

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

УДК 543.5;543.26

DOI 10.21685/2307-4205-2017-3-1

ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ «ГАЗОВАЯ ФАЗА – ПОЛУПРОВОДНИК»

А. И. Белозерцев, С. З. Эль-Салим

Одной из важных задач теории надежности является активизация исследований по разработке не столько математических, сколько физических моделей отказов и причин, вызывающих их возникновение.

Следовательно, необходимо разработать такие физические или математические модели и требования, которые позволяют достаточно полно характеризовать надежность системы независимо от ее природы. При этом необходимо знать причину, а не следствие отказа. Следовательно, необходим инженерный анализ и расчет надежности будущего изделия, а также алгоритма его работы.

Существующие модели, основанные на вероятностном подходе, не удовлетворяют условиям контроля готовой продукции, поскольку далеки от практики производства. Многочисленные исследования говорят о том, что в основе обеспечения надежности лежат физико-химические процессы, протекающие в используемых материалах на стадии изготовления и последующей их эксплуатации [1, 2].

Поскольку физические явления описываются физическими теориями, на базе которых строятся математические модели, то и надежность как процесс потери или сохранения работоспособности объекта за счет изменения внутреннего состояния описывается физической теорией, а затем уже возможно создание математической теории.

Вероятностно-статистический подход, основанный на теории вероятностей и математической статистике, несовершенен, так как для установления закономерностей возникновения отказов необходимо проводить опыты, приводящие к изменению свойств и разрушению деталей. Кроме того, он не дает точного анализа поведения объекта при дальнейшей эксплуатации. В соответствии с этим подходом возможно с определенной степенью достоверности предсказать момент наступления отказа, а не предупредить его и обеспечить надежность работы объекта.

Детерминированный (причинно-следственный) подход позволяет оценить надежность как отдельного элемента системы, так и всей системы в целом при одновременном воздействии на объект внешних и внутренних факторов. Поэтому такой подход к изучению надежности является более приемлемым [3]. Детерминированная модель повышения надежности аналитических систем на основе причинно-следственных связей прежде всего выстраивается на анализе процессов, эту связь формирующих [4].

Существование «чистых» паров или газов в воздухе практически недостижимо в силу природного молекулярного многообразия. Молекулярный состав окружающего воздуха формируется молекулами (веществами), которые в свою очередь претерпевают физические и химические трансформации. Молекулы целевого (исследуемого) вещества могут сохранить структуру или трансформироваться, сохраняя основные свойства. Также целевые вещества могут вступать во взаимодействие с другими компонентами, содержащимися в воздухе. При этом исходная концен-

трация целевого вещества может изменяться в ту или иную сторону, т.е. состав окружающего воздуха можно считать динамически переменным. Также необходимо учитывать аэродинамическое перемешивание и способ (метод) отбора проб [5].

В основе адсорбционно-кинетического анализа [полупроводники-сенсоры] лежит измерение изменения электропроводности вследствие хемосорбции вещества из газовой фазы за определенное время. Очевидно, что даже при низких концентрациях число молекул велико. Так, количество молекул водорода в одном кубическом метре при нормальных условиях для концентрации

10^{-3} г/м^3 равно $N = \frac{m}{\mu} N_{Av} \approx 3 \cdot 10^{20}$, где N_{Av} – число Авогадро.

Практика изучения случайных процессов показывает, что хотя результаты отдельных наблюдений, проведенных в одинаковых условиях, могут сильно отличаться, в то же время средние результаты для достаточно большого числа наблюдений устойчивы и слабо зависят от результатов отдельных наблюдений.

Для построения феноменологической модели формирования аналитического сигнала необходимо построить цепь причинно-следственных связей и определить уравнения изменения состояния в соответствии со временем течения всего процесса измерения [6]. На рис. 1 приведена общая схема событий в зависимости от их наступления.

