

## ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ И ВОЛЬТ-ФАРАДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРЕМНИЕВЫХ ПДП СТРУКТУР С ТОЛЩИНОЙ ДИЭЛЕКТРИКА МЕНЕЕ 50 АНГСТРЕМ

Вуль А. Я., Дидейкин А. Т., Осипов В. Ю.,  
Бойцов С. К., Зинчик Ю. С., Макарова Т. Л.

В работе излагаются результаты изучения вольт-амперных (ВАХ) и вольт-фарадных (ВФХ) характеристик кремниевых структур полупроводник—диэлектрик—полупроводник  $p^+-Si^*-SiO_2-p-Si$  с толщиной диэлектрика менее 50 Å.

Определенная величина поверхностного начального изгиба зон в  $p$ -кремнии составляла  $\varphi_s^0 = 640-720$  мВ при толщинах окисла от 20 до 33 Å. Вольт-амперные характеристики при напряжениях прямого смещения, больших поверхностного начального изгиба зон в  $p-Si$ , носят резко выраженный пороговый характер, что связано с переходом границы раздела  $Si-Si_2O_2$  в состояние обогащения основными носителями заряда (дырками). При этом ток определяется туннелированием основных носителей заряда из аккумуляционного дырочного слоя через окисел в  $p^+$ -поликремний.

Характер спада прямого тока с толщиной окисного слоя свидетельствует об отличии структуры окисных слоев толщиной 20—33 Å от структуры  $SiO_2$  стехиометрического состава.

Исследованию механизмов токопереноса в структурах металл—туннельно-прозрачный диэлектрик—полупроводник (МТДП) и полупроводник—туннельно-прозрачный диэлектрик—полупроводник (ПТДП) уделялось достаточно большое внимание [1, 2]. В последние годы интерес к такого рода исследованиям возрос в связи с необходимостью уменьшения толщины подзатворного диэлектрика кремниевых МДП транзисторов в больших интегральных схемах [3], а также исследованиями эффекта усиления фототока [4]. В данной работе излагаются результаты изучения вольт-амперных (ВАХ) и вольт-фарадных (ВФХ) характеристик кремниевых ПДП структур с толщиной диэлектрика менее 50 Å. Структуры изготавливались на кремниевых подложках  $p$ -типа проводимости ориентации (100) марки КДБ-15, термический низкотемпературный ( $T \approx 700$  °С) окисел выращивался в потоке сухого кислорода. Одним электродом структуры при измерении электрических характеристик служила подложка, вторым — сильно легированный бором поликремний  $p \approx (2-5) \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup>. Толщины слоев измерялись на контрольных пластинах без слоя поликремния эллипсометрическим методом. Некоторые детали технологии и кинетики роста сверхтонких слоев  $SiO_2$  рассмотрены нами в [5].

На рис. 1 приведены вольт-фарадные характеристики (ВФХ) исследуемых структур. Линейность ВФХ в координатах  $1/C^2 = f(U)$  в диапазоне обратных смещений  $U = (0-2)$  В свидетельствует о реализации режима стационарного неравновесного обеднения [4] и позволяет определить напряжение плоских зон структуры  $V_c$ . Найденная величина  $V_c$  с точностью до  $kT$  позволяет найти величину поверхностного начального изгиба зон в  $p$ -кремнии:  $\varphi_s^0 = 640-720$  мВ при толщинах окисла от 20 до 33 Å. Большая величина  $\varphi_s^0$  в  $p$ -кремнии, по всей видимости, обусловлена большой плотностью встроенного в  $SiO_2$  положительного заряда и имеет место сразу после выращивания термического окисла. Поскольку в режиме неравновесного обеднения  $C(U) \sim (V_c + U)^{-1/2}$ ,

