

15.2;06.2;12

## ЕМКОСТЬ СТРУКТУР С ТОЛСТЫМ СЛОЕМ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

© С.П.Зимин, Е.П.Комаров

Изучение емкостных свойств пористого кремния (ПК) и структур на его основе является в настоящее время важной задачей физики низкоразмерных систем и представляет значительный интерес для разработчиков полупроводниковых приборов [1]. Среди экспериментальных работ, посвященных исследованиям емкостных свойств кремниевых структур со слоем ПК, отметим работы [2-6], из которых следует отсутствие единого характера изменения емкости структуры металл-пористый кремний-монокремний-металл (Me-ПК-МК-Me) при изменении внешнего смещения. Вольт-емкостные характеристики (ВЕХ) таких структур имели либо колоколообразный вид, либо вид, характерный для структуры металл-диэлектрик-полупроводник. Для ряда образцов емкость при изменении внешнего смещения вела себя подобно емкости барьера Шоттки, для других структур она не зависела от подаваемого смещения или имела сложный характер. Наблюдаемое многообразие ВЕХ может быть объяснено тем [6,7], что общая емкость структуры Me-ПК-МК-Me (Me-PS-SCS-Me) определяется не только емкостью слоя пористого кремния ( $C_2$ ), но и емкостями соответствующих переходов в структуре (рис. 1, а). Свой вклад в общую емкость структуры ( $C$ ) вносят емкости переходов Me-ПК ( $C_1$ ), ПК-МК ( $C_3$ ) и в ряде случаев емкость перехода МК-Me ( $C_4$ ). Конкретный вид ВЕХ будет определяться поведением каждой из перечисленных емкостей при изменении внешнего смещения. В этой ситуации для определения емкости пористого слоя можно применить по крайней мере три метода. Первый подход заключается в возможности использования методов математического моделирования для выделения емкости слоя  $C_2$  из общей емкости структуры. Однако такую идею в настоящее время трудно реализовать, так как многие параметры структуры Me-ПК-МК-Me неизвестны. Второй метод основывается на создании структур Me-ПК-МК-Me без потенциальных барьеров на границах переходных областей, что в случае ПК с высоким удельным сопротивлением очень трудно сделать. Третий подход состоит в том, что поскольку при последовательном соединении конденсаторов емкость

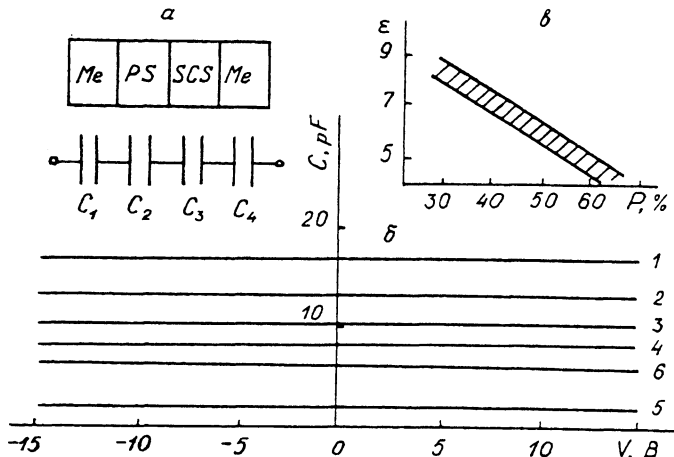


Рис. 1.

*a* — структура Me-ПК-МК-Me и эквивалентная емкостная схема; *b* — типичные ВЕХ структур на основе Si, легированного бором (1-4), фосфором (5), сурьмой (6): 1 —  $P = 67\%$ ,  $d = 67$  мкм; 2 —  $P = 66\%$ ,  $d = 86$  мкм; 3 —  $P = 65\%$ ,  $d = 100$  мкм; 4 —  $P = 68\%$ ,  $d = 110$  мкм; 5 —  $d = 140$  мкм; 6 —  $d = 165$  мкм; образцы (1-4) получены на кремнии с удельным сопротивлением  $0.03 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  при одинаковых режимах анодирования в течение разного времени; *c* — зависимость диэлектрической проницаемости пористого материала от величины весовой пористости.

системы определяется конденсаторами с наименьшими емкостями, то можно попытаться целенаправленно уменьшить емкость пористого слоя за счет увеличения толщины пористого кремния в структуре. Если удастся реализовать такую ситуацию и доказать, что емкость структуры с толстым слоем ПК действительно определяется емкостью пористого материала, то исследовать емкостные свойства ПК можно будет путем измерения емкости всей структуры.

