

ЭЛЕМЕНТЫ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ INTEGRATED ELECTRONICS ELEMENTS

УДК 592.546.28:539.21.621.79:621.38

Интегральный варикап повышенной емкости на основе пористого кремния

С.П. Тимошенко¹, А.Н. Бойко¹, Д.С. Гаев², Р.М. Калмыков²

¹*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
г. Москва, Россия*

²*Кабардино-Балкарский государственный университет
им. Х.М. Бербекова, г. Нальчик, Россия*

Integrated High-Capacity Varicap Based on Porous Silicon

S.P. Timoshenkov¹, A.N. Boyko¹, D.S. Gaev², R.M. Kalmykov²

¹*National Research University of Electronic Technology, Moscow,
Russia*

²*Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, Russia*

Рассмотрена возможность применения пористого кремния при создании варикапов с большим коэффициентом перекрытия по емкости, удовлетворяющих требованиям микроэлектроники и микросистемной техники. Описана технология изготовления конденсаторных структур с применением гальванического осаждения меди в поры пористого кремния. Исследованы морфологические особенности экспериментальных структур, определена удельная емкость варикапов. Показана перспективность применения варикапов на основе пористого кремния в интегральной электронике.

Ключевые слова: пористый кремний; интегральный конденсатор; варикап; гальваническое осаждение; электрохимическое анодирование кремния.

The possibility of applying porous silicon in creation of varicaps with high capacitance ratio, satisfying the requirements of microelectronic and macrosystem technology, has been investigated. The capacitor structures using the copper galvanic deposition to porous silicon pores have been presented. The morphological features of the experimental structures have been studied, the specific capacitance of varicaps has been determined. The obtained results demonstrate the prospects of application of varicaps based on porous silicon in integrated electronics.

Keywords: porous silicon; integral capacitor; varicap; electrodeposition; electrochemical anodizing of silicon.

Введение. Актуальная задача развития современной электроники, расширения ее элементной базы – создание интегральных конденсаторов с повышенной емкостью. Конденсаторы с управляемой емкостью, или варикапы, применяются в электронной аппаратуре для перестройки частоты и частотной модуляции, в системах автономного питания, а также в других устройствах. При разработке такого рода элементов традиционные подходы базируются на оптимальном использовании объема и возможности их системной интеграции в кристалле. В субвольтовой области тонкопленочные конденсаторы традиционных конструкций не могут быть масштабированы из-за экспоненциального роста туннельного тока утечки через слой диэлектрика нанометровой толщины. Эту задачу можно успешно решить, используя планарные электроды с развитой поверхностью.

Для создания варикапов нового типа перспективно применение пористого кремния, который характеризуется развитой поверхностью, относительной простотой в получении, совместимостью с технологиями микрообработки. Заполнение пор пористого кремния другим материалом позволяет создавать широкий спектр наноконструктивных материалов и функциональных структур с новыми свойствами [1].

В настоящей работе исследуется возможность создания варикапа с использованием гетероструктуры металл–полупроводник, где роль полупроводникового электрода играет пористый кремний.

Особенности конструкции варикапа. Схематическое изображение структуры варикапа представлено на рис. 1. Принцип работы варикапа на основе пористого кремния основан на варьировании барьерной емкости гетероперехода металл–полупроводник при изменении обратного смещения. Барьерная емкость гетероперехода увеличивается пропорционально его площади [2], поэтому использование пористого кремния с развитой поверхностью обеспечивает высокое значение удельной емкости при нулевом смещении.

Емкость структуры меняется в широких пределах при изменении обратного напряжения, что обеспечивает высокое значение коэффициента перекрытия по емкости.