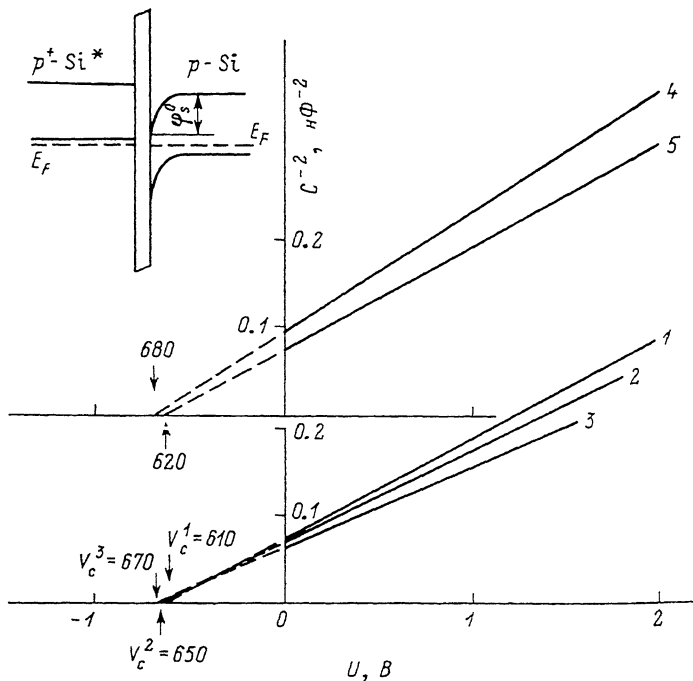


Рис. 1. Вольт-фарадные характеристики ПДП структур с различной толщиной окисла.  $d$ , Å: 1, 4, 5 — 20; 2 — 26, 3 — 33.  $T$ , К: 1, 2, 3, 5 — 293; 4 — 77. Для наглядности начало отсчета по оси ординат для графиков 4, 5 смещено вверх. Цифры у стрелок указывают величину  $V_c$  — отсечку по оси абсцисс в мВ. Диаметр кольцевого металлического электрода структуры 6 мм, измерительная частота 10 кГц. На вставке — энергетическая диаграмма структуры при нулевом смещении.

экстраполяция касательной к зависимости  $C(U)$  в точке  $U=0$  до уровня  $C=0$  определяет удвоенную величину  $V_c$ . Как видно из рис. 2, такая процедура дает значение  $V_c$ , согласующееся с найденной из зависимости  $1/C^2=f(U)$ . Увеличение  $V_c$  с ростом толщины окисла от 620 до 700 мВ при изменении  $d$  от 20 до 33 Å может быть, вообще говоря, связано с ростом плотности поверхностных состояний из-за изменения величины упругих напряжений на границе Si—SiO<sub>2</sub>. Однако более вероятным нам представляется, что изменение  $V_c$  связано с увеличением положительного заряда, фиксированного в диэлектрике [6, 7]. В этом случае относительно слабый рост  $V_c$  с толщиной позволяет предположить, что основная доля положительного заряда в структурах с  $d=20-33$  Å встроена на расстоянии до 20 Å от границы раздела Si—SiO<sub>2</sub>.

Заметим, что в структурах с толщиной диэлектрика более 33 Å режим неравновесного обеднения реализуется при смещениях более двух вольт, однако механизм проводимости диэлектрика, по всей видимости, не является чисто туннельным.

Относительно большие изгибы зон в  $p$ -кремнии и небольшой (в пределах  $\cong 100$  мВ) рост величины  $\phi_0^0$  с толщиной окисла подтверждаются измерениями насыщенной фотоэдс при  $T=77$  К.

