

03;06

Спектральные и статистические характеристики шума полупроводниковых газовых сенсоров в эквивалентных условиях

© Р.Б. Угрюмов, А.В. Шапошник, В.С. Воищев

Воронежский государственный аграрный университет им. К.Д. Глинки,
394043 Воронеж, Россия
e-mail: asb@agrochem.vsau.ru

(Поступило в Редакцию 4 ноября 2003 г.)

Исследовалась стационарность и гауссовость флуктуаций сопротивления полупроводниковых газовых сенсоров, а также спектральный состав шума в эквивалентных условиях. Показана зависимость гауссовости и стационарности шума от состава газовой фазы. Обнаружено, что спектральный состав шума сенсора в разных средах имеет качественно различный вид. На основании этого сделан вывод о принципиальной возможности повышения селективности газовых сенсоров путем совместного измерения их резистивных и шумовых характеристик.

Хемосорбция оказывает глубокое воздействие на систему энергетических уровней поверхностных состояний. Случайный характер захвата и освобождения носителей заряда приводит к флуктуациям их концентрации и/или подвижности и, как следствие, к флуктуациям электропроводности. Изменение системы энергетических уровней приводит к изменению среднего времени заряженного и нейтрального состояния поверхностных центров, влияя таким образом на динамику захвата и освобождения носителей тока и, как следствие, на величину шума полупроводника. В эксперименте это выражается в изменении спектральных и статистических характеристик токового шума при изменении состава газовой фазы [1,2].

Настоящая работа посвящена исследованию принципиальной возможности определения состава газовой фазы по шумовым измерениям. Для этой цели была проведена серия экспериментов по измерению относительной спектральной плотности мощности шума $S(f)$ и оценки ξ стационарности и гауссовости шума в эквивалентных условиях. Сущность методики эквивалентных условий заключается в подборе в газовой смеси таких пропорций восстановительных и окислительных компонентов, при которых сопротивление сенсора было бы одинаковым. Это возможно из-за того, что донорное действие газов-восстановителей (водород, окись углерода, этанола и т.д.), приводящее к уменьшению сопротивления, уравновешивалось акцепторным действием содержащегося в воздухе кислорода (акцепторное действие приводит к увеличению сопротивления полупроводника n -типа). В этом случае удается нивелировать изменение абсолютной мощности шума вследствие изменения его сопротивления.

Для проведения экспериментальной части был изготовлен специальный автоматизированный лабораторный комплекс, позволяющий исследовать как сенсорные, так и шумовые характеристики газочувствительных структур в различных газовых смесях [3]. Для оценки исследования спектрального состава шума применялся метод цифрового спектрального анализа. Исследование

гауссовости и стационарности шума проводилось методом, основанным на измерении интенсивности шума на выходе полосового фильтра [4,5]. Предполагается нулевая гипотеза о том, что шум гауссов и стационарен. Тогда теоретическая погрешность измерения мощности шума определяется соотношением $E_t^2 = 1/(t\Delta f_x)$, где Δf_x — эффективная ширина спектра фильтрованного шума, t — время наблюдения. При измерении оценивается экспериментальная погрешность $E_e = s/(p\sqrt{N})$, где s — дисперсия интенсивности шума, p — среднее значение мощности шума, N — число некоррелированных отсчетов интенсивности. Вычисляется полуширина ΔE доверительного интервала для доверительной вероятности 95%, которая равна удвоенной относительной погрешности E_t . Рассчитывается оценка $\xi = E_e/E_t - 1$. В случае, если $|\xi| \leq \Delta E$, считаем что входной шум гауссов и стационарен. В противном случае хотя бы одно условие не выполняется: нарушена стационарность или/и гауссовость шума.

Исследуемые газовые сенсоры получали методом химического осаждения [6]. В качестве эталонного сопротивления газового сенсора принималось сопротивление сенсора в нейтральной среде (газ-аргон) при температуре 180°C, которое составляло 150 кОм. Измерение шума производилось в нейтральной среде, а также в смесях воздух + пары этилового спирта и воздух + СО. При этом подбирались такое содержание СО или паров этилового спирта, чтобы сопротивление сенсора составляло 150 кОм. На рис. 1 представлены относительные спектральные плотности мощности шума сенсоров в трех средах в эквивалентных условиях. Из рисунка видно, что при одном и том же сопротивлении и одинаковой температуре относительные спектральные плотности мощности шума в разных средах отличаются не только количественно, но и имеют качественно различный вид. Частотная зависимость спектральной плотности мощности шума в нейтральной среде хорошо аппроксимируется обратной степенной зависимостью с показателем степени, близким к 1. Можно видеть, что в нейтральной среде сенсор показывает „классический“

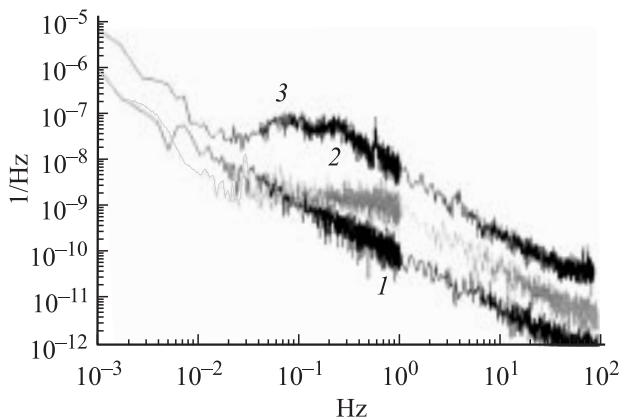


Рис. 1. Спектральная плотность мощности шума сенсора в различных газовых средах при температуре 180°C: 1 — аргон, 2 — смесь воздух + CO (0.45%), 3 — смесь воздух + пары этилового спирта (0.33%).

