

КИНЕТИКА НАКОПЛЕНИЯ И ОТЖИГА ПОВЕРХНОСТНЫХ СОСТОЯНИЙ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА СТРУКТУР КРЕМНИЙ—ОКИСЕЛ КРЕМНИЯ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ

Крылов Д. Г., Ладыгин Е. А., Горюнов Н. Н.

С помощью методики снятия подпороговых ВАХ получены данные о кинетике накопления и отжига поверхностных состояний (ПС) на границе раздела кремний—окисел кремния транзисторных МОП структур после облучения электронами с энергией 6 МэВ потоками $5 \cdot 10^{14} - 10^{17} \text{ см}^{-2}$. В распределении плотности ПС наблюдаются два максимума: первый расположен вблизи $E_v + 0.35 \text{ эВ}$, второй — вблизи $E_c - 0.34 \text{ эВ}$. Обнаружено, что потоковые зависимости плотности ПС имеют максимум вблизи $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Показано, что кинетика изотермического отжига плотности ПС при температуре 200°C в воздушной среде имеет двухстадийный характер: в течение первых 20 мин происходит резкое снижение плотности ПС, затем наблюдается ее медленное изменение. Временная зависимость плотности ПС аппроксимируется суммой двух экспонент. Представлены возможные модели, объясняющие качественно наблюдаемые потоковые и временные зависимости.

Известно, что свойства кремниевых МОП структур в значительной мере зависят от совершенства границы раздела (ГР) кремний—окисел кремния. Количественно совершенство ГР можно описать плотностью поверхностных состояний (ПС). Для оценки величины плотности ПС на ГР транзисторных МОП структур существует методика снятия подпороговых ВАХ [1]. Ранее [2] были изучены условия применимости данной методики для оценки плотности ПС на ГР кремний—окисел кремния в КМОП структурах. В этой работе была усовершенствована техника снятия подпороговых ВАХ и предложены соответствующие аналитические выражения. С помощью методики снятия подпороговых ВАХ в КМОП структурах, облученных электронами с энергией 6 МэВ, были обнаружены два

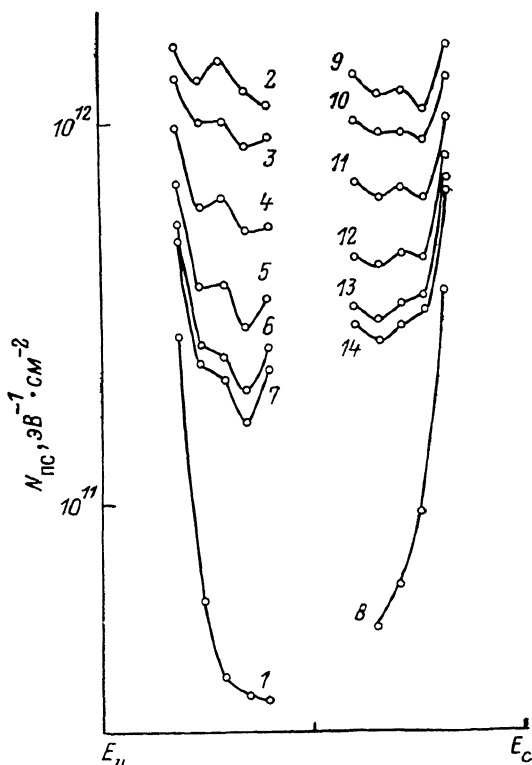


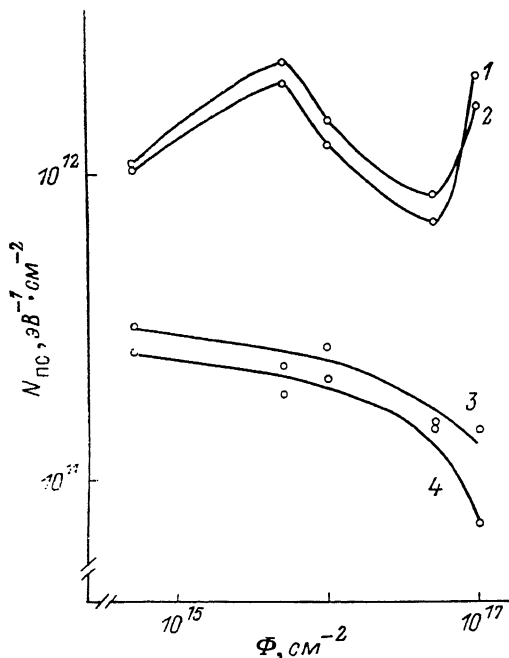
Рис. 1. Распределение плотности ПС на ГР кремний—окисел кремния КМОП структуры до и после облучения.

