

©1995 г.

## РЕЛАКСАЦИЯ ЗАРЯДА В КРЕМНИИ НА ГРАНИЦАХ ЗЕРЕН, ОВОГАЩЕННЫХ КИСЛОРОДОМ И УГЛЕРОДОМ

*Ю.М.Ильящук, А.К.Федотов*

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь  
(Получена 8 августа 1994 г. Принята к печати 5 сентября 1994 г.)

Приводятся результаты изучения влияния сегрегации кислорода и углерода на вольт-амперные характеристики границ зерен, спонтанно зарождающихся в процессе кристаллизации профилированного кремния. Показано, что на вольт-амперной характеристике такой границы проявляется гистерезис. Соответствующая долговременная релаксация напряжения может быть описана логарифмическим законом с гигантскими характерными временами ( $10^3 - 10^4$ ) с.

В данной работе приводятся результаты изучения вольт-амперных характеристик (ВАХ) одиночных плоских электрически активных границ зерен общего типа, спонтанно зарождающихся в процессе кристаллизации кремния (СЗГЗ), выращенного способом Степанова [1]. В работах [2-6] нами было показано, что СЗГЗ общего типа в структурном и электрическом смысле подобны естественным двойным гетеропереходам. При этом существенное влияние на характер движения носителей заряда поперек плоскости таких СЗГЗ оказывает присутствие на них преципитатов карбида и оксида кремния. Наличие таких преципитатов в окрестности СЗГЗ обусловлено спецификой получения кристаллов профилированного кремния (их рост через графитовый формообразователь) и подтверждается результатами металлографического и электронно-микроскопического анализов [2,3,7], а также данными оже-спектроскопии. В частности, локальная оже-спектроскопия при уровне локальности порядка (500-1000) Å показывает (рис. 1), что на некоторых границах общего типа количество углерода и кислорода может достигать нескольких атомных процентов, тогда как в объеме зерен их содержание не превышает  $10^{16}$  см<sup>-3</sup>.

Присутствие выделений SiC и SiO<sub>2</sub> на границах зерен приводит к возникновению ряда особенностей на ВАХ, измеряемых поперек плоскости границы зерен. Так, например, на таких СЗГЗ наблюдаются долговременные релаксации напряжения и, как следствие, гистерезис

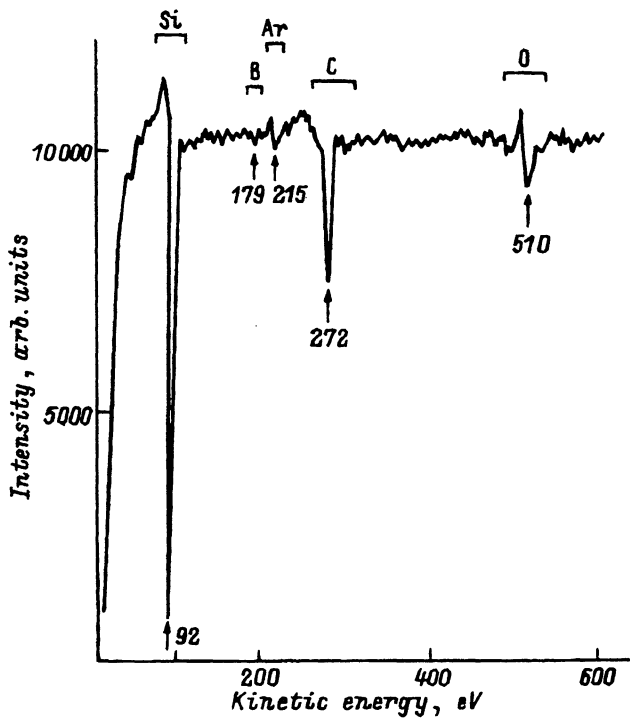


Рис. 1. Оже-спектр области границы, обогащенной углеродом и кислородом.

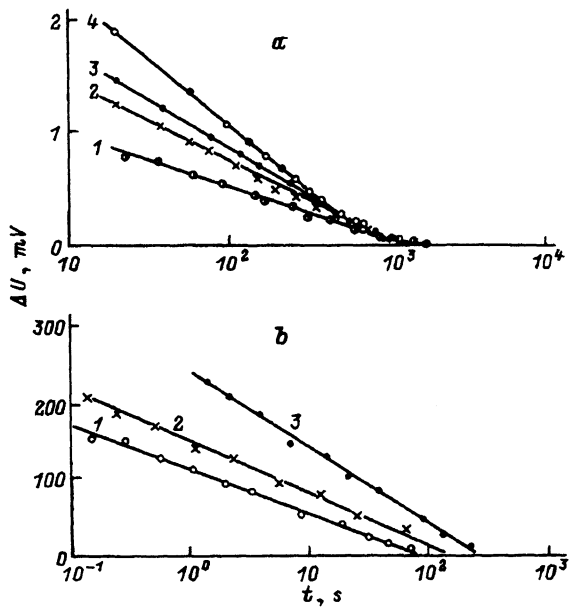


Рис. 2. Кривые релаксации напряжения поперечной ВАХ СЗГЗ при разных максимальных напряжениях  $U_{\max}$ . а —  $T = 300$  K;  $U_{\max}$ , В: 1 — 0.5, 2 — 0.74, 3 — 0.85, 4 — 0.89; б —  $T = 77$  K;  $U_{\max}$ , В: 1 — 0.84, 2 — 3.9, 3 — 5.2.

