

УДК 621.315.592

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЕТЕРОСТРУКТУР SiC / Si

О.Н. Сергеева^{1,4}, А.В. Солнышкин¹, С.И. Гудков¹, С.А. Кукушкин², И.П. Пронин³,
Г.М. Некрасова⁴

¹ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»
170000, Россия, Тверь, ул. Желябова, 33

²ФГБУН «Институт проблем машиноведения РАН»
199178, Россия, Санкт-Петербург, Большой пр. ВО, 61

³ФГБУН «Физико-технический институт имени А.Ф.Иоффе РАН»
194021, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

⁴ФГБОУ ВО «Тверская государственная сельскохозяйственная академия»
170904, Россия, Тверь, ул. Маршала Василевского (Сахарово), 7
o_n_sergeeva@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2017.9.435

Аннотация: В работе представлены результаты исследования диэлектрических и фотовольтаических свойств гетероструктур SiC / Si с различным типом проводимости кремниевых подложек. Показано, что при их облучении электромагнитным излучением в диапазоне длин волн 400–980 нм возникают стационарные фотовольтаические отклики, фаза которых зависит от направления скачка емкости на $C-V$ характеристиках. Обсуждаются возможные механизмы возникновения фотовольтаических явлений в гетероструктурах SiC / Si .

Ключевые слова: гетероструктуры SiC / Si , дилатационный диполь, наноразмерный карбид кремния, фотовольтаический отклик.

1. Введение

В настоящее время элементная база, основанная на использовании разнообразных низкоразмерных структур, является наиболее перспективной для электронной техники новых поколений, где определяющую роль в функционировании приборов будут играть квантовые эффекты, возникающие при переходе к системам нанометрового масштаба. К таким функциональным материалам относится карбид кремния SiC . Обладая стабильными временными характеристиками, широким диапазоном рабочих температур (вплоть до 900°C), он может быть использован при создании новых приборов микро-, СВЧ-, мощной и сильноточной электроники [1], полупроводниковых детекторов ядерных частиц [2] и фотоэлектропреобразователей УФ излучения [3-5]. Тонкие пленки SiC , используемые в качестве буферных слоев для кремниевых подложек при создании гетероструктур с высококачественными эпитаксиальными слоями широкозонных полупроводниковых материалов, таких как AlN и GaN [6-8], являются основой элементной базы современной электроники для создания высокоэффективных оптоэлектронных устройств [9,10], в том числе и в ИК-области [11]. Расширение областей применения SiC требует

дальнейших исследований, в том числе исследований диэлектрических свойств гетероструктур SiC/Si и отклика на световое воздействие в области длин волн, соответствующих видимому диапазону и ближнему ИК-излучению.

2. Экспериментальная часть

В качестве объектов исследований использовались тонкие пленки карбида кремния, выращенные методом топохимического замещения на подложках из кремния, легированного фосфором (КЭФ) и бором (КДБ) и обладающим примесной электронной и дырочной проводимостью, соответственно [7-8, 10]. Ориентацию пленки при этом задает кристаллическая структура исходной матрицы кремния [7]. Этот метод осаждения карбида кремния на кремний заключается в замене атомов матрицы кремния на атомы углерода с образованием молекул карбида кремния и последующем планарным продвижением слоя SiC вдоль плоскости подложки Si . Процесс формирования пленки происходит на основе образования нанообъектов – дилатационных диполей (вакансия кремния – углерод) за счет реакции между кристаллическим кремнием и газообразным монооксидом углерода CO . Релаксацию механических напряжений в выращенных структурах из-за рассогласования параметров кристаллических решеток SiC и Si , превышающих 20 %, обеспечивали образованные на границе раздела SiC/Si поры, рис. 1 а, а эпитаксиальный слой обеспечивался тем, что в плоскости (111) 4 параметра решетки кремния практически соответствуют 5 параметрам решетки карбида кремния. В результате на кремниевых подложках вырастают высококачественные монокристаллические слои карбида кремния, которые можно отнести к наноразмерному карбиду кремния по классификации, приведенной в [12], рис. 1 б.

