

ПРИРОДА

№ 2, 2005 г.

С.И. Рембеза

Нужен ли человечеству искусственный нос?

© “Природа”

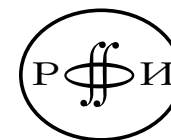
Использование и распространение этого материала
в коммерческих целях
возможно лишь с разрешения редакции



Сетевая образовательная библиотека “VIVOS VOCO!”
(грант РФФИ 03-07-90415)

vivovoco.nns.ru
vivovoco.rsl.ru
www.ibmh.msk.su/vivovoco

Нужен ли человечеству искусственный нос?



С.И.Рембеза

Многие эпохи (вплоть до XVI—XVII вв.) человечество довольствовалось данными ему от природы органами чувств — зрением, слухом и обонянием. Но с тех пор, как человек вооружил свой глаз очками, линзами микроскопа и телескопа, он старался расширить возможности своего зрения не только ради увеличения изображений предметов, но и для выхода за пределы спектрального интервала видимого света (примерно от 0.4 до 0.6 мкм). Благодаря достижениям науки мы теперь можем «видеть» почти во всем диапазоне электромагнитных волн — от рентгеновского излучения до сверхдлинных радиоволн, различать отдельные атомы и самые отдаленные галактики. Так человечество преуспело в усовершенствовании зрения.

Первым шагом в создании искусственного уха можно считать изобретение слуховой трубки для слабослышащих людей. В дальнейшем человек научился различать инфразвуки и гиперзвуки, хотя само по себе человеческое ухо ощущает воздушные колебания только в ограниченном диапазоне частот от 16 Гц до 20 кГц. Сейчас нам доступны для наблюдений и исследований интервалы частот от 10^{-3} до 10^{12} Гц; с помощью



Станислав Иванович Рембеза, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой полупроводниковой электроники Воронежского государственного технического университета. Заслуженный деятель науки РФ. Область научных интересов — физика точечных дефектов в полупроводниках, физика поверхности полупроводников, полупроводниковые приборы.

ультразвуковых сонаров мы ориентируемся в глубинах океана, на инфразвуковых частотах вслушиваемся в дыхание Земли перед землетрясением. Так что в создании искусственного уха также достигнуты впечатляющие успехи.

Искусственный нос, или искусственный орган обоняния, призван обогатить наши ограниченные природные данные по восприятию запахов, в том числе недоступных человеческому носу. Ведь известно, что многие ядовитые (CO — угарный газ и др.) и взрывоопасные (H_2 — водород, CH_4 — метан и др.) газы не имеют ни цвета, ни запаха. Частично эту проблему можно решить, используя обоняние животных, но лучше все-таки иметь надежный физический прибор для обнаружения различных газов и определения их количества в воздухе, так как 2—3% водорода или метана уже образуют взрывоопасную гремучую смесь. Наличие в воздухе примесей некоторых газов научились контролировать еще в XVIII в. по определенным химическим реакциям, а позднее — по спектрам излучения и поглощения света или с помощью масс-спектропии. Однако сделать на этих принципах компактный недорогой прибор, улавливающий разнообразные газы, пока не представляется возможным.

История создания искусственного носа намного короче, чем история искусственного глаза или уха. Она теснейшим образом связана с развитием физики, теории и технологии полупроводников: уже при исследовании первых полупроводниковых материалов (ZnS , Ge и др.) было замечено, что электрофизические свойства их поверх-

© Рембеза С.И., 2005

ФИЗИКА

ности зависят от состава окружающей газовой атмосферы. Именно это обстоятельство заставило в дальнейшем тщательно герметизировать все полупроводниковые приборы и интегральные схемы, чтобы переменный газовый состав окружающей среды не влиял на электрические параметры изделий. Большой теоретический вклад в понимание природы взаимодействия газов с поверхностью полупроводников был сделан А.Ф.Иоффе, Ф.Ф.Волькенштейном и др. [1].

Все эти работы относятся к 40–60-м годам XX в. Начало практическому использованию эффекта влияния газов на электрические свойства поверхности полупроводников положил в 60-х годах японец Н.Тагучи. На основе керамического SnO_2 он изготовил газочувствительное устройство, электросопротивление которого изменялось пропорционально концентрации некоторых газов в воздухе, и запатентовал его. Прибор позволяет контролировать содержание в воздухе H_2 , CO , CH_4 и др. Японская компания «Figaro» до сих пор ежегодно выпускает миллионы таких датчиков, и они широко применяются, например, в системах предупреждения взрывов при работах с природным газом. Главное их достоинство — возможность многократного использования (после десорбции газа при повышенной температуре). Позже было установлено, что практически все окислы металлов, являющиеся полупроводниками, обладают газовой чувствительностью. В настоящее время изготавливают датчики газов на основе SnO_2 , ZnO , NiO , CuO , TiO_2 , ZrO_2 , Y_2O_3 , WO_3 и других окислов. Можно ли считать, что задача создания искусственного носа уже решена? К сожалению, это не так, и ниже мы поговорим о современном состоянии дел в данной области, возникших проблемах и путях их решения, а также дальнейших перспективах создания искусственного носа.

Датчики газов чувствительнее собачьего носа?

Обоняние человека работает за счет взаимодействия молекул газов со специальными высокочувствительными рецепторами носа. Аналог такого рецептора в системе искусственного носа — отдельный датчик газов, который должен обладать высокой чувствительностью и селективностью к разным газам.

По принципам действия современные датчики газов многократного действия условно можно разделить на 4 группы: 1 — термокондуктометрические ячейки; 2 — каталитические ячейки; 3 — топливные ячейки; 4 — полупроводниковые датчики.