поперечной ВАХ. Эксперименты показали, что после импульсной подачи напряжения ( $U_{\max}$ ) на границу его релаксация во времени ( $t$ ) подчиняется логарифмическому закону (рис. 2):

$$\Delta U(t) = r \lg(t/t_0).$$

Здесь  $\Delta U(t) = U_{\max} - U(t)$ , а  $r = dU/d(\lg t)$  характеризует логарифмическую скорость релаксации поперечного напряжения смещения. Параметр  $t_0$  можно рассматривать как характерное время для процесса релаксации, достигавшее гигантских величин порядка ( $10^3 - 10^4$ ) с. Результаты обработки экспериментальных зависимостей релаксации напряжения на границе зерен, изображенных на рис. 2, представлены в таблице.

Логарифмический характер релаксации заряда на таких СЗГЗ свидетельствует о том, что связанные с преципитатами SiC и SiO<sub>2</sub> и глубокие центры захвата обеспечивают туннельный механизм движения носителей заряда, подобный наблюдаемому в МНОП структурах [8]. Учитывая гетеропереходный характер СЗГЗ общего типа в профилированном кремнии [6,9], энергетическую диаграмму в окрестности такого рода границ (или их участков) с карбидно-оксидными преципитатами можно качественно представить в виде гетероструктуры типа [Si (зерно)]-SiO<sub>2</sub>-SiC-[металл («ядро» СЗГЗ)]-SiC-SiO<sub>2</sub>-[Si (зерно)]. Пространственное разделение областей с преобладанием SiC либо SiO<sub>2</sub> может быть обусловлено различием коэффициентов диффузии кислорода и углерода в кремнии. Следуя [8,10], образование ловушек (в карбиде кремния) можно приписать атомам кремния с измененной координатой (возникающим, например, из-за наличия дислокаций на границе зерен либо оборванных связей на границе раздела кремний-карбид). При этом естественно предположить наличие трех различных зарядовых состояний у таких дефектов в запрещенной зоне SiC. Нейтральный дефект  $D^0$  в этом случае располагается по энергии между заряженными дефектами  $D^+$  и  $D^-$ . Отрицательно заряженный дефект  $D^-$  с двумя электронами на оборванной связи кремния лежит в области энергий около потолка валентной зоны, тогда как положительно заряженное состояние  $D^+$  оборванной связи с двумя дырками находится вблизи дна зоны проводимости. При приложении напряжения поперек плоскости границы носители заряда могут туннелировать через включения SiC

Параметры релаксации поперечных ВАХ для СЗГЗ общего типа, обогащенной кислородом и углеродом

$T, K$	$t_0, c$	$r$	$U_{\max}, B$
300	1553.3	0.4397	0.50
	1255.1	0.7059	0.74
	1160.4	0.8493	0.85
	861.3	1.1515	0.89
77	69.58	61.071	1.84
	150.48	69.730	3.90
	265.65	97.616	5.20

и  $\text{SiO}_2$ , захватываясь заряженными ловушками. При захвате электрона (дырки) на центр  $D^+$  ( $D^-$ ) происходит переход дефекта  $D^+$  ( $D^-$ ) в состояние  $D^0$ . Увеличение концентрации нейтральных дефектов в результате туннельной релаксации заряда и может объяснить релаксацию ВАХ в этой модели.

Авторы благодарят С.И. Власкину за помощь в проведении спектроскопии СЗГЗ и Е.А. Каца за предоставление образцов профилированного кремния.

### Список литературы

- [1] А.В. Артемьев, С.С. Горелик, Б.Н. Евтодий и др. Изв. АН СССР. Сер. физ., **52**, 1951 (1988).
- [2] А.В. Артемьев, С.С. Горелик, Б.Н. Евтодий и др. Препринт ИПТМ и ОМ АН СССР (Черноголовка, 1989).
- [3] А.К. Fedotov, В.Н. Evtody, Е.А. Katz, Ю.М. Pyashuk. Phys. St. Sol. (a), **119**, 523 (1990).
- [4] А.К. Fedotov, В.Н. Evtody, Е.А. Katz et al. J. Cryst. Growth, **104** 186 (1990).
- [5] А.К. Федотов, Б.Н. Евтодий, Е.А. Кац, Ю.М. Ильяшук. Тез. докл. VII Всес. конф. по физике полупроводн. (Киев, 1990) ч. 2, с. 267.
- [6] Ю.М. Ильяшук, А.К. Федотов. Вестн. Белорус. ун-та. Сер. 1, Физика, математика, механика, № 3, 20 (1990).
- [7] Е.А. Кац. Автореф. канд. дис. (М., 1990).
- [8] В.Н. Селезнев. Тр. ФИ им. П.Н. Лебедева, **184**, 90 (1987).
- [9] Ю.М. Ильяшук, В.В. Углянец, А.К. Федотов. Вестн. Белорус. ун-та. Сер. 1, Физика, математика, механика, № 1, 24 (1994).
- [10] K.L. Ngai, I. Hsia. Appl. Phys. Lett., **42**, 159 (1983).

Редактор Т.А. Полянская

## The charge relaxation in silicon at grain boundaries after their enrichment with oxygen and carbon

*Yu.M. Pyashuk, A.K. Fedotov*

Minsk State University, 220050 Minsk, Belarus