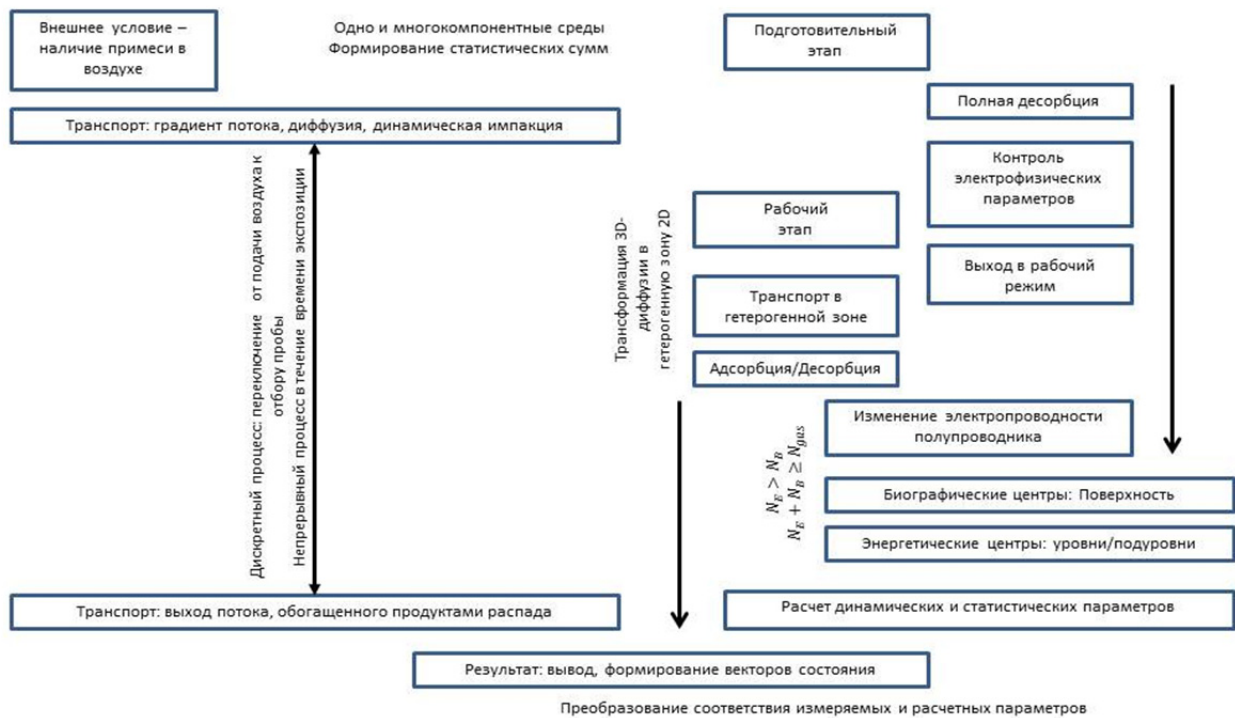


Рис. 1. Причинно-следственная цепь событий формирования аналитического сигнала

Причинно-следственная модель состоит из двух практически независимых физически, но связанных идеологически блоков. К физическим блокам следует отнести:

- процессы, происходящие в объеме полупроводника при его нагреве;
- процессы, протекающие в гетерогенной зоне;
- конкурирующие процессы адсорбции и десорбции при контакте молекул газовой фазы с поверхностью.

По времени процессы располагаются по приоритету причинности:

- 1) отбор и доставка вещества в гетерогенную зону газочувствительного слоя;
- 2) взаимодействие молекул газовой фазы с поверхностью полупроводника;
- 3) транспорт электронов адсорбата с учетом знака направления перехода;
- 4) поверхностные процессы, формирующие значения изменения электропроводности.

Для повышения достоверности качественных и количественных измерений, проводимых с помощью полупроводниковых сенсоров, имеющих развитую структуру поверхности (рис. 2),

крайне важно определить момент начала взаимодействия вещества газовой фазы с поверхностным слоем газочувствительного элемента [5].

Так как данный метод анализа является косвенным, то перед формированием аналитического сигнала проводится первичная обработка, которая включает процедуру сглаживания, расчета текущего среднего значения и расчета нормированной дисперсии $Z(t) = [\tilde{U}(t) - U(t)]^2$.



Рис. 2. Растровое изображение чувствительного слоя полупроводникового сенсора с увеличением $\times 50000$

Для точного определения момента начала взаимодействия сенсора с газом необходимо установить параметр, который однозначно откликается на факт взаимодействия вещества газовой фазы с поверхностью. Так как для изменения электропроводности при формировании аналитического сигнала необходима активация, в данном случае – подведение энергии для нагрева до определенной температуры, то целесообразно по измеренным и преобразованным параметрам рассчитать степень упорядоченности гетерогенной зоны.

