

## БЫСТРОДЕЙСТВИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ФРАКТАЛЬНЫХ ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

к.т.н. П.Ф. Буданов, д.т.н., проф. Ю.Г. Даник, к.ф.-м.н. С.Е. Кальной

*Изменение проводимости полупроводникового газочувствительного элемента (ЧЭ) рассматривается как результат роста адсорбционного газового фрактального кластера на его поверхности. Быстродействие ЧЭ оценено как время достижения кластером перколяционного порога. Рассмотрены случаи роста адсорбционного фрактала на гладкой поверхности, а также рост адсорбционного фрактала на фрактальной поверхности. Показано, что время роста существенно зависит как от фрактальной размерности адсорбционного кластера, так и от фрактальной размерности исходного ЧЭ.*

**Постановка проблемы и анализ литературы.** В настоящее время большой интерес представляет исследование свойств полупроводниковых пористых мелкодисперсных газочувствительных элементов [1, 2]. В случае, когда характерный размер неоднородностей ЧЭ составляет порядка нескольких нанометров, его структуру можно рассматривать как фрактальную [3, 4, 5].

К особенностям работы таких ЧЭ относится резкое возрастание проводимости чувствительной массы при адсорбции молекул газов на ее поверхность. При этом ЧЭ реагирует на очень малые концентрации газов (до 0,1 ppm) и характеризуется высоким быстродействием ( $10^{-3} \div 1$  с) [1, 6].

В работе [7] была предложена модель, описывающая механизм проводимости фрактального ЧЭ, суть которого в том, что адсорбция молекулы газа на поверхность ЧЭ вызывает делокализацию электронов полупроводниковой массы и вокруг молекулы образуется область проводимости, размеры которой порядка нескольких нанометров. Слияние областей делокализации приводит к образованию сплошных цепочек, по которым происходит перенос зарядов. Проводимость ЧЭ при этом резко возрастает.

**Целью данной статьи** является расчет времени формирования в ЧЭ сквозных путей проводимости, которое и определяет быстродействие газочувствительного элемента.

**Изложение основного материала.** Полупроводниковый пористый газочувствительный элемент представляет собой многоуровневую фрактальную систему. Пористая чувствительная масса образует первичный фрактал, имеющий фрактальную размерность  $D^{ЧЭ}$ . Адсорбция молекул газа приводит к возникновению на поверхности ЧЭ вторичного адсорбционного газового фрактала. На начальном этапе этот фрактал представляет собой кластер (кластеры) объединившихся между собой областей делокализации электронов, имеющий фрактальную размерность  $D^Г$ . Структурное взаимодействие первичного и газового фракталов приводит к тому, что в целом фрактальная размерность ЧЭ меняется:  $D^{ЧЭ} + D^Г \rightarrow D^{ЧЭ+Г}$ . На проводимость ЧЭ непосредственное влияние оказывает строение и рост адсорбционного газового фрактала, по которому идет перенос зарядов, хотя влияние первичной фрактальной матрицы также должно быть существенным.

Время быстроедействия ЧЭ мы будем оценивать как время роста адсорбционного фрактала, когда геометрические размеры соответствующего кластера  $R$  сравниваются с размерами чувствительного элемента  $L$ , что соответствует достижению им порога перколяции.

**Рост адсорбционного фрактала на гладкой (эвклидовой) поверхности.** Рост адсорбционного кластера происходит в результате диффузионного потока молекул из газовой фазы. Молекулы газа будем рассматривать как сферические частицы радиусом  $r_0$ . Также для упрощения будем считать, что адсорбционный кластер занимает на поверхности ЧЭ область, ограниченную радиусом  $R$  (рис. 1). Рост числа молекул газа  $n$  в кластере определяется кинетическим уравнением

$$\frac{dn}{dt} = \nu, \quad (1)$$

где  $\nu$  – частота “прилипания” к кластеру газовых молекул. Так как площадь поверхности, на которой размещен кластер, равна  $S = \pi R^2$ , а

диффузионный поток молекул газа  $j = D \nabla N \approx D \frac{N}{R}$ , то

$$\nu = S j = \pi R D N, \quad (2)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии молекул газа в воздушной среде,  $N$  – концентрация молекул в газовой фазе. Формула (2) – двумерный аналог формулы Смолуховского [4].

