

УДК 539.216.2

Ю.В. Сахаров, П.Е. Троян

## Исследование пористых пленок диоксида кремния

Исследованы электрофизические свойства пористых пленок диоксида кремния, полученных магнетронным распылением составной мишени.

**Ключевые слова:** диоксид кремния; углерод; модифицированный углеродом диоксид кремния; магнетрон.

Твёрдые материалы с низкими значениями диэлектрической проницаемости перспективны для применения в нанoeлектронике [1]. Использование этих материалов в качестве изоляционных прослоек в наносхемах позволяет заметно повышать скорость распространения электрических сигналов и снижать диэлектрические потери. Низкие значения диэлектрической проницаемости обычно получаются внедрением в твёрдые диэлектрические материалы воздуха в виде пор. Механическая прочность материала чаще всего достигается путём пространственного упорядочения таких пор.

Целью настоящей работы является сообщение об открытии принципиально новой технологии получения пористых пленок диоксида кремния и электрофизических свойствах получаемых пленок (патент РФ на изобретение №2439743 «Способ получения пористого диоксида кремния» кл. МПК H01L 21/316 от 11.05.2010 г.). Отличительной особенностью новой технологии является применение нового подхода к формированию пористых пленочных диэлектриков – модификация их путем введения углерода. В качестве основы разрабатываемой технологии предлагаются вакуумные методы получения диэлектрических пленок диоксида кремния путем распыления составной кремниевой-углеродной мишени сформулированным ионным пучком или в плазме магнетронного разряда в среде рабочего газа.

Разработанный и запатентованный нами способ получения пористого  $\text{SiO}_2$  заключается в использовании магнетронного распыления составной мишени (рис. 1) кремний-углерод ( $\text{Si}+\text{C}$ ) с соотношением площадей, занимаемых на мишени кремнием и графитом от 80/20 до 20/80 в смеси газов аргон-кислород ( $\text{Ar}+\text{O}_2$ ) в соотношении 1/10 при давлении в вакуумной камере  $(6\div 4)\times 10^{-3}$  мм рт. ст., при разрядном напряжении 400 В, значении разрядного тока 200 мА. Толщина пленки диоксида кремния, модифицированного углеродом ( $\text{SiO}_2^{\text{M}}$ ), составляла 100 нм. Подобная толщина пленки выбрана из соображения «сплошности» и для предотвращения закороток МДМ-структур. Для исследования электрических параметров получаемых пленок использовалась структура металл-диэлектрик-металл (МДМ) нанесенная на стеклянные подложки. В качестве нижнего и верхнего электродов использовались пленки алюминия толщиной 100 нм. Для количественной характеристики распыляемой составной мишени вводится параметр  $S_c$ , равный отношению площади, занимаемой графитовыми дисками к площади кремниевой мишени.

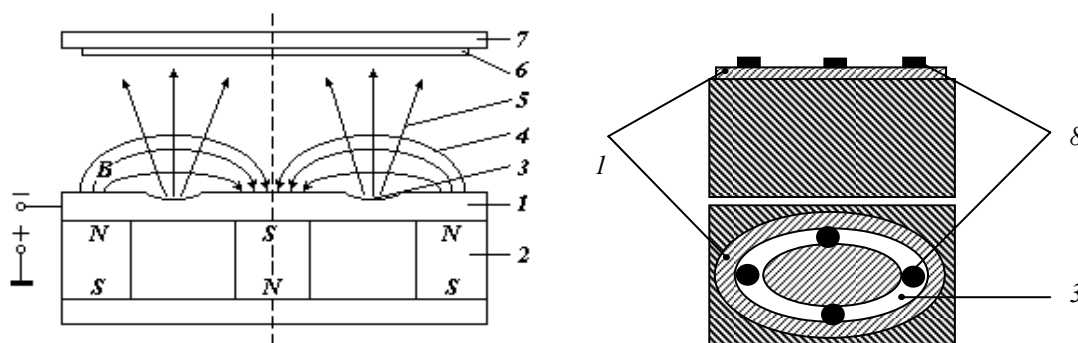


Рис. 1. Схема магнетронной системы распыления составной мишени: 1 – кремниевая мишень; 2 – магнитная система; 3 – зона распыления; 4 – магнитные силовые линии; 5 – поток распыляемого вещества; 6 – подложка; 7 – подложкодержатель; 8 – графитовые диски

В рассматриваемой работе представлено описание проведенных исследований и полученные результаты:

- по зависимости относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь пленки  $\text{SiO}_2^M$  от  $S_c$ ;
- по влиянию  $S_c$  на электропроводность, вольт-амперные характеристики (ВАХ) и электрическую прочность структур  $\text{Al-SiO}_2^M\text{-Al}$ ;
- по влиянию  $S_c$  на пористость диэлектрической пленки  $\text{SiO}_2^M$ .