Работа термокондуктометрической ячейки основана на сравнении теплопроводности исследуемой пробы газа с теплопроводностью чистого воздуха или другого известного газа. Сопоставляются интенсивности теплоотвода от двух нагретых спи-

ралей: одной — в измерительной камере с пробой газа, и второй — в камере сравнения с чистым воздухом. Чем выше теплопроводность контролируемого газа по сравнению с воздухом, тем быстрее будет остывать нагретая до определенной температуры спираль в измерительной камере; электросопротивление спирали будет при этом падать. Включение измерительной спирали и спирали сравнения в мостовую схему обеспечивает достаточную точность измерений. К сожалению, метод удобен лишь для контроля заранее известных газов, сильно отличающихся по теплопроводности от воздуха — водорода, гелия, двуокси углерода, диоксида серы и некоторых других. Достоинство метода — в простоте конструкции датчика и возможности измерять концентрации конкретных газов от 0 до 100%. Но смеси неизвестных газов с неизвестной величиной теплопроводности таким способом контролировать нельзя.

Каталитическая (термохимическая) ячейка предназначена для обнаружения только горючих газов, например, монооксида углерода в автомобильном выхлопе или в окружающем воздухе, либо метана при утечке бытового газа. В измерительной ячейке такого датчика находятся одновременно две включенные в мостовую схему нагревательные спирали при одинаковой температуре, одна из которых покрыта активным катализатором. При попадании в ячейку горючего газа (CO) он будет реагировать с кислородом воздуха на катализаторе, сгорая и образуя диоксид углерода (CO_2). При этом выделяется тепло, повышающее температуру и, соответственно, электросопротивление спирали пропорционально количеству сгорающего газа. Такой датчик позволяет обнаруживать концентрации CO на уровне $10^{-4}\%$. Недостаток ячейки — низкая селективность к разным горючим газам и невозможность обнаружения негорючих газов. Датчик такого типа называется пеллистор.

С помощью топливной, или электрохимической ячейки можно обнаружить наличие исключительно кислорода или газа, содержащего кислород (например, воздуха). В такой ячейке имеются два электрода, между которыми расположен жидкий или твердый электролит, например ионный проводник ZrO_2 с примесью Y_2O_3 . Если между двумя электродами (внутри выхлопной трубы и снаружи) концентрация ионов кислорода меняется, возникает ионный ток, или электродвижущая сила, пропорциональная разности концентраций ионов кислорода. Величина возникающего электрического поля служит мерой содержания кислорода. По такому принципу работает λ -зонд для контроля количества кислорода в выхлопном газе автомобиля (контроль степени сгорания топлива) и для регулировки работы карбюратора. Работа λ -зонда требует температуры не менее 500°C , которую обеспечивают горячие выхлопные газы. Подробнее об устройстве и сферах применения перечисленных датчиков можно узнать из книги [2].

В настоящее время наиболее распространены и перспективны полупроводниковые датчики газов из перечисленных выше оксидов металлов. Принцип их действия основан на том, что в результате физической адсорбции молекул газа на поверхности полупроводника его поверхностное сопротивление изменяется пропорционально числу адсорбированных молекул (или концентрации газа в воздухе). Физическая адсорбция обусловлена главным образом силами Ван-дер-Ваальса и имеет обратимый характер, поскольку стойкие химические соединения не образуются [1]. Иными словами, после завершения цикла измерения концентрации конкретного газа датчик можно нагреть до температуры, превышающей энергию связи Ван-дер-Ваальса, и осуществить десорбцию молекул газа. В результате датчик будет готов к повторным измерениям. Металлооксидный чувствительный элемент датчика имеет мелкокристаллическую структуру. В процессах адсорбции и десорбции газов участвуют приповерхностные слои микрокристаллов, поэтому чем больше отношение поверхности кристаллов к их объему, тем эффективнее работа датчика, тем выше его чувствительность к газам.

Как известно, в полупроводнике все валентные электроны участвуют в образовании межатомных связей и свободных носителей заряда нет, а величина энергии связи определяет ширину запрещенной зоны ΔE (для SnO_2 : $\Delta E = 3.5$ эВ; для ZnO : $\Delta E = 3.1$ эВ и т.п.). Отклонение состава оксида от стехиометрического порождает примесные уровни в запрещенной зоне, например, для SnO_2 недостаток (вакансии) кислорода создает донорный уровень, поэтому SnO_x ($x < 2$) имеет электронный тип проводимости. Обрыв валентных связей на поверхности микрокристалла также образует поверхностные энергетические состояния в валентной зоне, взаимодействие которых с объемом полупроводника приводит к искривлению энергетических зон у поверхности кристалла (см. рис.1). Величина искривления зон характеризуется дебаевской длиной

$$L_D = \sqrt{\frac{\epsilon\epsilon_0 kT}{2e^2 n}},$$

которая соответствует глубине проникновения внешнего поля в объем полупроводника (рис.1).

Газы обладают разным сродством к электрону и характеризуются либо окислительными (O_2 , O_3 , Cl_2 и др.), либо восстановительными (H_2 , CO , CH_4 , $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ и др.) свойствами. Соответственно при взаимодействии газов с поверхностью полупроводника электроны либо захватываются из приповерхностной области (окислители — акцепторы), либо передаются полупроводнику (восстановители — доноры). Поэтому взаимодействие с «донорными» газами приводит к снижению барьера для дрейфа электронов в полупроводнике n -типа ($U_{\text{кт}}$) и к возрастанию электропроводности всего образца (рис.2). При взаимодействии же такого полупроводника с газом-окислителем его электросопротивление, наоборот, возрастает по сравнению с исходным значением, которое имелось в отсутствие контролируемого газа.

