

УДК 681.518+621.38

DOI: 10.46548/21vek-2021-1055-0004

УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ МАТЕРИАЛОВ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ ДАТЧИКОВ

© 2021

Михайлов Петр Григорьевич, доктор технических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник «Центра сопровождения научных исследований»
Пензенский государственный технологический университет
(440039, Россия, Пенза, проезд Байдукова/улица Гагарина, 1А/11, e-mail: pit_mix@mail.ru)

Базарбай Лашын, PhD, докторантка
Института автоматизации и информационных технологий
Бактыбаев Мурат Кыргызбаевич, кандидат физико-математических наук,
ассоциированный профессор Института автоматизации и информационных технологий

НАО КазННТУ имени К.И. Сатпаева
(050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22,
e-mails: lashyn_7754@mail.ru, m.baktybayev@satbayev.university)

Аннотация. Материалы, их свойства и возможности составляют основу развития всех отраслей науки и технологий. Характеристики материалов полностью определяют основные электрофизические свойства микроэлектронных приборов и в целом приборостроения. В указанных приложениях требуются материалы высочайшей чистоты и химической стойкости. В многостадийном технологическом процессе изготовления полупроводниковых приборов используемые материалы не должны деградировать со временем. В процессе проведения операций по формированию структуры полупроводниковых элементов и узлов микроприборов используются различные разномасштабные технологические операции и переходы. К ним относятся операции напыления наноструктурных металлических пленок из высокопроводящих и резистивных сплавов, формирование изоляционных и защитных неметаллических пленок, операции анизотропного и изотропного травления, модификации материалов с использованием ионного легирования и прочих операций. В статье описаны варианты модификации материалов микроэлектронных датчиков с целью улучшения их метрологических характеристик: расширения рабочего температурного диапазона, увеличения ресурса, и проч. Предложены методы, внедренные в существующие технологии и конструкции, которые отвечают заявленным требованиям.

Ключевые слова: датчик, микроэлектронный, материал, ионы, полупроводник.

CONTROL OF ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF MATERIALS OF MICROELECTRONIC SENSORS

© 2021

Mikhailov Petr Grigorievich, doctor of Technical Sciences, professor,
leading researcher at the Center for Support of Scientific Research
Penza State Technological University

(440039, Russia, Penza, Baidukova proezd / Gagarina street, 1A / 11 e-mail: pit_mix@mail.ru)

Bazarbai Lashyn, PhD doctoral student of the Institute of Automation and Information Technologies
Baktybaev Murat Kyrgyzbaevich, candidate of Physical and Mathematical Sciences, associate professor of the
Institute of Automation and Information Technologies

NAO KazNRTU named after K.I. Satpayev
(050013, Republic of Kazakhstan, Almaty, Satpayev st., 22,
e-mails: lashyn_7754@mail.ru, m.baktybayev@satbayev.university)

Abstract. Materials, their properties and capabilities, are the main and most important indicators in all branches of science, technology, construction of various objects. The properties of materials are of particular importance in microelectronics and instrument making. This is primarily due to the fact that the materials in them determine the basic electrophysical properties of the products they produce. In these industries, materials of the highest purity and chemical resistance are required. In a multistage technological process of manufacturing microcircuits and semiconductor devices, the materials used should not degrade in their properties and characteristics. In the process of carrying out operations to form the structure of semiconductor elements and units of microdevices, various different-scale technological operations and transitions are used. These include the operations of spraying nanostructured metal films from highly conductive and resistive alloys, the formation of insulating and protective non-metallic films, operations of anisotropic and isotropic etching, modification of materials using ion doping and other operations. The article describes the options for modifying the materials of microelectronic sensors in order to expand their metrological characteristics: expanding the temperature range, increasing the resource, etc. In addition, methods are given that have been implemented in existing technologies and designs that have met the stated requirements.

Keywords: sensor, microelectronic, material, ions, semiconductor.