**Зависимость относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь пленки  $\text{SiO}_2^M$  с различным  $S_c$ .** Исследования емкости МДМ-структур  $\text{Al-SiO}_2^M\text{-Al}$  показало уменьшение относительной диэлектрической проницаемости пленки  $\text{SiO}_2^M$  и увеличение тангенса угла диэлектрических потерь с ростом  $S_c$  (рис. 2).

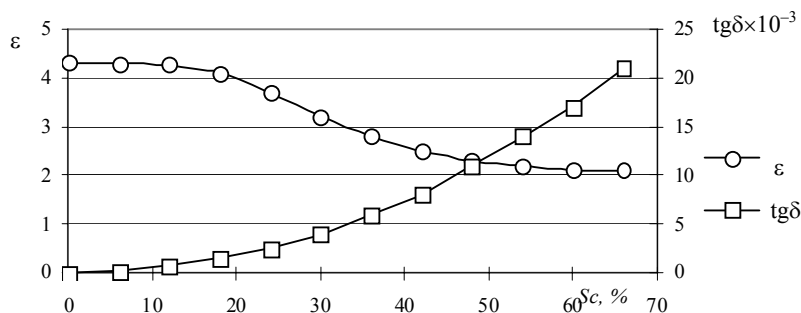
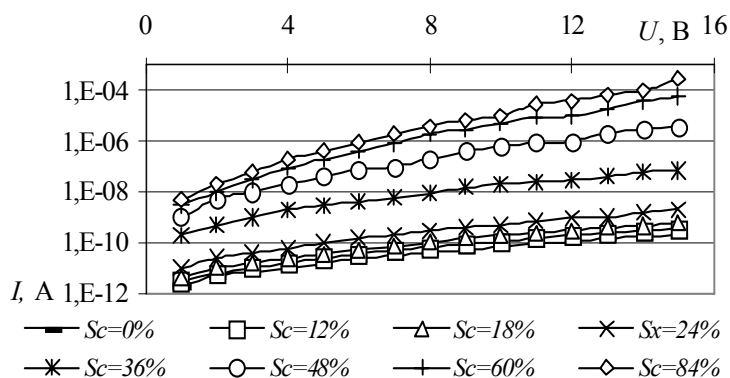


Рис. 2. Зависимость относительной диэлектрической проницаемости и тангенса диэлектрических потерь пленки  $\text{SiO}_2^M$  с различным  $S_c$

Уменьшение диэлектрической проницаемости может быть связано с появлением в диэлектрике сквозных пор и газовых включений, а увеличение тангенса угла диэлектрических потерь может быть обусловлено увеличением электропроводности диэлектрических пленок за счет появления несвязанного кремния в пленке.



**Вольт-амперные характеристики и электропроводность структур  $\text{Al-SiO}_2^M\text{-Al}$  с различным  $S_c$ .** Исследование ВАХ структур  $\text{Mo-SiO}_2^M\text{-Al}$  показало значительное увеличение проводимости при увеличении количества углерода, введенного в пленку рабочего диэлектрика  $S_c > 24\%$  (рис. 3, 4).