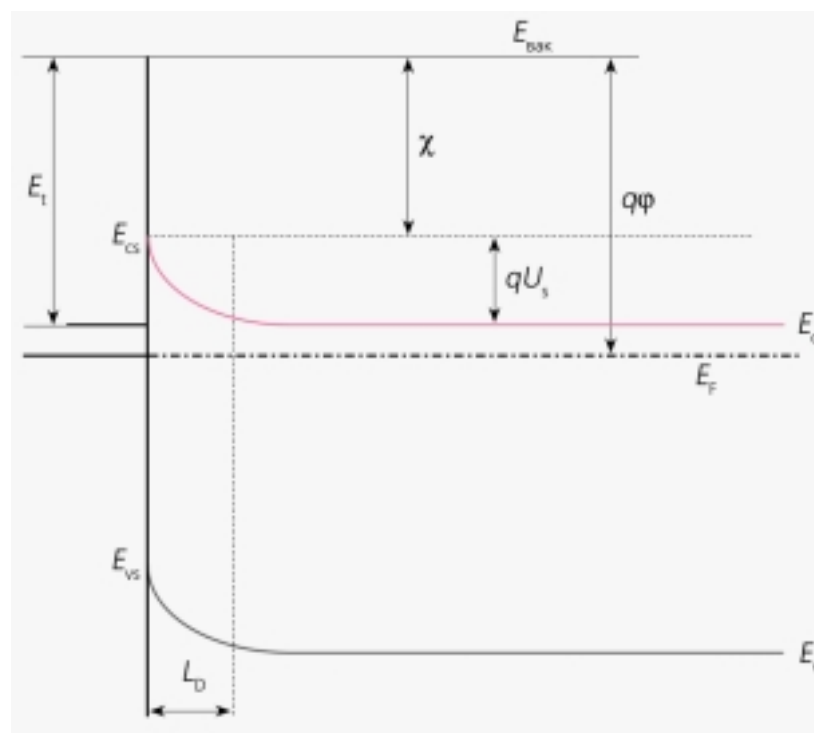
Газовая чувствительность датчика S может быть определена как отношение сопротивления R_b сенсорного элемента на воздухе к сопротивлению R_f чувствительного слоя при наличии газа:

$$S = \frac{R_b}{R_f};$$

можно также представить чувствительность S' в относительных изменениях проводимости (G) сенсорного слоя:

$$S' = \frac{G_f - G_b}{G_b} \cdot 100\% = (S - 1) \cdot 100\%.$$

Рис.1. Энергетическая схема полупроводника n -типа. Вблизи поверхности происходит искривление энергетических зон, обусловленное адсорбцией акцепторных частиц на первоначально нейтральной поверхности. $E_{\text{вак}}$ — уровень вакуума; E_c и E_{cs} — положение дна зоны проводимости относительно уровня вакуума в объеме и на поверхности полупроводника соответственно; E_f — уровень Ферми; E_v и E_{vs} — потолок валентной зоны в объеме и на поверхности соответственно; E_i — энергетическое положение поверхностного уровня, соответствующего хемосорбированным частицам; qU_s — величина поверхностного барьера, обусловленного зарядом поверхности; χ — величина сродства к электрону поверхности полупроводника; $q\phi$ — термодинамическая работа выхода электронов; L_D — дебаевский радиус экранирования.



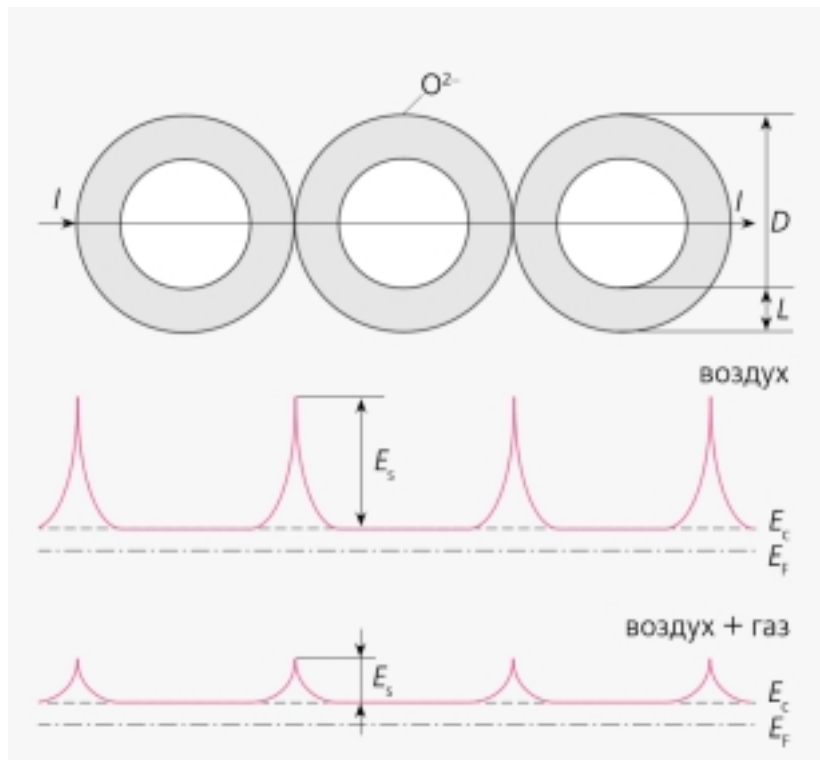


Рис.2. Конфигурация монокристаллов и профили зоны проводимости в направлении протекания тока I . D — диаметр зерна; L — ширина области пространственного заряда; E_s — высота потенциального барьера; E_c — дно зоны проводимости; E_f — уровень Ферми.

