

№4, апрель 2015

ISSN 1999-9429



Южный
федеральный
университет

И З В Е С Т И Я

- *Моделирование и проектирование*
- *Радиосвязь, электроника и нанотехнологии*
- *Автоматика и управление*
- *Вычислительная техника и информатика*

ЮФУ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ИЗВЕСТИЯ ЮФУ. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ IZVESTIYA SFedU. ENGINEERING SCIENCES

Свидетельство о регистрации средства массовой информации

ПИ № ФС77-28889 от 12.07.2007

Научно-технический и прикладной журнал

Издается с 1995 года

Подписной индекс 41970

№ 4 (165). 2015 г.

Журнал включен в «Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук».

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНТИ. Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich`s Periodicals Directory».

Редакционный совет

Каляев И.А. (председатель); Курейчик В.М. (зам. председателя); Моськин В.Н. (ученый секретарь); Абрамов С.М.; Агеев О.А.; Бабенко Л.К.; Вагин В.Н.; Веселов Г.Е.; Гонкальвес Ж.; Колесников А.А.; Коноплев Б.Г.; Курейчик В.В.; Левин И.И.; Макаревич О.Б.; Маркович И.И.; Микрин Е.А.; Никитов С.А.; Обуховец В.А.; Осипов Г.С.; Панатов Г.С.; Панич А.Е.; Петров В.В.; Петровский А.Б.; Пшихопов В.Х.; Редько В.Г.; Румянцев К.Е.; Саламах М.; Солдатов А.В.; Стемпковский А.Л.; Сухинов А.И.; Сысоев В.В.; Тарасов С.П.; Фрадков А.Л.; Хашемипур М.; Чаплыгин Ю.А.; Чердниченко Д.И.; Четверушкин Б.Н.; Чичков Б.Н.

Рецензент номера Обуховец В.А.

Учредитель Южный федеральный университет.

Издатель Южный федеральный университет.

Ответственный за выпуск Моськин В.Н.

Главный редактор Ярошевич Н.В.

Оригинал-макет выполнен Ярошевич Н.В.

Подписано к печати 29.04.2015 г. Формат 70×108 $\frac{1}{8}$. Бумага офсетная.

Офсетная печать. Усл. печ. л. – 31,3. Уч.-изд. л. – 31,0.

Заказ № . Тираж 250 экз.

Адрес издателя: 344091, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1. Тел. 8(863)2478051.

Адрес типографии: Отпечатано в Секторе обеспечения полиграфической продукцией кампуса в г. Таганроге отдела полиграфической, корпоративной и сувенирной продукции ИПК КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ 347928, г. Таганрог, ГСП 17А, Энгельса, 1. Тел. 8(8634)371717.

Адрес редколлегии: 347928, г. Таганрог, ГСП 17А, пер. Некрасовский, 44, ЮФУ, Д-225, телефон/факс: +7(8634)371071. E-mail: onti@tgn.sfedu.ru, <http://izv-tn.tti.sfedu.ru/>.

ISSN 1999-9429 (Print)

ISSN 2311-3103 (Online)

© Южный федеральный университет, 2015

Раздел II. Радиосвязь, электроника и нанотехнологии

УДК 621.373.8.002

А.М. Светличный, М.Н. Григорьев, М.В. Демьяненко, И.Л. Житяев

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПЛЕНОК ГРАФЕНА НА ПОЛУИЗОЛИРУЮЩЕМ 6H-SiC К NH₃ И ПАРАМ (CH₃)₂CH(OH)

В качестве газочувствительного слоя газового сенсора используется графен. Пленки графена выращивались на полуизолирующем 6H-SiC методом вакуумной термической деструкции, позволяющим получать высококачественные пленки по всей поверхности подложки. Топологический рисунок газового сенсора был получен после нанесения через маску на 6H-SiC диэлектрической пленки Al₂O₃, вакуумного отжига при температуре 1300–1400 °С и изготовления контактов к графену. Были проведены исследования газочувствительности, динамических характеристик сенсора, построена зависимость процесса десорбции газа NH₃ и паров (CH₃)₂CH(OH) от температуры сенсора для пленок графена, полученных при различных температурных режимах. Было показано, что пленки графена, полученные при температуре отжига 1300 °С имеют почти в два раза более высокую чувствительность к NH₃ при концентрации 100 ppm, по сравнению с образцами, полученными при температуре отжига 1400 °С. Чувствительность графеновых пленок к парам (CH₃)₂CH(OH), при концентрации 100 ppm, почти в четыре раза выше по сравнению с образцами, полученными при температуре отжига 1400 °С. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что полученные сенсорные элементы перспективны для обнаружения малых долей исследованных нами газов.