ВАХ исследованных структур аналогичны характеристикам МТДП диодов (Al—SiO<sub>2</sub>— $p$ -Si) [8], и при прямом внешнем смещении в зависимости от соотношения  $U$  и  $\phi_0^0$  реализуются режимы ограничения тока полупроводником или диэлектриком. При напряжениях  $U < \phi_0^0$  имеет место режим ограничения тока полупроводником, когда процесс переноса заряда ограничивается надбарьерной термоактивационной эмиссией с характерной экспоненциальной зависимостью тока от напряжения и обратной температуры. При этом характерный

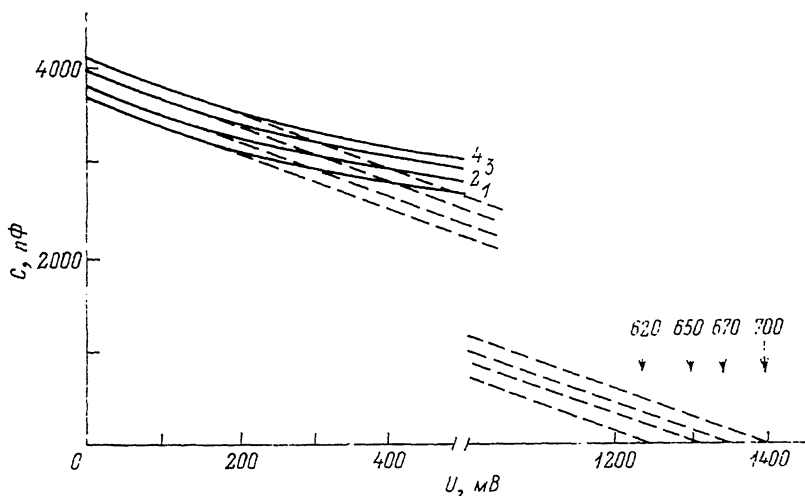


Рис. 2. Вольт-фарадные характеристики ПДП структур с различными толщинами окисла при  $T=293$  К.

Показана экстраполяция начального участка ВФХ к нулевому значению емкости,  $d$ , Å: 1 — 20, 2 — 26, 3 — 29, 4 — 33. Цифры у стрелок указывают графически определенную величину  $V_c$ .

параметр неидеальности ВАХ на этом участке увеличивается с ростом толщины окисла от  $\beta=1.06$  при  $d=20$  Å до  $\beta=1.5$  при  $d=33$  Å и  $T=293$  К. При  $U > \varphi_0^o$  реализуется режим ограничения тока проводимостью диэлектрика. В этом случае при  $U > \varphi_0^o$  поверхность переходит в состояние обогащения основными носителями заряда (дырками) и прямой ток обусловлен туннелированием дырок из аккумуляционного дырочного слоя на поверхности полупроводника через окисел в  $p^+$ -полукремний.

На рис. 3 показаны ВАХ структур в режиме  $U > \varphi_0^o$ ,  $T=77$  К при различных толщинах окисла в координатах  $I^{1/2}$  от  $U$ . Видно, что экстраполяция ВАХ структур с  $d=20, 26$  Å к нулевому току дает величину отсечки, совпадающую с величиной  $V_c$ , определенной из ВАХ, а сами ВАХ носят резко выраженный пороговый характер. Это подтверждает тот факт, что данный участок ВАХ ограничения тока через структуру диэлектриком имеет место при переходе границы раздела Si—SiO<sub>2</sub> в состояние обогащения, при этом формирующийся при  $U > U > \varphi_0^o$  аккумуляционный слой играет роль «второй обкладки» SiO<sub>2</sub>-конденсатора. Из рис. 3 видно, что для некоторых образцов при  $d=29, 33$  Å величина отсечки на ВАХ сдвинута в область более высоких напряжений, что связано с вышеупомянутым небольшим увеличением  $\varphi_0^o$  с толщиной диэлектрика. Наблюдаемое сильное уменьшение наклона ВАХ в координатах  $I^{1/2}$  от  $U$  определяется главным образом уменьшением вероятности туннелирования через окисел с ростом его толщины.

