

К. т. н. И. И. РУБЦЕВИЧ, В. Б. ВЫСОЦКИЙ,
Н. С. КОВАЛЬЧУК

Республика Беларусь, г. Минск, Завод «Транзистор»,
Белорусский государственный университет информатики
и радиоэлектроники
E-mail: 7033696@mail.ru

Дата поступления в редакцию
20.05 2009 г.

Оппонент д. т. н. В. Л. КОСТЕНКО
(ОНПУ, г. Одесса)

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ МЕМБРАННЫХ ДАТЧИКОВ

Предложена оптимизированная конструкция газового анализатора с уменьшенным энергопотреблением за счет использования многослойной мембраны.

Быстрое развитие промышленности и транспорта привело в последнее десятилетие к резкому увеличению содержания различных газов-загрязнителей в воздухе. К числу этих газов относятся, прежде всего, СО, углеводороды (метан, пропан, пары бензина), аммиак, оксиды азота, озон. Они не только представляют опасность с экологической точки зрения, но и могут являться причиной техногенных катастроф (взрывов, пожаров, массовых отравлений и т. д.). Поэтому научные исследования и промышленные разработки направлены на создание новых средств защиты и предупреждения аварий на предприятиях. Одним из таких средств является полупроводниковый датчик (сенсор), чувствительный к метану, угарному газу и другим горючим и токсичным газам. Современные полупроводниковые датчики способны обнаруживать в воздухе посторонние газы с концентрацией до 0,0001%, и имеется постоянная тенденция к повышению их чувствительности. Чувствительность датчика к газу может быть определена как отношение сопротивления сенсорного элемента на воздухе в отсутствие газа к его сопротивлению при наличии газа.

Для решения современных задач обеспечения безопасности жизнедеятельности человека и оперативного экологического контроля окружающей среды наиболее перспективными представляются металлооксидные полупроводниковые и термокаталитические сенсоры. Принцип действия металлооксидных полупроводниковых сенсоров основан на изменении проводимости газочувствительного слоя на поверхности полупроводника при химической сорбции различных газов, например газов-доноров (горючих газов, включая метан, пропан, пары бензина, аммиака, СО, сероводород и др.) или газов-акцепторов (озона, оксидов азота, хлора, фтора). Хемосорбция этих примесей приводит к обратимому изменению концентрации носителей заряда в полупроводнике и соответствующим образом изменяет проводимость чувствительного слоя. Для достаточно быстрого протекания химических реакций на поверхности полупроводника — с постоянной времени на уровне несколь-

ких секунд — сенсор нагревают до высокой температуры (от 523 К — для датчиков паров спирта, водорода, до 773 К — для датчиков метана). Для каждого типа газа существует оптимальный температурный диапазон [1, 2].

Таким образом, актуальной задачей остается разработка конструкции и технологии изготовления малогабаритных сенсоров с уменьшенным энергопотреблением, пригодных для применения в переносных и карманных приборах, а также в приборах, длительное время работающих от автономных источников питания.

Теоретический анализ

В настоящее время в технологии изготовления датчиков и микроэлектромеханических систем (МЭМС) одной из основных задач является получение элементов конструкции (мембран, балок) с минимальными механическими напряжениями. Решение этой задачи достигается правильным выбором конструкции сенсора. Датчики мембранных конструкций для нагрева и работы в непрерывном режиме при температуре 720 К потребляют на порядок меньшую мощность, чем классические толсто пленочные сенсоры на основе пористого алюминия толщиной 20—50 мкм [3]. В свою очередь, потребляемая мощность мембранного газового датчика определяется толщиной мембраны, соотношением площади чувствительного слоя и площади мембраны и теплопроводностью материала мембраны [4].

В последнее время нашел широкое применение датчик с многослойной мембраной. Важнейшим элементом его конструкции является мембрана, материалом для которой может служить нитрид кремния или поликристаллический кремний [5]. Мембраны на основе диэлектрической пленки нитрида кремния использовать предпочтительнее, т. к. они обладают хорошими электрическими характеристиками. Пленки нитрида кремния можно использовать и как материал диэлектрической мембраны, и как изолятор для поликристаллической мембраны, и как стойкие маски при химическом и плазменном травлении кремния [6, 7]. Однако, наряду с преимуществами, существуют и технологические трудности формирования пленок нитрида кремния толщиной 0,6—1,0 мкм с минимальным механическим напряжением.

