

УДК.621.3.049.772

## ОПТИМИЗИРОВАННАЯ КОНСТРУКЦИЯ ДАТЧИКА ГАЗОВОГО АНАЛИЗАТОРА С УМЕНЬШЕННЫМ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕМ

И.И. РУБЦЕВИЧ, Н.С. КОВАЛЬЧУК

"Завод Транзистор"  
Корженевского, 16, Минск, 220108, Беларусь

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 12 мая 2009

Рассмотрена возможность использования многослойной мембраны в конструкции газового анализатора для уменьшения потребляемой мощности. Получены экспериментальные зависимости потребляемой мощности от наличия щелей в мембране. Предложена оптимизированная конструкция газового анализатора с уменьшенным энергопотреблением.

*Ключевые слова:* газовый анализатор, мембрана, нитрид кремния, оптимизированная конструкция.

### Введение

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 и др. Они представляют опасность как с экологической точки зрения, так и являются причиной возможных техногенных катастроф (взрывов, пожаров, массовых отравлений и т.д.). Поэтому научные исследования и промышленные разработки в этой области направлены на создание новых средств защиты и предупреждения аварий на предприятиях. Одним из таких средств являются полупроводниковые датчики (сенсоры), чувствительные к метану, угарному газу и другим горючим и токсичным газам. Современные полупроводниковые датчики способны обнаруживать посторонние газы в воздухе на уровне 0,0001% и существует постоянная тенденция к повышению их чувствительности. Газовая чувствительность датчика может быть определена как отношение сопротивления сенсорного элемента на воздухе к сопротивлению при наличии газа.

Для решения современных задач обеспечения безопасности жизнедеятельности человека и оперативного контроля экологического состояния окружающей среды наиболее перспективными представляются металлоксидные полупроводниковые и термокаталитические сенсоры. Принцип действия металлоксидных полупроводниковых сенсоров основан на изменении проводимости газочувствительного слоя при химической сорбции на поверхности полупроводника 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 нескольких секунд — сенсор нагревают до высокой температуры, составляющей от 523 К (для датчиков паров спирта, водорода) до 773 К (для датчиков метана). Для каждого типа газа существует оптимальный температурный диапазон [1, 2].

Большинство из них сравнительно велики по размерам и потребляют достаточно большую мощность для достижения температур, необходимых для обеспечения оптимальной чувствительности сенсора. Поэтому актуальной задачей для разработчиков 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

Решение этой задачи достигается правильным выбором конструкции сенсора. При сравнении потребляемой мощности, требуемой для нагрева и работы в непрерывном режиме при температуре 720 К различных сенсоров (рис. 1) видно, что мембранные конструкции датчиков потребляют на порядок меньшую мощность, чем классические толсто пленочные сенсоры на основе пористого алюминия толщиной 20–50 мкм [3].

В свою очередь, потребляемая мощность газового датчика определяется толщиной мембраны, соотношением площади чувствительного слоя к площади мембраны и теплопроводностью материала мембраны [4]. В последнее время нашла широкое применение конструкция многослойного мембранного датчика на основе пленки нитрида кремния.

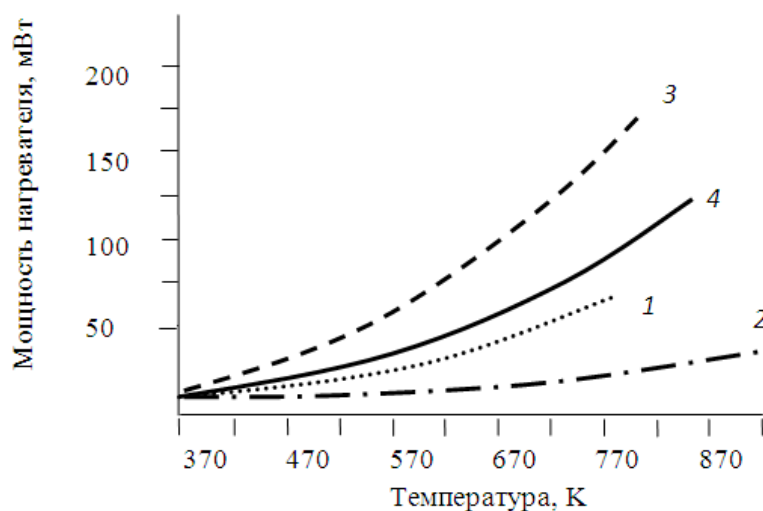


Рис. 1. Мощность, потребляемая различными сенсорами как функция температуры: 1 — сплошная мембрана на основе оксида/нитрида кремния; 2 — перфорированная мембрана на основе оксида/нитрида кремния; 3 — конструкция на пористой поликремниевой мембране; 4 — мембрана на основе пористого оксида алюминия

