

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕОДНОРОДНОЙ ПО ПЛОЩАДИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ГЕНЕРАЦИИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В МДП СТРУКТУРАХ

© А.Г. Мосейчук

Санкт-Петербургский государственный технический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия
(Получена 22 мая 1995 г. Принята к печати 3 июля 1995 г.)

Были измерены неравновесные вольт-фарадные характеристики глубокого обеднения модельных МДП структур при комнатной температуре. Для этих целей была специально подготовлена пластина n -Si-SiO₂ со ступенчатым по площади распределением плотности поверхностных состояний. Для моделирования неоднородной МДП структуры был использован сканирующий ртутный полевой электрод 1.5 мм диаметром. Под полевым электродом модельной МДП структуры имелось два участка с различной ($5 \cdot 10^{10}$ и $3.6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{В}^{-1}$) плотностью поверхностных состояний. Когда площадь участка с высокой плотностью состояний составляла 0.3–28% от площади электрода модельной МДП структуры, на C - V -кривых глубокого обеднения наблюдались аномалии. Обсуждается эмпирическая модель неоднородной поверхностной генерации неосновных носителей в МДП структурах.

В настоящее время большое внимание уделяется анализу влияния крупномасштабных планарных неоднородностей распределения параметров диэлектрика, границы раздела диэлектрик-полупроводник и приповерхностного слоя полупроводника на вольт-фарадные характеристики (ВФХ) кремниевых структур металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) [1–3]. Неоднородности заряда диэлектрика, плотности поверхностных состояний на границе раздела диэлектрик-полупроводник, времени жизни неосновных носителей заряда и др. могут появляться в МДП структурах в результате технологических или физических сильнополевых или термополевых воздействий, а также радиационного облучения [1,3–5]. Подобные неоднородности искажают форму вольт-фарадной кривой как на равновесных участках [1,4], так и в области неравновесного обеднения [3,5].

В настоящей работе было проведено экспериментальное моделирование крупномасштабной неоднородности распределения плотности поверхностных состояний на границе раздела диэлектрик-полупроводник по площади и изучено влияние связанной с ней неоднородной поверхностной генерации носителей заряда на форму неравновесных вольт-фарадных характеристик глубокого обеднения МДП

структур. Опыты были проведены на кремниевой монокристаллической пластине КЭФ-15 с ориентацией (111), окисленной в атмосфере HCl при температуре $T = 1050^{\circ}\text{C}$. Толщина пленки SiO_2 составила $0.45\ \mu\text{м}$. Для создания неоднородного распределения плотности поверхностных состояний на границе раздела Si-SiO₂ был использован эффект [6] снижения плотности поверхностных состояний под действием отжига алюминиевой пленки, напыленной на поверхность диоксида кремния. В нашем случае слой алюминия толщиной $1\ \mu\text{м}$ напылялся только на часть поверхности пластины Si-SiO₂ методом термического вакуумного испарения. Другая часть пластины была закрыта сплошной механической маской с линейным краем. После напыления был проведен отжиг образца при 450°C на воздухе в течение 1 ч. Затем слой алюминия был частично стравлен с поверхности SiO₂ в центре пластины так, чтобы край оставшейся пленки алюминия позволял произвести оптическую привязку местоположения линии раздела между двумя областями поверхности: 1 — отожженной под слоем алюминия и 2 — отожженной без этого слоя (см. рис. 1, а).

На подготовленной таким образом структуре Si-SiO₂ с помощью сканирующего ртутного зонда диаметром $150\ \mu\text{м}$, аналогичного [7], были изучены распределения параметров диэлектрика и полупровод-