Преимущества многослойной конструкции мембраны, состоящей из последовательных слоев оксида

и нитрида кремния, связаны с тем, что различие коэффициентов температурного расширения этих материалов позволяет компенсировать механические напряжения, возникающие в мембране при температурном ударе, и получить поверхность с минимальными механическими напряжениями площадью в несколько квадратных миллиметров толщиной 1—2 мкм. С другой стороны, увеличение числа слоев приводит к увеличению потребляемой мощности. Поэтому для уменьшения толщины мембраны необходимо разработать технологический процесс осаждения пленки нитрида кремния с минимальным механическим напряжением в рабочем диапазоне температуры сенсора.

Механические напряжения растяжения пленок нитрида кремния, полученных методом химического вакуумного осаждения при пониженном давлении, зависят от режимов нанесения, в первую очередь от температуры осаждения, рабочего давления и состава газовой среды [8]. При стандартных режимах нанесения остаточное напряжение на границе «кремний—нитрид кремния» достигает 1,3 ГПа. Поэтому толщина пленок может достичь всего 0,2—0,3 мкм, причем только при наличии компенсирующего окисного подслоя. Такое высокое механическое напряжение приводит к растрескиванию мембран и балок. Для повышения надежности и стабильности работы мембранных датчиков необходимо увеличить толщину пленки нитрида кремния до 1,0 мкм, сохраняя при этом ненапряженную структуру пленки без окисного подслоя, который ухудшает тепловые характеристики мембраны. В ходе исследований [9] решалась технологическая задача получения пленок нитрида кремния, обладающих минимальным механическим напряжением 170—200 МПа, которые можно использовать в качестве диэлектрических мембран МЭМС, что потребовало существенной оптимизации процесса их получения.

В настоящей работе рассматривается конструкция мембранного датчика на основе нитрида кремния с платиновой металлизацией и диэлектрической пассивацией металлической разводки. Такая конструкция широко используется в производстве датчиков расхода и болометров.

Сложность получения системы с низким механическим напряжением заключается в наличии у платиновой пленки высокого механического напряжения растяжения (порядка 0,6—0,7 ГПа), которое еще и возрастает при различных технологических процессах отжига и пассивации. В связи с этим было предложено компенсировать высокое растягивающее напряжение платиновой пленки как за счет уменьшения напряжения в пленке нитрида кремния, так и за счет достижения напряжения сжатия пассивирующей пленки. Пассивирующее покрытие должно наноситься при невысокой температуре во избежание окисления пленки никеля.

Была исследована зависимость механического напряжения пленок нитрида кремния от параметров технологических процессов их получения с добавками низкотемпературного фосфоросиликатного стекла с минимальным механическим напряжением растяжения. Также был проведен выбор дополнительного слоя

с механическим напряжением сжатия для компенсации механического напряжения мембраны.

Методика эксперимента

Осаждение пленок нитрида кремния осуществлялось методом аммонолиза дихлорсилана (SiH_2Cl_2) в промышленном реакторе пониженного давления с горячими стенками горизонтального типа «Изотрон-4-150». В качестве подложек использовались пластины монокристаллического кремния КДБ-12 диаметром 100 мм. Общее давление в реакторе составляло 30 Па, температура осаждения — 1093 К. Температурный профиль по зонам осаждения поддерживался с точностью ± 1 К. Отношение объемов дихлорсилана и аммиака ($\text{SiH}_2\text{Cl}_2/\text{NH}_3$) изменялось от 0,25 до 10. Использовались дихлорсилан и аммиак электронного класса чистоты. Толщина пленок нитрида кремния определялась с помощью многоуровневой эллипсометрии на установке ЛЭФ-3М. Механическое напряжение измеряли по смещению дифракционного пика отражения от системы атомных плоскостей на рентгеновской двухкристаллической топографической установке типа РДТ.

Для получения подслоя анодированного окисла (Al_2O_3) сначала методом термического распыления наносилась пленка Al толщиной 0,2 мкм, затем проводилось ее анодирование в растворах на основе ортофосфорной кислоты на всю глубину пленки. Металлизация разводки проводилась методом трехэлектродного распыления платины в атмосфере Ag при давлении 10^{-3} Па и ускоряющем напряжении 3 кВ.