Так как в процессе изменения электропроводности (сопротивления) участвует большое количество частиц, сигнал $U(t)$ распределен нормально. В этом случае интегральная функция и функция плотности вероятности имеют вид

$$F_U(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{t_1}^{t_2} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(u-\mu)^2}{\sigma^2}\right) dt \text{ и } f_U(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(u-\mu)^2}{\sigma^2}\right),$$

где μ – математическое ожидание; σ – стандартное отклонение величины $U(t)$ на интервале $[t_1, t_2]$.

Очевидно, что приращения сигнала $\Delta U(t) = U(t_2) - U(t_1), t_2 > t_1$ также нормально распределены с $\mu \rightarrow 0$, и интегральное распределение определится как

$$P(\Delta U < U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma\Delta t} \int_{t_1}^{t_2} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(u)^2}{\Delta t\sigma^2}\right) d\Delta t.$$

В этом случае полная дисперсия сигнала $U(t)$ на интервале $[t_1, t_2]$ рассчитывается как $D[U(t_2) - U(t_1)] = \sigma^2 |t_2 - t_1|$ для любых значений внутри интервала. Видно, что рассчитанная дисперсия зависит только от разности Δt и не зависит от самих значений сигнала $U(t)$.

Для дисперсии и стандартного отклонения приращений справедливо равенство $\lim_{\Delta t \rightarrow 1} \frac{D(U(t_2) - U(t_1))}{\Delta t} = \sigma^2$, т.е. при $\Delta t = 1$, $D = \sigma^2$. При изменении приращения стандартное отклонение флуктуирует относительно D , но с бесконечно малым порядком малости: $|D - \sigma^2| < \varepsilon \rightarrow 0$. В этом случае справедливо уравнение для математического ожидания $E[U(t_2) - U(t_1)] = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sigma \sqrt{|t_2 - t_1|}$, т.е. приращение сигнала, соответствующего модели броуновского движения, обладает свойством статистического самоподобия:

$$U(t + \Delta t) - U(t) \triangleq \frac{1}{\sqrt{\gamma}} (U(t + \gamma \Delta t) - U(t)), \gamma \in \mathbb{R}^+.$$

Самоподобие сигнала $U(t)$ и его эквивалентность модели броуновского движения позволяют рассчитать размерность результатов измерений на интервале $[t_1, t_2]$.

Стандартная процедура расчета фрактальной размерности определяется следующим образом: количество элементарных зон N , полностью «покрывающих» зависимость $U(t)$, пропорционально $N(\Delta t) \propto \Delta t^{-\frac{\omega}{2}}$ или $\dim U = -\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\ln(N\Delta t)}{\ln \Delta t} = \frac{\omega}{2\gamma}$. В зависимости от частоты и $\gamma = \frac{\omega}{2 + \delta}$ фрактальная размерность сигнала $U(t)$ изменяется как $\frac{2 + \delta}{2}$, при этом δ определяется характером

взаимодействия вещества из газовой фазы с газочувствительным слоем. При этом большую роль играет состав материала, тип проводимости и мощность нагрева [2, 6, 7].

Таким образом, процесс изменения электропроводности вследствие хемосорбции, т.е. обмен электронами между зоной проводимости и газовой фазой в гетерогенной зоне, является самоподобным по отношению к измеряемому падению напряжения в цепи газочувствительного слоя на интервале $[t_1, t_2]$.

Флуктуации падения напряжения в результате хемосорбции, соответствующие модели броуновского движения с точностью δ , предполагают некоторые дополнительные преобразования сигнала $U(t)$ для повышения стабильности (однозначности) обработки результатов измерения для более точного определения аналитических параметров. Для аналитического применения полупроводниковых сенсоров необходимо разработать модель, а на ее основе – алгоритм обработки сигнала $U(t)$, позволяющий реализовать прямую аналитическую задачу – идентификацию вещества и определение его концентрации по измеренным значениям измеряемого напряжения.

Энтропия по разбросу значений состояния определяется как $S = Z \ln Z$, полагая, что Z соответствует сумме предыдущих значений. В этом случае изменение энтропии по времени равно

$$\frac{dS}{dt} = \ln Z \cdot \frac{dZ}{Z}, \text{ и, следовательно, производство энтропии}$$

$$\frac{d^2 S}{dt^2} = \frac{dZ}{Z} \frac{1}{Z^2} (1 - Z \ln Z).$$

Анализ производства энтропии в соответствии с теоремой Пригожина показывает: если $Z < 1 \rightarrow 1 - Z \ln Z > 0$, и, следовательно, система находится в хаотичном состоянии, обмен электронами со средой (с газовой фазой) минимален. В этом случае потенциал, вызванный хемосорбцией, определяется только молекулами кислорода. Если же $Z > 1 \rightarrow 1 - Z \ln Z < 0$, то обмен электронами со средой упорядочен, имеет градиент потока и обусловлен хемосорбцией молекул примесей, которые содержатся в газовой фазе [5].