Современные полупроводниковые датчики газов способны обнаруживать посторонние газы в воздухе в объемных концентрациях на уровне единиц ppm и даже ppb. Единица ppm (1 молекула на миллион молекул воздуха) соответствует одной капле чернил в тонне воды, или $10^{-4}\%$ об.; единица ppb (одна часть на миллиард) — капле чернил в 50 цистернах.

В соответствии с некоторыми современными представлениями о механизме обоняния животных, собака, как и человек, чувствует запах молекул летучих газов, которые растворяются в воде или в слизистой оболочке носа. Если же молекулы какого-либо газа не растворяются в слизистой оболочке носа, собака их не чувствует. А для полупроводникового газового сенсора условие растворимости газа в воде не обязательно, так как изменение электропроводности датчика происходит в результате взаимодействия газа с молекулами кислорода, а не с молекулами воды. Поэтому такой датчик чувствует некоторые газы, недоступные обонянию собаки.

Газовая чувствительность зависит от температуры сенсора, и для каждого газа существует своя характерная температура, при которой чувствительность к нему данного сенсора максимальна. Физическая адсорбция молекул газа на поверхности происходит в результате нескольких процессов: ионизации атомов, их взаимодействия с поверхностными состояниями, образованием слабых свя-

зей, разрывом слабых связей, изменением зарядового состояния вакансий и т.п. Причем некоторые процессы приводят к увеличению концентрации электронов в полупроводнике с ростом температуры, а другие процессы при нагревании сопровождаются захватом свободных носителей. Поэтому температурная зависимость газовой чувствительности имеет вид кривой с максимумом. Например, для SnO_2 максимальная чувствительность к водороду достигается при 320°C , к спирту — при 330°C , к ацетону — 360°C и т.п. Таким образом, задавая определенный температурный режим работы датчика, можно «настроить» его на распознавание тех или иных газов. Селективность также можно повысить с помощью легирования сенсора различными примесями, чувствительными к конкретным газам (Pd для H_2 , Cu для SO_2 и т.п.).

Как делаются датчики

Роль газочувствительных элементов могут играть керамические образцы, толсто пленочные ($\sim 10\div 100$ мкм) слои, а также тонкие (< 1 мкм) пленки. В настоящее время большинство датчиков газов делается по керамической технологии (компания «Figaro» Япония), в значительно меньших количествах выпускаются датчики с сенсорными слоями, изготовленные по толсто пленочной технологии, и только начинается производство датчиков с использованием микроэлектронной технологии.

Тонкопленочные сенсоры наиболее технологичны, и их можно изготавливать путем напыления тонких пленок оксидов металлов. Совместимость с современной микроэлектронной технологией будет обеспечена, если получать сенсорные слои разнообразными методами реактивного (в кислородсодержащей среде) распыления (магнетронного, ионно-лучевого, ионно-плазменного и др.) металлов. Такая методика получения сенсорных пленок может быть частью технологического процесса производства полупроводниковых приборов и интегральных схем. При этом все элементы датчика газов наносятся на окисленные кремниевые пластины приемами фотолитографии в виде кристаллов размером 1 мм^2 . Тогда из одной стандартной пластины кремния $\varnothing 76$ мм можно сделать более 5000 датчиков [3]. Тонкопленочные сенсоры характеризуются высокой воспроизводимостью параметров и быстродействием, превышающим быстродействие керамических и толсто пленочных сенсоров.

Исходя из принципа работы сенсорного слоя, в конструкцию датчика газов следует включить газочувствительный сенсорный элемент с контактами для измерения его сопротивления и нагревательный элемент для создания оптимальных условий измерения концентрации конкретного газа. Очень важны равномерное распределение темпе-

ратуры по поверхности сенсорного слоя и точность задания и поддержания температуры.

Возможный вариант конструкции датчика газов, изготовленный по микроэлектронной технологии, приведен на рис.3. Датчик размещается на пластине Si, покрытой изолирующим слоем SiO_2 . Все контакты изготавливаются из платины; конструкция нагревателя обеспечивает однородность температуры на сенсорных элементах в пределах $\pm 2^\circ\text{C}$ (при 250°C). Один из сенсорных элементов (SnO_2) закрывается газонепроницаемым слоем (например, SiO_2) и служит элементом сравнения — включается со вторым измерительным элементом в мостовую схему. В зависимости от вида легирующей примеси в сенсорном слое можно сделать датчики для контроля различных газов.

Для уменьшения мощности, потребляемой при нагревании чувствительного элемента, с помощью анизотропного травления кремния изготавливают тонкие (~ 10 мкм) мембраны, на которые напыляют газочувствительные слои. Таким образом удается снизить энергопотребление сенсора до десятков милливольт, что значительно продлевает срок службы датчика с автономным электропитанием.

