

Влияние глубоких энергетических уровней на коэффициент газовой чувствительности кондуктометрических сенсоров газов

С.А. Богданов, А.Г. Захаров, Ю.Б. Какурин

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

Аннотация: разработана методика прогнозирования коэффициента газовой чувствительности кондуктометрических сенсоров с чувствительным слоем на основе полупроводника с глубокими энергетическими уровнями в запрещенной зоне. В результате моделирования установлено, что глубокие энергетические уровни могут приводить к существенному увеличению коэффициента газовой чувствительности, а также влиять на хемосорбционные свойства чувствительного слоя.

Ключевые слова: кондуктометрический сенсор газа, газовая чувствительность, чувствительный слой, полупроводник, глубокие энергетические уровни.

Решение задач повышения адсорбционной чувствительности и селективности невозможно без интенсивного исследования методов формирования и особенностей структуры полупроводниковых чувствительных слоев (ЧС) кондуктометрических сенсоров газов [1]. В работах [2, 3] рассмотрено влияние электроискровой обработки поверхности полупроводникового чувствительного слоя сенсора газа на его электрофизические свойства, в [4] проведено моделирование коэффициента газовой чувствительности (ГЧ) кондуктометрических сенсоров газов на основе оксидов металлов, в приближении квазиоднородности полупроводникового материала ЧС, в [5] разработана методика прогнозирования ГЧ кондуктометрических сенсоров с ЧС на основе неоднородных полупроводников, учитывающая размеры кристаллических зерен материала ЧС.

Целью настоящей работы является разработка методики прогнозирования коэффициента газовой чувствительности кондуктометрических сенсоров с ЧС на основе полупроводников с глубокими энергетическими уровнями (ГУ) в запрещенной зоне.

Коэффициент ГЧ кондуктометрического сенсора газа определим как отношение приращения абсолютной величины сопротивления ($|R - R_0|$) ЧС, обусловленного появлением анализируемого газа, к его величине в воздушной среде без анализируемого газа R_0

$$S = \frac{|R - R_0|}{R_0}. \quad (1)$$

Для определенности рассмотрим ЧС на основе полупроводника n-типа проводимости, поверхность которого отрицательно заряжена вследствие химической адсорбции анализируемого газа-акцептора и других фоновых газов и электрически-активных дефектов [6].

При плотности заряда на поверхности полупроводникового ЧС N_s , концентрации ионизированных атомов основной легирующей примеси N_d и акцепторных ГУ N_{ta} из условия электронейтральности

$$qN_s = q(N_d - N_{ta})W$$

с учетом выражения для толщины обедненной области [7]

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0\varphi_s}{q(N_d - N_{ta})}} \quad (2)$$

для величины поверхностного потенциала φ_s имеем

$$\varphi_s = \frac{qN_s^2}{2\varepsilon\varepsilon_0(N_d - N_{ta})}. \quad (3)$$

Сопротивление обедненной основными носителями заряда приповерхностной области ЧС R_s существенно превышает сопротивление электрически нейтрального объема ЧС R_b ($R_s \gg R_b$), следовательно, сопротивление сенсора газа будет в основном определяться величиной R_b

$$R_b = \frac{L}{qS(\mu_{nb} n_b + \mu_{pb} p_b)}, \quad (4)$$

где: μ_{nb}, μ_{pb} – подвижности электронов и дырок в объеме ЧС, соответственно; n_b, p_b – концентрации электронов и дырок в объеме ЧС, соответственно; $S = d(h - W)$ – площадь поперечного сечения электрически нейтрального объема ЧС, d - ширина ЧС, h - толщина ЧС; L - длина ЧС, на границах которого расположены омические контакты кондуктометрического сенсора газов. Концентрации электронов и дырок в объеме ЧС с учетом ГУ, а также концентрации ионизированных ГУ определяются по методикам, приведенным в [7, 8].

Таким образом, появление анализируемого газа приводит к изменению величины плотности заряда на поверхности ЧС с N_0 на N_g до значения $N_S = N_g + N_0$, влияет на величину поверхностного потенциала φ_s (3), обуславливая изменение положения уровня Ферми на поверхности ЧС, а, следовательно, и его хемосорбционные свойства [9, 10], а также модулирует толщину обедненной области W (2) и сопротивление сенсора газа $R \approx R_b$ (4).