Газочувствительный сенсор; графен; карбид кремния; десорбция.

A.M. Svetlichnyy, M.N. Grigoriev, M.V. Demyanenko, I.L. Jityaev

RESEARCH OF GAS SENSITIVITY OF GRAPHENE FILMS ON SEMIINSULATING SILICON CARBIDE 6H-SiC TO NH₃ AND VAPORS OF (CH₃)₂CH(OH)

Graphene is used as the gas sensitive layer of the gas sensor. Graphene films grown on semiconductive 6H-SiC by vacuum thermal degradation, enables to obtain of high quality films all along surface of the substrate. Topological pattern of the gas sensor was obtained after the plotting of dielectric film Al₂O₃ on top of the 6H-SiC through a mask, vacuum annealing at a temperature of 1300–1400 °C and manufacturing contacts to graphene. Gas sensitivity of the sensor and the dynamic characteristics was research and the dependence of desorption of NH₃ and (CH₃)₂CH(OH) vapors from the sensor temperature was plotted for graphene films prepared at different temperatures. It was demonstrated, that graphene films obtained at an annealing temperature 1300 °C has almost two times higher sensitivity to NH₃ at a concentration 100 ppm compared to the samples obtained at the annealing temperature 1400 °C. Sensitivity of graphene films to (CH₃)₂CH(OH) vapours at a concentration 100 ppm was almost four times higher compared to the samples obtained at the annealing temperature 1400 °C. The obtained results allow us to conclude that the obtained sensor elements are promising for the detection of small amounts of investigated gases.

Gas sensor; graphene; silicon carbide; desorption.

Введение. Графен, монослой атомов углерода, образующих гексагональную кристаллическую решетку, считается перспективным материалом в полупроводниковой электронике благодаря его уникальным физическим и электронным свойствам: высокая подвижность носителей заряда, высокая проводимость, теплопроводность, механическая стабильность, низкая работа выхода электронов, устойчивость к ионизирующим излучениям [1–6]. Механизм газовой чувствительности пленок графена проявляется в следствие адсорбции и десорбции молекул газа, выступающих в качестве доноров и акцепторов на поверхности пленок графена [1, 2]. Графен является перспективным материалом для использования в газовой сенсорике по причине его двумерной структуры, толщиной в один атом, которая позволяет детектировать малые концентрации адсорбированного газа [7].

Проведены исследования газочувствительности сенсоров на основе пленок графена в работах [1, 2, 4, 7–9], которые установили высокую чувствительность пленок графена и перспективность их использования для обнаружения газов. Графен, полученный механическим отшелушиванием, способен обнаружить молекулы NO_2 на уровне миллионных долей [9]. Но предложенный в этой работе метод получения графена вряд ли подходит для промышленного производства сенсоров газа в связи с трудностями формирования достаточно больших площадей графена, изготовления контактов к нему, а также переноса на диэлектрическую подложку. Другой распространенный метод получения пленок графена, путем восстановления оксида графена, имеет высокую степень структурных дефектов углеродного слоя, связанную со сменой гибридизации углерода с sp^2 на sp^3 при взаимодействии с кислородом [10].

Метод термической деструкции полуизолирующего $6H$ -SiC не имеет недостатков, перечисленных выше [8, 9]. Он считается одним из перспективных для промышленного производства, поскольку пленки графена имеют высокую прочность и могут быть получены на всей поверхности подложки [8]. Важным является также то, что пленка графена в этом случае является продолжением структуры подложки, за счет чего достигается высокая адгезия к SiC [9] и отпадает необходимость переноса пленок графена на диэлектрическую подложку, что существенно упрощает технологический процесс.