Использование конструкции многослойной мембраны, состоящей из последовательных слоев оксида и нитрида кремния, связано с тем, что различие в коэффициенте температурного расширения этих материалов позволяет скомпенсировать механические напряжения, возникающие в мембране при температурном ударе, и получить поверхность площадью в несколько квадратных миллиметров толщиной 1–2 мкм. Однако увеличение числа слоев приводит к увеличению потребляемой мощности, поэтому для уменьшения толщины мембраны является актуальным решение задачи разработки технологического процесса осаждения пленки нитрида кремния с минимальными механическими напряжениями в диапазоне рабочих температур сенсора.

Аналогично, решая задачу оптимизации топологии мембраны для получения минимального соотношения площади чувствительного слоя и мембраны, дополнительно можем уменьшить требуемую рабочую мощность сенсора.

В данной работе ставилась задача по разработке конструкции газового датчика, с мембраной из нитрида кремния с расположенным на ней тонкопленочным нагревателем шириной 50 мкм и толщиной 0,2–0,3 мкм, на который наносится чувствительный слой. Основным материалом для чувствительного слоя — окись олова  $\text{SnO}_2$ , с добавками Pt, Pd и др. Данная структура

может быть универсальной для широкого диапазона концентраций различных газов. Для каждого газа необходим свой состав чувствительного слоя.

Важнейшим элементом конструкции является мембрана, материалом для которой может служить нитрид кремния или поликристаллический кремний [5]. Мембраны на основе диэлектрической пленки нитрида кремния предпочтительнее использовать благодаря их высоким электрическим характеристикам. Пленки нитрида кремния можно использовать как материал диэлектрической мембраны и изолятор для поликристаллической мембраны, а также и как стойкие маски при химическом и плазменном травлении кремния [6, 7]. Однако, наряду с преимуществами, существуют технологические трудности формирования пленок нитрида кремния толщиной 0,6–1,0 мкм с минимальными механическими напряжениями.

Пленки нитрида кремния, осаждаемые методом химического вакуумного осаждения при пониженном давлении (LPCVD), обладают механическими напряжениями растяжения различной степени в зависимости от режимов нанесения, в первую очередь от температуры осаждения, рабочего давления и состава газовой среды [8]. При стандартных режимах нанесения остаточные напряжения на границе кремний–нитрид кремния достигают 1,3 ГПа. Поэтому толщина пленок не может превышать 0,2–0,3 мкм и то при наличии компенсирующего окисного подслоя. Такие высокие механические напряжения приводят к растрескиванию мембран и балок. Для повышения надежности и стабильности работы мембранных датчиков необходимо увеличить толщину мембраны нитрида кремния до 1,0 мкм, сохраняя ненапряженную структуру пленки без окисного подслоя, который ухудшает тепловые характеристики мембраны. В ходе работ решалась технологическая задача получения пленок нитрида кремния, обладающих минимальными механическими напряжениями 170–200 МПа, которые возможно использовать в качестве диэлектрических мембран МЭМС [9, 10], что потребовало существенной оптимизации процесса их получения.

### Методика эксперимента

Осаждение пленок нитрида кремния осуществлялось методом аммонолиза дихлорсилана ( $\text{SiH}_2\text{Cl}_2$ ) 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 30 Па. Температура осаждения изменялась в диапазоне 1073–1123 К. Температурный профиль по зонам осаждения поддерживался с точностью  $\pm 1$  К. Соотношение объемных источников дихлорсилана к аммиаку ( $\text{SiH}_2\text{Cl}_2/\text{NH}_3$ ) 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. Механические напряжения  $\sigma$  измеряли по смещению дифракционного пика отражения от системы атомных плоскостей на рентгеновской двухкристалльной топографической установке типа РДТ.

### Результаты и их обсуждение

На рис. 2 показана полученная в ходе работ экспериментальная зависимость механических напряжений в пленке нитрида кремния  $\text{Si}_x\text{N}_y$  толщиной 1,0 мкм при различных соотношениях газов  $\text{SiH}_2\text{Cl}_2/\text{NH}_3$  — от 1 до 7, при температурах 1103, 1113, 1123 К. Из приведенных на рис. 2 данных видно, что увеличение соотношения дихлорсилана к аммиаку приводит к уменьшению величины механических напряжений  $\sigma$  от 650 МПа до 180 МПа (растяжение). Понижение температуры осаждения от 1123 К до 1103 К приводит к увеличению механических напряжений: 950 МПа при соотношении 1:1 и 300 МПа — при 7:1. Однако использование нитрида кремния, осажденного при соотношении дихлорсилана к аммиаку 7:1, затрудняет последующее травление кремния, а также ухудшаются тепловые характеристики мембраны в связи с увеличением кремниевой фазы в пленке. Дальнейшее увеличение температуры осаждения ограничено техническими характеристиками оборудования. На рис. 3 показана зависимость механических напряжений от толщины пленки нитрида кремния при соотношении рабочих газов дихлорсилана к аммиаку 1/4 и 4/1. Видно, что пленки, полученные при соотношении ди-