На рис. 1 приведены зависимости энергетического положения уровня Ферми и коэффициентов газовой чувствительности от энергетического положения акцепторного ГУ относительно дна зоны проводимости, для кондуктометрического сенсора газа с ЧС на основе полупроводникового материала n-типа проводимости с шириной запрещенной зоны 3,5 эВ, диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 12$, концентрациями ионизированных атомов основной легирующей примеси $N_d = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и акцепторных ГУ $N_{ta} = 9 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, подвижностью электронов $\mu_{nb} = 120 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ и дырок $\mu_{pb} = 60 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Температура ЧС составляла 500 К. Кривые 1, 2 – коэффициенты газовой чувствительности для ЧС толщиной $h = 300$ нм и $h = 600$ нм, соответственно. Кривая 3 – энергетическое положение уровня Ферми, эВ. Расчет R_0 в (1) по (4) проводился для плотности заряда на

поверхности ЧС $N_S = N_0 = 10^{11} \text{ см}^{-2}$, расчет сопротивления ЧС при появлении газа-акцептора R осуществляли для $N_S = N_0 + N_g = 3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, т.е. для плотности заряда, обусловленного адсорбцией газа-акцептора, равной $N_g = 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ [11].

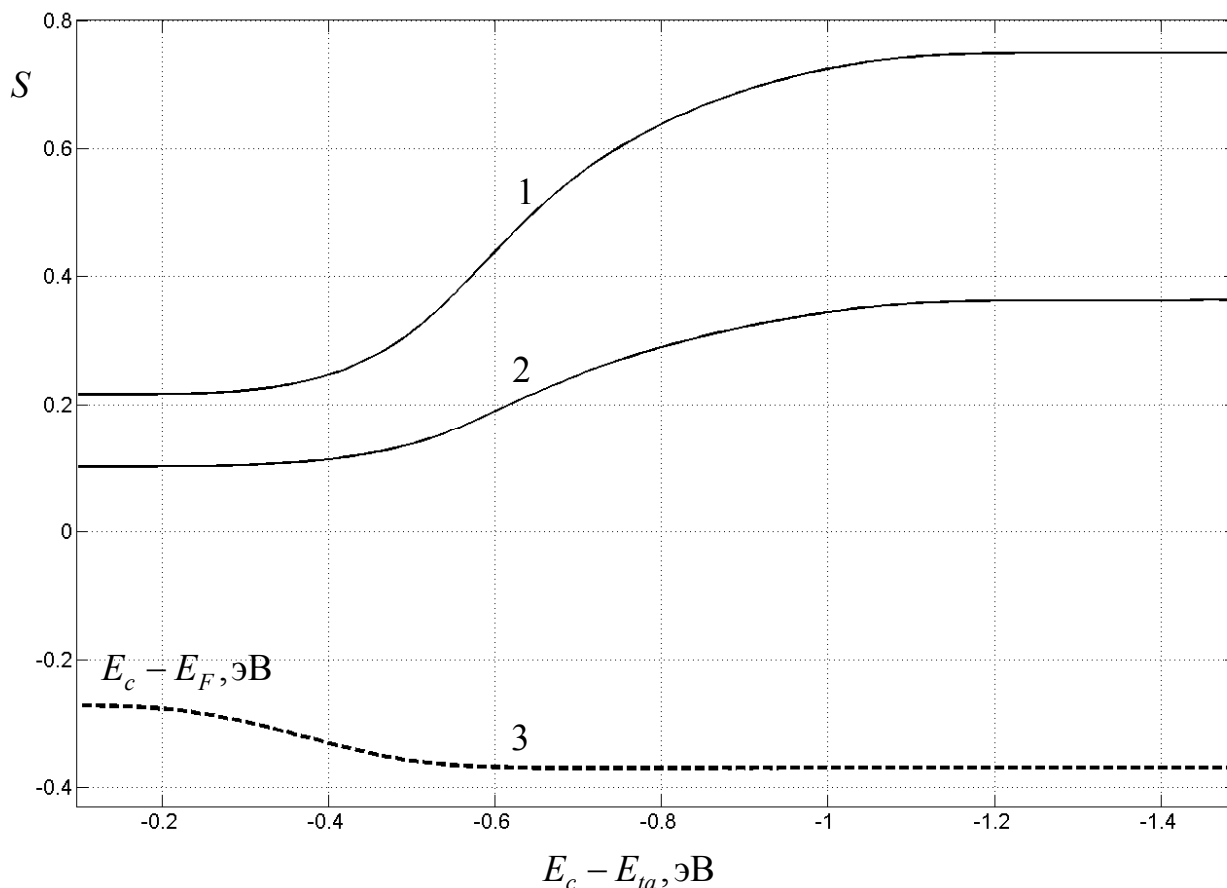


Рис. 1. – Зависимости энергетического положения уровня Ферми и коэффициентов газовой чувствительности от энергетического положения акцепторного ГУ

