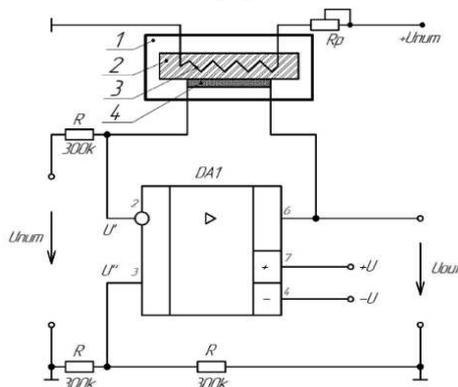


М.А. Анкуда, ст. преп.; Н.М. Олиферович, ст. преп.;  
 М.К. Анкуда, ассист.; И.О. Оробей, доц., канд. техн. наук;  
 Д.С. Карпович, доц., канд. техн. наук (БГТУ г. Минск)

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ПЛЕНОЧНОМ ПОЛУПРОВОДНИКОВОМ СЕНСОРЕ В УСЛОВИЯХ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Принцип действия полупроводниковых пленочных сенсоров основан на изменении электрических свойств чувствительного слоя полупроводникового образца при изменении состава анализируемой газовой среды около поверхности сенсора. Выходным сигналом датчика служит величина сопротивления, которая в последующем с помощью измерительной схемы преобразуется в напряжение.

Полупроводниковый сенсор представляет собой небольшую изолирующую подложку ( $3 \times 3$  мм<sup>2</sup> или меньше), на которой расположены измерительные электроды и нагреватель (см. рис. 1). В полупроводниковых газоанализаторах используется эффект изменения электрического сопротивления пленок полупроводниковых материалов, возникающего вследствие физической и химической адсорбции газа. В качестве базовой схемы преобразования сопротивления в напряжение была предложена схема дифференциального усилителя на основе операционного усилителя [1].



- 1 – корпус чувствительного элемента; 2 – подложка керамическая;  
 3 – спираль нагрева; 4 – полупроводниковый чувствительный слой

**Рисунок 1 – Газоанализатор полупроводникового типа, включенный по дифференциальной схеме измерения на базе операционного усилителя**

На поверхности полупроводникового материала существуют донорные уровни  $E_D$ , которые расположены выше уровня ферми в объеме материала. Электронные зоны проводимости стремятся заполнить поверхностные состояния. А значит теория приповерхностного

заряда позволит определить сопротивление пленки полупроводникового сенсора. В общем случае проводимость полупроводников определяется выражением [2]:

$$G_0 = K \cdot \frac{e \cdot S_k}{2 \cdot k_B \cdot T} \cdot \frac{e \cdot \mu_n \cdot E \cdot n_0}{1 + 4 \cdot \frac{\mu_n \cdot E}{v_n}} \cdot e^{-\frac{E \cdot \varphi_s}{k_B \cdot T}}$$

где  $K$  – постоянная величина, которая определяется геометрическими размерами пленки и числом проводящих зерен,  $S_k$  – площадь контакта зерен,  $T$  – температура,  $E$  – максимальная напряженность электрического поля,  $n_0$  – концентрация электронов,  $v_n$  – средняя тепловая скорость электронов,  $\mu_n$  [см<sup>2</sup>/В·с] – подвижность носителей заряда n-типа,  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл – элементарный заряд,  $k_B$  – постоянная Больцмана.

При этом электрическое поле сенсора может быть подвержено внешним воздействиям.

Рассмотрим влияние внешнего электромагнитного излучения на полупроводниковый сенсор. При этом следует учесть, что анализ поля излучения обычно выполняют в сферической системе координат, в центр которой помещен излучатель (см рис. 2) [3]

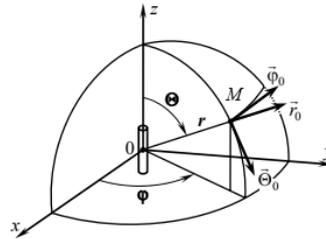


Рисунок 2 – Электромагнитное излучение диполя

Электрический диполь длиной  $l$  с однородным током  $I_{CT}$  создает напряженности полей, проекции которых определяются соотношениями:

$$E_r = \frac{klI_{CT}}{2\pi\omega\epsilon\epsilon_0 r^2} \cdot \left[ \frac{1}{kr} \sin(\omega t - kr) + \cos(\omega t - kr) \right] \cdot \cos \theta$$

$$E_\theta = \frac{k^2 I_{CT}}{4\pi\omega\epsilon\epsilon_0 r} \cdot \left[ \frac{1}{kr} \cos(\omega t - kr) + \left( \frac{1}{k^2 r^2} - 1 \right) \sin(\omega t - kr) \right] \cdot \sin \theta$$

$$H_\alpha = \frac{klI_{CT}}{4\pi r} \cdot \left[ \frac{1}{kr} \cos(\omega t - kr) - \sin(\omega t - kr) \right] \cdot \sin \theta$$

$$E_\alpha = H_r = H_\theta = 0$$

Из формул следует, что каждая компонента поля ( $E_r$ ,  $E_\theta$ , и  $H_\alpha$ ) имеет постоянную фазу на сферических поверхностях  $r = const$ , однако эти компоненты не синфазны, а их амплитуды зависят от угловой координаты  $\theta$ . Это неоднородная гармоническая сферическая волна, распространяющаяся в радиальном направлении и имеющая

сложную пространственную структуру. Поле обладает осевой симметрией (отсутствует зависимость от азимутальной координаты  $\varphi$ ), причем магнитные силовые линии – это концентрические окружности вокруг оси  $Z$ , а электрические силовые линии лежат в меридиональных областях.

