

## ОСОБЕННОСТИ СЕНСОРНЫХ СВОЙСТВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ФРАКТАЛЬНЫХ СТРУКТУР

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

*Рассмотрена возможность использования фрактальных свойств структуры чувствительных масс полупроводниковых чувствительных элементов (ЧЭ) для обнаружения молекул опасных газов. Показан способ определения фрактальной размерности чувствительной массы путем измерения сопротивления на высоких частотах.*

**Постановка проблемы.** Одной из актуальных задач техники является разработка новых газочувствительных элементов, способных регистрировать молекулы газов в минимальных концентрациях.

**Анализ литературы.** В этом отношении перспективным является использование шероховатых пористых полупроводниковых наноструктур [1]. Исследования, проведенные ранее на металлооксидных полупроводниковых пленках, показывают высокую чувствительность их электрических, оптических и других свойств к адсорбции различных газов [2, 3]. В работе [3] указывалось на существенное влияние неоднородностей структуры полупроводниковой пленки, на ее сенсорные свойства и на то, что шероховатые неоднородные пористые поверхности можно рассматривать как фрактальные структуры [4].

**Цель статьи.** В данной работе поставлена задача исследовать влияние адсорбции молекул газа на фрактальные характеристики полупроводниковой чувствительной массы на основе диоксида олова и их связь с электрическими характеристиками ЧЭ.

**Изложение основного материала.** В результате адсорбции молекул газа меняется структура поверхности полупроводниковой чувствительной массы. В наиболее общем виде молекулы газа можно рассматривать, как газовые кластеры с фрактальной размерностью  $D_f^\Gamma$  [5], а поверхность ЧЭ как поверхностный фрактал с размерностью  $D_f^{ЧЭ}$ . Тогда адсорбция молекул газа на пористую поверхность может быть описана как взаимодействие двух различных фракталов, в результате чего формируется новый поверхностный фрактал с размерностью  $D_f^{ЧЭ+\Gamma}$  [6]:  $D_f^{ЧЭ} + D_f^\Gamma \rightarrow D_f^{ЧЭ+\Gamma}$ .

Следовательно, наблюдая за динамикой изменения фрактальной размерности чувствительной массы в различных температурных режимах, можно сделать вывод о присутствии в газовой среде молекул тех или иных газов.

Для установления того, фрактальна или нефрактальна чувствительная масса ЧЭ, а также определения ее фрактальной размерности можно использовать ряд методов. К ним относятся прецизионный рентгенофазовый анализ, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, малоугловое рассеяние света и рентгеновских лучей [4, 6].

В данной работе использовался способ определения фрактальной размерности чувствительной массы  $D_f^{\text{ЧЭ}}$  путем измерения сопротивления  $R_{\sim}^{\text{ЧЭ}}$  на высоких частотах  $\omega$ . В этом случае имеет место скин-эффект, в результате которого переменный ток протекает преимущественно в поверхностном фрактальном слое ЧЭ [6].

Формулы, описывающие скин-эффект в однородном или близком к однородному цилиндрическом проводнике, имеют вид [7]:

$$\frac{R_{\sim}^{\text{ЧЭ}}}{R_{=}^{\text{ЧЭ}}} = \begin{cases} 1 + \frac{x^4}{3} & \text{при } x < 1; \\ 0,997x + 0,277 & \text{при } 1,5 < x < 10; \\ x + \frac{1}{4} + \frac{3}{64x} & \text{при } x > 10, \end{cases} \quad (1)$$

где  $R_{\sim}^{\text{ЧЭ}}$  – сопротивление проводника переменному току с циклической частотой  $\omega$ ;  $R_{=}^{\text{ЧЭ}}$  – сопротивление проводника постоянному току;

$x = \frac{r}{2\delta} = r \sqrt{\frac{\mu_0 \mu \sigma \omega}{2}}$ ;  $r$  – радиус цилиндра;  $\sigma$  – удельная электропроводность для постоянного тока;  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость

проводника;  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \mu \sigma \omega}}$  – толщина скин-слоя (эффективная глубина проникновения переменного тока).