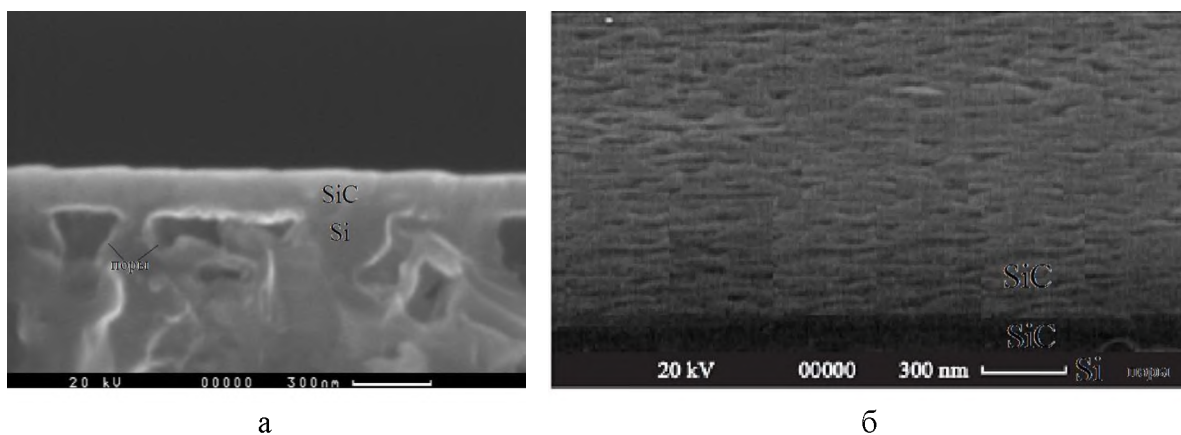


Рис. 1. СЭМ-изображения: а – торца пленки SiC на кремниевой подложке; б – ее поверхности.

В настоящей работе проводились сравнительные исследования диэлектрических и фотовольтаических свойств двух типов SiC/Si структур с удельным сопротивлением $\sim 5 \cdot 10^3$ Ом·м и толщиной SiC слоя ~ 100 нм. На свободную поверхность SiC наносились платиновые электроды размером 200×200 мкм. Вторым (нижним) электродом служила серебряная паста, нанесенная на свежий скол кремниевой подложки.

Диэлектрические характеристики пленок SiC определялись с помощью измерителя иммитанса Е7-20. Вольт-фарадные характеристики $C-V$ измерялись на частоте 1 кГц при приложении к пленке постоянного смещающего напряжения ± 3 В. Частотные зависимости емкости $C(f)$ исследовались в диапазоне частот $10^2 - 10^6$ Гц при приложении к образцу переменного измерительного напряжения 0,1 В.

Фоточувствительность SiC/Si исследовалась динамическим методом в области ближнего ИК-излучения (длина волны $\lambda = 980$ нм) при периодическом облучении структуры модулированными импульсами прямоугольной формы. Спектральные зависимости стационарного фотовольтаического отклика получены как отклик исследуемой структуры на световое воздействие от лампы накаливания, разложенного в спектр с помощью монохроматора УМ-2. Ширина входной и выходной щелей монохроматора составляла 4 мм. Энергия пучка света на выходе монохроматора контролировалась с помощью пироэлектрического датчика так, чтобы его мощность составляла 7 мВт.

На рис. 2 представлены частотные зависимости емкости пленок карбида кремния, сформированных на кремниевых подложках, легированных бором (КДБ) (см. рис. 2 а) и фосфором (КЭФ) (см. рис. 2 б).