Рис. 3. Вольт-амперные характеристики структур  $\text{Al-SiO}_2^M\text{-Al}$  с различным  $S_c$

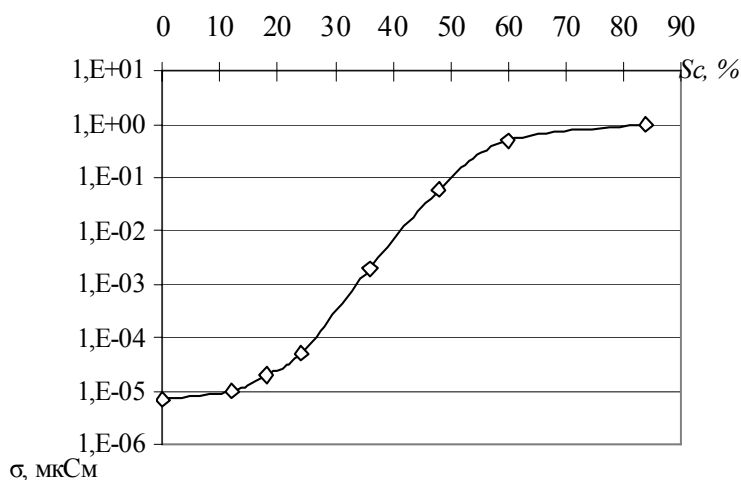


Рис. 4. Зависимость проводимости структур  $\text{Al-SiO}_2^M\text{-Al}$  от  $S_c$  при постоянном напряжении на структуре 10 В

ВАХ структур Al-SiO<sub>2</sub><sup>M</sup>-Al в координатах  $\ln I - E^{1/2}$  достаточно хорошо укладываются в прямую линию, что свидетельствует о возможности проводимости диэлектрика за счет механизма Пула–Френкеля или Шоттки. Более детальное определение тангенса угла наклона ВАХ в координатах  $\ln I - E^{1/2}$  позволил выявить, что при  $24\% < S_c < 48\%$  происходит смена механизма электропроводности с шоттковского на механизм Пула–Френкеля.

Исследования влияния полярности приложенного напряжения показали, что сильная зависимость от полярности приложенного напряжения наблюдается у образцов Al-SiO<sub>2</sub><sup>M</sup>-Al с малым количеством углерода, введенного в пленку рабочего диэлектрика ( $S_c < 24\%$ ), при этом разница в сквозных токах (при различных полярностях) достигала величины более порядка. По мере увеличения  $S_c$  разница в сквозных токах уменьшалась, совсем исчезая при  $S_c > 60\%$ .

Таким образом, в структурах Al-SiO<sub>2</sub><sup>M</sup>-Al с  $S_c < 48\%$  преобладает проводимость по механизму Шоттки, а при больших количествах углерода, введенного в пленку рабочего диэлектрика  $S_c > 48\%$ , наблюдается проводимость по механизму Пула–Френкеля.

**Исследование пористости диэлектрической пленки SiO<sub>2</sub><sup>M</sup>.** Исследование пористости диэлектрической пленки SiO<sub>2</sub><sup>M</sup> методом электрохимического высаживания меди показало значительное увеличение количества сквозных пор с увеличением  $S_c$ . Причем значительно возрастает число мелких пор, с эффективным диаметром 2–5 мкм, чем крупных, с диаметром 10–15 мкм (этот размер носит лишь качественный характер, поскольку при высаживании меди поры визуально укрупняются) (рис. 5).

Для выявления пористости диэлектрика, а также для оценки размера и распределения пор были проведены микроскопические исследования поверхности пленки SiO<sub>2</sub><sup>M</sup> (рис. 6).

Анализируя полученные микрофотографии (см. рис. 6), можно сказать, что введение углерода в рабочий диэлектрик приводит к увеличению его пористости и появлению газовых включений, в результате чего получается диэлектрик с очень рыхлой пористой структурой. Простейшая оценка доли, занимаемой порами, показывает, что поры могут занимать от 30 до 70% (эти области выделены пунктирным белым прямоугольником).

Рис. 6. Микрофотографии поверхности диэлектрика:  
а – SiO<sub>2</sub><sup>M</sup> с  $S_c = 84\%$ ; б – SiO<sub>2</sub>.  
1 – до травления диэлектрика;  
2 – после «сравливания» диэлектрика толщиной 20 нм