Введение. Микроэлектронные датчики (МЭД) обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными датчиками (малые габариты, повышенная чувствительность, групповые процессы изготовления, невысокая стоимость и проч.), что позволяет широко использовать их в различных отраслях науки, техники и в быту. Но, наряду с несомненными преимуществами, им присущи и определенные недостатки – сравнительно узкий температурный диапазон работы, температурный и временной дрейфы характеристик, хрупкость чувствительного элемента и проч., что сдерживает их внедрение в такие важные отрасли, как авиация, ракетно-космическая техника, ядерная и тепловая энергетика [1 - 3]. Эти ограничения объясняются, в первую очередь, свойствами применяемых в МЭД полупроводниковых материалов и структур (шириной запрещенной зоны, типом изоляции сформированных в полупроводнике элементов и структур, уровнем легирования и т.д.). Использование широкозонных полупроводников и полупроводниковых соединений (алмаза, карбида кремния, арсенида галлия) пока еще проблематично из-за значительных технологических трудностей и дороговизны исходного материала. Поэтому основным способом повышения стабильности и устойчивости МЭД к дестабилизирующим факторам является обеспечение возможности управления свойствами материала полупроводникового чувствительного элемента (ПЧЭ) [4 - 6].

Целью исследований является нахождение механизмов и методик управления электро-физическими характеристиками (ЭФХ) элементов и структур ПЧЭ для их оптимизации.

Как показали проведенные исследования, управления свойствами материалов МЭД можно добиться следующими основными методами [7, 8].

1. Модификацией поверхностей и объемных областей ПЧЭ.
2. Формированием самоорганизующихся сенсорных структур.
3. Использованием динамических режимов работы ПЧЭ.

Модификация предполагает формирование на поверхности или в объеме ПЧЭ зон элементов (диэлектрических пленок, геттеров, поликристаллических или аморфных областей и т.д.), имеющих отличные от основного материала физико-механические свойства (твердость, подвижность носителей и проч.). Формирование самоорганизующихся структур заключается во введении на каждом физическом уровне (зерно, кристалл, тензоэлемент) локальных обратных связей, обеспечивающих стабилизацию характеристик ПЧЭ [5, 6]. Функционирование ПЧЭ в динамическом режиме (автоколебания) позволяет значительно уменьшить погрешности и дрейф характеристик МЭД.

Следует отметить, что кремний с такими малыми концентрациями носителей заряда технологически очень трудно получить. Так, метод зонной плавки позволяет получить примесную концентрация $\approx 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Для производства же высокочувствительных фото-

приемников, датчиков радиации, магнитодиодов и проч., требуется высокочистый кремний с концентрацией примесей не более $10^{10} \dots 10^{11} \text{ см}^{-3}$ [9, 10]. Для получения высокоомных кремния и арсенида галлия используют оригинальный метод компенсации, путем легирования примесью противоположного типа проводимости. Так, кремниевые (Si) слитки, выращиваемые по методу Чохральского, и имеющие изначально электронный тип проводимости, легируют акцепторной примесью – бором, имеющим уровень $\Delta E_a = 0,045$ эВ, отсчитываемый от вершины валентной зоны. Концентрация компенсирующей примеси определяется, исходя из замеров объемного сопротивления слитка кремния. Зонная диаграмма самокомпенсированного кремния приведена на рисунке 1.

