt{\varepsilon_k} \quad (5)$$

Здесь

$$\varepsilon_k = B^2 k^4 + C^2 (k_1^2 k_2^2 + k_1^2 k_3^2 + k_2^2 k_3^2)$$

(A, B, C — параметры валентной зоны, характеризующие эффективные массы дырок); знак «+» соответствует зоне легких дырок, а знак «-» — тяжелых.

При наличии в структуре механического напряжения энергия дырок рассчитывается по формуле

$$E_{1,2}(k\varepsilon) = Ak^2 + a\Delta \pm \sqrt{\varepsilon_k + \varepsilon_\varepsilon + \varepsilon_{\varepsilon k}}. \quad (6)$$

Здесь

$$\varepsilon_\varepsilon = \frac{b^2}{2} [(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22})^2 + (\varepsilon_{22} - \varepsilon_{33})^2 + (\varepsilon_{33} - \varepsilon_{11})^2] + d^2 (\varepsilon_{12}^2 + \varepsilon_{13}^2 + \varepsilon_{23}^2);$$

$$\varepsilon_{\varepsilon k} = Bb \left[3(k_1^2 \varepsilon_{11} + k_2^2 \varepsilon_{22} + k_3^2 \varepsilon_{33}) - k^2 \Delta \right] + 2Dd (k_1 k_2 \varepsilon_{12} + k_1 k_3 \varepsilon_{13} + k_2 k_3 \varepsilon_{23})$$

(a — константа деформационного потенциала валентной зоны, характеризующая ее смещение при деформации; b, d — константы деформационного потенциала валентной зоны, характеризующие расщепление зон под воздействием деформации); D — приведенная константа деформационного потенциала.

Произвольная деформация приводит к смещению и расщеплению зоны, которые можно рассчитать по формуле

$$\Delta E_v = a\Delta \pm \sqrt{\varepsilon_\varepsilon}. \quad (7)$$

Параметр a для кремния равен 6,33 эВ [8, 9].

Расчеты показали, что величина смещения валентной зоны для рассматриваемых кремниевых структур датчиков $\approx 6,5 \cdot 10^{-3}$ эВ.

Основополагающим параметром для всех полупроводниковых материалов является *ширина запрещенной зоны*. Под действием деформации ширина запрещенной зоны также претерпевает изменения. Это обусловлено смещением дна зоны проводимости и потолка валентной зоны под действием деформации. Расщепление краев зоны проводимости и валентной зоны приводит к тому, что носители тока перераспределяются между экстремумами: электроны переходят в те минимумы, которые оказываются нижними, а верхние минимумы обедняются, дырки переходят в ту зону, которая оказывается выше. В проводимости участвуют только те электроны, которые находятся в самом нижнем экстремуме, и те дырки, которые находятся в верхней зоне. В этом случае изменение ширины запрещенной зоны ΔE_g можно представить так:

$$\Delta E_g = \Delta E_c - \Delta E_v, \quad (8)$$

где ΔE_c — изменение уровня дна зоны проводимости; ΔE_v — изменение уровня потолка зоны проводимости.

Для исследуемой кремниевой структуры расчетное значение $\Delta E_g \approx -6 \cdot 10^{-3}$ эВ. Следует отметить, что любой вид напряженного состояния кремния приводит к уменьшению ширины запрещенной зоны.

Для указанного изменения ширины запрещенной зоны эффекты в полупроводнике в основном связаны с изменением эффективной массы, времени жизни и подвижности носителей тока.

Подвижность носителя тока можно представить как

$$\mu = \tau e / m, \quad (9)$$

где τ — время релаксации; e — заряд электрона; m — эффективная масса носителя тока.

Поскольку считается, что время релаксации зависит от наличия в материале механических напряжений, то изменение подвижности обычно связывают с изменением массы носителя тока. Для нахождения изменения массы носителей в деформированной структуре следует учи-

тывать, что существуют массы носителей тока вдоль оси эллипсоида постоянной энергии m_{\parallel} и перпендикулярно ей m_{\perp} . В соответствии с этим имеются разные подвижности: вдоль оси μ_{\parallel} и перпендикулярно оси μ_{\perp} . Перераспределение носителей между уровнями при деформации приводит к изменению вклада этих двух компонент в общую подвижность по отношению к недеформированной структуре.