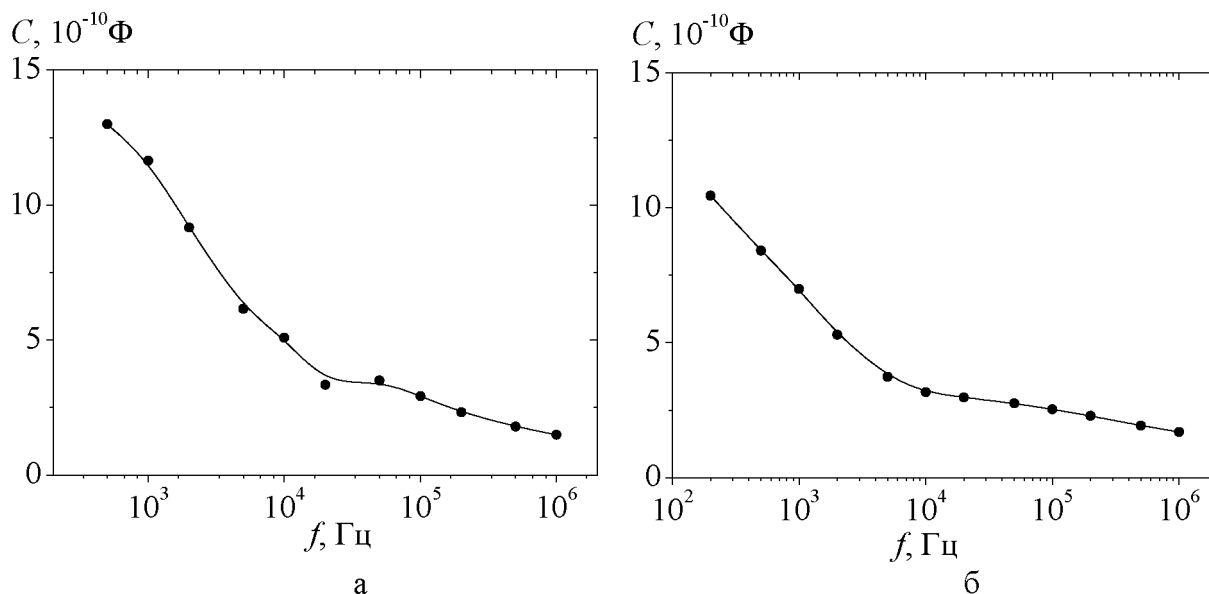


Рис. 2. Частотные зависимости емкости для пленок SiC , сформированных на кремниевой подложках: а – легированных бором (КДБ), б – фосфором (КЭФ).

Частотные зависимости емкости для исследуемых гетероструктур были идентичными: в области частот $10^2 - 10^4$ Гц емкость с ростом частоты уменьшалась по линейному закону достаточно быстро, однако, начиная с частот $> 10^4$ Гц, скорость уменьшения емкости с частотой снижалась.

При приложении к гетероструктуре SiC/Si постоянного смещающего поля были получены вольт-фарадные зависимости, на которых отчетливо виден скачок емкости при изменении знака приложенного потенциала к свободной поверхности пленки карбида кремния (см. рис. 3).

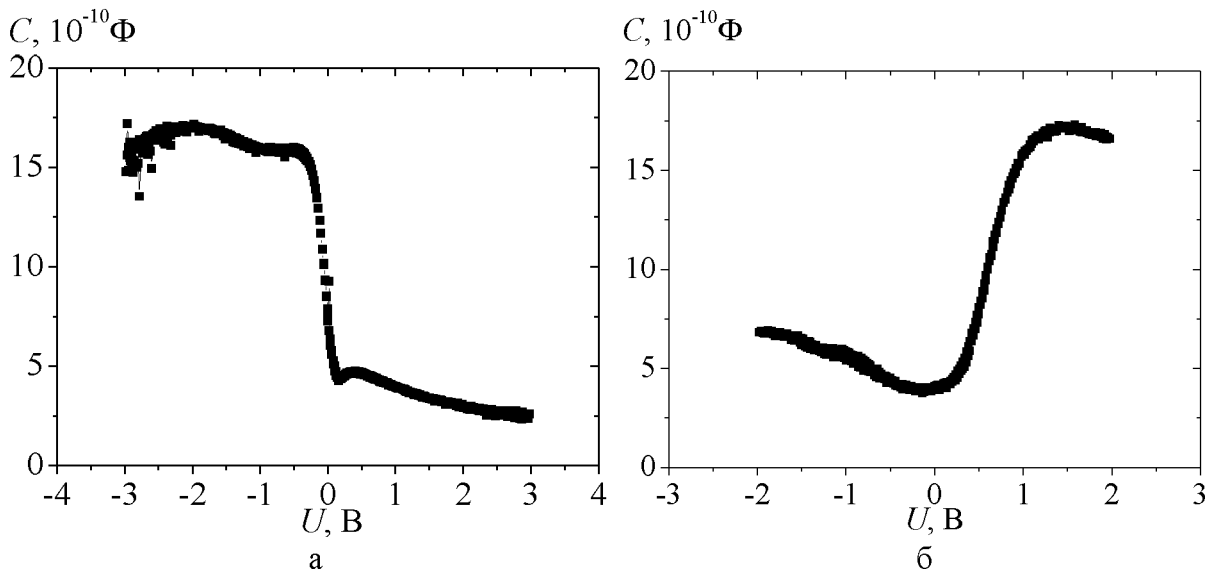


Рис. 3. Вольт-фарадные характеристики пленок SiC , сформированных на кремниевых подложках: а – легированных фосфором (КЭФ); б – бором (КДБ)