Целью данной работы являлось изучение общих закономерностей поведения емкости структур Me-ПК-МК-Me с толстым слоем ПК при изменении внешнего смещения и частоты. В качестве исходных подложек использовались различные кремниевые пластины с легирующей примесью бора, фосфора или сурьмы с удельным сопротивлением  $0.01-7.5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ . Пористый кремний формировался методом анодной электрохимической обработки в смеси 48% водного раствора  $\text{HF}$  и изопропилового спирта (1:1) при плотности тока анодирования  $50-60 \text{ mA/cm}^2$  в течение 10-60 мин. Толщина слоев пористого кремния ( $d$ ) составляла 55-190 мкм и для большинства образцов находилась в интервале 90-190 мкм. Весовая пористость ( $P$ ) ПК равнялась 30-68%, причем для большинства структур она пре-

вышла 50%. Удельное сопротивление материала пористого слоя равнялось  $10^6 - 10^8$  Ом·см. На поверхности ПК и МК методом термовакуумного напыления наносились пленочные алюминиевые контакты с последующей термообработкой  $300^\circ\text{C}$  в инертной среде в течение 15–20 мин. Площадь контактов исследуемой сэндвич-структуры составляла  $25 \text{ мм}^2$ .

Измерения ВЕХ структур на частоте 1 МГц в интервале смещений  $\pm 15$  В показали, что для всех без исключения образцов независимо от вида легирующей примеси и особенностей формирования пористого слоя наблюдается единый вид зависимости, показанный на рис. 1, б. Емкость структур не зависела от величины подаваемого смещения в интервале напряжений до 15 В, а для образцов с толщиной ПК более 100 мкм — до 40 В. Вольт-амперные характеристики структур, измеренные на постоянном токе в интервале  $\pm 3$  В, показали, что в ряде случаев имеется сильное выпрямление. Это свидетельствует о том, что барьеры в структуре сформированы, но они не проявляются на вольт-емкостных характеристиках. Для серии образцов, которые были получены в одинаковых условиях анодной обработки и имели одинаковый показатель пористости, но отличались толщиной ПК, наблюдалась практически линейная связь уменьшения емкости структуры при увеличении толщины пористого слоя. Эти факты позволяют с большой степенью достоверности говорить о том, что измеряемые значения емкости на структурах с толстыми слоями ПК определяются в основном емкостью слоя ПК. Вычисление величины диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  для пористого слоя показало, что для всех исследуемых образцов она находится в интервале 4.2–8.6 и зависит от показателя весовой пористости  $P$ . На рис. 1, с представлена сводная зависимость диэлектрической проницаемости пористого слоя от величины пористости, из которой следует, что для всех исследованных 45 образцов ПК независимо от морфологии пор и легирующей примеси экспериментальные значения  $\epsilon$  укладываются в узкую полосу значений. Интерполяция приведенной зависимости в сторону малой пористости показывает, что величина  $\epsilon$  при нулевой пористости стремится к  $\epsilon = 12$ , что соответствует значению диэлектрической проницаемости кристаллического кремния. Это является еще одним подтверждением того, что определяющий вклад в емкость структуры Ме–ПК–МК–Ме в исследуемом случае вносит емкость слоя пористого материала.

Изучение частотной дисперсии емкости проводилось в диапазоне частот 50 кГц–25 МГц. На рис. 2, а показаны типичные зависимости емкости структур от частоты  $F$ , из которых следует, что сильное уменьшение емкости при увели-

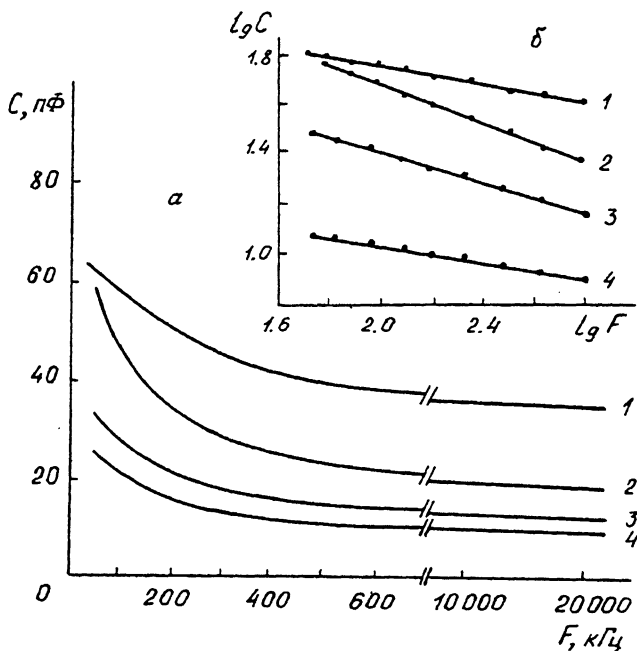


Рис. 2.