Максимальная емкость варикапа достигается при нулевом смещении гетероперехода, так как в данном случае ширина области пространственного заряда вблизи гетероперехода минимальна [2]. Кроме того, для достижения максимальной емкости необходимо, чтобы области пространственных зарядов близко расположенных гетеропереходов не перекрывались. Данное условие, нарушение которого приведет к уменьшению барьерной емкости, связано с толщиной межпоровых стенок $L_{ст}$ пористого кремния следующим образом:

$$L_{ст} > 2W_{эфф},$$

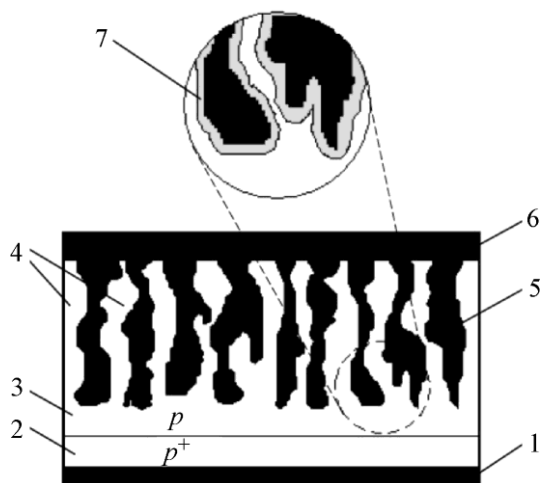


Рис.1. Схематическое изображение варикапа на основе пористого кремния: 1 – нижний металлический электрод; 2 – кремниевая подложка p^+ -типа; 3 – слой кремния p -типа; 4 – межпоровые стенки в слое пористого кремния; 5 – интеркалированный в поры металл; 6 – верхний металлический электрод; 7 – область пространственного заряда

где $W_{\text{эфф}}$ – эффективная толщина области пространственного заряда при нулевом смещении, определяемая выражением [3]

$$W_{\text{эфф}} = L_{\text{д}} \sqrt{\frac{2\varphi_{\text{к}} e}{kT}},$$

здесь $L_{\text{д}}$ – дебаевская длина экранирования; e – заряд электрона; $\varphi_{\text{к}}$ – контактная разность потенциалов; k – постоянная Больцмана; T – температура.

Изготовление экспериментальных образцов. При создании варикапов применяются технологические процессы, используемые в микроэлектронике и микросистемной технике, что предполагает возможность интегрирования варикапов в кристалл интегральной схемы или микроэлектромеханической системы. Пористый рабочий слой создается с помощью электрохимического анодирования, переход металл–полупроводник формируется гальваническим осаждением.

Экспериментальные структуры варикапов изготавливались по технологии получения макропористого кремния [4]. Применение макропористого кремния обусловлено необходимостью выполнения условия $L_{\text{ст}} > 2W_{\text{эфф}}$. Использовались пластины монокристаллического кремния дырочного типа с удельным сопротивлением 0,01 Ом·см, кристаллографической ориентацией (100) и гомопереходом p^+/p на обратной стороне пластины. Для повышения равномерности распределения тока при анодировании и электроосаждении на p^+ -слой вакуумно-термическим испарением наносилась пленка алюминия толщиной 0,8 мкм. Затем проводился термический отжиг структур при температуре 350 °С в течение 15 мин для создания омического контакта со стороны нижнего электрода варикапной структуры (см. рис. 1). Пористый слой формировался электрохимическим травлением кремния во фторопластовой ячейке вертикального типа с площадью обработки образца 1 см², использовался электролит состава HF(40%):H₂O:C₂H₅OH(96%) в объемном соотношении 1:5:1. Перед анодированием с поверхности кремния удалялась пленка естественного окисла посредством обработки в 5%-ном растворе фтористой кислоты. Травление проводилось в гальваностатическом режиме при плотности ионного тока 80 мА/см² при комнатной температуре в течение 60–180 с. После завершения процесса формирования пористого слоя электролит сливался, ячейка и пористый слой тщательно промывались в деионизованной воде. Для снятия верхнего слоя пористого кремния образец в составе ячейки обрабатывался в 1%-ном растворе едкого натрия в течение 10 с с последующей промывкой в деионизованной воде и этаноле.