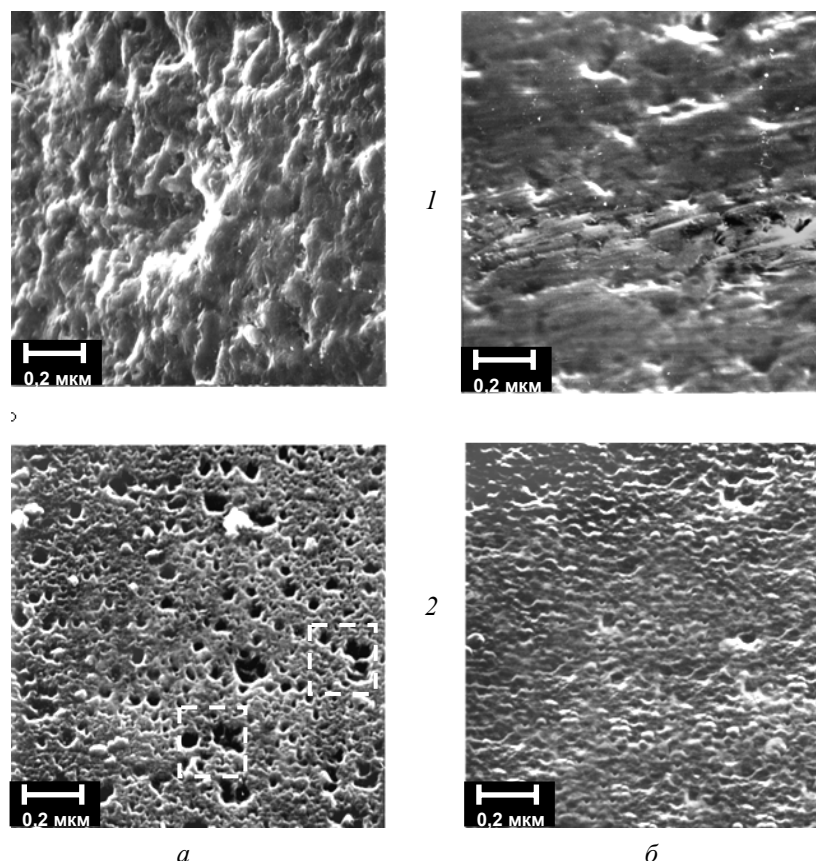
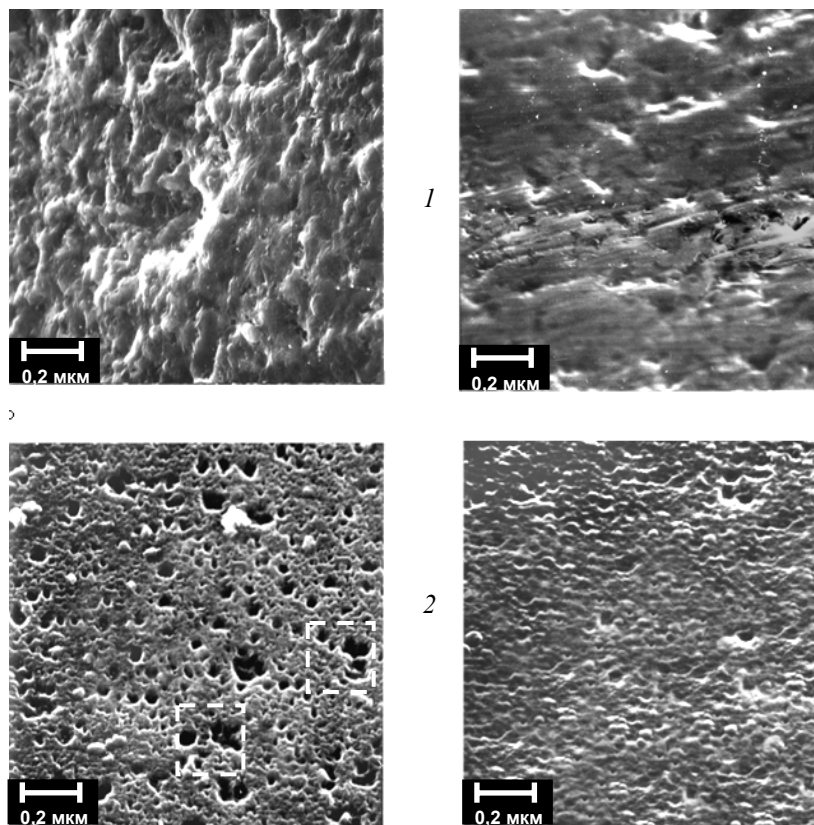