Результаты эксперимента

Проведенные исследования показали, что в широком диапазоне технологических параметров пленки, входящие в состав мембраны, обладают механическим напряжением растяжения. Чтобы компенсировать это напряжение, было предложено ввести дополнительный слой среднетемпературного фосфоросиликатного стекла (ФСС). Установлено, что при толщине слоя платины 0,3 мкм оптимальной толщиной слоя фосфоросиликатного стекла является 0,6 мкм. При отношении объемов кислорода и моносилана, равном 2, были получены пленки с напряжением сжатия, равным 180 МПа (рис. 1).

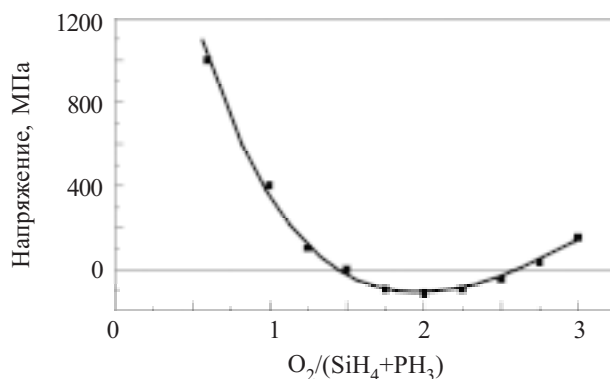


Рис. 1. Зависимость остаточного напряжения от соотношения объемов газов в пленках ФСС, полученных при температуре 723 К

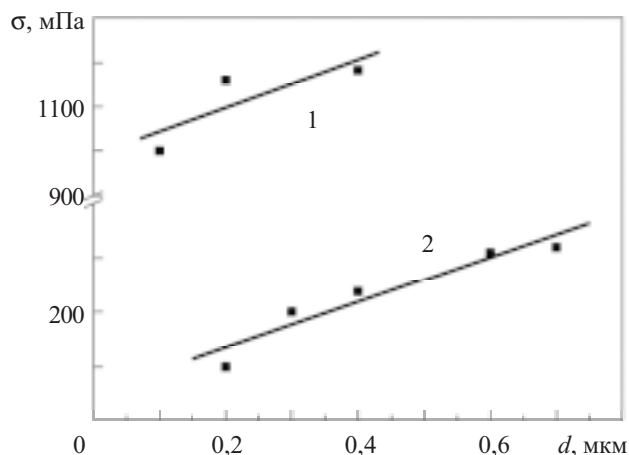


Рис. 2. Зависимость механического напряжения от толщины пленки нитрида кремния при различных отношениях объемов $\text{SiH}_2\text{Cl}_2/\text{NH}_3$:
1 — 1/4; 2 — 4/1

На рис. 2 показана зависимость механического напряжения пленки нитрида кремния от ее толщины при отношении объемов рабочих газов дихлосилана и аммиака 1/4 и 4/1. Видно, что пленки, полученные при отношении 4/1, имеют значения механического напряжения на порядок меньше, чем при 1/4.

Разводку высокотемпературных датчиков металлизировать, в основном, золотом, платиной и никелем (для более низких значений рабочей температуры). Такие металлические пленки обладают низкой адгезией к диэлектрическим пленкам. Использование в качестве подслоя для улучшения адгезии V_a , Cr и т. п. приводит к ухудшению стабильности и электрических параметров. Адгезия определялась величиной усилия отрыва приваренной платиновой проволоки. Для улучшения адгезии предлагается использовать в качестве подслоя пленку анодированного Al, которая обладает высокой структурной и химической стойкостью при высокой температуре. Улучшение адгезии при использовании пористого Al происходит за счет