фликкер-шум на протяжении почти пяти декад частоты. При хемосорбции появляется существенная нелинейность частотной зависимости СПМШ и даже наблюдается ее рост с частотой (кривая 2). Подобное увеличение спектральной плотности мощности шума невозможно объяснить на основании модельных представлений о происхождении шума вследствие захвата носителей тока ловушками. Эти модели сводят результирующий спектр к сумме лоренцевских спектров независимых шумящих центров, а их суммированием невозможно получить рост спектральной плотности мощности шума с частотой. В среде паров спирта (кривая 3) заметны несколько размытых максимумов с кратными частотами 0.08, 0.24, 0.56 Hz. Наличие широких максимумов на частотных зависимостях спектральной плотности мощности шума можно связать с возникновением неких автоколебательных процессов, которые трудноразличимы в широкополосном шумовом $1/f$ -сигнале. Можно предположить наличие нескольких механизмов возникновения шума, независимых друг от друга и дающих некоррелированные вклады в общий шум. Величина этого вклада может зависеть от внешних параметров, таких как температура и концентрация активного газа. Совокупность экспериментальных данных приводит к выводу о наличии некоторых оптимальных сочетаний температуры и концентрации газа, при которых автоколебательные процессы имеют максимальную интенсивность.

На рис. 2 представлена зависимость относительной оценки погрешности ξ (5) стационарности и гауссовости шума в эквивалентных условиях при различной ширине пропускания фильтра. Время наблюдения составляло 84 s, центр полосы пропускания фильтра 146 Hz. На рисунке двумя симметричными относительно нуля линиями показан доверительный интервал, куда должна попасть оценка для гауссового стационарного шума.

Кривая 1 на рис. 2 снята для сенсора в воздушной атмосфере при комнатной температуре. Видно, что при комнатной температуре оценка ξ образца находится в

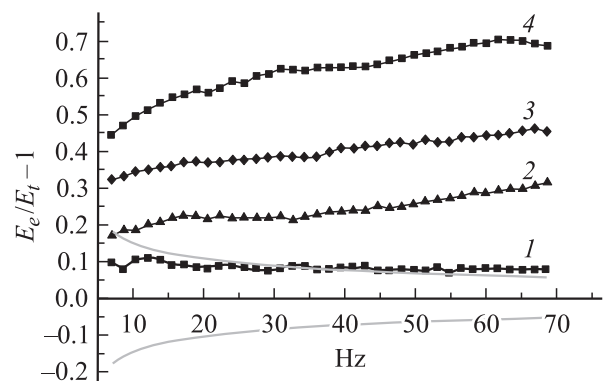


Рис. 2. Оценка гауссовости и стационарности шума сенсора в различных газовых средах: 1 — воздух при 25°C, 2 — аргон при 180°C, 3 — смесь воздух + CO (0.45%) при 180°C, 4 — смесь воздух + пары этилового спирта (0.33%) при 180°C.

районе доверительного интервала, поэтому его с определенной долей условности можно считать гауссовым и стационарным. Некое отклонение от гауссовости и стационарности заметно при увеличении полосы пропускания свыше 40 Hz. Кривые 2–4 на рис. 2 рассчитаны по тем же шумовым рядам, что и кривые 1–3 на рис. 1. Видно, что при одном и том же сопротивлении оценка ξ различается для трех сред.

Измерение спектральной плотности мощности шума и оценки гауссовости и стационарности ξ в эквивалентных условиях показывает принципиальную возможность определения качественной природы газов, что недостижимо обычными резистивными измерениями. Например, при температуре поверхности датчика 180°C спирт с концентрацией паров 0.33% и CO с концентрацией 0.45% приводят к одинаковому относительному изменению электропроводности и поэтому неразличимы. Снятие же шумовой характеристики позволяет качественно определить состав газовой фазы, поскольку шумовые характеристики сенсора в большей степени зависят от индивидуальных особенностей химизма взаимодействия адсорбата с поверхностью. Таким образом, можно сделать вывод о принципиальной возможности повышения селективности газовых сенсоров путем совместного измерения их сенсорных и шумовых характеристик.

Список литературы

- [1] Титов А.В., Гуляев А.М., Мухина О.Б., Варлашов И.Б. // Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах. Матер. докл. научно-методического семинара. М.: МНТОРЭС им. А.С. Попова. МЭИ (ТУ), 2002. С. 245–246.
- [2] Урюмов Р.Б., Шапошник А.В., Воищев В.С., Рябцев С.В., Васильев А.А. // Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах. Матер. докл. научно-методического семинара. М.: МНТОРЭС им. А.С. Попова. МЭИ (ТУ), 2003. С. 245–246.

- [3] Угрюмов Р.Б., Шапошник А.В., Воищев В.С., Яковлев П.В., Кирнов Д.С. // Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах. Матер. докл. научно-методического семинара. М.: МНТОРЭС им. А.С. Попова, 2003.
- [4] Якимов А.Б. // Изв. вузов. Радиофизика. 1997. Т. 40. № 9. С. 1155.
- [5] Ferrante G., Якимов А.Б. // Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах. Матер. докл. научно-методического семинара. М.: МНТОРЭС им. А.С. Попова, 1999. С. 177–182.
- [6] Мальшев В.В., Писляков А.В. // Сенсор. 2001. № 1. С. 2–15.