Верхний металлический электрод варикапной структуры формировался гальваническим осаждением меди из 1%-ного водного раствора CuSO₄·5H₂O с добавлением этилового спирта. Осаждение велось на постоянном токе 0,1 мА/см². Достаточно низкая скорость осаждения выбрана для получения плотной пленки и предотвращения роста медных дендритов [4]. После формирования верхнего электрода структуры промывались и подвергались вакуумной сушке и отжигу при температуре 350 °С в течение 30 мин.

Результаты и их обсуждение. Структура экспериментальных образцов на различных этапах изготовления исследовалась с применением сканирующей электронной микроскопии. На рис. 2 представлены СЭМ-изображения кремниевой пористой матрицы до формирования металлического электрода. Поры имеют квазипериодическое распределение, режимы электрохимического анодирования выбраны таким образом, чтобы обеспечить получение макропористого слоя.

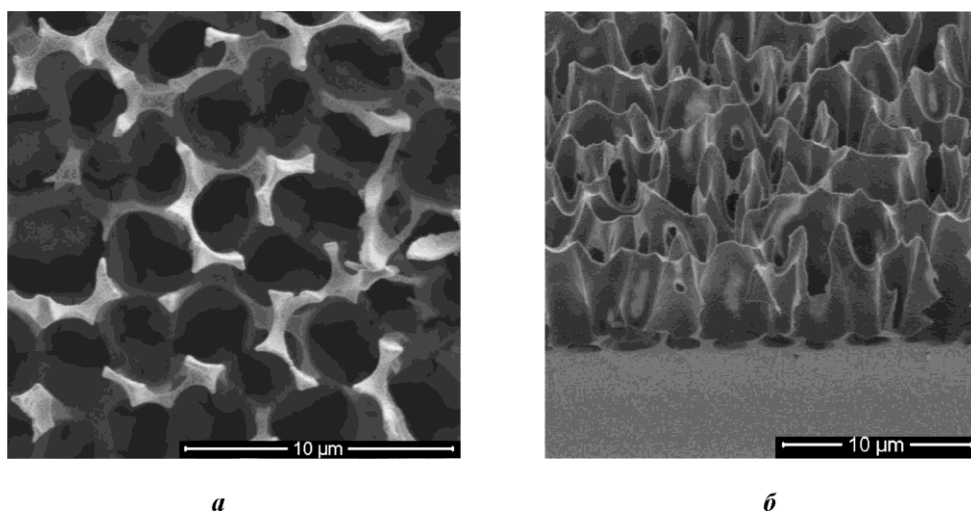


Рис.2. СЭМ-изображения слоя пористого кремния с удаленным приповерхностным слоем:
а – вид сверху; б – вид торца

На рис. 3 приведены СЭМ-изображения экспериментальной структуры на промежуточной стадии формирования металлического электрода. В рассматриваемом случае микрокристаллы меди изоморфно покрывают поверхность кремниевых пор. Кристаллическая структура металлического слоя и его морфология в значительной степени определяются морфологией исходной кремниевой матрицы и величиной ионного тока. В общем случае вероятность роста плотной непористой пленки и заполнения пор возрастает при уменьшении скорости осаждения [5]. При увеличении ионного тока металлические кластеры образуют структуры фрактального типа, возможна закупорка пор. Осаждаемый металлический слой становится менее плотным, что сказывается отрицательно на параметрах конденсаторной структуры.