хлорсилана к аммиаку 4/1, имеют значения механических напряжений на порядок меньше, чем у пленок, полученных при соотношении 1/4. Видно, что при увеличении толщины пленки нитрида кремния, полученной при соотношении рабочих газов дихлорсилана к аммиаку равном 4/1, от 0,2 мкм до 0,8 мкм, значения механических напряжений увеличились в 1,8 раз.

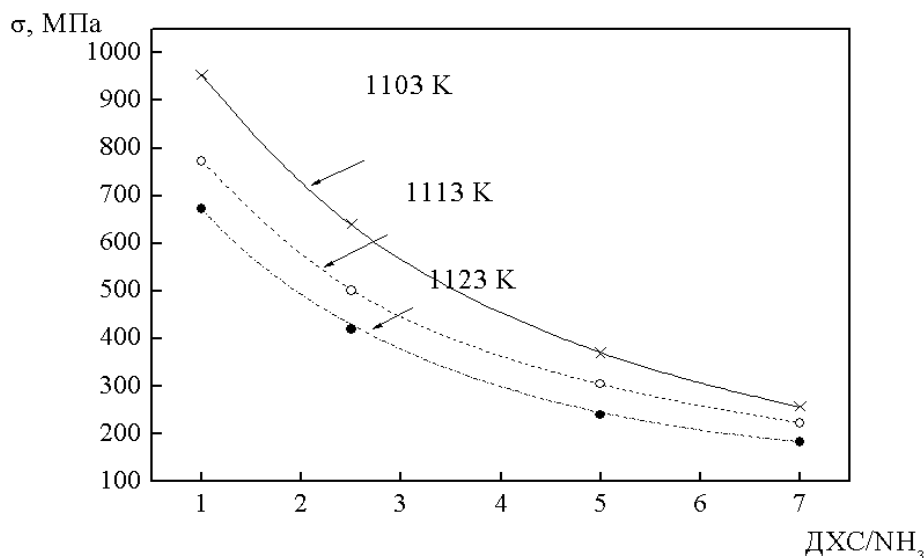


Рис. 2. Зависимость механических напряжений от соотношения дихлорсилана и аммиака ( $\text{SiH}_2\text{Cl}_2 / \text{NH}_3$ , толщина  $\text{Si}_x\text{N}_y \sim 1,0$  мкм)

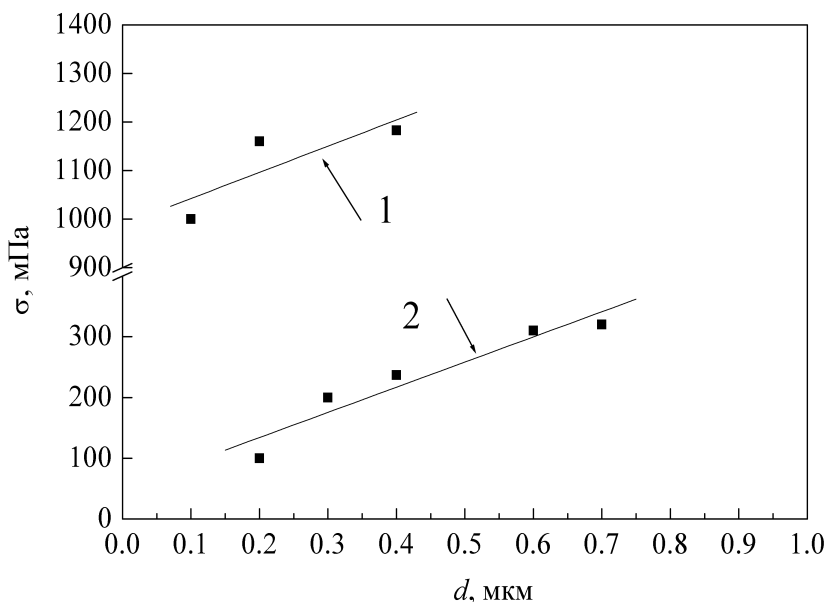


Рис. 3. Зависимость механических напряжений от толщины пленки нитрида кремния при различных соотношениях  $\text{SiH}_2\text{Cl}_2/\text{NH}_3$ : 1–1/4, 2–4/1