Изменение подвижности электронов можно представить следующим образом:

$$\frac{\mu_{n\varepsilon}}{\mu_{n0}} = \frac{1}{1+2K} \frac{1+2K \exp(\Delta E_c/(kT))}{2[1+2 \exp(\Delta E_c/(kT))]}, \quad (10)$$

где $K = \mu_{\perp} / \mu_{\parallel}$ — фактор анизотропии подвижности; $\mu_{n\varepsilon}$ — подвижность электронов при воздействии деформации; μ_{n0} — подвижность электронов при отсутствии деформации.

Изменение подвижности дырок можно представить выражением

$$\frac{\mu_{p\varepsilon}}{\mu_{p0}} = \frac{m_{\text{л}}^{1/2}}{m_{\text{л}}^{1/2} + m_{\text{т}}^{1/2}} \frac{1 + (m_{\text{т}}/m_{\text{л}})^{1/2} (K')^{3/2} \exp(\Delta E_v/(kT))}{1 + (K')^{3/2} \exp(\Delta E_v/(kT))}, \quad (11)$$

где $K' = m_1/m_2$ — фактор анизотропии массы; $m_{\text{л}}$, $m_{\text{т}}$ — эффективные массы легких и тяжелых дырок в недеформированной структуре; $\mu_{p\varepsilon}$ — подвижность дырок при воздействии деформации; μ_{p0} — подвижность дырок при отсутствии деформации.

Для рассматриваемой кремниевой структуры отношение подвижности при наличии деформации к подвижности в недеформированной структуре составило $\approx 0,49$, т. е. значение подвижности носителей в напряженном состоянии снизилось приблизительно в 2 раза.

Наряду с рассмотренными параметрами полупроводниковых структур одним из важнейших параметров, определяющих чувствительность приборов к деформации, является *концентрация носителей тока*, в частности неосновных. В деформированном полупроводнике перераспределение носителей между уровнями приводит к изменению их концентрации в зоне. Для исследуемой кремниевой структуры p -типа при деформации концентрации p_p и n_p основных и неосновных носителей соответственно будут определены как

$$p_p = N_a + \frac{n_{i0}^2}{N_a} \exp\left(\frac{-\Delta E_g}{kT}\right), \quad (12)$$

$$n_p = \frac{n_{i0}^2}{N_a} \exp\left(\frac{-\Delta E_g}{kT}\right), \quad (13)$$

где N_a — концентрация акцепторов; n_{i0} — концентрация носителей заряда в собственном полупроводнике при отсутствии в нем механических напряжений; T — температура, при которой рассматривается полупроводниковая структура; k — постоянная Больцмана.

Если концентрация акцепторов достаточно велика, т. е. $N_a \geq n_i$, то деформация оказывает незначительное влияние на концентрацию p_p основных носителей, однако концентрация n_p неосновных носителей может изменяться очень сильно. Из выражений (12) и (13) видно, что, если обозначить через n_{p0} концентрацию носителей тока в полупроводнике при отсутствии деформации, имеем изменение концентрации неосновных носителей:

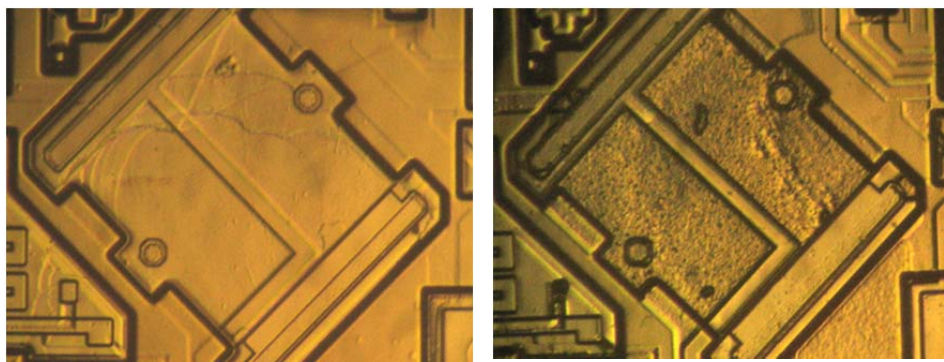
$$\frac{n_p}{n_{p0}} = \exp\left(\frac{-\Delta E_g}{kT}\right) \approx 0,8.$$