Поскольку технологию изготовления сенсорных слоев можно совместить с микроэлектронной технологией, был разработан ряд химически чувствительных полупроводниковых приборов: диодов Шоттки с газочувствительными слоями, полевых транзисторов с палладиевым затвором и газочувствительным диэлектриком, а также дру-

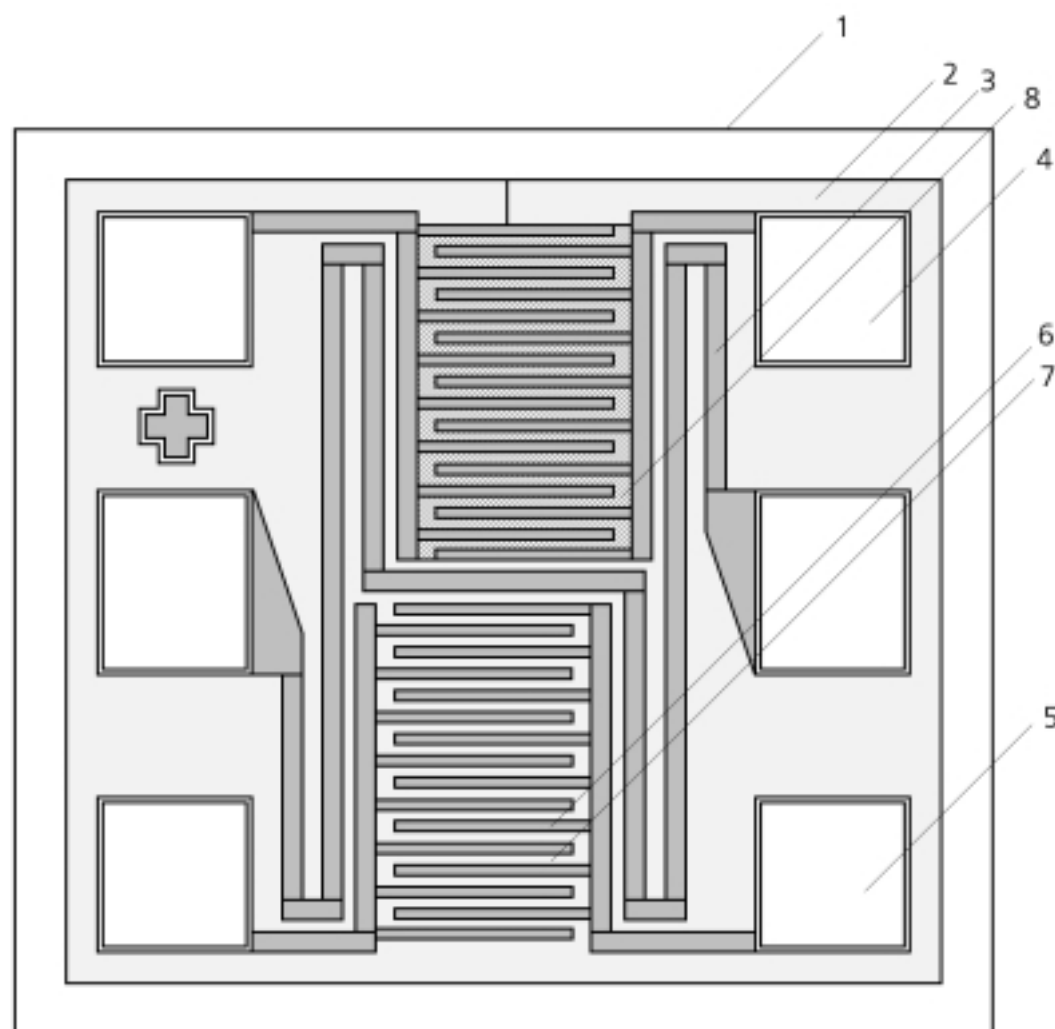
гих комбинированных приборов. Комбинация сенсорных слоев с полупроводниковым транзистором позволяет усиливать сигнал о наличии газа непосредственно в самом датчике. К сожалению, результаты этих исследований еще не нашли широкого практического применения, но перспективы их несомненны.

Используя набор датчиков, чувствительных к различным газам, можно изготовить подобие искусственного носа, обнаруживающего целую гамму запахов. Уже есть образцы таких приборов, используемых для оценки качества пищевых продуктов по их запаху.

На пути к созданию искусственного носа

Рассмотрим, как можно повысить газовую чувствительность датчиков, изготовленных на основе пленок SnO_2 . Обычно пленка SnO_2 , полученная методом, например, реактивного магнетронного напыления, при температуре подложки, близкой к комнатной, имеет аморфную структуру и толщину < 1 мкм. Чтобы газ взаимодействовал с поверхностью SnO_2 более эффективно, надо увеличить отношение доли поверхности к объему кристалла — это будет достигнуто, если в пленке создать мелкокристаллическую структуру, стабильную до максимальных температур работы датчика (500°C). Для кристаллизации пленки проводят ее высокотемпературную термообработку в течение

Рис.3. Топология кристалла датчика газов размером 1×1 мм²:
1 — пластина кремния, 2 — слой SiO_2 , 3 — тонкопленочный платиновый нагреватель, 4 и 5 — контактные площадки, 6 — токосъемные контакты датчика, 7 — слой SnO_2 , 8 — газонепроницаемый маскирующий слой.



ФИЗИКА

нескольких часов. Завершение процесса кристаллизации можно установить по стабилизации электросопротивления пленки. Наличие мелких кристаллов и фазовый состав пленки контролируются с помощью рентгеновской или электронной дифракции. Электронный микроскоп одновременно позволяет определить средние размеры кристаллов (рис.4) при наблюдении пленки на просвет [4]. Так, нам удалось получить пленки SnO_2 со средним размером кристаллов ~ 20 нм. Хорошие результаты при создании мелкокристаллической структуры пленок SnO_2 дает их термообработка с помощью импульсного отжига интенсивным светом или отжиг импульсным лазером. Импульсный отжиг одновременно способствует как образованию большого числа мелких зародышей в пленке, так и образованию мелких (~ 10 нм) кристаллов и сокращает длительность термообработки.