Исследовались газочувствительные свойства сенсора к парам $(\text{CH}_3)_2\text{CH}(\text{OH})$ (изопропиловый спирт) и газообразному NH_3 (аммиак). NH_3 используется в процессе получения аммиачной селитры, в холодильных установках, в медицине и других применениях. Ежегодный мировой объем производства NH_3 достигает 150 млн. тонн. Изопропиловый спирт также широко используется в химической промышленности при производстве ацетона, пероксида водорода. При превышении ПДК (предельно допустимой концентрации), исследуемые газы воздействуют на организм человека весьма неблагоприятно. В связи с этим, а также с рядом технологических параметров, которые необходимо контролировать в вышеперечисленных процессах производства, большая роль отводится устройствам мониторинга газового состава воздуха и системам обнаружения утечек газа. В настоящее время имеются большие трудности изготовления газовых сенсоров, обладающих высокой стабильностью характеристик и чувствительностью к аммиаку и парам изопропилового спирта. Следовательно, усовершенствование существующих и создание новых видов газовых сенсоров для NH_3 и $(\text{CH}_3)_2\text{CH}(\text{OH})$ является актуальной задачей.

Целью работы, представленной в настоящей статье, является исследование газочувствительных характеристик сенсорного элемента газового датчика.

Изготовление сенсора. На основе анализа экспериментальных результатов исследования процесса термического разложения карбида кремния в вакууме [11–16], а также результатов исследования спектров комбинационного рассеяния света пленками графена на полуизолирующих подложках карбида кремния, проведенных нами в работе [15], был разработан технологический маршрут изготовления газового сенсора на основе пленок графена на карбиде кремния, который включает в себя следующие основные операции: подготовка подложки 6H–SiC, нанесение пленки Al_2O_3 через маску, деструкция карбида кремния, формирование контактов. Отметим, что нанесение пленки Al_2O_3 методом магнетронного распыления через маску для создания топологического рисунка в виде меандра никем ранее не использовалось.

На основе этого технологического маршрута нами были изготовлены опытные образцы газовых сенсоров и проведены исследования газочувствительности пленок графена к NO_2 и C_2H_5OH [16], подтвердившие перспективность этого метода.

Результаты экспериментов и обсуждение. Чувствительность сенсора определялась по формуле:

$$S = \frac{(R_0 - R)}{R} \times 100\%, \quad (1)$$

где R_0 – изначальное сопротивление, R – текущее сопротивление.

Исследования проводились при помощи стенда для измерения газочувствительности, состоящего из камеры в виде кварцевого цилиндра, герметично закрытого с торцевых сторон фторопластовыми крышками, электроизолированного нагревательного столика, выводов для измерения величины сопротивления сенсора и для подачи электропитания на нагреватель, термопары для контроля температуры, штуцеров для оттока и подачи газов, фиксирующей подставки для кварцевой камеры. Величина сопротивления сенсора и ЭДС термопары контролировались с помощью цифрового мультиметра.

Исследование газочувствительности пленок графена проводилось на образцах, полученных при температурах термодеструкции 1300 °C и 1400 °C, так как ранее нами было установлено, что именно при этих температурах достигается оптимальное соотношение «размер кристаллита/степень дефектности» графена [16]. Исследования газочувствительности к NH_3 и парам $(CH_3)_2CH(OH)$ проводились при комнатной температуре. Каждый раз после подачи газа, сенсор прогревался с целью десорбции молекул газа с поверхности пленок графена. После прогрева, образец охлаждался до 20 °C для восстановления начального значения сопротивления, поскольку энергия связи молекул газа с пленкой графена зависит от температуры исследуемого образца [1].

На рис. 2 представлены результаты исследования чувствительности пленок графена, полученных деструкцией карбида кремния в вакууме при температурах 1300 °C и 1400 °C к NH_3 .