В результате моделирования установлено, что глубокие энергетические уровни могут приводить к существенному увеличению коэффициента газовой чувствительности, а также влиять на хемосорбционные свойства чувствительного слоя. Разработанная методика прогнозирования коэффициента газовой чувствительности может быть использована при

оптимизации технологических режимов формирования кондуктометрических сенсоров газов с ЧС на основе полупроводников с глубокими энергетическими уровнями в запрещенной зоне.

Работа выполнена при поддержке государственного задания Министерства образования РФ (тема № 213.01 – 11/2014 – 14).

Литература

1. Гаман В.И. Физика полупроводниковых газовых сенсоров. Томск: НТЛ, 2012. 112 с.

2. Богданов С.А., Захаров А.Г., Писаренко И.В. Влияние электроискровой обработки поверхности полупроводникового чувствительного слоя сенсора газа на его электрофизические свойства // Электронная обработка материалов. 2014. № 6. С. 1-5.

3. Богданов С.А., Захаров А.Г., Писаренко И.В. Модификация поверхности чувствительного слоя сенсора газа электроискровой обработкой // Инженерный вестник Дона, 2013, № 1. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1528.

4. Богданов С.А., Захаров А.Г., Лытюк А.А. Моделирование газовой чувствительности кондуктометрических сенсоров газов на основе оксидов металлов // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 1. С. 12-14.

5. Богданов С.А. Моделирование газовой чувствительности кондуктометрических сенсоров на основе неоднородных полупроводников // Нано- и микросистемная техника. 2013, № 9. С. 2-6.

6. Barsan, N. and U. Weimar, 2003. Understanding the fundamental principles of metal oxide based gas sensors; the example of CO sensing with SnO₂ sensors in the presence of humidity. J. Phys.: Condens. Matter, 15: 813-839.

7. Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов. М.: Энергия, 1973. 656 с.



8. Богданов С.А., Захаров А.Г., Писаренко И.В. Влияние многозарядных примесных центров на распределение потенциала в приповерхностной области полупроводника // Инженерный вестник Дона, 2013, № 1. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1530.

9. Захаров А.Г., Богданов С.А., Лытюк А.А. Прогнозирование положения уровня Ферми в полупроводнике чувствительного слоя сенсора газа // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. 2011. № 4. С. 34-36.

10. Волькенштейн Ф.Ф. Электронные процессы на поверхности полупроводников при хемосорбции. М.: Наука, 1987. 432 с.

11. Weiz, P.B., 1953. Effect on electronic charge transfer between adsorbate and solid on chemisorptions and catalysis. J. Chem. Phys., 21: 1531-1538.

References

1. Gaman V.I. Fizika poluprovodnikovyx gazovykh sensorov [Physics of semiconductor gas sensors]. Tomsk: NTL, 2012. 112 p.

2. Bogdanov S.A., Zakharov A.G., Pisarenko I.V. Elektronnaya obrabotka materialov. 2014. № 6. pp. 1-5.

3. Bogdanov S.A., Zakharov A.G., Pisarenko I.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, № 1. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1528.

4. Bogdanov S.A., Zakharov A.G., Lytyuk A.A. Nano- i mikrosistemnaya tekhnika. 2011. № 1. pp. 12-14.

5. Bogdanov S.A. Nano- i mikrosistemnaya tekhnika. 2013. № 9. pp. 2-6.

6. Barsan, N. and U. Weimar, 2003. J. Phys.: Condens. Matter, 15: 813-839.

7. Zi S.M. Fizika poluprovodnikovyx priborov [Physics of Semiconductor Devices]. M.: Energiya, 1973. 656 p.

8. Bogdanov S.A., Zakharov A.G., Pisarenko I.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, № 1. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1530.



9. Zakharov A.G., Bogdanov S.A., Lytyuk A.A. Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. 2011. № 4. pp. 34-36.

10. Vol'kenshteyn F.F. Elektronnye protsessy na poverkhnosti poluprovodnikov pri khemosorbtsii [Electronic processes on semiconductor surfaces when chemisorption]. M.: Nauka, 1987. 432 p.

11. Weiz, P.B., 1953. J. Chem. Phys., 21: 1531-1538.