Действительно, расчеты средних значений и дисперсий позволяют рассчитать энтропию динамического состояния и функцию динамического изменения энтропии $\frac{dZ}{Z}$, являющуюся определяющей как для скорости изменения порядка, так и для определения производства энтропии (табл. 1).

Таблица 1

Первичные преобразования и динамика энтропии взаимодействия

Измерение напряжения при хемосорбции НДМГ и АТ Концентрация НДМГ: 1 и 3,3 мг/м ³ , АТ: 3 мг/м ³	
Накопление средних значений за время экспозиции	
Динамика дисперсии за время экспозиции	
Динамика энтропии	
Функция динамического изменения энтропии	

Измерения, приведенные в табл. 1, показывают, что при расхождении измеряемого сигнала (наличие мешающих примесей, наличие флуктуаций на поверхности чувствительного слоя) расчет текущих средних значений, а затем мгновенной дисперсии переводит процесс изменения электропроводности вследствие хемосорбции окислителя и восстановителя (А и НДМГ соответственно) из случайного в детерминированный. Расчет динамики и динамического изменения энтропии определяет момент начала реакции – истинной экспозиции. При подаче пробы в измерительный тракт инертность аналитической системы определяется длиной газоотборной трубки, пульсациями побудителя расхода, температурой, влажностью, плотностью и давлением окружающего воздуха, поэтому аппаратно установленная экспозиция вносит погрешность в расчет концентраций. Расчет динамики энтропии $\ln Z$ и динамического изменения $\frac{dZ}{Z}$ позволяет достаточно точно определить момент начала взаимодействия, соответственно, время экспозиции уточняется и повышается точность расчета концентраций.

Таким образом, самоподобные преобразования позволяют повысить стабильность исходных измерений, уточнить время аппаратно установленной экспозиции, тем самым повысить точность количественного определения по величине дисперсии потенциала, обусловленного хемосорбцией вещества-аналита.

В основе детерминированного моделирования лежит возможность построения тождественного преобразования для исходных данных по теоретически предполагаемым прямым связям с

факторами. Детерминированное моделирование факторных систем – это простое и эффективное средство для количественной оценки роли отдельных факторов в динамике изменения обобщающего показателя (рис. 3).

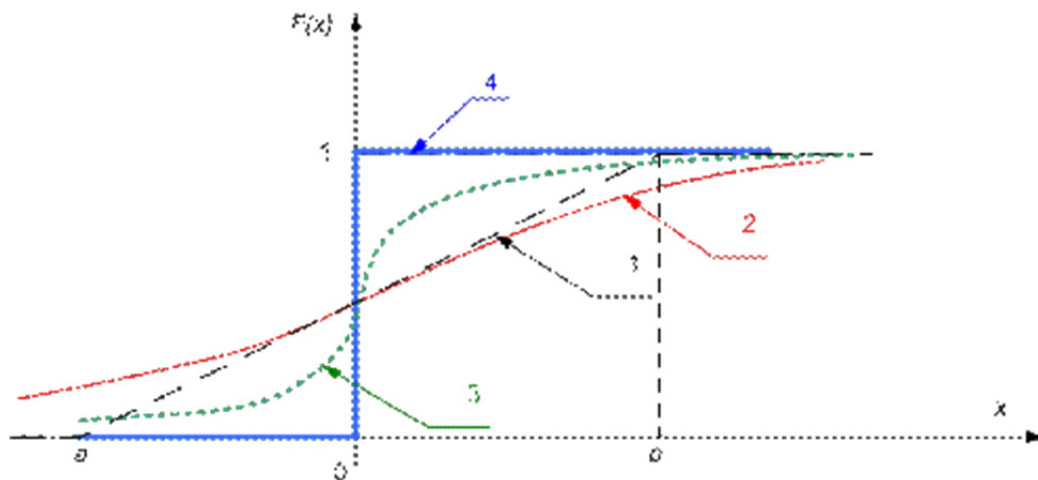


Рис. 3. Переход от вероятностных моделей: равномерного распределения (1) и нормального распределения (2, 3) к детерминированной модели (4)

При детерминированном анализе модель изучаемого явления не изменяется по изучаемым объектам и периодам. При необходимости сравнения результатов измерений в отдельные периоды возникает лишь вопрос о сопоставимости выявленных на основе модели количественных аналитических результатов.