Механизм изменения чувствительности обусловлен тем, что за счет неспаренных электронов внешнего слоя атом азота в молекуле NH_3 образует с помощью обменного механизма три ковалентные связи с атомами водорода. Помимо этого, у атома азота на внешнем электронном слое остается еще одна свободная электронная пара, расположенная на s-подуровне. Свободная электронная пара значительно воздействует на химические свойства аммиака, позволяя атому азота, используя донорно–акцепторный механизм, образовывать дополнительную ковалентную связь. Для пленок графена, полученных при 1300 °C, время отклика составило 80 сек., время восстановления 125 сек., чувствительность 10.2 %. Для пленок графена, полученных при 1400 °C, время отклика 79 сек., время восстановления

123 сек., чувствительность 4,8 %. Порог чувствительности к NH_3 для пленок графена, полученных при 1300°C составил 10 ppм, а для 1400°C – 28 ppм. Возможно, это связано с соотношением размеров кристаллитов и степенью дефектности графена [15].

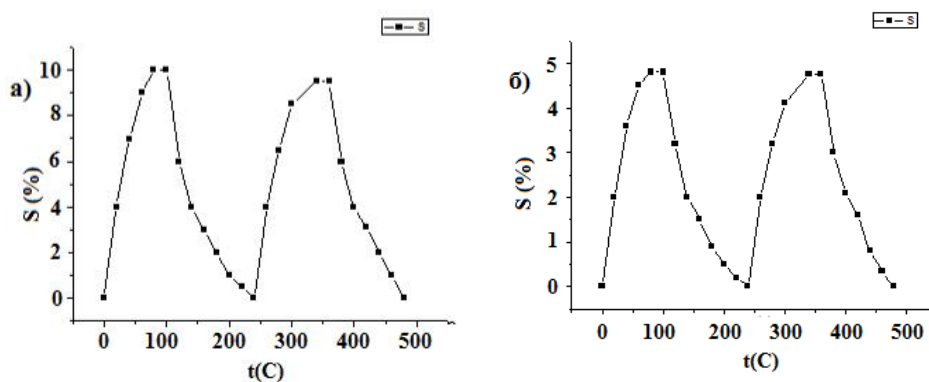


Рис. 2. Зависимость чувствительности пленок графена от времени при концентрации NH_3 100 ppм. Температура отжига: а) 1300°C , б) 1400°C

В работе [17] авторы изучали газочувствительность графитовых нанолент к NH_3 . У графитовых нанолент, активированных с помощью наночастиц Pt, наибольшая чувствительность составила около 70 % при концентрации исследуемого газа 50 ppм. Дефекты в пленке и высокая степень пористости нанолент возможно явились причиной высокой газочувствительности. Об исследовании чувствительности при концентрации NH_3 менее 50 ppм в работе [17] не сообщалось. Исследуемый же нами сенсор показал способность обнаруживать газ NH_3 с концентрацией 10 ppм при чувствительности около 1 %.

На рис. 3 представлены результаты исследований чувствительности к парам $(\text{CH}_3)_2\text{CH}(\text{OH})$ пленок графена, полученных при отжиге полуизолирующего 6H-SiC при температуре 1300°C и 1400°C .

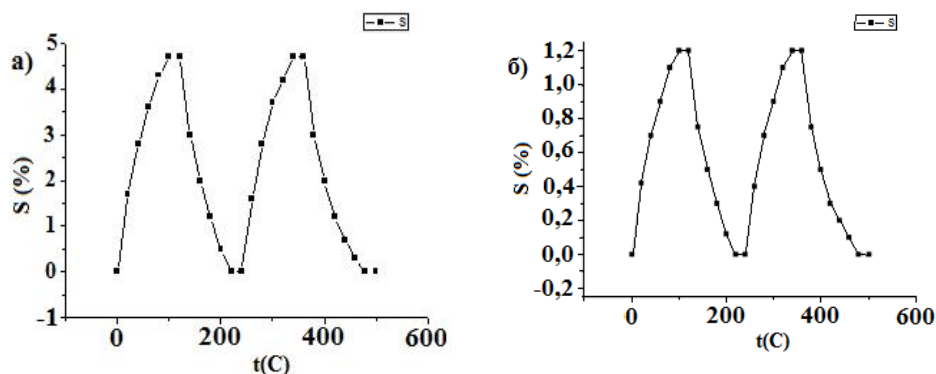


Рис. 3. Зависимость чувствительности пленок графена от времени к парам $(\text{CH}_3)_2\text{CH}(\text{OH})$ при концентрации паров 100 ppм. Температура отжига: а) 1300°C , б) 1400°C

