

Определены значения концентрации угарного газа и раздражающих газов HCN, HCl, H<sub>2</sub>S, HF, NO<sub>2</sub>, удельной оптической плотности, рассеивающей способности и температуры окружающей среды при тлении в помещении макета мягкой мебели, состоящего из пенополиуретана в чехле из хлопчатобумажной ткани, в момент времени, когда пожар должен быть обнаружен чтобы обеспечить безопасную эвакуацию до того, как относительная эффективная доза достигнет значения 0,3.

#### Литература

1. Сарманаев С.Х., Башарин В.А., Толкач П.Г., Шербашов К.А. Токсико-химическое поражение на пожаре / С.Х. Сарманаев. – Токсикология, т. 16, 2015 – С. 434–442.
2. Пузач С.В., Смагин А.В., Лебедченко О.С., Доан В.М., Полевода И.И., Полоз Д.А., Осяев В.А., Кузьмицкий В.А. Роль динамики опасных факторов пожара в патогенезе отравления человека на пожаре / Вестник командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь, №1 (11), 2010. – С. 4–10.
3. Петров Л.В. Судебно-медицинская характеристика комбинированных отравлений в условиях пожара: автореф. дис. канд. мед. наук / Л.В. Петров. – СПб, 1993. – 24 с.
4. Pauluhn J.A. Retrospective analysis of predicted and observed smoke lethal toxic potency values // J. Fire Sciences. – 1993. – Vol. 11, № 2. – P. 109–130.
5. Bukowski R.W., Peacock R.D., Averill J.D., Cleary T.G., Bryner N.P., Walton W.D., Reneke P.A., Kuligowski E.D. Performance of Home Smoke Alarms. Analysis of the Response of Several Available Technologies in Residential Fire Settings // NIST Technical Note 1455-1, 2008 – 265 p.
6. Proulx G., Cavan N., Tonikian R. Egress Times from Single Family Houses. Institute for Research in Construction, National Research Council Canada Research Report: IRC-RR-209, July 2006.
7. Антошин А.А., Волков С.А. Методика исследования параметров среды и продуктов горения в жилом помещении и смежных с ним пространствах / А.А. Антошин. – Приборы и методы измерений 2018. – Т9, № 4. – С. 347–358.

УДК 621.891

### ЗОНДОВЫЕ ЭЛЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ИОННО-ЛЕГИРОВАННЫХ И ДИФфуЗИОННЫХ СЛОЕВ

Тявловский А.К.<sup>1</sup>, Воробей Р.И.<sup>1</sup>, Гусев О.К.<sup>1</sup>, Жарин А.Л.<sup>1</sup>, Пантелеев К.В.<sup>1</sup>, Петлицкий А.Н.<sup>2</sup>, Пилипенко В.А.<sup>2</sup>, Свистун А.И.<sup>1</sup>, Тявловский К.Л.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»

Минск, Республика Беларусь

Задачей исследования являлась разработка физических основ контроля качества тонких ионно-легированных и диффузионных слоев полупроводниковых пластин кремния на основе неразрушающего контроля параметров пространственного распределения значений удельного поверхностного сопротивления ( $10\text{--}10^5$  Ом/кв.дм), основанных на базе методов зондовой электрометрии поверхности. По результатам исследований была разработана конструкция и изготовлены эскизный и опытный образцы измерительных преобразователей и измерительной установки бесконтактной фотостимулированной сканирующей электрометрии, реализующей описанный ниже метод.

Чувствительный элемент измерительного преобразователя, реализующего метод бесконтактного контроля однородности распределения параметров ионно-легированных и диффузионных слоев на полупроводниковых пластинах диаметром до 200 мм, представляет собой систему из четырех концентрических секторных электродов, расположенных в одной плоскости. Вид и размеры электродной системы показаны на рисунке. Центральный электрод занимает сектор  $360^\circ$ , сектор каждого из остальных трех электродов составляет  $100^\circ$ .

Локальное воздействие на поверхность полупроводниковой пластины модулированным оптическим излучением осуществляется через отверстие  $\varnothing 0,51$  мм в центральном электроде; поверхность полупроводника непосредственно под электродами при этом остается неосвещенной. Изменение величины модулированной поверхностной фото-ЭДС VJPV1 – VJPV4 под электродами S1 – S4 определяется латеральным дрейфом фотогенерируемых неравновесных носителей заряда (ННЗ). Полный сигнал, регистрируемый электродом площадью Si, вычисляется путем интегрирования поверхностной фото-ЭДС по площади электрода.

Плотность мощности воздействующего излучения модулируется в соответствии с законом

$$\Phi(t) = \Phi_0(x,y)(1 - \cos(2\pi ft)), \quad (1)$$

где  $\Phi_0(x,y)$  – пространственное распределение плотности мощности в пределах освещенного участка;  $f$  – частота модуляции оптического излучения.

