

**ГАЗОАНАЛИЗАТОР ВОДОРОДА С МАЛОЙ ПОТРЕБЛЯЕМОЙ
МОЩНОСТЬЮ НА БАЗЕ МДП-СЕНСОРА**

А. В. ЛИТВИНОВ, Л. Н. КАЛИНИНА, И. Н. НИКОЛАЕВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Москва, Россия, e-mail: Nikolaev@mephi.ru

Изготовлен новый тип сенсоров со структурой $Pd-Si_3N_4-SiO_2-Si$, работающих при температурах 6 – 50 °С. На его основе разработан макет газоанализатора для измерений концентраций водорода в диапазоне 0,2 – 4 %, в котором отсутствие нагревательного элемента на сенсоре позволило снизить потребляемую мощность с 1,6 до 0,1 Вт.

Ключевые слова: газоанализатор водорода, малая потребляемая мощность, МДП-сенсор.

A new type of sensors with $Pd-Si_3N_4-SiO_2-Si$ structure operating at temperatures 6 – 50 °C is manufactured. On its basis the prototype of gas analyzer for hydrogen concentrations measurements in the range 0,2 – 4 % is developed. The absence of heating element on the sensor allowed to decrease the power consumption from 1,6 to 0,1 W.

Key words: hydrogen gas analyzer, low power consumption, MIS-sensor.

При использовании портативных газоанализаторов актуален вопрос экономии потребляемой мощности. В газоанализаторах на базе МДП-сенсоров (металл–диэлектрик–полупроводник) большая часть мощности потребляется самим сенсором, что обусловлено необходимостью его нагрева до 80 – 150 °С для увеличения быстродействия. Обычно средняя потребляемая мощность нагревательного элемента сенсора составляет 1,6 Вт, вследствие чего возникает проблема работы газоанализатора в долговременном автономном режиме. В связи с этим представляет интерес поиск вариантов устройств МДП-сенсоров с минимальной потребляемой мощностью.

Кратко изложим устройство и принцип действия МДП-сенсора, более подробно они рассмотрены в [1, 2]. Он представляет собой конденсатор с электроемкостью C , состоящий из металлической и полупроводниковой обкладок, разделенных тонким слоем диэлектрика (рис. 1, *а*). На рис. 1, *б* приведена его вольтфарадная характеристика – зависимость электроемкости C от приложенного к обкладкам конденсатора напряжения V . Принцип действия сенсора состоит в следующем. Молекулы газа адсорбируются на металлическом электроде, диффундируют вглубь до границы раздела металл–диэлектрик и изменяют электроемкость сенсора, при этом C – V -характеристика смещается параллельно оси напряжения либо влево, либо вправо в зависимости от типа газа (пунктирная кривая на рис. 1, *б*). При постоянном напряжении смещения $V_{см}$, приложенном к обкладкам конденсатора, измеряется изменение электроемкости ΔC , преобразуемое электронной схемой газоанализатора в изменение напряжения, значение которого выводится на дисплей прибора.

Для определения метрологических характеристик МДП-сенсора измеряют динамическую и статическую характеристики. Динамическая характеристика – это зависимость показаний прибора от времени при прямоугольном импульсе концентрации газа. По ее виду устанавливают чувствительность и быстродействие сенсора (времена отклика $\tau_{0,9}$ и релаксации $\tau_{0,1}$). Статическая характеристика – это зависимость пока-

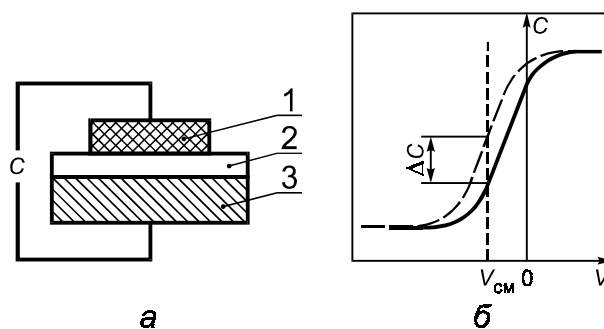


Рис. 1. Устройство (*а*) и вольтфарадная характеристика (*б*) МДП-сенсора:

1 – металлический электрод; 2 – слой диэлектрика; 3 – пластина полупроводника; пунктирная кривая соответствует C – V -характеристике при появлении H_2 в атмосфере; $V_{см}$ – постоянное напряжение смещения

заний прибора от концентрации газа, она позволяет определить диапазон измеряемых концентраций газа. Измерения выполняли с помощью аттестованных поверочных газовых смесей, изготовленных Балашихинским кислородным заводом. Вопросы долговременной стабильности и воспроизводимости МДП-сенсоров подробно изложены в [1].