Так как адсорбированная молекула формирует вокруг себя область делокализации электронов радиусом  $r_s$ , а адсорбционный кластер пред-

ставляет собой объединение таких областей, то количество молекул газа связано с радиусом кластера соотношением

$$n = \left( \frac{R}{r_S} \right)^{D^F} . \quad (3)$$

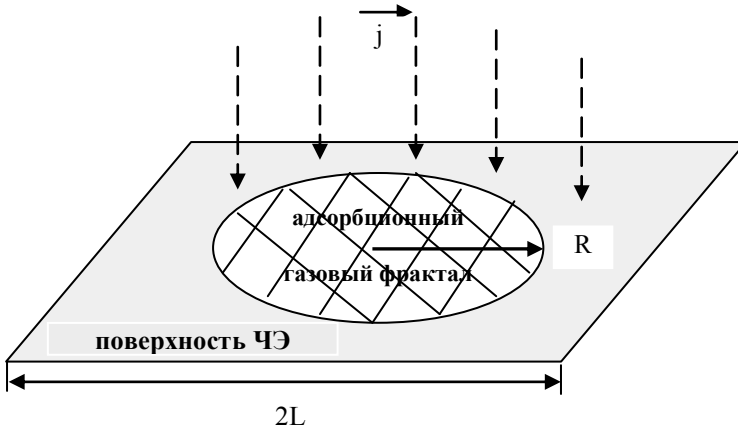


Рис. 1. Рост адсорбционного поверхностного фрактального кластера

Определяя  $D$  согласно соотношению Эйнштейна, для  $v$  получаем

$$v = k_0 N \cdot \left( \frac{r_S}{r_0} \right) \cdot n^{D^F} , \quad (4)$$

где  $k_0 = \frac{kT}{6\eta}$  ( $k$  – постоянная Больцман,  $T$  – температура,  $\eta$  – вязкость воздушной среды). Из (1) и (4) находим время роста адсорбционного кластера

$$t = \frac{1}{k_0 N} \cdot \left( \frac{r_0}{r_S} \right) \cdot \frac{D^F}{D^F - 1} \cdot \left( \frac{L}{r_S} \right)^{D^F - 1} . \quad (5)$$

Видно, что это время существенно зависит от фрактальной размерности адсорбционного кластера  $D^F$ .

По различным литературным данным [4, 5] фрактальная размерность молекулярных кластеров в объемной фазе составляет  $D^F = 1,8 \div 2,3$ . Оценим время роста кластера для молекул  $CO_2$  в воздухе при нормальных условиях при молярной концентрации  $C = 0,1$  ppm, считая что  $r_S = 10$  нм,  $L = 1$  мм (табл. 1).

Таблица 1

Оценка быстродействия ЧЭ с гладкой поверхностью

$D^\Gamma$	1,8	2,3
t, с	4,4	$1,1 \cdot 10^3$

**Рост адсорбционного фрактала на фрактальной поверхности.** Учтем влияние фрактальных характеристик поверхности ЧЭ на рост адсорбционного кластера. В этом случае площадь поверхности, на которой размещается адсорбционный кластер радиусом  $R$  (рис. 1), определяется соотношением

$$S = \pi r_0^2 \cdot \left( \frac{R}{r_0} \right)^{D^{ЧЭ}} \quad (6)$$

и при  $D^{ЧЭ} > 2$  превышает аналогичную площадь для гладкой поверхности. Количество молекул газа в кластере по-прежнему определяется соотношением (3). Тогда для частоты  $\nu$  вместо (4) имеем

$$\nu = k_0 N \cdot \left( \frac{r_S}{r_0} \right)^{D^{ЧЭ}-1} \cdot n \frac{D^{ЧЭ}-1}{D^\Gamma} \quad (7)$$

Используя (1) находим

$$t = \frac{1}{k_0 N} \cdot \left( \frac{r_S}{r_0} \right)^{D^{ЧЭ}-1} \cdot \frac{D^\Gamma}{D^\Gamma - D^{ЧЭ} + 1} \cdot \left( \frac{L}{r_S} \right)^{D^\Gamma - D^{ЧЭ} + 1} \quad (8)$$

Из (8) видно, что на время роста адсорбционного кластера в равной мере влияет как фрактальная размерность самого кластера, так и фрактальная размерность исходного ЧЭ. В предельном случае гладкой поверхности ЧЭ, когда  $D^{ЧЭ} = 2$ , формула (8) переходит в соотношение (5).