Как же оценить эффективность взаимодействия газов с поверхностью кристаллов в пленке SnO_2 ? Для этого следует сравнить величину области пространственного заряда в кристалле (или дебаевскую длину) с размерами кристалла. Чем больше доля пространственного заряда по отношению к размерам кристалла, тем заметнее будет изменяться поверхностное электросопротивление пленки при взаимодействии с газами. Для определения дебаевской длины экранирования необходимо знать концентрацию свободных носителей заряда в объеме пленки, которую можно определить из измерений эффекта Холла. В результате выполненных оценок размеров зерен кристаллов, концентрации свободных носителей заряда и расчетов дебаевской длины установлено, что

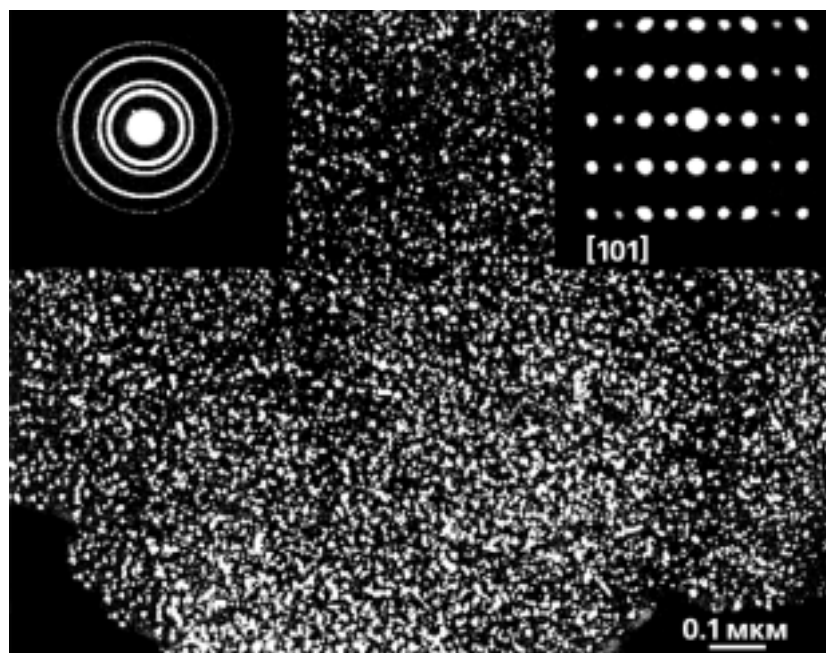


Рис.4. Электронно-микроскопическая фотография поверхности пленки SnO_2 (увел. 30 000). На вставках приведены картины электронной дифракции (от широкого пучка, левая вставка) и микродифракции на отдельном кристалле (когда электронный пучок очень узкий, правая вставка) пленки SnO_2 .

изготовленные нами пленки обладают наибольшей эффективностью, так как область пространственного заряда соизмерима с размерами кристаллических зерен в пленке [4].

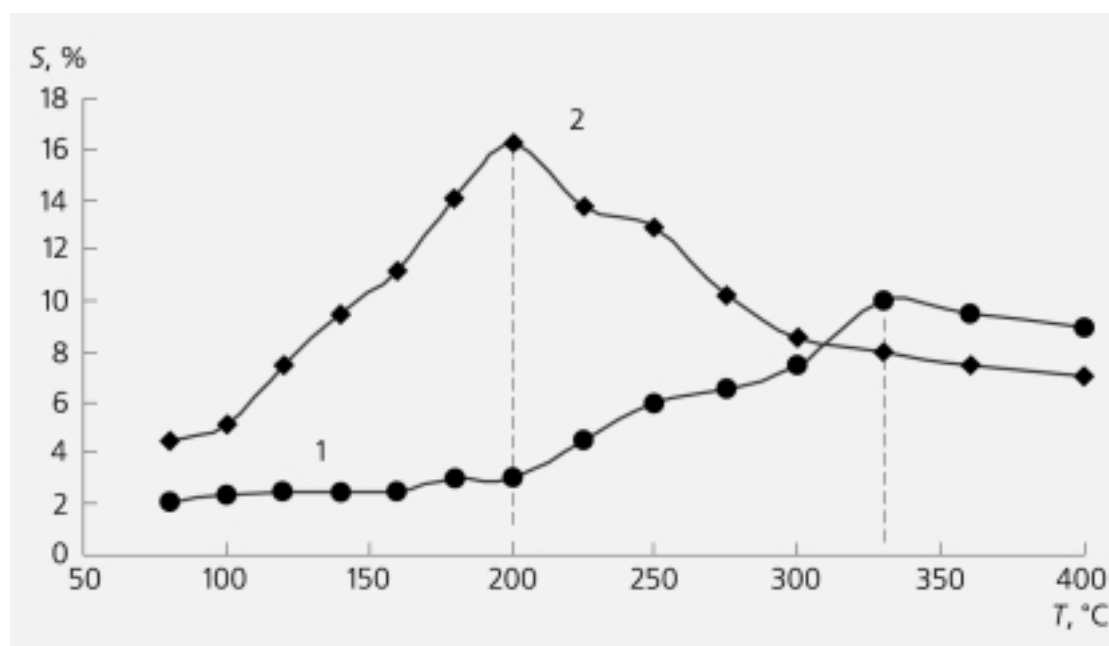
Другой эффективный способ повышения газовой чувствительности пленок SnO_2 — легирование их разными примесями, особенно веществами, обладающими каталитическими свойствами. Легирование пленки катализаторами может не только улучшить газовую чувствительность пленки, но и обеспечить определенную селективность, т.е. избирательную чувствительность к конкретным газам. Введение примесей можно осуществлять разными методами, в том числе используя составную мишень при магнетронном напылении, когда в оловянную мишень делаются небольшие вставки из легирующего металла. Обычно добавки примеси составляют от десятых долей до нескольких процентов. Такое количество примеси в образцах можно обнаружить с помощью рентгеновского микроанализа.