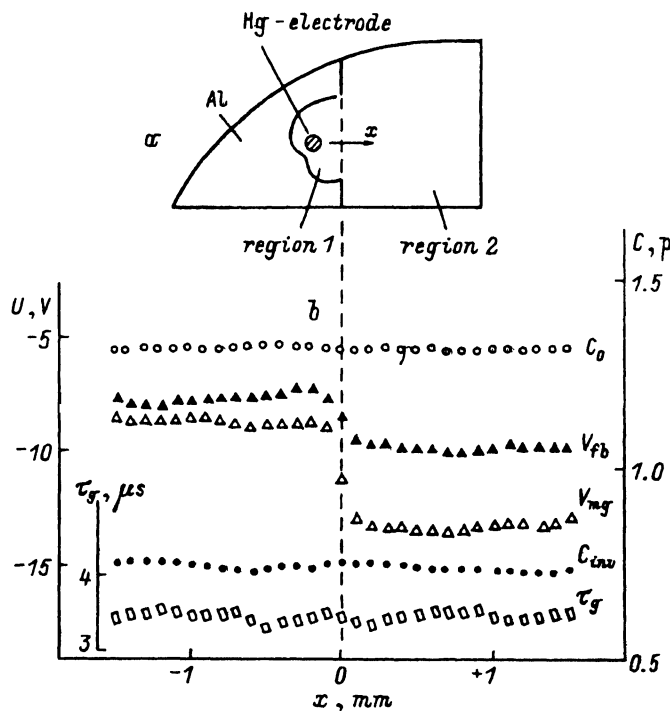


Рис. 1. Типичные распределения основных параметров вдоль модельной структуры $n\text{-Si-SiO}_2$, полученные с двух сторон границы раздела участков 1 и 2 поверхности. а — моделирование макроскопической неоднородности поверхности $n\text{-Si-SiO}_2$ путем отжига пластины под слоем алюминия; б — точками разной формы показаны распределения емкости диэлектрика C_0 , инверсионной емкости МДП структуры C_{inv} , напряжения плоских зон V_{fb} , напряжения середины зоны V_{mg} и генерационного времени жизни неосновных носителей τ_g вдоль линии x перемещения ртутного зонда диаметром $150\ \mu\text{м}$.

на участке размером $2 \times 3.5 \text{ мм}^2$, охватывающем обе области 1 и 2 поверхности образца. Перемещение ртутного зонда осуществлялось с шагом 100 мкм в направлении, перпендикулярном линии раздела между областями 1 и 2. При этом фиксировались распределения емкости диэлектрика C_0 , инверсионной емкости C_{inv} МДП структуры, напряжения плоских зон V_{fb} , напряжения середины зоны V_{mg} , а также объемного генерационного времени жизни неосновных носителей заряда — τ_g . На рис. 1, б приведены типичные распределения указанных величин по одной из линий сканирования зонда. Все параметры были определены по общепринятым методикам с использованием равновесных высокочастотных $C-V$ - и релаксационных импульсных $C-t$ -кривых [8]. Из приведенных данных видно, что в модельной структуре Si-SiO₂ нам действительно удалось получить ступенчатое изменение зарядового состояния диэлектрика и границы раздела диэлектрик-полупроводник при переходе от области 1 к области 2, в то время как остальные параметры распределены однородно в пределах изученного участка поверхности. Напряжение плоских зон V_{fb} изменяется более слабо, чем величина V_{mg} , что, видимо, связано с влиянием отрицательного заряда поверхностных состояний на участке 2 поверхности. Расчеты показывают, что области 1, отожженной под слоем алюминия, соответствуют дифференциальная плотность поверхностных состояний вблизи середины запрещенной зоны $N_{s1} = 5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$ и плотность встроенного заряда окисла, рассчитанная по величине V_{mg} , — $N_{O1} = 3.9 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, тогда как для области 2, отожженной без алюминия, $N_{s2} = 3.6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$ и $N_{O2} = 6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Дифференциальный энергетический спектр распределения плотности поверхностных состояний по запрещенной зоне полупроводника имел традиционную для кремниевых МДП структур U -образную форму на обоих изученных участках поверхности [8].

Таким образом, в нашем распоряжении имелась пластина Si-SiO₂ со ступенчатой планарной неоднородностью плотности поверхностных состояний, с перепадом значений более чем в 7 раз. Для моделирования неоднородной поверхностной генерации неосновных носителей заряда в таком случае достаточно было расположить полевой электрод МДП структуры так, чтобы под него попали оба участка 1 и 2 структуры Si-SiO₂. В качестве полевого электрода такой неоднородной структуры был использован подвижный ртутный электрод диаметром 1.5 мм . Сначала он устанавливался только на участке 1 (с низкой плотностью поверхностных состояний). Затем этот электрод перемещался с помощью микрометрического винта по направлению к линии раздела между участками 1 и 2 с шагом 10 мкм (см. рис. 1, а). Размер участка 2, попавшего под ртутный электрод, оценивался с точностью до 5 мкм по лимбу микрометра при помощи оптической системы привязки относительно края напыленного алюминия и рассчитывалась его доля площади S_2/S_m по отношению к площади полевого электрода S_m . Для каждого местоположения модельного электрода проводились измерения высокочастотной (1 МГц) неравновесной вольт-фарадной характеристики модельной МДП структуры. Скорость развертки напряжения смещения была выбрана равной 6 В/с , чтобы обеспечить переход в глубокое обеднение модельной МДП структуры на полупроводнике с объемным генерационным временем жизни неосновных носителей $\tau_g = 3.5 \text{ мкс}$. На рис. 2 приведено семейство эксперимен-