Для структур, сформированных на подложках с электронным типом проводимости (КЭФ), при приложении к ее верхней поверхности положительного потенциала происходит резкое уменьшение емкости почти на порядок. Иная картина имеет место для структур на подложках с дырочным типом проводимости (КДБ): скачок происходит при изменении приложенного к свободной поверхности пленки напряжения с отрицательного на положительное значение, т.е. в обратную сторону.

Воздействие на исследуемые структуры света с различными длинами волн приводит к генерации фотовольтаических откликов, рис. 4,5. Как видно из представленных на рис. 4 осциллограмм, во время воздействия однополярных импульсов ИК-излучения с длиной волны 980 нм возникают стационарные фотовольтаические отклики, отличающиеся по фазе (кривые 1) по отношению к модулированному излучению (кривые 2).

Разные фазы фотовольтаических откликов означали, что для пленок SiC на подложках с различным типом проводимости фототок протекал в разных направлениях.

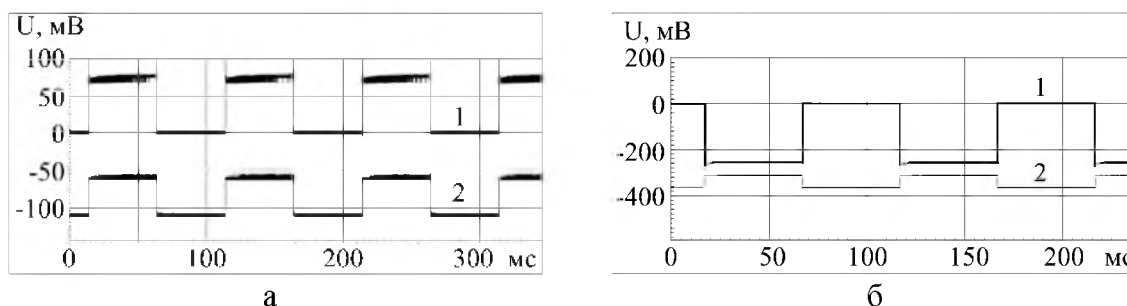


Рис. 4. Осциллограммы фотовольтаических откликов (1) на воздействие модулированного импульсами прямоугольной формы (2) ИК-излучения ($\lambda = 980$ нм): а – для пленки SiC на подложке КЭФ; б – на подложке КДБ.

Спектральные зависимости стационарного фотовольтаического отклика на световое воздействие мощностью 7 мВт пленок карбида кремния, сформированных на подложках КДБ и КЭФ, представленные на рис. 5, также отличались направлением возникающего при облучении фототока короткого замыкания.