Поле в дальней области имеет вид

$$E_{\theta} = \frac{k^2 I_{CT}}{4\pi\omega\epsilon\epsilon_0 r} \cdot \sin(\omega t - kr) \cdot \sin \theta$$

$$E_r \approx 0$$

$$H_{\alpha} = \frac{k I_{CT}}{4\pi r} \cdot \sin(\omega t - kr) \cdot \sin \theta$$

На эклектическое поле сенсора будет накладываться пол, создаваемое диполем. А также может оказывать влияние магнитное поле диполя на характеристики полупроводникового прибора посредством воздействия на движение носителей заряда, которое проявляется эффектом Холла: возникает поперечное электрическое поле (поле Холла)  $\vec{E}_x$  между боковыми гранями полупроводникового образца, которое характеризуют разностью потенциалов [3].

$$E_x = \frac{R_h}{d} \cdot i \cdot B \cdot \sin \alpha,$$

где  $R_h = \frac{1}{n_0 \cdot e}$  – коэффициент Холла, зависящий от природы вещества пластины;  $d$  – толщина пластинки в направлении магнитного поля;  $i$  – ток через пластину;  $\alpha$  – угол между направлениями векторов магнитной индукции и электрического тока.

При этом индукция от внешнего электромагнитного возмущения будет иметь вид:

$$B = \frac{k I_{CT}}{4\pi r \mu_0} \cdot \sin(\omega t - kr) \cdot \sin \theta$$

В полупроводниковой пластинке возникает суммарное электрическое поле  $\vec{E}_{\Sigma}$ , направление которого определяется векторной суммой:

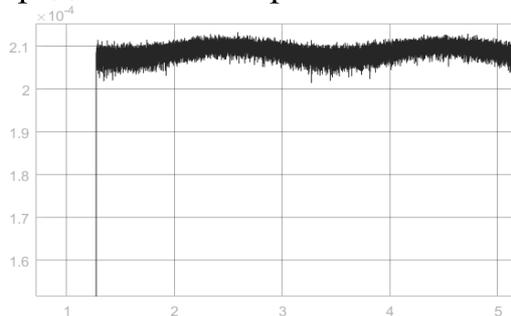
$$\vec{E}_{\Sigma} = \vec{E} + \vec{E}_{\theta} + \vec{E}_x$$

Изменение электрического поля будет сказываться на величине проводимости сенсора. Поскольку внешние возмущения являются случайной величиной, то эффект будет проявляться в виде шумов, которые можно учитывать при моделировании физических процессов на поверхности сенсора и при обработке информации.

Таким образом получили математическую модель энергетических процессов, протекающих в приповерхностной области полупроводникового сенсора от действия газа на основе уравнения Пуассона с учетом внешних воздействий на электрическое поле. Что позволило

получить зависимость изменения активной проводимости приповерхностного слоя от полупроводников при адсорбции молекул газа среды в условиях внешних электромагнитных излучений.

Моделирование изменения проводимости сенсора при действии статического электрического поля в условиях генерации постоянного шумового сигнала представлено на рис. 3.



**Рисунок 3 – Зависимость проводимости сенсора при статическом воздействии электрического поля в условиях внешнего электромагнитного воздействия**

Таким образом получили математическую модель энергетических процессов, протекающих в приповерхностной области полупроводникового сенсора от действия газа на основе уравнения Пуассона. Что позволило получить зависимость изменения активной проводимости приповерхностного слоя от полупроводников при адсорбции молекул газа среды.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Анкуда, М. А. Определение шумовой составляющей сигнала в измерительных преобразователях для полупроводниковых сенсоров / М. А. Анкуда, Д. С. Карпович, Н. М. Олиферович // Химическая технология и техника : материалы 88-й науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием), Минск, 29 января – 16 февраля 2024 г. – Минск: БГТУ, 2024. – С. 350-354.
2. Описание и моделирование энергетических процессов в полупроводниковом сенсоре / М. А. Анкуда [и др.] // Химическая технология и техника : материалы 88-й науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием), Минск, 29 января – 16 февраля 2024 г. – Минск: БГТУ, 2024. – С. 340-344.
3. Юдин В.И., Останков А.В. Электромагнитные поля и волны. Часть 1. Волны в безграничных и полубесконечных средах: учеб. пособие / В.И. Юдин, А.В. Останков; под общ. ред. В.И. Юдина. – Воронеж: Междунар. ин-т копыют. технологий, 20007. – 182 с.