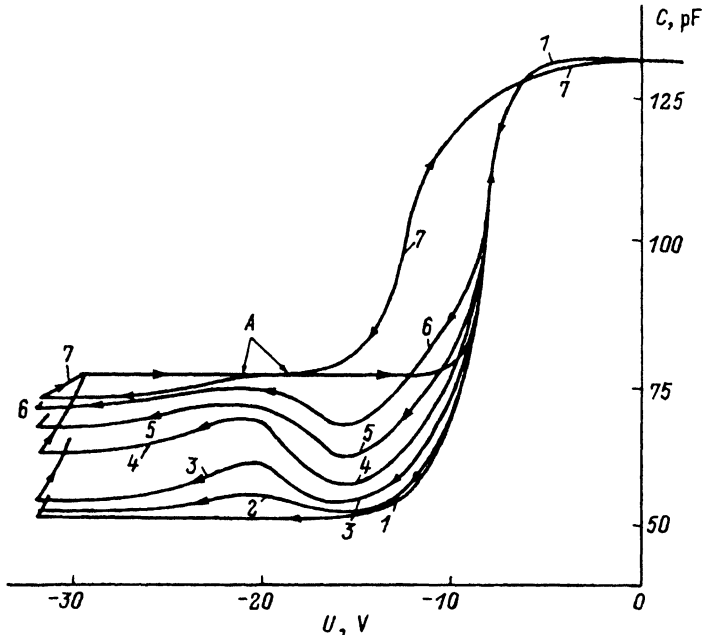


Рис. 2. Экспериментальные неравновесные вольт-фарадные характеристики модельной структуры Hg-Si-SiO_2 , полученные при движении ртутного электрода диаметром 1.5 мм вдоль поверхности в сторону участка с большой плотностью поверхностных состояний: 1, 7 — кривые для участков поверхности с низкой и высокой плотностью поверхностных состояний соответственно; 2-6 — кривые для МДП структуры с различной долей участка 2 под ртутным электродом; %: (3, 2.9, 11, 18 и 28 соответственно. А — участок плавного перехода равновесной $C-V$ -кривой к кривой глубокого обеднения для МДП структуры с большой плотностью состояний.

тальных вольт-фарадных кривых модельной МДП структуры с различной долей площади участка 2 под полевым электродом. Кривые 1 и 7 соответствуют расположению ртутного электрода только на участке 1 или 2. Видно, что обе эти вольт-фарадные кривые имеют участок неравновесного глубокого обеднения, где емкость плавно убывает с ростом напряжения смещения без каких-либо аномалий формы. Эти кривые отличаются не только наклоном, как это и следует ожидать для МДП структур с различной плотностью поверхностных состояний, но и наличием на кривой 7 затянутого перехода к участку неравновесного обеднения вблизи емкости C_{inv} (см. участок А на рис. 2). Как известно, такой перегиб вольт-фарадной кривой однозначно связан с наличием интенсивной поверхностной генерации неосновных носителей заряда через уровни поверхностных состояний [9]. Из рис. 2 (см. кривую 2) видно, что попадание под полевой электрод модельной структуры участка с высокой плотностью поверхностных состояний, составляющего всего 0.3% от общей площади полевого электрода S_m , уже вызывает на прямом ходе ВФХ в области глубокого обеднения появление немонотонности изменения емкости в виде характерного «горба». При линейном росте отрицательного обедняющего напряжения свыше -16 В наблюдается сначала подъем неравновесной емкости, а после -20 В следует ее плавный спад вплоть до реверса направления

развертки напряжения смещения. По мере увеличения доли площади участка 2 под полевым электродом до 28% (см. кривые 3-6) амплитуда горба и крутизна участка подъема растут, а неравновесная емкость МДП структуры может приблизиться к равновесному инверсионному значению C_{inv} . Однако и в этом случае по мере дальнейшей развертки напряжения смещения (свыше -24 В) емкость МДП структуры вновь начинает спадать.