При поглощении излучения в мелком p-n переходе происходит генерация электронно-дырочных пар. Динамика генерации, рекомбинации и диффузии ННЗ описывается уравнениями непрерывности и Пуассона.

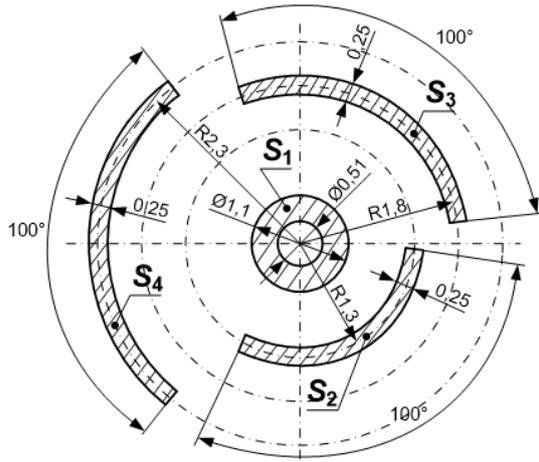


Рисунок – Вид и размеры электродной системы чувствительного элемента:

$$S_1 = 0,746 \text{ мм}^2; S_2 = 0,567 \text{ мм}^2; \\ S_3 = 0,785 \text{ мм}^2; S_4 = 1,004 \text{ мм}^2$$

В данном случае генерация ННЗ обеспечивается воздействием монохроматического оптического излучения из области собственного поглощения кремния. Скорость генерации определяется выражением

$$g_n = g_p = \alpha\Phi(1-R)\exp(-\alpha z), \quad (2)$$

где  $\alpha = 1/L$  – коэффициент поглощения оптического излучения;  $R$  – коэффициент отражения света;  $z$  – глубина (расстояние от поверхности полупроводниковой пластины).

Решение (2) для поверхностной фото-ЭДС в одномерной модели может быть найдено в виде

$$V_{JPV}(r) = A \cdot K_0(k \cdot r), \quad (3)$$

где  $K_0$  – модифицированная функция Бесселя второго рода;  $r$  – расстояние от центра области воздействия, соответствующее радиусу расположения отсчетного электрода.

Модифицированная функция Бесселя второго рода нулевого порядка записывается как

$$K_0(k \cdot r) = a + j \cdot b = |K_0(k \cdot r)| \exp(j\beta). \quad (4)$$

С учетом (4), выражение (3) можно переписать в виде

$$V_{JPV}(r) = A^* \exp(-j\Phi), \quad (5)$$

где

$$A^* = \frac{A}{\exp\left(\alpha \cos\left(\frac{\Phi}{2} r\right)\right)}, \quad (6)$$

$$\Phi = \alpha \sin\left(\frac{\Phi}{2} r\right). \quad (7)$$

Разность фаз сигнала поверхностной фото-ЭДС в точках с координатами  $r_1$  и  $r_2$  составляет

$$\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = \alpha \sin\left(\frac{\Phi}{2}(r_2 - r_1)\right). \quad (8)$$

Из (5)–(7) отношение амплитуд модулированной поверхностной фото-ЭДС в точках пространства с координатами  $r_1$  и  $r_2$  можно выразить как

$$\frac{|V_{JPV}(r_2)|}{|V_{JPV}(r_1)|} = \frac{A_2^*}{A_1^*} = \frac{\exp\left(\alpha \cos\left(\frac{\Phi}{2} r_1\right)\right)}{\exp\left(\alpha \cos\left(\frac{\Phi}{2} r_2\right)\right)} = \\ = \exp\left(\alpha \cos\left(\frac{\Phi}{2}(r_1 - r_2)\right)\right). \quad (9)$$

Прологарифмируем (9):

$$\ln \frac{|V_{JPV}(r_2)|}{|V_{JPV}(r_1)|} = \alpha \cos\left(\frac{\Phi}{2}(r_1 - r_2)\right). \quad (10)$$

Из (8) и (10) получаем, что

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\Phi}{2}\right) = \operatorname{tg}\left(\frac{1}{2} \operatorname{arctg}\left(\frac{2\pi f C_s}{G}\right)\right) = \\ = \frac{\Delta\Phi}{\ln \frac{|V_{JPV}(r_2)|}{|V_{JPV}(r_1)|}}. \quad (11)$$

Откуда

$$G = \frac{2\pi f C_s}{\operatorname{tg}\left(2 \operatorname{arctg}\left(\frac{\Delta\Phi}{\ln \frac{|V_{JPV}(r_2)|}{|V_{JPV}(r_1)|}}\right)\right)}. \quad (12)$$

Емкость подложки  $C_s$  может быть найдена из выражения

$$C_s = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 q^2 N}{2kT} \sqrt{2 \ln\left(\frac{N}{n_i}\right) + \ln\left(\ln\left(\frac{N}{n_i}\right)\right)}, \quad (13)$$

где  $n_i$  – собственная концентрация носителей заряда в подложке.