Как отмечалось выше, большая часть мощности газоанализаторов расходуется на нагрев МДП-сенсоров. Дело в том, что «классические» сенсоры со структурами $\text{Pd-Ta}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2\text{-Si}$ и $\text{Pd-SiO}_2\text{-Si}$ при температурах ниже 80°C обладают недопустимо низким быстродействием (времена отклика и релаксации составляют более часа). Поэтому весьма актуальны попытки разработки сенсоров с высоким быстродействием, работающих при сравнительно низких температурах.

Исследования МДП-сенсоров с различными диэлектрическими слоями [3] показали, что наиболее высокое быстродействие при температуре 100°C отмечено у сенсоров со структурой $\text{Pd-Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2\text{-Si}$. В связи с этим возникло предположение, что временные характеристики этих сенсоров будут приемлемыми и при более низких температурах. Для его проверки были проведены две серии экспериментов.

В первой серии измеряли динамические характеристики сенсоров со структурой $\text{Pd-Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2\text{-Si}$ для объемной доли H_2 1 % в смеси при температурах 6, 22 и 50°C . При этом нагревательный элемент отсутствовал, а температура сенсора соответствовала температуре термостата. На рис. 2 представлены результаты измерений, откуда следует,

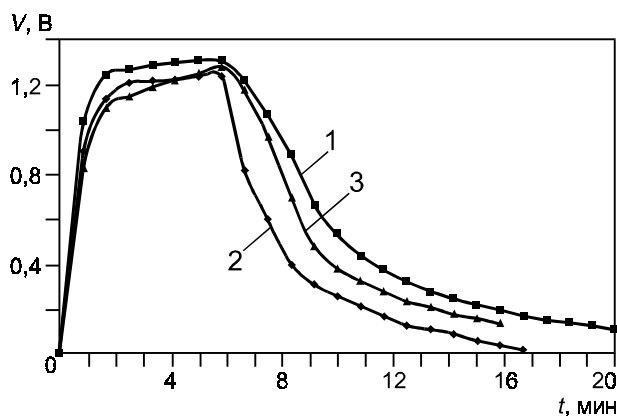


Рис. 2. Динамические характеристики сенсора со структурой типа $\text{Pd-Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2\text{-Si}$ при концентрации H_2 1 % и температурах 6, 22, 50°C – кривые 1 – 3, соответственно

что для всех трех температур $\tau_{0,9}$ не превышает 2 мин, а $\tau_{0,1}$ составляет около 10 мин. Также отметим, что чувствительность сенсора слабо зависит от температуры, следовательно, калибровать его при каждой температуре в отдельности не требуется.

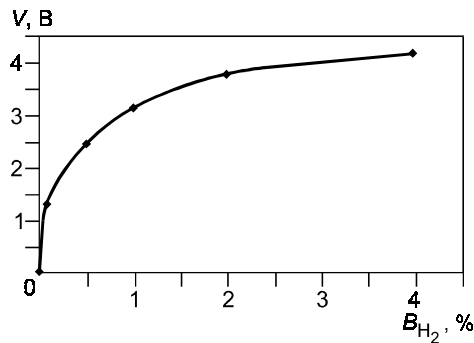


Рис. 3. Статическая характеристика сенсора со структурой типа Pd-Si₃N₄-SiO₂-Si при комнатной температуре (22 °С)

Во второй серии измеряли динамические характеристики при температуре 22 °С для различных концентраций H₂ и на основе полученных данных строили статическую характеристику (рис. 3). Из анализа динамических характеристик было установлено, что при концентрации H₂ выше 0,2 % времена $\tau_{0,9}$ и $\tau_{0,1}$ составляют соответственно 3 и 10 мин, а для значений ниже 0,2 % быстродействие сенсора резко снижается ($\tau_{0,9}$ = 5 мин, $\tau_{0,1}$ > 40 мин).

В связи с этим оптимальный нижний предел диапазона концентраций водорода, измеряемых газоанализатором на базе такого сенсора, не должен быть ниже 0,2 %. Из рис. 3 следует, что верхний предел измеряемых сенсором концентраций водорода достигает 4 %.

Таким образом, результаты проведенных измерений подтвердили предположение о том, что МДП-сенсоры со структурой Pd-Si₃N₄-SiO₂-Si сохраняют приемлемое быстродействие при температурах вблизи комнатной, что делает возможным создание на их базе газоанализаторов с малой потребляемой мощностью.