Важно, что относительно небольшая разница в плотностях поверхностных состояний на участках 1 и 2 (всего в 7 раз) и малая доля площади участка 2 от полевого электрода могут обусловить для всей поверхности МДП структуры достаточно интенсивный генерационный поток неосновных носителей заряда. Так, для значения $S_2/S_m = 11\%$ (см. рис. 2, кривая 4) на участке подъема емкости скорость генерации носителей достигает величины $8.2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Таким образом нами экспериментально доказано, что крупномасштабная неоднородность распределения плотности поверхностных состояний в пределах площади полевого электрода МДП структуры приводит к появлению на участке глубокого обеднения прямого хода ВФХ аномалии в виде горба при линейной развертке напряжения смещения. Понять этот эффект можно в рамках модели, предложенной в [10]. Действительно, неоднородность плотностей поверхностных состояний и встроенного заряда на участках 1 и 2 под полевым электродом МДП структуры ведет к отставанию изменения поверхностного потенциала на участке с большей плотностью состояний от остальной части полупроводника. В этом случае при развертке напряжения смещения от обогащения к обеднению участок поверхности с малой плотностью состояний будет находиться уже в глубоком обеднении, тогда как на участке с большой плотностью состояний наступает всего лишь обеднение и только создаются условия для генерации носителей заряда через поверхностные уровни. При этом из-за разницы в поверхностных потенциалах образовавшиеся на участке 2 неосновные носители будут стекать в глубокую потенциальную яму, образованную окружающей глубоко обедненной поверхностью, и тем самым вызовут рост общей емкости МДП структуры. Интенсивная поверхностная генерация на участке 2 будет продолжаться до тех пор, пока не исчезнет разница в поверхностных потенциалах 1 и 2 участков МДП структуры. Только после этого неосновные носители начнут накапливаться и вблизи границы раздела Si-SiO₂ на участке генерации в достаточном количестве, чтобы в соответствии с теорией Шокли-Рида-Холла подавить поверхностную генерацию. В результате только после этого емкость МДП структуры в целом начнет опять убывать, поскольку ни поверхностная, ни объемная генерация носителей не смогут поддерживать равновесие зарядов при выбранной скорости развертки напряжения смещения.

Итак, после выполненного экспериментального моделирования и с учетом теоретической модели [10] немонотонность хода в виде горба на участке глубокого обеднения вольт-фарадной кривой можно однозначно связывать с наличием под полевым электродом МДП структуры локального по площади участка с повышенным уровнем плотности поверхностных состояний на границе раздела диэлектрик-полупроводник.

Работа выполнена при финансовой поддержке конкурсного центра фундаментального естествознания.

- [1] И.Г. Михайловский, В.Н. Овсяк, А.Е. Эпов. Письма ЖТФ, **9**, 1051 (1983).
- [2] О.В. Фролов, А.Е. Руденко. Микроэлектроника, **10**, 552 (1981).
- [3] Н.А. Абрамова, А.Г. Мосейчук, Г.Б. Семушкин. Proc XXVI Int. Wiss. Koll., TH Pflanz, GDR, **29** (1981).
- [4] В.А. Гуртов, М.В. Золотов. ФТП, **19**, 2127 (1985).
- [5] А.Э. Бендер, А.Г. Мосейчук, Г.Б. Семушкин. Электрон. техн., сер. 6, Материалы, вып. 4(280), 59 (1988).
- [6] В.Н. Вертопрахов, Б.М. Кучумов, Е.Г. Сальман. *Строение и свойства структур Si-SiO₂* (Новосибирск, 1981).
- [7] R.S. Nakhmanson, P.P. Dobrovolskij. Phys. St. Sol. (a), **19**, 699 (1972).
- [8] E.H. Nicollian, J.R. Brews. *MOS (Metal-Oxide-Semiconductor). Physics and Technology* (N.Y., 1982).
- [9] L.S. Wei, J.G. Simmons. Sol. St. Electron., **17**, 1021 (1974).
- [10] А.П. Горбань, А.Г. Мосейчук, Г.Б. Семушкин. Изв. вузов СССР. Физика, № 7, 107 (1987).

Редактор В.В. Чалдышев

Experimental modelling of planar nonuniform surface carriers generation in MIS-structures

A.G. Moseichuk

State Technical University, 195251 St.Petersburg, Russia

Non-equilibrium capacitance-voltage characteristics of deep depleted model MIS-structures were measured at room temperature. For this purpose, a *n*-Si-SiO₂ wafer with a planar step-wise distribution of the surface state density was specially prepared. A scanning mercury gate electrode of 1.5 mm diameter was used in order to model the nonuniform MIS-structures. There were two surface regions with different ($5 \cdot 10^{10}$ and $3.6 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$) surface state densities under gate electrode of the model MIS-structure. An anomalous course of the deep depletion *C-V* curves has been observed when the area of the high surface state density region was about 0.3–28% of that under the electrode. An empirical model of planar nonuniform minority carriers generation on the surface of MIS-structures was discussed.