Была выявлена зависимость коэффициента преломления  $n$  от соотношения дихлорсилана к аммиаку ( $\text{SiH}_2\text{Cl}_2/\text{NH}_3$ ) (рис. 4). При увеличении соотношения  $\text{SiH}_2\text{Cl}_2/\text{NH}_3$  от 0,25 до 10 наблюдается увеличение коэффициента преломления  $n$  от 2,0 до 2,9. Полученная корреляционная зависимость между этими параметрами дает возможность по коэффициенту преломления  $n$  контролировать режим нанесения пленок нестехиометрического нитрида кремния  $\text{Si}_x\text{N}_y$ .

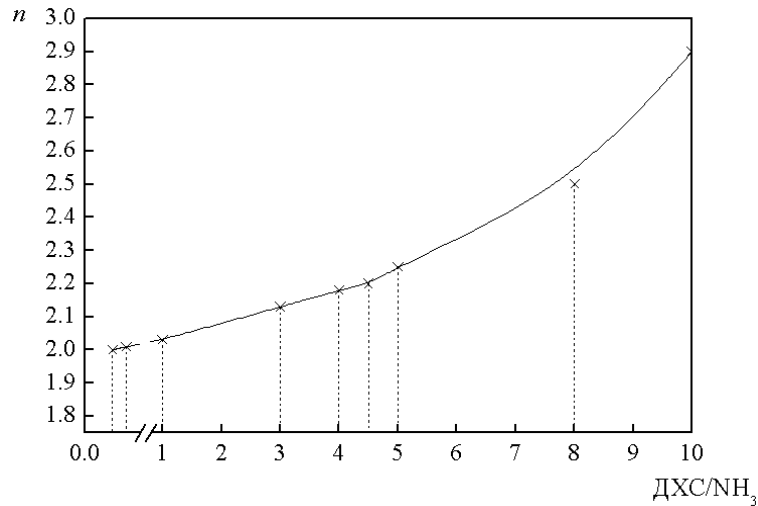


Рис. 4 Зависимость показателя преломления  $\text{Si}_x\text{N}_y$  от соотношения дихлорсилана и аммиака в процессе осаждения

Таким образом, представленные на рис. 2–4 экспериментальные данные показывают, что можно планировать оптимальный режим осаждения нестехиометрического нитрида кремния  $\text{Si}_x\text{N}_y$  и получать механические напряжения в несколько раз ниже, чем у стехиометрического нитрида кремния, а также обеспечить оперативный технологический контроль воспроизводимости результатов осаждения с помощью измерения коэффициента преломления  $n$  наращиваемой пленки нитрида кремния.

Эксперименты с опробованием различных топологических конструкций сенсора показали, что введение щелей в конструкцию мембраны при прочих равных условиях позволяет уменьшить потребляемую мощность в 2–3 раза при работе в диапазоне высоких температур (порядка 570–770 К) и, соответственно, увеличить время работы датчика без подзарядки (рис. 5).

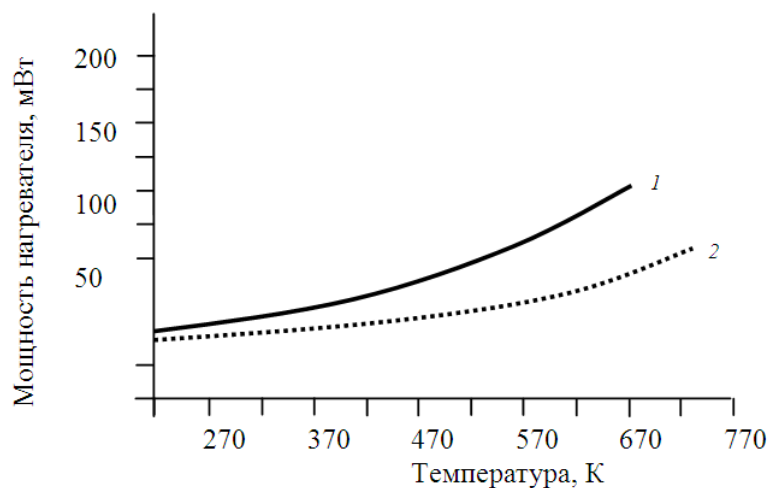


Рис. 5. Зависимость потребляемой мощности датчика от конструкции мембраны: 1 — сплошная мембрана; 2 — мембрана со щелями

На рис. 6 показана фотография кристалла оптимизированной конструкции датчика газового анализатора с перфорированной мембраной с уменьшенной мощностью потребления. На рис. 7 представлена структура датчика газового анализатора с мембраной на основе пленки нитрида кремния толщиной 1,0 мкм, нагревателем на основе пленки платины толщиной 0,3 мкм, пассивацией низкотемпературным фосфоро-силикатным стеклом (НТФСС) толщиной 0,6 мкм.