В нефрактальных структурах на высоких частотах при  $x > 1,5$  (нормальный скин-эффект) сопротивление

$$R_{\sim}^{\text{ЧЭ}} \sim R_{=} \cdot \omega^{1/2} \quad (2)$$

и в двойных логарифмических координатах описывается прямой с угловым коэффициентом 1/2 (пунктирная прямая на рис. 1).

При наблюдении скин-эффекта на фрактальной чувствительной массе зависимость сопротивления  $R_{\sim}^{\text{ЧЭ}}$  от частоты  $\omega$  определяется выражениями [6]:

$$R_{\sim} \sim \omega^{\frac{1+2D_L-D_S}{2}} \quad (3)$$

или при  $D_L = D_S - 1$

$$R_{\sim} \sim \omega^{\frac{D_S-1}{2}}, \quad (4)$$

где  $D_L, D_S$  – фрактальные размерности, порождаемые фрактальными величинами:

$$l_L = \frac{1}{\delta^{D_L-1}} \quad \text{– продольная фрактальная}$$

длина;  $S = \frac{1}{\delta^{D_S-2}}$  –

фрактальная площадь поверхности ЧЭ, заключенной между по-

перечными сечениями, отстоящими друг от друга на расстоянии  $l_L$ ;  $\delta$  – толщина скин-слоя, которую в данной задаче будем рассматривать в роли фрактального масштаба (на рис. 2 показаны соответствующие фрактальные величины для спиралевидного ЧЭ).

Таким образом, в двойных логарифмических координатах согласно (4) зависимость  $R_{\sim}^{\text{ЧЭ}}$  от  $\omega$  описывается прямой с угловым коэффициентом, отличным от  $1/2$ :

$$K_{\text{угл}} = (D_S - 1)/2. \quad (5)$$

Следовательно, измерение сопротивления  $R_{\sim}^{\text{ЧЭ}}$  ЧЭ как функции от частоты  $\omega$  позволяет определить фрактальную размерность  $D_S$  чувствительной массы ЧЭ, обозначенную ранее как  $D_f^{\text{ЧЭ}}$ .

Рассмотрим спиралевидный ЧЭ [8], который представляет собой спираль из высокоомной металлической проволоки с плотно уложенными витками, покрытую полупроводниковой чувствительной массой

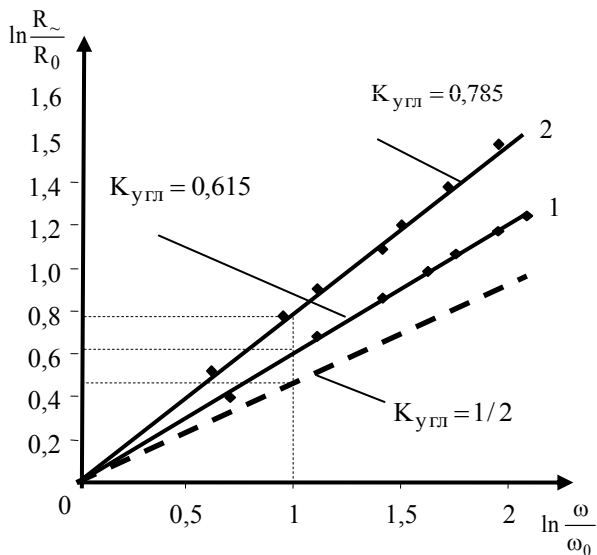


Рис. 1. Зависимость электрического сопротивления ЧЭ с фрактальной структурой от частоты до и после взаимодействия с молекулами газа ( $\text{CO}_2$ )

$\text{Sn}_2\text{O}_3 + \text{In}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$  (рис. 2). Диаметр ЧЭ  $d=0,25\text{мм}$ , длина  $l=1\text{мм}$ . Металлическая спираль в ЧЭ играет роль подложки, а чувствительная масса может рассматриваться как полупроводник цилиндрической формы.

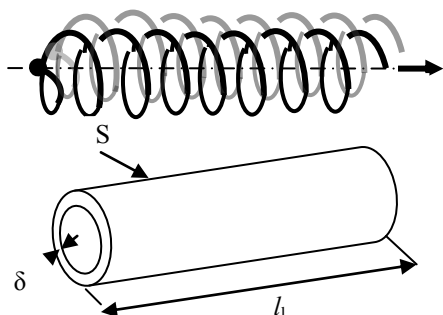


Рис. 2. Спиралевидный ЧЭ

Для проведения эксперимента по измерению сопротивления  $R_{\sim}^{\text{ЧЭ}}$  как функции от частоты  $\omega$  для спиралевидного ЧЭ использовалась экспериментальная установка, включающая: генератор стандартных сигналов; генератор эталонных смесей; гермозону; комплекс

измерительной аппаратуры (миллиамперметр, вольтметр, осциллограф).