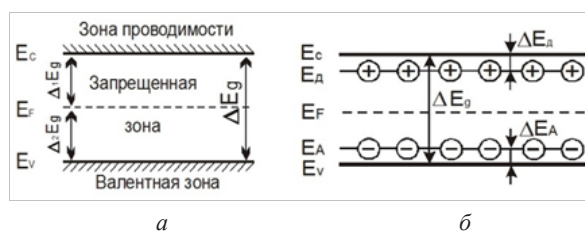


Рисунок 1 – Зонные модели кремния: с собственной проводимостью (а) и компенсированного (б), у которого $\Delta E_d \approx \Delta E_a$ и $N_d \approx N_a$

Получение самокомпенсированного кремния вышеописанным методом (мелкие доноры компенсируются мелкими акцепторами) имеет один существенный недостаток, заключающийся в необходимости точного соблюдения технологических режимов и в малой управляемости самого процесса. Более эффективной является компенсация остаточной примеси глубокими донорами или акцепторами. Такой метод компенсации имеет то преимущество, что избыточная глубокая примесь не влияет на электропроводность полупроводника и ее избыток не приводит к перекомпенсации, как это бывает в случае мелкозалегающей (мелкой) примеси. Таким образом, сравнительно просто технологически получить высокоомный полупроводник с проводимостью, близкой к собственной (его еще называют *i* – типным, например *i-Si*) [8].

Глубокими примесями для Si являются Au, Mn, Co и ряд других (рис. 2).

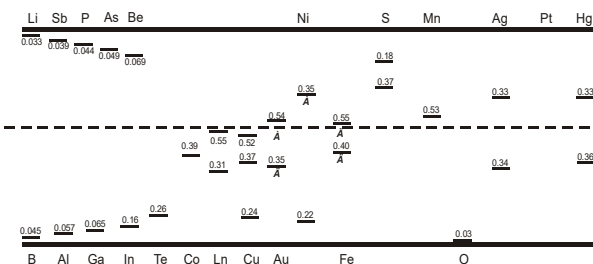


Рисунок 2 – Расположение донорных и акцепторных уровней в кремнии для различных легирующих элементов

Особенно велико значение указанного метода получения компенсированного материала для GaAs, который является перспективным материалом для высокотемпературных МЭД. Дело в том, что соб-

ственная концентрация носителей заряда у него очень мала $\approx 10^8 \text{ см}^{-3}$ (удельное объемное сопротивление $\approx 10^9 \text{ Ом}\cdot\text{см}$), поэтому получить такой материал глубокой очисткой практически невозможно. Используя же компенсацию глубоким акцептором (Cr), имеющим уровень 0,70 эВ (близко к середине запрещенной зоны) получают практически полную компенсацию мелких донорных уровней, в результате чего может быть получен полуизолирующий *i-GaAs* с ρ_s вплоть до $10^{18} \text{ Ом}\cdot\text{см}$.

Материалы и результаты исследований. При целенаправленном введении в полупроводник легирующих примесей (модификация полупроводника) или наличии в материале разного рода дефектов, дислокаций в запрещенной зоне образуются так называемые примесные уровни (мелкие и глубокие уровни), которые также изменяют свои свойства под действием деформации. Это изменение в основном сводится к смещению примесных уровней и изменению энергии ионизации, причем влияние второй составляющей гораздо меньше чем первой. Так, для мелких донорных и акцепторных примесей изменение энергии ионизации в *Ge* (аналогично и для *Si*) составляет 10^{-13} эВ/Па , тогда как, изменение ширины запрещенной зоны составляет, т.е. на два порядка меньше.

Более сложно ведут себя глубокие уровни в полупроводнике под действием деформации, но их влияние также мало по сравнению с явлением изменения ширины запрещенной зоны. Так, согласно [10, 11], для золота, создающего в *Si* несколько глубоких уровней, энергия ионизации при всестороннем сжатии представлена в таблице 1, где *D* – донорная, *A* – акцепторная примеси. Перераспределение носителей заряда (НЗ) в деформированном полупроводнике между смещенными уровнями, смещение примесных центров приводят в общем случае к изменению таких важных для полупроводника ЭФХ, как подвижность и время жизни НЗ.