Влияние знакопеременных нагрузок на фактические свойства изделий автомобильной электроники. Полученные ранее значения изменения основных свойств полупроводниковых элементов можно связать с деградацией их структур. Согласно [4, 8, 9] изменение электрофизических параметров полупроводников при воздействии напряжений происходит в результате возникновения в них дислокаций, которые могут оказывать прямое или косвенное влияние. Прямое влияние дислокаций объясняется возникновением в запрещенной зоне электронных состояний, что приводит к появлению новых энергетических уровней и изменению ширины запрещенной зоны [11]. В этом случае дислокации в полупроводнике оказывают акцепторное или донорное действие. Косвенное влияние дислокаций объясняется тем, что они являются местами притяжения точечных дефектов и примесных атомов.

В связи с вышесказанным металлографическим исследованиям были подвергнуты образцы полупроводниковых чувствительных элементов с разным уровнем механических напряжений, а именно кристаллы, не подвергнутые финишной сборке, и кристаллы, прошедшие все стадии производства. Для выявления дислокаций и определения их плотности был использован метод селективного травления. В качестве селективного травителя использовался состав $2\text{HF}:\text{Cr}_3\text{O}$. Травители на основе Cr_3O обладают меньшей скоростью реакции, чем кислотные, однако позволяют контролировать различные виды дефектов. Также выбор указанного травителя обусловлен тем, что процесс проводится при комнатной температуре. Это позволяет считать, что в ходе исследования не вносятся дополнительные нарушения в кристаллическую решетку материала и плотность дис-

локаций в нем не изменяется. Процесс травления образцов проводился в течение 3...5 мин.

Количество и характер дефектов, выявленных на образцах, определяли на исследовательском металлографическом микроскопе марки Е при увеличении $500\times$. Полученная картина распределения дислокаций представлена на рисунке.



2 мкм
└───┘

a

б

Чувствительный элемент полупроводниковой структуры:

a — не подвергнутой сборочным операциям; *б* — после сборочных операций

Определенная плотность дислокаций для полупроводниковой структуры, не подвергнутой сборочным операциям, $\approx 10 \text{ см}^{-2}$, а для структуры, участвующей в сборке датчика, $\approx 2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$.