Как же выбирают легирующие примеси? Например, известно, что медь при умеренных температурах образует химически нестойкие соединения с серой, которые при высоких температурах легко разлагаются. Поэтому добавки меди повышают чувствительность и селективность пленок SnO_2 к различным газам, таким как ядовитые H_2S или SO_2 . Каталитические свойства палладия и платины по отношению к протеканию химических реакций с участием водорода известны давно, поэтому данные примеси также используются в датчиках, чувствительных к водороду. Целесообразность и эффективность других примесей не всегда можно заранее предсказать, и они часто определяются эмпирическим путем.

Рассмотрим некоторые наши результаты легирования пленок SnO_2 различными примесями. При использовании чистой, не легированной пленки SnO_2 для контроля 0.1% газа водорода в воздухе температура максимальной чувствительности составляет $\sim 320^\circ\text{C}$. Легирование образца примесью палладия повышает чувствительность пленки к водороду в 1.5 раза и снижает температуру максимальной чувствительности до 200°C (рис.5) из-за проявления каталитических свойств примеси палладия по отношению к реакции взаимодействия водорода с кислородными вакансиями SnO_2 [5]. Подобные же результаты были получены с использованием пленок SnO_2 , легированных платиной. Снижение температуры максимальной чувствительности в результате легирования пленок почти на 120°C означает, что потребляемую мощность датчика, изготовленного на основе легированных пленок, можно существенно снизить, а время работы автономного портативного измерителя концентрации взрывоопасного газа в воздухе значительно увеличить.

Однако самый многообещающий способ улучшить физические и метрологические характерис-

Рис.5. Температурная зависимость газовой чувствительности пленки SnO_2 к этанолу с концентрацией в воздухе ~ 1000 ppm:
1 — нелегированная пленка SnO_2 ;
2 — пленка SnO_2 , легированная Pd до 3.0% об.



тики газочувствительных пленок — изготавливать многокомпонентные композиционные материалы на базе двух и даже трех оксидов соответствующих металлов, например, $\text{SnO}_2 + \text{SiO}_2$, $\text{SnO}_2 + \text{In}_2\text{O}_3$, $\text{SnO}_2 + \text{CuO}$, $\text{SnO}_2 + \text{TiO}_2$ и т.п. В зависимости от соотношения разных оксидов в матрице можно варьировать чувствительность и избирательность пленок к различным газам в широких пределах.

Очень интересные результаты дали композиционные пленки $\text{SnO}_2 + \text{SiO}_2$, полученные одновременным распылением олова и кварца в кислородсодержащей атмосфере. Присутствие кварца в пленке создает условия, препятствующие росту зерен SnO_2 при термообработке. Таким образом были изготовлены пленки, размер зерен кристаллов в которых лежит в пределах $5\div 10$ нм, т.е. эти материалы можно назвать нанокompозитами. На рис.6 приведено изображение поверхности, полученное с помощью атомно-силового микроскопа («Femtoscan-0,1») [6]. Оказалось, что в зависимости от содержания дополнительных компо-

нентов в пленке SnO_2 можно изменять величины и температуры максимальной газовой чувствительности, повышать избирательность пленок к различным газам.

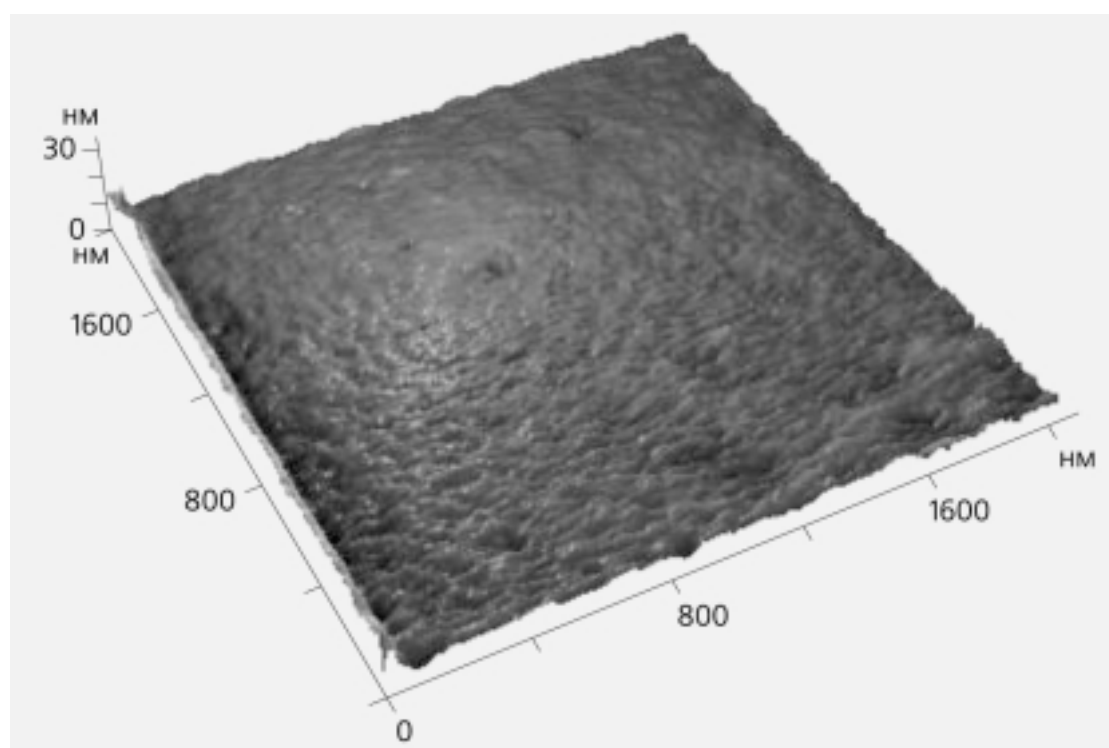
Итак, нам известны пути изготовления высокочувствительных и достаточно селективных датчиков газов, из которых при соответствующей электронной периферии можно изготовить устройство (газоанализатор) для контроля целой гаммы газов — аналог органа обоняния.