Таблица 1 – Энергия ионизации при всестороннем сжатии

| Ширина запрещенной зоны E_g эВ | Чувствительность ширины запрещенной зоны к всестороннему сжатию $\frac{dE_g}{dP} \cdot 10^{11} \text{ эВ/Па}$ |
|----------------------------------|---|
| 0,35 (D) | 0,05 |
| 0,54 (D) | -1,5 |
| 0,62 (A) | -3,0 |

Рассмотрим влияние этих изменений. Подвижность НЗ выражается через массу и время релаксации носителей заряда как

$$\mu = \tau \cdot l/m \quad (1)$$

Обычно считают (по экспериментальным данным), что τ не зависит от деформации, поэтому изменения μ связаны с изменением массы НЗ, но, как ранее было указано, эти изменения не являются существенными.

При рассмотрении механизмов влияния деформации на ЭФХ полупроводника, можно заметить, что все изменения концентрации, эффективных масс, подвижности и времени жизни НЗ в определенной степени связаны с изменением ширины запрещенной зоны (ΔE_g). Изменения последней зависят от вида напряженно-деформированного состояния полупроводника и, в общем случае, может быть представлено как

$$\Delta E_g = a_g |\sigma|, \quad (2)$$

где a_g – постоянный коэффициент, зависящий от материала полупроводника (эВ/Па); σ – механическое напряжение, Па. Ранее было приведено выражение для всестороннего сжатия: $a_g = -1,5 \cdot 10^{-11} \text{ эВ/Па}$.

Для одноосного напряженного состояния a_g зависит от ориентации прикладываемой нагрузки. Так, для монокристаллического кремния (в круглых скобках значения для растяжения) (*Si*):

$$\begin{aligned} [001] &-7,4 (-3,6) \cdot 10^{-11} \\ [111] &-4,5 (-3,4) \cdot 10^{-11} \\ [110] &-2,1 (-6,7) \cdot 10^{-11} \end{aligned}$$

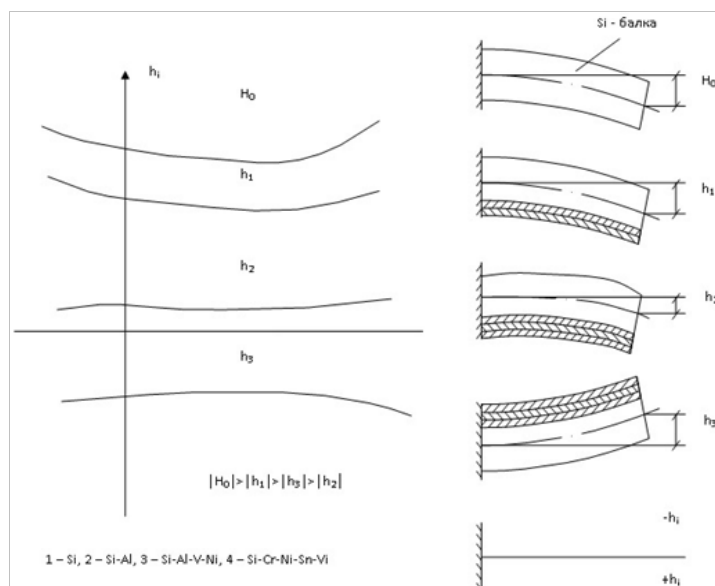


Рисунок 3 – Метод управления уровнем механических напряжений с помощью металлических пленочных композиций (1-Si; 2-Si-Al; 3-Si-Al-V-Ni; 4-Si-Cr-Ni-Sn-Vi; 5-скомпенсированный ЧЭ)

Здесь видно, что максимальная чувствительность у Si наблюдается в направлении $[001]$ для сжатия и $[110]$ – для растяжения. Знак минус у параметра a_g говорит о том, что и сжатия и растяжения приводят к уменьшению ширины запрещенной зоны у Si [12 - 14].