Приведенные нами в [5] результаты показывают резкий спад в диэлектрике. Аналогично и резкость спада ВАХ не соответствует теории  $I \sim \exp(-\psi^{1/2}d)$ . Причинами такого относительно слабого спада могут быть как малое значение эффективной величины туннельного барьера для дырок [5], так и отличие структуры окисных слоев толщиной 20—33 Å от структуры стехиометрического SiO<sub>2</sub>. На это указывает отличие показателей преломления окисных слоев с  $d < 33$  Å и стехиометрического SiO<sub>2</sub> толщиной  $d \sim 1000$  Å. Так, показатель преломления изменяется от 1.71 для  $d=20$  Å до 1.54 для  $d=33$  Å. Поскольку показатель преломления микронных пленок SiO составляет  $n=2.0$ , а показатель преломления

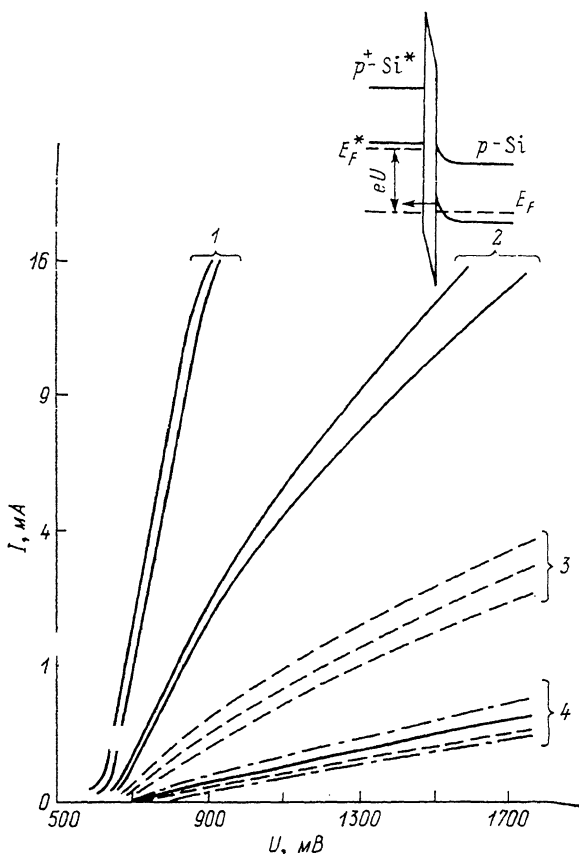


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики ПДП структур с различной толщиной окисла при  $T=77$  К.

$d, \text{\AA}$ : 1 — 20, 2 — 26, 3 — 29, 4 — 33. Кривые для одной толщины окисла относятся к образцам ПДП структур диаметром 6 мм. На вставке — энергетическая диаграмма структуры при прямом внешнем смещении в режиме аккумуляции.

кремния равен  $n=3.8$ , это говорит либо о присутствии переходного слоя SiO в окисле при  $d < 33 \text{\AA}$ , либо об избытке атомарного кремния в диэлектрическом слое.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Kumar V., Dahlke // Sol. St. Electron. 1977. V. 20. N 1. P. 143—152.
- [2] Tarr N. G., Pulfrey D. L., Camporese D. S. // IEEE Trans. Electron. Dev. 1983. V. ED-30. N 12. P. 1760—1770.
- [3] Hung K. K. // J. Appl. Phys. 1986. V. 59. N 3. P. 816—823.
- [4] Вуль А. Я., Саченко А. В. // ФТП. 1983. Т. 17. В. 8. С. 1361—1375.
- [5] Вуль А. Я., Макарова Т. Л., Осипов В. Ю., Зинчик Ю. С., Бойцов С. К. // ФТП. 1991. Т. 26. В. 1. С. 111—121.
- [6] Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Т. 1. М., 1984. 455 с.
- [7] Глудкин О. П. // Обзоры по электронной технике. 1983. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. В. 2 (935).
- [8] Shewchun J., Green M. A., King F. D. // Sol. St. Electron. 1974. V. 17. Pt. 2. P. 563—572.

Физико-технический институт  
им. А. Ф. Иоффе РАН  
Санкт-Петербург

Получена 15.08.1991  
Принята к печати 21.08.1991