Детерминированный анализ представляет собой методику исследования влияния факторов, связь которых с результативным показателем носит функциональный характер, т.е. может быть выражен математической зависимостью.

Следовательно, предположение о детерминированном характере физической системы и описание ее детерминированной математической моделью является идеализацией реальной системы. Детерминированная математическая модель отображает реальные физические процессы в усредненном смысле.

В тех задачах, где не требуется высокая точность результатов моделирования, предпочтение отдается детерминированной модели. Это объясняется тем, что реализация и анализ детерминированной математической модели много проще, чем стохастической.

Детерминированная модель недопустима в ситуациях, когда случайные процессы $\omega(t)$ соизмеримы с детерминированными $x(t)$. Результаты, полученные с помощью детерминированной математической модели, будут неадекватными реальным процессам.

Библиографический список

1. Миллер, Б. М. Случайные процессы в примерах и задачах / Б. М. Миллер, А. Р. Панков. – М. : Изд-во МАИ, 2001. – 313 с. ISBN 5-7035-2321-4.
2. Вентцель, А. Д. Курс теории случайных процессов / А. Д. Вентцель. – М. : Наука, 1975. – 320 с.
3. Вентцель, Е. С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – М. : Наука, 2000. – 383 с. ISBN 5-06-003831-9.
4. Обухова, Л. В. Теория вероятностей, математическая статистика и случайные процессы в примерах и задачах / Л. В. Обухова, З. Я. Молдовская, В. Ф. Князева. – Киев : УМКВО, 1991. – 318 с.
5. Громов, В. Ф. Механизмы сенсорного эффекта в кондуктометрических датчиках на основе диоксида олова для детектирования газов-восстановителей / В. Ф. Громов, Г. Н. Герасимов, Т. В. Бельшева, Л. И. Трахтенберг // Журнал Рос. хим. об-ва им. Д. И. Менделеева. – 2008. – Вып. 5. – С. 80–87.
6. Бендат, Дж. Прикладной анализ случайных данных / Дж. Бендат, А. Пирсол. – М. : Мир, 1989. – 540 с.
7. Тюрин, Ю. Н. Стохастический анализ данных на компьютере / Ю. Н. Тюрин, А. А. Макаров. – М. : ИНФРА-М, 1997. – 528 с.
8. Ван-Желен, В. Физическая теория надежности / В. Ван-Желен. – Симферополь : Крым, 1998. – 318 с.

Белозерцев Александр Иванович

первый заместитель генерального директора,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: info@niifi.ru

Эль-Салим Суад Зухер

доктор физико-математических наук, профессор,
генеральный директор
ООО «Омега»
(199048, Россия, г. Санкт-Петербург,
наб. реки Смоленки, 19-21, лит. В)
E-mail: suad-olka@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрена модель повышения достоверности, а следовательно, надежности аналитических измерений паров и газов. Исследованы факторы, связанные с результативным показателем, выраженным математической зависимостью. Для задач, которые решаются в масштабе реального времени и не требуют высокой точности результатов моделирования, построена детерминированная модель, позволяющая уточнить длительность реальной экспозиции для повышения точности количественных расчетов.

Ключевые слова: модель, энтропия, детерминированные процессы, причина, следствие.

Belozertsev Aleksandr Ivanovich

first deputy general director,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(440026, 8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Al-Salim Suad Zuher

doctor of physical and mathematical sciences, professor,
director general,
Ltd "Omega"
(199048, lit. In, 19-21 embankment
of the Smolenka river, Saint-Petersburg, Russia)

Abstract. The model of increase in reliability and consequently, and reliabilities of analytical measurements of vapors and gases is considered. Factors, the bound to the productive indicator expressed by mathematical dependence are investigated. For problems which are solved on the scale of real time and do not demand a high precision of results of model operation, the determined model allowing to specify duration of an actual exposition for increase in accuracy of the quantitative calculations is constructed.

Key words: model, an entropy, the determined processes, the reason, a corollary.

УДК 543.5;543.26

Белозерцев, А. И.

Причинно-следственный подход к моделированию надежности системы «газовая фаза – полупроводник» / А. И. Белозерцев, С. З. Эль-Салим // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 3 (19). – С. 3–9. DOI 10.21685/2307-4205-2017-3-1.