Рис. 5. Зависимость плотности сквозных пор  $N_p$  в диэлектрической пленке SiO<sub>2</sub><sup>M</sup> от  $S_c$



**Исследование электрической прочности структур Al-SiO<sub>2</sub><sup>M</sup>-Al с различным S<sub>c</sub>.** Данные, полученные по пробой и электрической прочности структур Mo-SiO<sub>2</sub><sup>M</sup>-Al, показывают, что электрическая прочность структур Al-SiO<sub>2</sub><sup>M</sup>-Al снижается при увеличении S<sub>c</sub> (рис. 7). При этом пробой в структурах Mo-SiO<sub>2</sub><sup>M</sup>-Al при низком значении S<sub>c</sub> < 36% происходит преимущественно по точечным дефектам. Развитие пробоя в структуре с большим количеством введенного углерода в пленку диэлектрика (S<sub>c</sub> = 80%) происходило одновременно в нескольких местах и сопровождалось сильным искрением с последующим выгоранием верхнего электрода в местах пробоя. При более детальном рассмотрении можно увидеть достаточно сильное свечение под пленкой верхнего электрода перед развитием пробоя. Среднее значение электрической прочности порядка 4×10<sup>5</sup> В/см, причем с ростом числа пробоев это значение сильно возрастало, достигая значения 2×10<sup>6</sup> В/см после 100 последовательных пробоев.

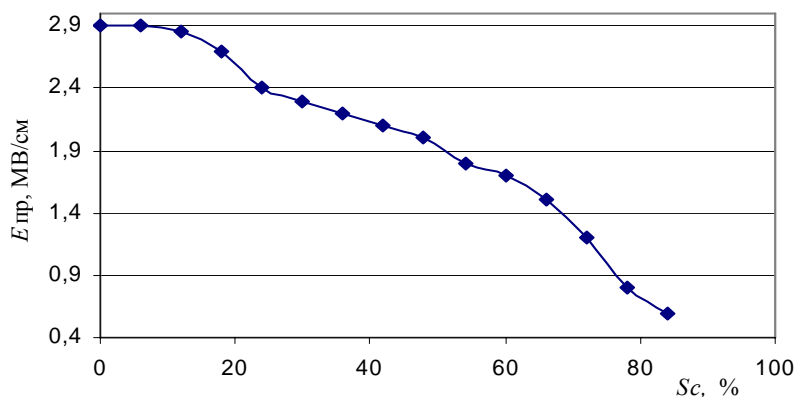


Рис. 7. Зависимость электрической прочности структур Mo-SiO<sub>2</sub><sup>M</sup>-Al от S<sub>c</sub>

**Анализ полученных данных.** Анализируя полученные данные, можно сказать, что введение углерода в пленку диэлектрика SiO<sub>2</sub> приводит к формированию рыхлой неупорядоченной структуры диэлектрика, содержащей большое число сквозных пор и газовых включений. При этом увеличивается его электропроводность, а также тангенс угла диэлектрических потерь. Причина этих изменений кроется в протекании химической реакции между кислородом и углеродом, приводящей к образованию

летучего соединения СО или СО<sub>2</sub>, которое покидает пленку диэлектрика, приводя к образованию сквозных пор и газовых включений, а также областей неполного окисления кремния.

Работа выполнена при финансовой поддержке фонда РФФИ, номер проекта 11-08-98056-р\_сибирь\_a.

#### Литература

1. Low dielectric constant materials for microelectronics / К. Маех, М.Р. Baklanov, D Shamiryman et al. // J. Appl. Phys. – 2003. – Vol. 93. – P. 8793.

#### Сахаров Юрий Владимирович

Канд. техн. наук, доцент каф. физической электроники ТУСУРа  
Тел.: 8-923-408-06-76  
Эл. почта: suv@ms.tusur.ru

#### Троян Павел Ефимович

Д-р техн. наук, профессор, зав. каф. физической электроники ТУСУРа  
Тел.: 8-913-110-22-11  
Эл. почта: tpe@ms.tusur.ru

Saharov Y.V., Troyan P.E.

#### Research of silicon dioxide porous films

We investigate the electrophysical properties of silicon dioxide porous films, received by means of magnetron dispersion of a compound target.

**Keywords:** silicon dioxide; carbon; dioxide of silicon modified by carbon; magnetron.