Установлено, что пленки графена, полученные при температуре термической деструкции 1300 °С, имели время отклика 100 сек., время восстановления 100 сек., чувствительность 4,6 %. Пленки графена, полученные при температуре термической деструкции 1400 °С, имели время отклика 100 сек., время восстановления 100 сек. и чувствительность 1,2 %. Порог чувствительности для 1300 °С составил 35 ppm, а для 1400 °С – 90 ppm. Полученные результаты не противоречат исследованиям газочувствительности сенсоров на основе нанокompозитных слоев ZnO/SiO₂ к изопропанолу, полученных в работе [18]. Однако, максимальная чувствительность исследованных сенсоров в работе [18] была достигнута при нагреве до температуры 300 °С, что энергозатратно.

Анализ экспериментальных данных показал, что пленки графена полученные при температуре отжига 1300 °С, проявляют лучшие газочувствительные свойства. Также следует отметить тот факт, что разница в температурах отжига карбида кремния в 100 °С практически не оказывает существенного влияния на время отклика и восстановления сенсора. Можно предположить, что причиной полученных данных является то, что пленки, полученные при больших температурах, имеют и большее количество графеновых слоев, которые, возможно, не участвуют в процессе адсорбции, тем самым снижая газочувствительность. Также можно предположить, что нижележащие слои графена меньше влияют на процессы десорбции с поверхностного слоя. Опытные образцы газочувствительных сенсоров показывали воспроизводимость результатов газочувствительности в ходе проведения исследований.

Были проведены также исследования зависимости длительности процесса десорбции газов от температуры для пленок графена, полученных методом термической деструкции карбида кремния в вакууме при температуре 1300 °С (рис. 4).

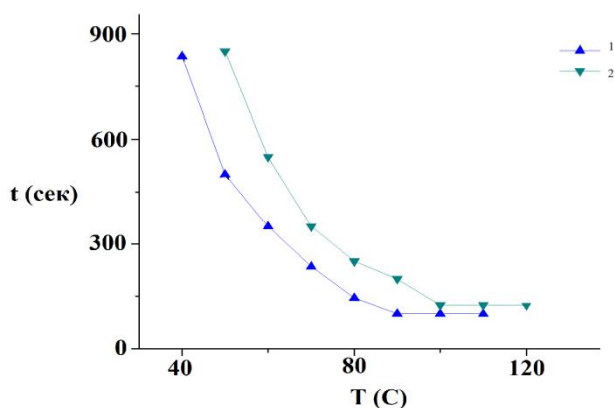


Рис. 4. Зависимости длительности процесса десорбции от температуры сенсора:
1 – (CH₃)₂CH(OH), 2 – NH₃

Для паров (CH₃)₂CH(OH) десорбция начинает происходить уже при температуре 40 °С, время восстановления достигает минимума за 90сек., за 100 сек. при 90 °С и не изменяется при дальнейшем увеличении температуры. Для NH₃ десорбция начинает происходить при температуре 50 °С, время восстановления достигает минимума за 125 сек. при 100 °С и не изменяется при дальнейшем увеличении температуры.

Заключение. В результате проведенных исследований разработана конструкция и изготовлен макет газового сенсора с пленкой графена на поверхности полужолирующего 6Н–SiC. Полученные пленки графена обладают высокой

прочностью, стабильностью и технологичностью для применения в производстве с использованием стандартных технологий. Установлены закономерности газочувствительности пленок графена к NH_3 и парам $(\text{CH}_3)_2\text{CH}(\text{OH})$. Определены время отклика, восстановления и порог чувствительности пленок графена, а также влияние температуры отжига карбида кремния на газочувствительность исследуемых сенсоров. Показано, что пленки графена, полученные при температуре отжига $1300\text{ }^\circ\text{C}$, имеют почти в два раза более высокую чувствительность к NH_3 , по сравнению с образцами, полученными при температуре отжига $1400\text{ }^\circ\text{C}$. Установлено, что температура отжига не существенно влияет на время отклика и восстановления газочувствительности сенсора. Однако чувствительность графеновых пленок к парам $(\text{CH}_3)_2\text{CH}(\text{OH})$ почти в четыре раза выше, по сравнению с образцами, полученными после отжига в вакууме при температуре $1400\text{ }^\circ\text{C}$. Разработанные сенсоры не уступают по своим параметрам сенсорам, продемонстрированным в работе [18], а по чувствительности имеют некоторое преимущество по сравнению с образцами, исследуемыми в работе [17], и особенно перспективны для контроля агрессивных сред при высоких температурах.