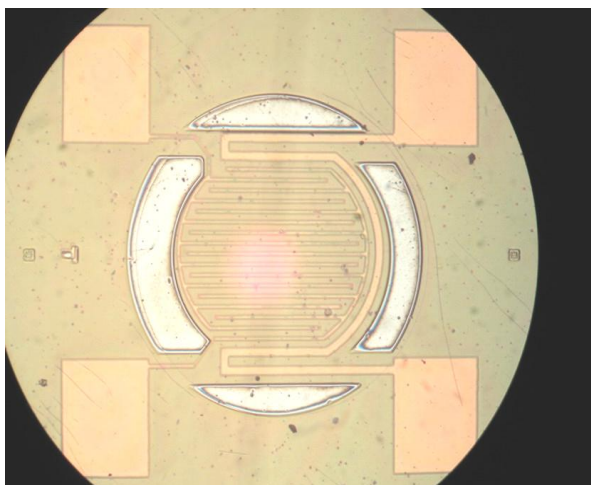


Рис. 6. Кристалл датчика газового анализатора

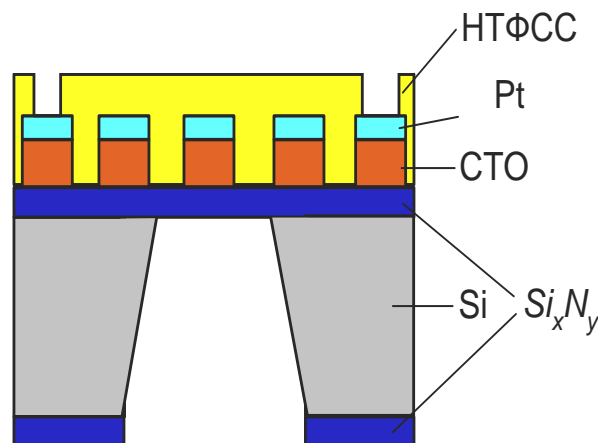


Рис. 7. Структура мембранного газового датчика

### Заклучение

Таким образом, наиболее оптимальной конструкцией, обеспечивающей минимальную потребляемую мощность порядка 50–100 мВт в зависимости от рабочей температуры 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. Такие газоанализаторы пригодны для применения в переносных и карманных приборах для определения концентрации газа, длительное время работающих от автономных источников питания, что важно для различных областей жизнедеятельности человека: в газодобывающей и газоперерабатывающей промышленности, медицине, автомобильной технике, для изделий специального назначения.

## OPTIMIZED DESIGN OF THE GAS SENSOR WITH REDUCED POWER CONSUMPTION

I.I. RUBCEVICH, N.S. KOVALCHUK

### Abstract

The possibility of the use of multilayer membrane in designs of gas analyzers for reduction of consumed power is considered. The experimental dependencies of consumed power from presence of fissures in membrane are received. The optimized design of the gas analyzer with reduced power consumption is offered.

### Литература

1. Rosler R.S. // Solid-State Technology. 1977. Vol. 20, N 4. P. 63–70.
2. French P.J. // J. Micromech. Microeng. 1996. N 6. P. 197–211.
3. Wen-Hsien Chuang, Rainer K. // Sensor and actuators. 2005. A. N 121. P. 557–565.
4. Penza M., Aversa P., Cassano G. et al. // IEEE Trans. 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. // IEEE Trans. on Electron Devices. 2008. Vol. 55. N. 5. P. 1109–1115.
6. Arreghini A., Driussi F., Vianello E. et al. // IEEE Trans. on Electron Devices. 2008. Vol. 55. N. 5. P. 1211–1219.
7. Han I-S., Ji H-H., You O-S. et al. // IEEE Trans. on Electron Devices. 2008. Vol. 55. N. 6. P. 1352–1358.
8. Coffa S. // IEEE Spectrum. 2005. N 10. P. 36–41.
9. Panizza M., Koehl S. // IEEE Spectrum. 2005. N.10. P. 30–35.
10. Temple-Boyer P., Rossi C., Saint-Etienne E., Scheid E. // J. Vac. Sci. Technol. A 16 (4). 1998. N. 7–8. P. 2003–2007.