Измерение проводилось в осушенном воздухе при температуре  $20^\circ\text{C}$  и в воздухе, содержащем  $0,5\%$   $\text{CO}_2$  при той же температуре.

На рис. 1 в двойных логарифмических координатах приведены зависимости сопротивления  $R_{\sim}^{\text{ЧЭ}}$  от частоты  $\omega$  для исследуемой фрактальной чувствительной массы.

Прямая 1 с угловым коэффициентом  $K_{\text{угл}}^{\text{ЧЭ}}=0,615$  соответствует измерениям в сухом воздухе (без молекул  $\text{CO}_2$ ). Прямая 2 с угловым коэффициентом  $K_{\text{угл}}^{\text{ЧЭ}}=0,785$  соответствует измерениям в присутствии молекул  $\text{CO}_2$ . Это позволяет, согласно (5), оценить фрактальную размерность: в первом случае  $D_f^{\text{ЧЭ}}=2,23$ , а во втором случае  $D_f^{\text{ЧЭ}}=2,57$ . Таким образом, адсорбция молекул  $\text{CO}_2$  привела к увеличению фрактальной размерности поверхности чувствительной массы на  $\Delta D_f^{\text{ЧЭ}}=0,34$ .

Необходимо отметить, что после взаимодействия с молекулами газа наблюдалось резкое, в десятки раз, уменьшение абсолютного значения сопротивления чувствительной массы  $R_{\sim}^{\text{ЧЭ}}$ . Если учесть, что в области нормального скин-эффекта по аналогии с (2) сопротивление представимо в виде

$$R_{\sim}^{\text{ЧЭ}} \sim R_{\sim}^{\text{ЧЭ}} \cdot \omega^{\frac{D_S-1}{2}}, \quad (6)$$

то можно предположить, что уменьшение  $R_{\sim}^{\text{ЧЭ}}$  связано с резким падени-

противления фрактального ЧЭ на постоянном токе  $R_{\text{ЧЭ}}$ . Заметим, подобные эффекты в экспериментах на постоянном токе ранее наблюдались [3].

**Выводы.** В работе представлены результаты исследования особенностей сенсорных свойств полупроводниковых фрактальных структур. Установлено, что процесс взаимодействия таких структур с молекулами газа приводит к изменению их фрактальной размерности, оценка изменения которых может быть проведена путем измерения изменения сопротивления чувствительной массы на высоких частотах.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мясников И.А., Сухарев В.А., Куприянов Л.Ю., Завьялов С.А. Полупроводниковые сенсоры в физико-химических исследованиях. – М.: Наука, 1991. – 320 с.
2. Васильев Р.Б., Гаськов А.М., Румянцев М.Н. и др. Свойства гетероструктур диодного типа на основе нанокристаллического  $n\text{-SnO}_2$  на  $p\text{-Si}$  в условиях газовой адсорбции // Физика и техника полупроводников. – 2000. – Т. 34. – Вып.8. – С. 993 – 997.
3. 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.
4. Федер Е. Фракталы. – М.: Мир, 1998. – 248 с.
5. Смирнов Б.М. Физика фрактальных кластеров. – М.: Наука, 1991. – 136 с.
6. Фракталы в физике. Труды VI Междунар. симп. по фракталам в физике / Под ред. Л. Пьетрокеро, Э. Тозатти. – М.: Мир, 1988. – 672 с.
7. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. – М.: Наука, 1968. – 446 с.
8. Нанівпровідникові сенсорні: Теорія, конструкції, застосування / Буданов П.Ф., Даник Ю.Г., та ін. – Х.: Вид-во Нац. ун-ту внутр. справ, 2001. – 252 с.

Поступила 19.05.2003

**БУДАНОВ Павел Феофанович**, преподаватель кафедры ХВУ. В 1981 году закончил 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 закончил 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.