Был разработан макет такого газоанализатора. Предварительно решали проблему температурного дрейфа электроемкости МДП-сенсора. Температурный дрейф обусловлен наличием в составе сенсора пластины полупроводника, в котором концентрация носителей тока существенно зависит от температуры, что приводит к сдвигу C - V - характеристики по оси C (см. рис. 1) и, следовательно, к изменению электроемкости МДП-сенсора на величину $\Delta C(T)$ при фиксированном $V_{см}$. Электронная схема газоанализатора, разработанная для классических типов сенсоров, фиксирует любое изменение электроемкости сенсора независимо от того, по какой причине оно возникает. Поэтому изменение

$\Delta C(T)$, обусловленное дрейфом температуры, можно воспринять как сигнал от появления водорода $\Delta C(H_2)$, что приводит к некорректным результатам измерения. Электронная схема газоанализатора была модифицирована так, чтобы скомпенсировать вклад $\Delta C(T)$.

Основная часть электронной схемы – измерительный мост (рис. 4). В одно плечо моста входит сенсор с электроемкостью C при фиксированном напряжении смещения $V_{см}$, в другое плечо – эталонный конденсатор C_0 . На мост подается периодический измерительный сигнал от генератора Γ . Полезным сигналом служит разность потенциалов U между точками A и B . Плечи моста подбирают таким образом, чтобы при отсутствии H_2 при постоянной температуре выполнялось условие $U = 0$ ($R_1 C = R_0 C_0$).

В стандартной схеме газоанализатора, когда сенсор нагревается и термостабилизируется, изменение его электроемкости может быть вызвано появлением H_2 в атмосфере, т. е. $\Delta C = \Delta C(H_2)$. Это приводит к изменению силы тока, протекающего через сенсор, что в свою очередь изменяет потенциал в точке A , и возникает сигнал $U(H_2) \neq 0$. Затем напряжение $U(H_2)$ усиливается, детектируется и подается на дисплей газоанализатора.

В данном случае, когда сенсор не нагревается (и не термостабилизируется) $\Delta C = \Delta C(H_2) + \Delta C(T)$ и, соответственно, $U = U(H_2) + U(T)$. Практически $U(H_2)$ и $U(T)$ могут быть величинами одного порядка. Для исключения влияния $U(T)$ в схеме измерительного моста сопротивление R_1 было заменено на специально подобранный терморезистор R_T . Тогда изменения в цепи, обусловленные $\Delta C(T)$, автоматически компенсировались изменением сопротивления терморезистора под действием температуры так, что потенциал в точке A оставался постоянным, а значит, $U(T) = 0$. В результате удалось исключить вклад $U(T)$ в сравнительно небольшом, но важном для практической работы интервале температур 6 – 50 °С.

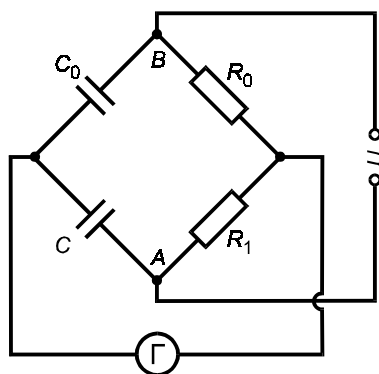


Рис. 4. Схема измерительного моста газоанализатора:

C_0 , R_0 , R_1 – эталонные конденсатор и резисторы; C – емкость сенсора; Γ – генератор переменного сигнала; U – измеряемая разность потенциалов

Выводы. Рассмотрены сенсоры со структурой $\text{Pd-Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2\text{-Si}$, имеющие удовлетворительное быстродействие при температурах вблизи комнатной ($6 - 50^\circ\text{C}$). Показано, что сенсоры такого типа можно использовать в качестве чувствительных элементов газоанализаторов. На базе созданных сенсоров был разработан макет газоанализатора водорода для концентраций $0,2 - 4\%$. Исследование МДП-сенсоров продолжаются в течение десяти лет. За это время авторами было установлено, что срок службы МДП-сенсоров в составе газоанализаторов водорода составляет пять лет и более. Селективность прибора достигается установкой перед сенсором специального фильтра. Отсутствие традиционно используемого нагревательного элемента позволило снизить потребляемую мощность с $1,6$ до $0,1$ Вт, благодаря чему прибор может работать длительное время с малогабаритным источником питания в автономном режиме.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Николаев И. Н., Литвинов А. В., Емелин Е. В. Возможности использования МДП-сенсоров в качестве чувствительных элементов газоанализаторов // Датчики и системы. 2007. № 5. С. 66.
2. Николаев И. Н., Литвинов А. В., Емелин Е. В. Механизм чувствительности МДП-сенсоров к концентрациям газов // Датчики и системы. 2006. № 7. С. 66.
3. Калинина Л. Н., Литвинов А. В., Николаев И. Н. МДП-сенсоры с различными металлическими и диэлектрическими слоями // Датчики и системы. 2011. № 2. С. 20.

Дата принятия 21.08.2012 г.