Результаты работы были получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования и научно-образовательного центра «Нанотехнологии» Южного федерального университета. Исследование выполнено в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности (Задание №16.1154.2014/К).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Schedin F., Geim A.K., Morozov S.V., Hill E.W., Blake P., et al.* Detection of individual gas molecules adsorbed on graphene // *Nat Mater.* – 2007. – Vol. 6. – P. 652-655.
2. *Lu G., Ocola L.E., Chen J.* Gas detection using low-temperature reduced graphene oxide sheets // *Appl Phys Lett.* – 2009. – Vol. 94. – P. 83-111.
3. *Geim A.K., Novoselov K.S.* The rise of graphene // *Nat Mater.* – 2007. – Vol. 6. – P. 183-191.
4. *Gautam M., Jayatissa A.H.* Gas sensing properties of graphene synthesized by chemical vapor deposition // *Mater Sci Eng: C.* – 2011. – Vol. 31. – P. 1405-1411.
5. *Ni Z.H., Wang H.M., Kasim J., Fan H.M., Yu T., et al.* Graphene thickness determination using reflection and contrast spectroscopy // *Nano Lett.* – 2007. – Vol. 7. – P. 2758-2763.
6. *Li X., Cai W., An J., Kim S., Nah J., Yang D. et al.* Large-area synthesis of high-quality and uniform graphene films on copper foils // *Science.* – 2009. – Vol. 324. – P. 1312-1314.
7. *Jeong H.Y., Le D.S., Choi H.K., Lee D.H., et al.* Flexible room-temperature NO_2 gas sensors based on carbon nanotubes/reduced graphene hybrid films // *Appl Phys Lett.* – 2010. – Vol. 96. – P. 213105.
8. *Ko G., Kim H.Y., Ahn J., Park Y.M., Kim J.* Graphene-based nitrogen dioxide gas sensors // *Curr Appl Phys* – 2010. – Vol. 10. – P. 1002-1004.
9. *Dan Y., Lu Y., Kybert N.J., Luo Z.* Intrinsic response of graphene vapor sensors // *Nano Lett.* – 2009. – Vol. 9. – P. 1472-1475.
10. *Парках, Ruoff R.S.* // *Nat. Nanotechnol.* – 2009. – Vol. 4, No. 4. – P. 217-224.
11. *Forbeaux I., Themlin J.M., Debever J.M.* Heteroepitaxial graphite on $6\text{H-SiC}(0001)$: Interface formation through conduction-band electronic structure // *Phys. Rev. B.* – 1998. – Vol. 58. – P. 16396-16406.
12. *Parvizi F. [et al.]* Graphene Synthesis via the High Pressure – High Temperature Growth Process // *Micro & Nano Lett.* – 2008. – Vol. 3. – P. 29-34.
13. *Hass J., W.A. de Heer, Conrad E.H.* The growth and morphology of epitaxial multilayer graphene // *J. Phys.: Condens. Matter.* – 2008. – Vol. 20. – P. 3232-3240.
14. *Lee J.K., Yamazaki S., Yun H. et al.* Modification of Electrical Properties of Graphene by Substrate-Induced Nanomodulation // *Nano Lett.* – 2013. – No. 13 (8). – P. 3494-3500.