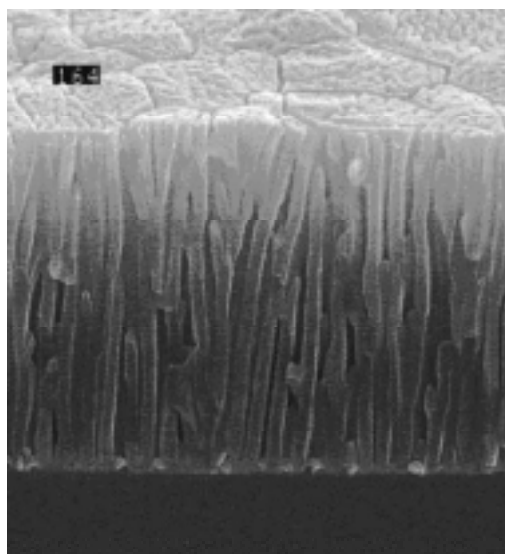


Рис. 3. Анодированный Al

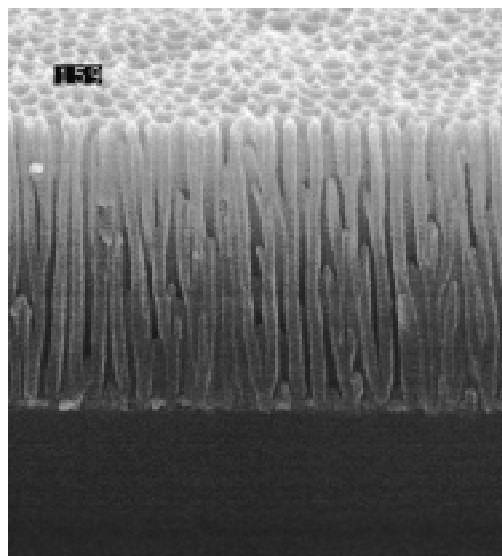


Рис. 4. Анодированный Al с растравленными порами

увеличения эффективной площади контактирования напыляемой пленки с поверхностью подложки, т. к. напыляемая пленка проникает вглубь пор, и в зависимости от диаметра пор площадь соприкосновения увеличивается в 5—6 раз.

При металлизации мембранных датчиков платиной толщина ее слоя составляет 0,2—0,3 мкм, что позволяет использовать его в качестве нагревателя тонкой мембраны. В связи с этим накладывается ограничение на диаметр пор анодированного Al — для обеспечения равномерной толщины слоя металлизации он не должен превышать 200 Å. На рис. 3 видно, что вершины пор сужены, что затрудняет проникновение атомов металла вглубь поры и уменьшает эффективную площадь контактирования. Для увеличения эффективной площади контактирования проводилось растравливание вершин пор в концентрированной ортофосфорной кислоте (рис. 4).

Толщина пленки платины, используемой в качестве нагревателя, составляет 0,2 мкм. Полученная пленка имеет ровную зеркальную поверхность, что обеспечивает возможность проведения фотолитографии и равномерной по электрическим свойствам разводки. Проверка адгезии Pt-пленки показала, что при напылении Pt на диэлектрическую пленку без подслоя усилие отрыва составляло 2—3 г, при напыле-

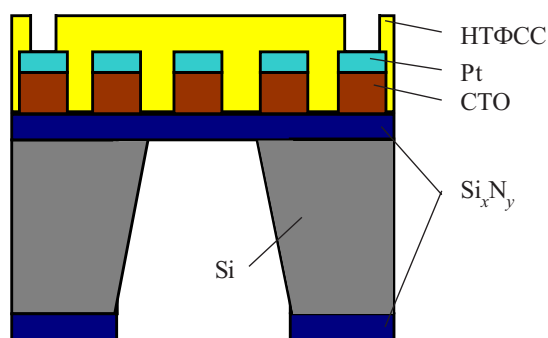


Рис. 5. Структура мембранного газового датчика

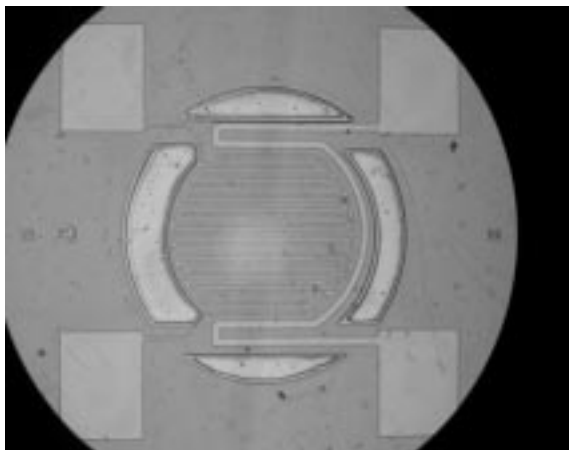


Рис. 6. Кристалл датчика газового анализатора

нии же на пленку анодированного Al оно превышало 10 г. При напылении на анодированный Al с растравленными вершинами пор усилие отрыва превышало 15 г, что приводило к разрыву платиновой проволоки диаметром 20 мкм.