Каковы перспективы?

Какие же основные научные и технические проблемы предстоит решать в ближайшее время?

Необходимо выяснить на атомно-ионном уровне механизмы газовой чувствительности оксидных пленок, чтобы научиться этими механизмами управлять. Разработка и изготовление миниатюрных газочувствительных устройств (инди-

Рис.6. Изображение поверхности композита $\text{SnO}_2 + 3$ ат. % Si в атомно-силовом микроскопе. Средний размер зерна поликристалла не превышает 10 нм.



ФИЗИКА

каторов и спектрометров) невозможна без привлечения достижений современной микроэлектроники. Будут продолжены поиски новых многокомпонентных наноконпозиционных материалов с уникальными газочувствительными и селективными свойствами. Очень перспективна разработка новых конструкций и приборов, сочетающих газочувствительные функции с возможностями полупроводниковых приборов и интегральных схем. Только начаты исследования по использованию в газовой сенсорике квантово-размерных эффектов и новых технологий (микросистемная техника, молекулярно-лучевая эпитаксия, лазерная обработка, импульсные отжиги и т.п.). Крайне важно решить проблему экономичности, удобства и простоты использования как индивидуальных, так и групповых средств обнаружения вредных газов в воздухе.

А что могут предложить исследователи каждому конкретному человеку?

Во-первых, это надежные портативные индикаторы вредных газов, способствующие повышению безопасности человека в условиях вредных (химических, металлургических) и опасных (шахты, рудники) производств. Во-вторых, это средства контроля утечек бытового газа в жилищах (квартира, дача, автономные системы отопления), в общественных местах (школы, больницы, торговые центры и т.п.), в автомобилях на газовом топливе и др. Датчики угарного газа и дыма также могут использоваться как средства противопожарной сигнализации. В-третьих, это специальные датчики, позволяющие обнаруживать малые количества наркотических и лекарственных веществ, некоторые виды взрывчатых и отравляющих веществ, что особенно актуально в свете современной борьбы с терроризмом и наркоторговлей. Производство большого количества дешевых и экономичных датчиков газов может создать предпосылки для широкого экологического мониторинга атмосферы вблизи вредных производств и промышленных центров, в оживленных местах на улицах и в других местах. Развитие экологически чистой водородной энергетики ставит задачи контроля процессов производства, транспортировки, хранения и применения водорода. Эти задачи можно решить за счет использования портативных датчиков водорода. Многообещающие перспективы использования датчиков газов в медицине, например, для оценки степени алко-

гольной интоксикации, при наблюдении и лечении сахарного диабета, для диагностики некоторых других болезней по составу выдыхаемого воздуха и т.п.

Приведенные примеры показывают, что в результате фундаментальных исследований проблемы атомно-ионного взаимодействия газов с поверхностью твердого тела созданы предпосылки для разработки и широкого применения новых полупроводниковых приборов — датчиков газов. Использование датчиков газов в промышленности, в быту, в медицине может существенно улучшить качество жизни людей за счет повышения безопасности их существования, улучшения состояния окружающей среды, автоматизации производственных и бытовых процессов, более высокого уровня комфортности и т.п.

Пока успехи в создании искусственного носа или систем обоняния намного скромнее, чем в случаях искусственного глаза и искусственного уха. И тем не менее за последние 40 лет пройден путь от примитивных датчиков газов системы Тагучи до современных микроэлектронных устройств, изготовленных с использованием всех достижений микроэлектроники и микросистемной техники. Появилась возможность изготавливать сверхминиатюрные датчики газов и конструировать из них сенсорные устройства для одновременного контроля нескольких газов, что делает их похожими на человеческий нос. В перспективе — изготовление на одной пластине кремния мультисенсорных устройств и систем обработки сигналов для контроля ничтожных количеств примесей самых разных газов в воздухе.

Так что вскоре мы сможем предложить герою рассказа Гоголя, потерявшему свой нос, майору Ковалеву, искусственный нос, который будет различать ароматы цветов, трав, пищи и т.п., а также многих других веществ и газов, не имеющих запаха для нас. По спектру запахов и по чувствительности искусственный нос будет значительно превосходить собачий, и майор будет чутко улавливать и различать все это море разнообразных запахов, приятных и не очень. Интересно, обрадуется ли он этому подарку? В любом случае, нам электронный нос просто необходим. ■

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проекты 01-02-97402 и 03-02-96453.

Литература

1. Волькенштейн Ф.Ф. Электронная теория катализа в полупроводниках. М., 1960.
2. Виглеб Г. Датчики. М., 1989.
3. Рембеза С.И., Просвирин Д.Б., Викин О.Г., Буслов В.А., Куликов Д.Ю. // Сенсор. 2004. №1(10). С.20—28.
4. Rembeza S.I., Svistova T.V., Borsikova O.I., Rembeza E.S. // Phy. Stat. Sol.(a). 2000. V.179. P.147—152.
5. Рембеза С.И., Свистова Т.В., Борсякова О.И., Рембеза Е.С. // Сенсор. 2001. №2. С.39—42.