15. Конакова Р.В., Коломыс А.Ф., Охрименко О.Б., Стрельчук В.В., Волков Е.Ю., Григорьев М.Н., Светличный А.М., Спиридонов О.Б. Сравнительные характеристики спектров комбинационного рассеяния света пленок графена на проводящих и полупроводящих подложках 6H-SiC // Физика и техника полупроводников. – 2013. – Т. 47. – Вып. 6.
16. Светличный А.М., Григорьев М.Н., Демьяненко М.В., Житяев И.Л. Газочувствительность пленок графена на полупроводящем SiC к NO₂ и парам C₂H₅OH // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 2. – URL: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1735>. – 5 с. (Дата обращения 11.01.2015).
17. Johnson J.L., Behnam A., An Y., Pearton S.J., Ural A. Experimental study of graphitic nanoribbon films for ammonia sensing // J Appl Phys. – 2011. – Vol. 109. – P. 124-301.
18. Божинова А.С., Канева Н.В., Кононова И.Е., и др. Изучение фотокаталитических и сенсорных свойств нанокompозитных слоев ZnO/SiO₂ // Физика и техника полупроводников. – 2013. – Т. 47. – Вып. 12.

REFERENCES

1. Schedin F., Geim A.K., Morozov S.V., Hill E.W., Blake P., et al. Detection of individual gas molecules adsorbed on grapheme, *Nat Mater.*, 2007, Vol. 6, pp. 652-655.
2. Lu G., Ocola L.E., Chen J. Gas detection using low-temperature reduced graphene oxide sheets, *Appl Phys Lett.*, 2009, Vol. 94, pp. 83-111.
3. Geim A.K., Novoselov K.S. The rise of grapheme, *Nat Mater.*, 2007, Vol. 6, pp. 183-191.
4. Gautam M., Jayatissa A.H. Gas sensing properties of graphene synthesized by chemical vapor deposition, *Mater Sci Eng: C*, 2011, Vol. 31, pp. 1405-1411.
5. Ni Z.H., Wang H.M., Kasim J., Fan H.M., Yu T., et al. Graphene thickness determination using reflection and contrast spectroscopy, *Nano Lett.*, 2007, Vol. 7, pp. 2758-2763.
6. Li X., Cai W., An J., Kim S., Nah J., Yang D. et al. Large-area synthesis of high-quality and uniform graphene films on copper foils, *Science*, 2009, Vol. 324, pp. 1312-1314.
7. Jeong H.Y., Le D.S., Choi H.K., Lee D.H., et al. Flexible room-temperature NO₂ gas sensors based on carbon nanotubes/reduced graphene hybrid films, *Appl Phys Lett.*, 2010, Vol. 96, pp. 213105.
8. Ko G., Kim H.Y., Ahn J., Park Y.M., Kim J. Graphene-based nitrogen dioxide gas sensors, *Curr Appl Phys.*, 2010, Vol. 10, pp. 1002-1004.
9. Dan Y., Lu Y., Kybert N.J., Luo Z. Intrinsic response of graphene vapor sensors, *Nano Lett.*, 2009, Vol. 9, pp. 1472-1475.
10. Parkax, Ruoff R.S., *Nat. Nanotechnol.*, 2009, Vol. 4, No. 4, pp. 217-224.
11. Forbeaux I., Themlin J.M., Debever J.M. Heteroepitaxial graphite on 6H-SiC(0001): Interface formation through conduction-band electronic structure, *Phys. Rev. B*, 1998, Vol. 58, pp. 16396-16406.
12. Parvizi F. [et al.] Graphene Synthesis via the High Pressure – High Temperature Growth Process, *Micro & Nano Lett.*, 2008, Vol. 3, pp. 29-34.
13. Hass J., W.A. de Heer, Conrad E.H. The growth and morphology of epitaxial multilayer grapheme, *J. Phys.: Condens. Matter.*, 2008, Vol. 20, pp. 3232-3240.
14. Lee J.K., Yamazaki S., Yun H. et al. Modification of Electrical Properties of Graphene by Substrate-Induced Nanomodulation, *Nano Lett.*, 2013, No. 13 (8), pp. 3494-3500.
15. Konakova R.V., Kolomys A.F., Okhrymenko O.B., Strel'chuk V.V., Volkov E.Yu., Grigor'ev M.N., Svetlichnyy A.M., Spiridonov O.B. Sravnitel'nye kharakteristiki spektrov kombinatsionnogorasseyaniya sveta plenok grafena na provodyashchikh i poluizoliruyushchikh podlozhkakh 6H-SiC [Comparative characteristics of the spectra of combination.paroxetine light graphene films on conductive and politology substrate 6H-SiC], *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Physics], 2013, Vol. 47, Issue 6.
16. Svetlichnyy A.M., Grigor'ev M.N., Dem'yanenko M.V., Zhityaev I.L. Gazochuvstvitel'-nost' plenok grafena na poluizoliruyushchem SiC k NO₂ i param C₂H₅OH [Gas sensitivity of graphene films on palusalue SiC to NO₂, C₂H₅OH and couples], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering journal of Don], 2013, No. 2. Available at: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1735>, 5 p. (accessed 11 January 2015).
17. Johnson J.L., Behnam A., An Y., Pearton S.J., Ural A. Experimental study of graphitic nanoribbon films for ammonia sensing, *J Appl Phys.*, 2011, Vol. 109, pp. 124-301.