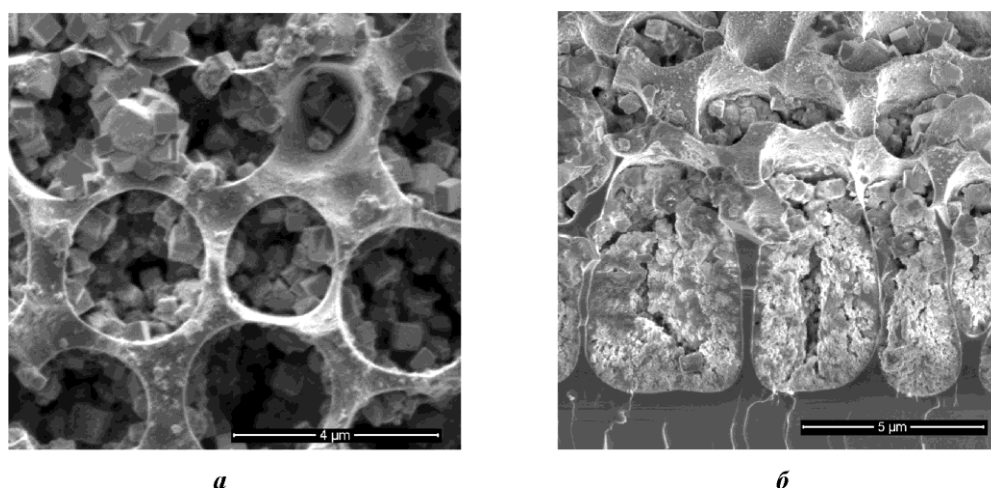


Рис.3. СЭМ-изображения слоя пористого кремния с осажденным медным слоем:
а – вид сверху; б – вид торца

Емкость экспериментальных образцов конденсаторной структуры определялась из кривых заряда-разряда, которые регистрировались при воздействии на конденсаторную структуру прямоугольных импульсов с амплитудой 10 В и частотой воздействия

1–100 кГц. Среднее значение емкости для структур площадью 5×5 мм с толщиной пористого слоя 10 мкм составило 0,1 мФ, что в пересчете на удельную емкость дает значение 0,4 мФ/см². Расчеты показывают, что при использовании пористого кремния в качестве рабочего слоя гетероперехода удельная емкость увеличивается примерно в 400 раз по сравнению со структурой с неразвитой поверхностью.

Заключение. Применение пористого кремния значительно увеличивает удельную емкость конденсаторной структуры. Технология изготовления варикапов совместима с технологиями микроэлектроники и микросистемной техники, отвечает требованиям миниатюризации и расширения функциональных характеристик устройств.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-38-50099).

Литература

1. *Granitzer P., Rumpf K.* Porous Silicon - a Versatile Host Material // Materials. – Vol. 3. – N 2. – 2010. – P. 943–998.
2. *Пасынков В.В., Чиркин Л.К.* Полупроводниковые приборы. – М.: Высшая школа, 1987. – 480 с.
3. *Зи С.* Физика полупроводниковых приборов: В 2 кн. Кн.1: пер. с англ. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Мир, 1984. – 456 с.
4. *Lehmann V., Stengl R., Luigart A.* On the morphology and the electrochemical formation mechanism of mesoporous silicon // Materials Science and Engineering B. – 2000. – Vol. 69–70. – P. 11–22.
5. *Boyko A., Gaev D., Timoshenkov S., Litmanovich D.* Controllable Growth of Copper Fractal Aggregates on Structurally Modified Silicon Surface // Proc. of the XXXII Intern. Scientific Conf. ELNANO'2013 (Kyiv, 2013). – 2013. – P. 185–187. DOI: 10.1109/ELNANO.2013.6551999

Статья поступила
после доработки 2 ноября 2016 г.

Тимошенко Сергей Петрович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой микроэлектроники (МЭ) МИЭТ, г. Москва, Россия. *Область научных интересов:* микросистемная техника, КНИ-структуры.

Бойко Антон Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры МЭ МИЭТ, г. Москва, Россия. *Область научных интересов:* микросистемная техника, наноструктурированные материалы.

Гаев Дахир Сайдуллахович – кандидат химических наук, доцент кафедры материалов и компонентов твердотельной электроники КБГУ, г. Нальчик, Россия. *Область научных интересов:* наноструктурированные материалы, пористый кремний.

Калмыков Рустам Мухамедович – аспирант кафедры материалов и компонентов, твердотельной электроники КБГУ, г. Нальчик, Россия. *Область научных интересов:* наноструктурированные материалы, пористый кремний.