Таким образом, с помощью разработанной методики и с использованием результатов нашей предыдущей работы [10] были определены изменения основных электрофизических параметров полупроводниковых структур чувствительных элементов. Так, смещение уровней зоны проводимости $\approx 4,5 \cdot 10^{-4} \text{ эВ}$, смещение уровней валентной зоны $\approx 6,5 \cdot 10^{-3} \text{ эВ}$, изменение ширины запрещенной зоны $\approx -6 \cdot 10^{-3} \text{ эВ}$, уменьшение подвижности носителей до $\approx 2 \cdot 10^2 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, изменение концентрации неосновных носителей составило 0,8 раза. Опытным путем установлено, что одной из причин изменения параметров полупроводников является образование в них дислокаций под действием механических напряжений. Так, для кристаллов с механическими напряжениями плотность дислокаций $\approx 2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$, в то время как для кристаллов, свободных от механических напряжений, эта величина составила $\approx 10 \text{ см}^{-2}$.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Сысоева С.А. Взгляд на современный рынок автомобильных датчиков. Основные тенденции и важнейшие рыночные фигуры. *Компоненты и технологии*, 2006, № 7, с. 18–25.
- [2] Иукович Э.В. Современные датчики и тенденции их развития. *Электронные компоненты*, 2003, № 2, с. 23–24.
- [3] Адарчин С.А., Косушкин В.Г., Максимова Е.А. Механизмы деградации микроэлектромеханических структур датчиков давления. *Тр. МГТУ им. Н.Э. Баумана № 587 «Методы исследования и проектирования сложных технических систем»*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004, с. 48–56.
- [4] Сергеев В.С., Кузнецов О.А., Захаров Н.П., Лetyгин В.А. *Напряжения и деформации в элементах микросхем*. Москва, Радио и связь, 1987, 386 с.
- [5] Мужиченко О.Г., Плис Н. Термомеханические напряжения в сборочных микроузлах. *Электроника: Наука, технология, бизнес*, 2000, № 6, с. 63–64.
- [6] Чернышев А.А. *Основы надежности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем*. Москва, Радио и связь, 1988, 356 с.
- [7] Зи С.М., ред. *Технология СБИС*. В 2 кн. Москва, Мир, 1986. Кн. 2, 453 с.
- [8] Полякова А.Л. *Деформация полупроводников и полупроводниковых приборов*. Москва, Энергия, 1979, 168 с.
- [9] Концевой Ю.А., Литвинов Ю.М., Фаттахов Э.А. *Пластичность и прочность полупроводниковых материалов и структур*. Москва, Радио и связь, 1982, 240 с.
- [10] Адарчин С.А., Косушкин В.Г., Максимова Е.А. Методика расчета величин упругих напряжений в микроэлектромеханических структурах датчиков давления. *Тр. МГТУ им. Н.Э. Баумана № 587 «Методы исследования и проектирования сложных технических систем»*. Москва, 2004, с. 37–47.
- [11] Осипьян Ю.А., ред. *Электронные свойства дислокаций в полупроводниках*. Москва, Эдиториал УРСС, 2000, 320 с.

Статья поступила в редакцию 03.10.2014

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Адарчин С.А., Косушкин В.Г., Адарчина Е.Н. Надежность автомобильных электронных компонентов в условиях воздействия знакопеременных нагрузок. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2014, вып. 7.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/eleng/1316.html>

Адарчин Сергей Александрович окончил Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2000 г. Канд. техн. наук, доцент, заместитель заведующего кафедрой «Материаловедение» Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 30 публикаций по технологии электроники и надежности электронных приборов. Область научных интересов: физика, электроника, надежность, микро- и нанотехнологии. e-mail: adarchin@rambler.ru.

Косушкин Виктор Григорьевич окончил Ленинградский технологический институт им. Ленсовета в 1972 г. Д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Материаловедение» Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 публикаций. Область научных интересов: рост монокристаллов, инновационная деятельность. e-mail: kosushkin@gmail.com

Адарчина Евгения Николаевна окончила КГПУ им. К.Э. Циолковского. Инженер ОАО «КНИИТМУ» (Калуга). Автор 3 публикаций. Область научных интересов: электроника, надежность, физика полупроводников. e-mail: tarchenkova@rambler.ru

Reliability of automotive electronic components under conditions of alternating loads

© S.A. Adarchin¹, V.G. Kosushkin¹, E.N. Adarchina²

¹ Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University, Kaluga, 248000, Russia
²JSC «KNIITMU», Kaluga, 248000, Russia

Generalized Hooke's law for a silicon single-crystal sensitive element of pressure sensors of automobile electronics showed that at a tension arising in sensitive elements of sensors under conditions of real operation of car engines, there can be defects in crystal lattice which cause a hysteresis of the device properties. It is established that experimental data on frequency distribution of hysteresis size of the sensors electrophysical parameters can be described by the normal law of distribution of random variables. We offer a mathematical model of hysteresis emergence and change in sensor elastic elements of mikroelektromekhanicheskikh structures used in automobile electronics. The model was constructed using a method of polynomial regression of experimental data and allows to define reliability of commercially available sensors. It is shown that in order to reduce the magnitude of the temperature hysteresis of the output signal in integrated pressure sensors, it is necessary to eliminate the causes of elastic stresses in their structures. Optimization of sensors technological process (changing technology of holes formation in the glass, upon which the membrane is attached) allowed to reduce the hysteresis sensor output to 0.01 mV instead of 0.07 mV for base technology.