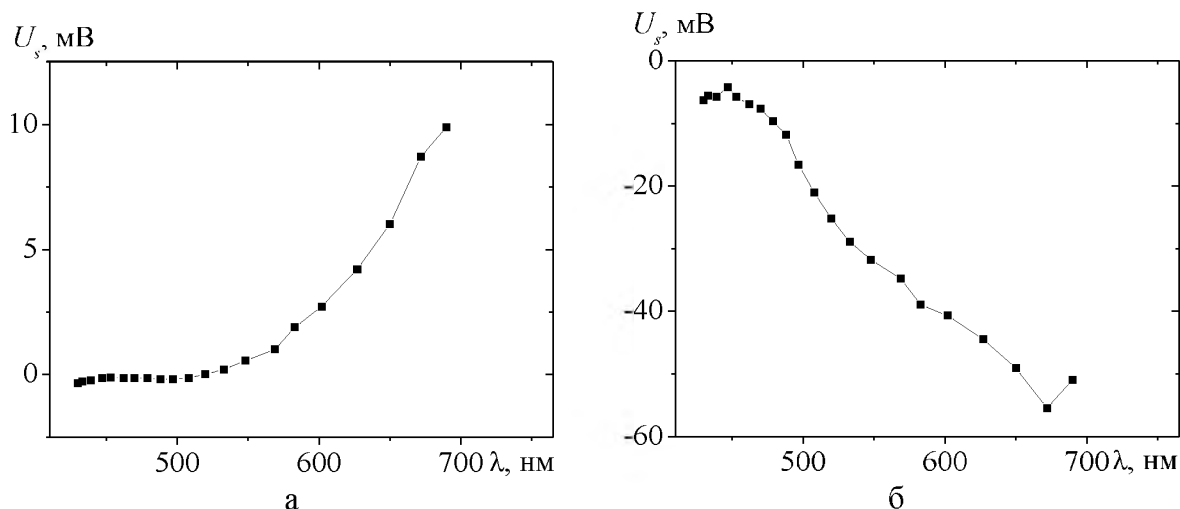


Рис. 5. Спектральные зависимости стационарного фотовольтаического отклика U_s для пленок SiC : а – сформированных на подложках с n -типом проводимости (КЭФ), б – на подложках с p -типом проводимости (КДБ).

Однако, независимо от типа проводимости используемых кремниевых подложек, наблюдался рост фототока с увеличением длины волны от 400 до 700 нм в соответствии с [13] и в отличие от результатов, представленных в [14], что, по-видимому, определяется однородностью и качеством исследуемых в работе пленок карбида кремния.

3. Обсуждение результатов

При анализе фотовольтаических откликов структур SiC / Si необходимо учитывать, что энергия активации излучения на всех исследуемых длинах волн меньше, чем ширина запрещенной зоны карбида кремния политипа 3С, которая составляет 2,3 эВ. Поэтому

фотопроводимость может возникнуть только за счет примесных донорно-акцепторных уровней (атомы углерода, кислородные вакансии и т.д.), находящихся в запрещенной зоне. Энергия поглощаемых фотонов света расходуется либо на перебрасывание электронов с донорных уровней в зону проводимости, либо из валентной зоны на акцепторные уровни. Примесные уровни могут быть локализованы вблизи дефектов или пор [7]. Если примесное поглощение смещено от края собственного поглощения в инфракрасную область, то при облучении пленки ИК-излучением с длиной волны 980 нм возможна генерация фотовольтаического отклика.

Одним из возможных механизмов возникновения фотоэдс является $p-n$ переход, возникающий вблизи границы раздела SiC/Si за счет того, что возникающий в результате твердофазной эпитаксии [7, 10] дилатационный диполь (вакансия - углеродный атом) может вести себя как «поставщик» электронов, и в упруго напряженных образцах возможна заметная фоточувствительность [9]. С другой стороны, излучение может поглощаться на самой границе раздела слоев карбида кремния и кремниевой подложки, легированной либо донорной, либо акцепторной примесью, за счет наличия квантовых и потенциальных барьеров в контактной области, связанных с разрывами энергетических зон [15]. Подтверждением наличия потенциального барьера может служить скачок емкости на $C-V$ характеристиках (см. рис. 4), а асимметрия этого скачка для структур с разными типами проводимости кремниевой подложки, позволяет объяснить изменение направления фототока (см. рис. 4, 5).

4. Заключение

В результате проведенных исследований диэлектрических свойств пленок SiC , выращенных на подложках с различным типом проводимости, выявлена дисперсия емкости в области частот $10^2 - 10^6$ Гц. Скачок емкости на $C-V$ характеристиках свидетельствует о наличии барьера на границе раздела SiC/Si , который, в свою очередь, может быть ответственным за возникновение фотовольтаического тока при облучении структуры SiC/Si электромагнитным излучением с энергией активации меньше ширины запрещенной зоны пленок SiC .

Работа выполнена при частичной поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект №16.2811.2017/4.6).