Для размерности ЧЭ реальной является оценка  $D^{ЧЭ} = 2,2$ . В этом случае для молекул  $CO_2$  в воздухе при тех же значениях параметров имеем (табл. 2).

Таблица 2

Оценка быстродействия ЧЭ с фрактальной поверхностью

$D^\Gamma$	1,8	2,3
t, с	$8,3 \cdot 10^{-2}$	6,5

Из полученных результатов следует, что адсорбционные поверхностные кластеры, имеющие меньшую размерность, быстрее достигают перколяционного порога, т.е. улучшают быстродействие ЧЭ. При этом надо учесть, что в процессе роста адсорбционного поверхностного кластера его размерность возрастает. Для быстродействия играет роль та размер-

, которую имеет адсорбционный поверхностный кластер при достижении им порога перколяции.

**Выводы:** В работе получены аналитические выражения позволяющие проводить оценку быстродействия ЧЭ как с гладкой, так и с фрактальной поверхностью, при этом в обоих случаях адсорбционный поверхностный газовый кластер рассматривался как фрактальная структура. Полученные результаты показывают, что использование ЧЭ с фрактальной структурой позволяет обеспечить быстродействие более чем на порядок превышающее быстродействие ЧЭ с гладкой поверхностью. Показано, что на быстродействие ЧЭ в одинаковой степени влияет как фрактальная размерность поверхностного адсорбционного газового кластера, так и фрактальная размерность исходного ЧЭ. Из полученной модели следует, что проводимость структуры ЧЭ резко возрастает на начальной стадии, когда фрактальная размерность адсорбционного кластера  $D^{\Gamma} < 2$  и падает по мере роста фрактальной размерности поверхностного кластера  $D^{\Gamma} > 2$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Напівпровідникові сенсори: Теорія, конструкції, застосування / Буданов П.Ф., Даник Ю.Г., та ін. – Х.: Вид-во Нац.ун-ту внутр. справ, 2001. – 252 с.*
2. *Мясников И.А., Сухарев В.А., Куприянов Л.Ю., Завьялов С.А. Полупроводниковые сенсоры в физико-химических исследованиях. – М.: Наука, 1991. – 310 с.*
3. *Федер Е. Фракталы. – М.: Мир, 1998. – 248 с.*
4. *Смирнов Б.М. Физика фрактальных кластеров. – М.: Наука, 1991. – 136 с.*
5. *Новиков В.У., Козлов Г.В. Фрактальный анализ макромолекул // Успехи химии. – 2000. – Т. 69, № 4. – С. 378 – 399.*
6. *Галямов Б.Ш., Завьялов С.А., Куприянов Л.Ю. Особенности микроструктуры и сенсорные свойства нанонеоднородных композитных пленок. // ЖФХ. – 2000. – Т. 74, № 3. – С. 459 – 465.*
7. *Буданов П.Ф., Даник Ю.Г., Кальной С.С. Фрактальный метод обнаружения газов и модель полупроводниковых чувствительных элементов // Системы обработки информации. – Х.: ХВУ. – 2003. – Вып. 4. – С. 22 – 26.*

Поступила 2.07.2003

**БУДАНОВ Павел Феофанович**, преподаватель кафедры ХВУ. В 1981 году окончил Ростовское высшее военное командно-инженерное училище. Область научных интересов – применение автоматизированных систем управления.

**ДАНИК Юрий Григорьевич**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник научного центра при ХВУ. В 1987 году окончил Житомирское высшее военное училище радиоэлектроники. Область научных интересов – обработка информации.

**КАЛЬНОЙ Сергей Евгеньевич** – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент ХВУ. Область научных интересов – физика низких температур, теория дифракции.