На рис. 5 представлена структура датчика газового анализатора с мембраной на основе пленки нитрида кремния толщиной 1,0 мкм, дополнительным слоем среднетемпературного оксида кремния (СТО), нагревателем на основе пленки платины толщиной 0,3 мкм, пассивированной низкотемпературным фосфоросиликатным стеклом (НТФСС) толщиной 0,6 мкм. На рис. 6 показана фотография кристалла датчика газового анализатора оптимизированной конструкции с перфорированной мембраной, которая имеет уменьшенную мощность потребления.

Таким образом, оптимальной конструкцией датчика, обеспечивающей минимальную потребляемую мощность (порядка 50—100 мВт при рабочей температуре мембраны от 370 до 770 К) является кремниевый кристалл размером 2×2 мм с перфорированной

мембраной на основе диэлектрической пленки нитрида кремния толщиной 1,0 мкм. Газоанализаторы с такими датчиками можно использовать для определения концентрации газа, в газодобывающей и газоперерабатывающей промышленности, в медицине, автомобильной технике, в изделиях специального назначения, т. е. в переносных и карманных приборах, длительное время работающих от автономных источников питания.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Rosler R. S. Low-pressure CVD production processes for poly nitride and oxide // Solid-State Technology.— 1977.— Vol. 20, N 4.— P. 63—70.
2. French P. J. Development of surface micromachining techniques compatible with on-chip electronics // J. Micromech. Microeng.— 1996.— N 6.— P. 197—211.
3. Wen-Hsien Chuang, Rainer K. An electrostatic actuator for fatigue testing of low-stress LPCVD silicon nitride thin films // Sensor and actuators.— 2005.— A, N 121.— P. 557—565.
4. Penza M., Aversa P., Cassano G. et al. Thin-film bulk-acoustic-resonator gas sensor functionalized with a nanocomposite Langmuir-Blodgett layer of carbon nanotubes // IEEE Transactions on Electron Devices.— 2008.— Vol. 55, N. 5.— P. 1237—1239.
5. Cross R. B. M., De Souza M. M., Deane S. C., Young N. D. A comparison of the performance and stability of ZnO-TFTs with silicon and nitride as gate insulator // IEEE Transactions on Electron Devices.— 2008.— Vol. 55, N. 5.— P. 1109—1115.
6. Arreghini A., Driussi F., Vianello E. et al. Experimental characterization of the vertical position of the trapped charge in Si nitride-based nonvolatile memory cells // IEEE Transactions on Electron Devices.— 2008.— Vol. 55, N. 5.— P. 1211—1219.
7. Han I-S., Ji H-H., You O-S. et al. New observation of mobility and reliability dependence on mechanical film stress in strained silicon CMOSFETs // IEEE Transactions on Electron Devices.— 2008.— Vol. 55, N. 6.— P. 1352—1358.
8. Coffa S. Light from Silicon // IEEE Spectrum.— 2005.— N. 10.— P. 36—41.
9. Paniccia M., Koehl S. The silicon solution // IEEE Spectrum.— 2005.— N. 10.— P. 30—35.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Антипов О. И., Неганов В. А., Потапов А. А. Детерминированный хаос и фракталы в дискретно-нелинейных системах / Под ред. Ю. В. Гуляева, С. А. Никитова.— М.: Радиотехника, 2009.— 235 с.

В монографии рассмотрены явления детерминированного хаоса и фрактальности в дискретно-нелинейных системах на примере устройств импульсной силовой электроники, приведены некоторые основные определения современной нелинейной динамики и некоторые математические методы целочисленных и дробных мер. Представленные явления стохастической работы могут наблюдаться в широком классе систем с переменной структурой, действие которых может быть описано системами дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами, скачкообразно меняющими свои значения с течением времени в зависимости от состояния системы. Объектами исследования явились импульсные стабилизаторы напряжения различных типов и структур. Научной новизной является применение как фрактальных, так и мультифрактальных мер детерминированного хаоса к анализу стохастической работы импульсных стабилизаторов.

Для специалистов, интересующихся проблемами детерминированного хаоса, численным моделированием дискретно-нелинейных систем.