Keywords: pressure sensors, automotive electronics, defects and hysteresis of parameters, MEMS, integrated chip, reliability, dislocations.

REFERENCES

- [1] Sysoyeva S.A. *Komponenty i tekhnologii — Components and technologies*, 2006, no. 7, pp. 18–25.
- [2] Iukovich E.V. *Elektronnyye komponenty — Electronic components*, 2003, no. 2, pp. 23–24.
- [3] Adarchin S.A., Kosushkin V.G., Maksimova E.A. Mekhanizmy degradatsii mikroelektromekhanicheskikh struktur datchikov davleniya [Mechanisms of degradation of microelectromechanical structures of pressure sensors]. *Trudy MGTU im. N.E. Baumana no. 587 "Metody issledovaniya i proektirovaniya slozhnykh tekhnicheskikh system"* [Proceedings of the Bauman MSTU no. 587 "Methods of research and design of complex technical systems"]. Moscow, BMSTU Publ., 2004, pp. 48–56.
- [4] Sergeyev V.S., Kuznetsov O.A., Zakharov N.P., Letyagin V.A. *Napryazheniya i deformatsii v elementakh mikroskhem* [Tension and deformations in chip elements]. Moscow, Radio i svyaz, 1987, 386 p.
- [5] Muzhichenko O.G., Plis N. *Elektronika: Nauka, tekhnologiya, biznes — Electronics: Science, Technology, Business*, 2000, no. 6, pp. 63–64.
- [6] Chernyshev A.A. *Osnovy nadezhnosti poluprovodnikovyykh priborov i integralnykh mikroskhem* [Bases of reliability of semiconductor devices and integrated chips]. Moscow, Radio i svyaz, 1988, 356 p.
- [7] Sze S.M., ed. *VLSI Technology*. McGraw-Hill, 1983.
- [8] Polyakova A.L. *Deformatsiya poluprovodnikov i poluprovodnikovyykh priborov* [Deformation of semiconductors and semiconductor devices]. Moscow, Energiya, 1979, 168 p.

- [9] Kontsevoi Yu.A., Litvinov Yu.M., Fattakhov E.A. *Plastichnost' i prochnost' poluprovodnikovyykh materialov i struktur* [Plasticity and durability of semiconductor materials and structures]. Moscow, Radio i svyaz, 1982, 240 p.
- [10] Adarchin S.A., Kosushkin V.G., Maksimova E.A. Metodika rascheta velichin uprugikh napryazheniy v mikromekhanicheskikh strukturakh datchikov davleniya [Calculation method of elastic tension values in MEMS of pressure sensors]. *Trudy MGTU im. N.E. Baumana no. 587 "Metody issledovaniya i proektirovaniya slozhnykh tekhnicheskikh sistem"* [Proceedings of the Bauman MSTU no. 587 "Methods of research and design of complex technical systems"]. Moscow, BMSTU Publ., 2004, pp. 37–47.
- [11] Osipyany Yu.A., ed. *Elektronnyye svoystva dislokatsiy v poluprovodnikakh* [Electronic properties of dislocations in semiconductors]. Moscow, Editorial of URSS, 2000, 320 p.

Adarchin S.A. (b. 1976) graduated from Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University in 2000. Ph.D., Assoc. Professor, Deputy Head of the Materials Sciences Department at Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. Author of 30 publications on electronics technology and reliability of electronic devices. Research interests: physics, electronics, reliability, micro- and nanotechnologies. e-mail: adarchin@rambler.ru.

Kosushkin V.G. graduated from the Engineering Physicochemical faculty of Leningrad Technological Institute in 1972. Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Materials Science Department of Bauman Moscow State Technical University (Kaluga Branch). Author of more than 100 publications. Specializes in the field of growth of semiconductor monocrystals, arranging of innovation activity in institutes of higher education. e-mail: kosushkin@gmail.com

Adarchina E.N. (b. 1977) graduated from KGPU named after K.E. Tsiolkovsky. She is an engineer at "Kaluga Research Institute of Telemechanical Devices, JSC", author of 3 publications. Research interests: electronics, reliability, physics of semiconductors. e-mail: tarchenkova@rambler.ru