$a$  — типичные зависимости емкости от частоты для структур, сформированных на кремнии, легированном бором (1, 2), фосфором (3), сурьмой (4): 1 —  $P = 53\%$ , 2 —  $P = 62\%$ , 3 —  $P = 57\%$ , 4 —  $P = 60\%$ ;  $b$  — зависимость  $\lg C = f(\lg F)$  для этих же образцов.

чении частоты характерно для начального участка зависимости от 50 до 500–1200 гКц, а при дальнейшем увеличении частоты емкость уменьшается незначительно и это изменение в интервале частот 1–25 МГц составляет в среднем 10–20%. Перестроение полученных зависимостей для начального участка в координатах  $\lg C = f(\lg F)$  показало, что экспериментальные точки для всех исследуемых образцов хорошо укладывались на прямые линии (рис. 2, б). Показатель степени в зависимости  $C \sim F^a$ , определенный по тангенсу угла наклона полученных прямых, оказался для подавляющего числа образцов находящимся в интервале значений  $a = -(0.3 \pm 0.1)$ . Эти значения несколько отличаются от теоретических значений показателя степени  $a = -0.5$ , полученных для системы квантовых нитей между металлическими контактами [1]. Это расхождение, по всей видимости, связано с тем, что реальный пористый кремний является более сложной системой по сравнению с идеальной моделью. Попытка перестроения зависимостей  $C(F)$  в координатах

$C = f(\lg F)$  показала, что для исследованных нами образцов экспериментальные значения емкости не укладывались в новых координатах на прямую линию и в данном конкретном случае ПК нельзя представить как совокупность двумерных плоскостей (чешуек) [2].

Таким образом, результаты данной работы свидетельствуют о том, что емкость структур Me-ПК-МК-Me с толстым слоем пористого кремния и высокой пористостью определяется в основном емкостью слоя пористого материала. Емкость таких структур не зависит от приложенного смещения, а в области высоких частот ( $F > 1$  МГц) практически не изменяется с частотой. Необходимо отметить, что обнаруженный нами для интервала 50–700 кГц степенной характер частотной дисперсии емкости не является, по всей видимости, универсальным и не может быть распространен на все случаи ПК. Пористый кремний, обладающий широким диапазоном структурных и электрических характеристик, способен, по нашему мнению, проявлять различные емкостные свойства в зависимости от эффективной размерности (0 – D, 1 – D, 2 – D, 3 – D или их комбинации), которая может быть реализована в структуре пористого материала в каждом конкретном случае.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта МИЭТа.

Выражаем глубокую признательность авторам [1,2] за возможность ознакомиться с материалами статей до выхода журналов из печати.

### Список литературы

- [1] *Аверкиев Н.С., Шик А.Я.* // ФТП. 1996. Т. 30. С. 199–207.
- [2] *Аверкиев Н.С., Капитонова Л.М., Лебедев А.А. и др.* // ФТП. 1996. Т. 30 (в печати).
- [3] *Anderson R.C., Muller R.S., Tobias C.W.* // J. Electrochem. Soc. 1991. V. 138. P. 3406–3411.
- [4] *Балагуров Л.А., Смирнов Н.Б., Кожугова Е.А. и др.* // Изв. АН. Сер. Физическая. 1994. Т. 58. В. 7. С. 78–82.
- [5] *Астрова Е.В., Белов С.В., Лебедев А.А.* // ФТП. 1994. Т. 28. С. 332–337.
- [6] *Zimin S.P., Kuznetsov V.S., Prokaznikov A.V.* / Technical Digest 3th International Conference ICVC'93. 1993. Taejon. P. 179–182.
- [7] *Zimin S.P., Kuznetsov V.S., Prokaznikov A.V.* // Abstracts of 2nd International Conference PLDS-2. 1995. Dubna. P. 80.

Ярославский государственный  
университет

Поступило в Редакцию  
4 июля 1996 г.