Библиографический список:

1. **Chung, W.** Gate-recessed $InAlN/GaN$ HEMTs on SiC substrate with Al_2O_3 / W. Chung, O.I. Saadat, J.M. Tirado et al. // IEEE Electron Device Letters. – 2009. – V. 30. – I. 9. – P. 904-906

2. **Лебедев, А.А.** Эпитаксиальные пленки $6H-SiC$ как детекторы ядерных частиц / А.А. Лебедев, Н.С. Савкина, А.М. Иванов, Н.Б. Строкан, Д.В. Давыдов // *Физика и техника полупроводников*. – 2000. – Т. 34. – Вып. 2. – С. 249-255.
3. **Бланк, Т.В.** Полупроводниковые фотоэлектронпреобразователи для ультрафиолетовой области спектра (Обзор) / Т.В. Бланк, Ю.А. Гольдберг // *Физика и техника полупроводников*. – 2003. – Т. 37. – Вып. 9. – С. 1025-1055.
4. **Афанасьев, А.В.** Карбид кремния – наноразмерный алмазоподобный широкозонный полупроводниковый материал и приборы на его основе / А.В. Афанасьев, В.А. Ильин, А.О. Лебедев и др. // *Биотехносфера*. – 2011. – Вып. 1-2 (13-14). – С. 11-19.
5. **Hongbin, P.** Si/SiC heterojunction optically controlled transistor with charge compensation layer / P. Hongbin, W. Xi, C. Zhiming // *MATEC Web of Conferences*. – 2016. – V. 7. – Art. № 08008. – P. 1-5.
6. **Bose, S.** Atomistic and electrical simulations of a $GaN-AlN-(4H)SiC$ heterostructure optically-triggered vertical power semiconductor device / S. Bose, S.K. Mazumder // *Solid-State Electronics*. – 2011. – V. 62. – I. 1. – P. 5-13.
7. **Кукушкин, С.А.** Синтез эпитаксиальных пленок карбида кремния методом замещения атомов в кристаллической решетке кремния (Обзор) / С.А. Кукушкин, А.В. Осипов, Н.А. Феоктистов // *Физика твердого тела*. – 2014. – Т. 56. – Вып. 8. – С. 1457-1485.
8. **Бессолов, В.Н.** Эффект воздействия n- и p-типа проводимости подложки $Si(100)$ с буферным слоем SiC на механизм роста и структуру эпитаксиальных слоев полуполярных AlN и GaN / В.Н. Бессолов, А.С. Гращенко, Е.В. Коненкова и др. // *Физика твердого тела*. – 2015. – Т. 57. – Вып. 10. – С. 1916-1921.
9. **Мынбаева, М.Г.** Фотоэлектрические свойства пористых гетероструктур GaN/SiC / М.Г. Мынбаева, А.А. Ситников, К.Д. Мынбаев // *Физика и техника полупроводников*. – 2011. – Т. 45. – Вып. 10. – С.1369-1372.
10. **Kukushkin, S.A.** Theory and practice of SiC growth on Si and its applications to wide-gap semiconductor films / S.A. Kukushkin, A.V. Osipov / *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2014. – V. 47. – № 31. – P. 313001-1-313001-41.
11. **Rockstuhl, C.** Infrared gratings based on SiC/Si -heterostructures / C. Rockstuhl, H.P. Herzig, Ch. Förster et al. // *Materials Science Forum*. – 2005. – V. 483-485. – P. 433-436.
12. **Андреевский, Р.А.** Наноразмерный карбид кремния: синтез, структура, свойства / Р.А. Андреевский // *Успехи химии*. – 2009. – Т. 78. – № 9. – С. 889-900.
13. **Гращенко, А.С.** Фотоэлектрические характеристики структур карбид кремния–кремний, выращенных методом замещения атомов в кристаллической решетке кремния / А.С. Гращенко, Н.А. Феоктистов, А.В. Осипов и др. // *Физика и техника полупроводников*. – 2017. – Т. 51. – Вып. 5. – С. 651-658.
14. **Беляев, А.П.** Исследование оптико-электрических свойств карбидосодержащих тонких пленок на основе кремния / А.П. Беляев, С.А. Кукушкин, А.В. Осипов и др. // *Письма в Журнал технической физики*. – 2006. – Т. 32. – Вып. 10. – С. 1-6.
15. **Семенов, А.В.** Фотоэлектрические свойства гетеропереходов $n-SiC/n-Si$ / А.В. Семенов, А.А. Козловский, В.М. Пузиков // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. – 2012. – Т. 5. – С. 27-30.