18. *Bozhinova A.S., Kaneva N.V., Kononova I.E., i dr. Izuchenie fotokataliticheskikh i sensorykh svoystv nanokompozitnykh sloev ZnO/SiO₂ [The study of photocatalytic and sensory properties of nanocomposite layers ZnO/SiO₂], Fizika i tekhnika poluprovodnikov [Physics], 2013, Vol. 47, Issue 12.*

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор А.М. Кармоков.

Светличный Александр Михайлович – Южный федеральный университет; e-mail: amsvetlich@gmail.com; 347928, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, корп. Е; тел.: +78634371611; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; к.т.н.; доцент.

Демьяненко Максим Валерьевич – e-mail: maks_vd@mail.ru; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; аспирант.

Житяев Игорь Леонидович – e-mail: jityaev.igor@gmail.com; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; аспирант.

Григорьев Михаил Николаевич – Таганрогский научно-исследовательский институт связи; e-mail: gregoryevmikhail@mail.ru; 347900, г. Таганрог, ул. Седова, 3; тел.: +786343870151; инженер.

Svetlichnyi Alexander Mikhailovich – Southern Federal University; e-mail: amsvetlich@gmail.com; 2, Shevchenko street, corps. E, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371611; the department of nanotechnologies and microsystems; cand. of eng. sc.; associate professor.

Demyanenko Maxim Valeryevich – e-mail: maks_vd@mail.ru; the department of nanotechnologies and microsystems; postgraduate student.

Jityaev Igor Leonidovich – e-mail: jityaev.igor@gmail.com; the department of nanotechnologies and microsystems; postgraduate student.

Grigoriev Mikhail Nikolayevich – Taganrog Research Institute of Communications; e-mail: gregoryevmikhail@mail.ru; 3, Sedova street, Taganrog, 347900, Russia; phone: +786343870151; engineer.

УДК 621.372

С.Г. Крутччинский, Е.А. Жебрун

СТРУКТУРНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ АРС-ФИЛЬТРОВ НА БАЗЕ МУЛЬТИДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ОУ*

Для повышения основных качественных показателей оптимальных по критерию минимума пассивной чувствительности фильтров как сложно-функциональных блоков смешанных микроэлектронных систем рассматривается применение принципов собственной и взаимной компенсации влияния частоты единичного усиления (f_1) операционных усилителей (ОУ) на частоту и затухание полюса звеньев второго порядка. Сформулированы функционально-топологические правила синтеза структур таких АФ. Показано, что эффекты взаимной компенсации влияния частоты единичного усиления отдельных ОУ на эти параметры достигаются введением двух автономных контуров специальных компенсирующих обратных связей. Показана целесообразность применения в схемотехнике звеньев второго порядка мультидифференциальных ОУ, обеспечивающих реализацию специальных сумматоров с различным коэффициентом передачи без использования дополнительных активных элементов. В этом случае базовым топологическим признаком компенсирующих контуров является объединение дифференциальных входов ОУ с дополнительным входом мультидифференциального ОУ. Установлено, что для компенсации погрешности частоты полюса

* Статья подготовлена по проекту № 8.374.2014/К Госзадания Минобрнауки РФ на 2014-2016 гг.