Величина  $C_s$  является константой подложки и может быть вычислена заранее вне цикла измерений.

Тогда величину удельного поверхностного сопротивления ионно-легированного или диффузионного слоя можно найти из выражения

$$R_S = \left[ \frac{\Delta\Phi}{\sqrt[4]{G^2 + (2\pi f C_S)^2} \cdot \sin\left(\frac{\arctg\left(\frac{2\pi f C_S}{G}\right)}{2}\right) (r_1 - r_2)} \right]^2 \quad (14)$$

Алгоритм бесконтактного измерения удельного электрического сопротивления ионно-легированных и диффузионных слоев включает следующие действия:

- локальное воздействие на поверхность полупроводника модулированным оптическим излучением под центром электрода S1 (см. рисунок);
- регистрация амплитуд модулированной поверхностной фото-ЭДС  $V_{JFV}(r_2)$ ,  $V_{JFV}(r_3)$  и  $V_{JFV}(r_4)$  и фазовых сдвигов  $\Delta\Phi_{23}$  и  $\Delta\Phi_{34}$ ;
- вычисление емкости подложки  $C_S$  в соответствии с выражением (13) на основе априорных данных;

УДК 681.2-71

## РАСЧЕТ ПАССИВНОЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ МИКРОТРИБОМЕТРА МТУ-2К7

Гуцев Д.М., Григорьев А.Я.

Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси»  
Гомель, Республика Беларусь

Модуль возвратно-поступательного движения микротрибометра МТУ-2К7 осуществляет функцию перемещения образца в процессе измерения. Для перемещения исследуемого образца был применен бесконтактный привод, обладающий рядом преимуществ.

Одной из проблем при работе микротрибометра является нагрев катушек до температуры около 70 °С, что может привести к перегреву и выходу прибора из строя. Поэтому целью работы является расчёт параметров работы катушки и оптимальных габаритных размеров для надежной работы катушки не допускающей ее перегрев.

Так, если внешний диаметр провода  $D_{pr} = 0,5$  мм,  $D_{pm} = 0,55$  мм, то площадь сечения провода:

$$S_{pr} = \pi \left( \frac{D_{pr}}{4} \right)^2, \quad (1)$$

$$S_{pr} = 3,14 \times \left( \frac{0,5}{4} \right)^2 = 0,19635 \text{ мм}^2.$$

Выбираем для расчета катушки размеры: длина катушки  $l_k = 65$  мм; высота катушки  $h_k = 14$  мм; наружный диаметр катушки  $D_n = 45$  мм; внутренний диаметр катушки  $D_e = 20$  мм.

Так как средняя длина витка:

$$l_{cp} = \frac{\pi(D_n + D_e)}{2}, \quad (2)$$

– вычисление проводимости перехода  $G$  в соответствии с выражением (12) на основании регистрации амплитуд и фазовых сдвигов модулированной поверхностной фото-ЭДС;

– вычисление удельного поверхностного сопротивления  $R_S$  в соответствии с выражением (14) на основе среднего вычисленного значения  $G$ .

Как можно видеть, предложенная методика измерений на основе использования зондовых электротрибометрических методов позволяет, помимо удельного поверхностного сопротивления, регистрировать дополнительные параметры характеризации ионно-легированных и диффузионных слоев, а именно: электрическую емкость подложки и проводимость перехода, в том же числе измерения. Данный алгоритм реализован в программном обеспечении измерительной установки бесконтактного контроля однородности распределения параметров ионно-легированных и диффузионных слоев на полупроводниковых пластинах диаметром до 200 мм и выполняется автоматически.

Выбираем коэффициент заполнения катушки  $f_k = 0,85$ .

Тогда значение удельного сопротивления выбираем по таблице 1 при 20°С, 40°С [1].

Таблица 1 – Значение удельного сопротивления

Рабочая температура, °С	Сопротивление (удельное), Ом.мм <sup>2</sup> /м
20	$\rho_{20} = 0,01754$
40	$\rho_{40} = 0,01991$

Число витков катушки будет:

$$\omega = f_k \frac{h_k l_k}{D_{pm}^2}, \quad (3)$$

$$\omega = 0,85 \frac{14 \cdot 65}{0,55^2} = 2557.$$

Находим сопротивление провода:

$$r = \rho_{40} \frac{\pi \cdot (D_n + D_e)}{2} \cdot \omega, \quad (4)$$

$$r = 0,01991 \frac{3,14 \cdot (0,045 + 0,020)}{2} \cdot 2557 = 26,47339 \text{ Ом}.$$

Из таблицы 2 [1] выбираем коэффициент теплоотдачи  $\mu = f(\theta)$  при 40°С, 60°С, 80°С.