Следует отметить, что при рассмотрении деформационных явлений необходимо учитывать уровень механических напряжений: высокими считаются те, при которых изменение ширины запрещенной зоны существенно превышает температурный потенциал, т.е. при $\Delta E_g > kT$, и малыми, при которых $\Delta E_g \leq kT$. В первом случае большинство эффектов в полупроводниках определяются степенью изменения ширины запрещенной зоны, а во втором эффекты объясняются в основном изменением эффективных масс, времени жизни и подвижности носителей заряда [15-16].

Очень эффективным методом снижения внутренних и тепловых механических напряжений является метод их компенсации с использованием полипленочных структур, формируемых на ЧЭ МЭД (рис. 3) [19].

Заключение. Предложенные методики и технологии управления ЭФХ, позволяют эффективно оптимизировать основные параметры ПЧЭ: параметрическую и временную стабильность которые напрямую зависят от уровня внутренних и наведенных механических напряжений [17 – 19].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Готра З.Ю. Технология микроэлектронных устройств. Справочник / М.: Радио и связь, 1991. – 526 с.
2. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник / М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
3. Поликристаллические полупроводники. Физические свойства и применение / под ред. Г. Харбеке / М.: Мир, 1989.
4. Технология тонких пленок / Справочник в 2-х томах под ред. Мейсэла, т.1. М.: Мир, 1972.
5. Михайлов П.Г., Козин С.А. Интегральный полупроводниковый преобразователь давления // Патент RU 1527526.
6. Петерсен К.Э. Кремний как механический материал. // ТИИР № 5 – 1982. – С. 5-49.
7. Викулин Н.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов / М.: Радио и связь, 1990, 264 с.
8. Модификация и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными потоками / пер. с англ. под ред. Дж. Поути / М. Машиностроение 1987.
9. Сергеев В.С. Напряжения и деформации в элементах микросхем / М.: Радио и связь, 1987.
10. Материалы микроэлектронной техники / под ред. В.М. Андреева / М.: Радиосвязь, 1989 - 350 с.
11. Шаскольская М.П. Кристаллография. / М.: Высшая школа, 1976. – 393 с.
12. P.G. Mikhajlov V.A., Chulkov Yu.N., Slesarev Mathematical Modeling of Combined Sensor Information - Measuring Systems // International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 11, Number 20 (2016) pp. 10332-10337 © Research India Publications, http://www.ripublication.com.
13. Mikhailov P.G., Ozhikenov K.A., Development of Technologies, Methods and Devices of the Functional Diagnostics of Microelectronic Sensors Parts and Components // 2016 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (A PEIE).2016. Vol.I. -pp. 84-90.
14. Михайлов П.Г., Косоголов В.М. Полупроводниковый чувствительный элемент датчика и способ его изготовления // Патент РФ № 1606886.
15. Mikhaylov P.G., Kassimov A.O. Microelectronic Sensors for the Aircraft and Space-Rated Equipment // International Journal of Advanced Biotechnology and Research (IJBR) ISSN 0976-2612, Online ISSN 2278-599X, Vol-8, Issue-4, 2017, pp 152-157 <http://www.bipublication.com>.
16. P. Mikhailov, M. Bayasilova Multi-functional sensors for control systems and monitoring // International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET) Volume 9, Issue 13, December 2018, pp. 959-967, Article ID: IJMET_09_13_101.
17. Mikhailov P.G., Chuvykin B.V., Mikhailov A.P. Questions of control of electrophysical properties of materials and structures of microelectronic sensors // International Multi- Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies FarEastCon 2019.
18. Mikhailov P., Ualiyev Zh. Sensor stability assurance problems and their relationship with the overall problems of providing system performance quality // MATEC Web of Conferences 329, 03032 (2020) <https://doi.org/10.1051/mateconf/202032903032> ICMTE 2020
19. Mikhailov P.G., Chuvykin B.V., Mikhailov A.P. Modeling of dimension chains of pressure control devices // Journal of Physics Conference Series, 2020, 1515(4), 042099

Статья поступила в редакцию 21.06.2021

Статья принята к публикации 15.09.2021