1-7 — p-канальный, 8-14 — n-канальный транзисторы КМОП структуры. 1, 8 — до облучения; после облучения с длительностью отжига, мин: 2, 9 — 5; 3, 10 — 10; 4, 11 — 20; 5, 12 — 60; 6, 13 — 150; 7, 14 — 240.

максимума в энергетическом спектре плотности ПС: $E_v + 0.35$ и $E_c - 0.37 \text{ эВ}$. В настоящей работе представлены результаты исследования кинетики накопления и отжига плотности ПС на ГР кремний—окисел кремния.

В качестве исследуемых структур были выбраны элементы КМОП микросхем 176ЛП1. Оценка плотности ПС проводилась по подпороговому ВАХ, снятым с *n*- и *p*-канальных транзисторов КМОП структур до и после обработки быстрыми электронами. Облучение проводилось электронами с энергией 6 МэВ потоками $5 \cdot 10^{14} - 10^{17} \text{ см}^{-2}$. После операции облучения проводился различной длительности стабилизирующий отжиг на воздухе при температуре 200 °С.

Расчитанные по подпороговому ВАХ распределения плотности ПС до и после облучения для ряда значений длительности отжига представлены на рис. 1.



С ростом потока быстрых электронов вид распределения не изменяется и в нем наблюдаются два максимума: первый расположен вблизи $E_c + 0.35 \text{ эВ}$ (*p*-канальный МОП транзистор), второй — вблизи $E_c - 0.34 \text{ эВ}$ (*n*-канальный МОП транзистор), погрешность оценки их энергетических положений составляет 0.03 эВ. Энергетический спектр ПС на ГР КМОП структур представляет собой сумму локализованных в запрещенной зоне и непрерывно *U*-образно распределенных состояний. Абсолютные значения плотности ПС в максимумах распределения близки друг к другу.

Рис. 2. Поточковая зависимость плотности ПС на ГР кремний—окисел кремния КМОП структур.

1, 3 — *n*-канальный; 2, 4 — *p*-канальный транзисторы. Длительность отжига, мин: 1, 2 — 5; 3, 4 — 240.

Эти значения будем использовать при исследовании кинетики изменения плотности ПС на ГР КМОП структур.

Результаты исследования кинетики изменения плотности ПС с ростом потока быстрых электронов для двух значений длительности отжига показаны на рис. 2. Для длительности отжига 5 мин наблюдается максимум при потоке $5 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$, рост плотности ПС при потоке 10^{17} см^{-2} вызван нестабильностью в приграничной области полупроводника. Для длительности отжига 240 мин наблюдается монотонный спад плотности ПС с ростом потока быстрых электронов.

Поток электронов, см^{-2}	Постоянная отжига $a \cdot 10^3, \text{с}^{-1}$		Постоянная отжига $b \cdot 10^3, \text{с}^{-1}$	
	<i>n</i> -канал	<i>p</i> -канал	<i>n</i> -канал	<i>p</i> -канал
$5 \cdot 10^{14}$	1.4 ± 0.3	1.3 ± 0.4	3.2 ± 0.5	3.7 ± 0.5
$5 \cdot 10^{15}$	2.1 ± 0.2	2.4 ± 0.4	2.6 ± 0.4	6.5 ± 1.4
10^{16}	1.5 ± 0.1	1.7 ± 0.2	3.9 ± 0.5	5.1 ± 0.6
$5 \cdot 10^{16}$	1.1 ± 0.4	1.2 ± 0.3	4.7 ± 0.5	4.4 ± 0.4

Результаты исследования кинетики отжига плотности ПС показаны на рис. 3. С ростом потока вид зависимости плотности ПС от длительности отжига не изменяется. Отжиг на воздухе при температуре 200 °С представляет собой двухстадийный процесс. В течение первых 20 мин происходит резкое снижение плотности ПС, затем наблюдается ее медленное изменение. Зависимость плотности ПС от времени отжига аппроксимируется суммой двух экспонент: $A \exp(-at) + B \exp(-bt)$. Поточковые зависимости параметров аппроксимации кинетики отжига *A* и *B* показаны на рис. 4, а параметров *a* и *b* — в таблице. Отметим, что

параметры кинетики отжига плотности ПС, соответствующей максимумам распределения, близки друг к другу.

Для объяснения механизма двухстадийного отжига плотности ПС на ГР кремний—окисел кремния КМОП структур можно предложить следующие модели.

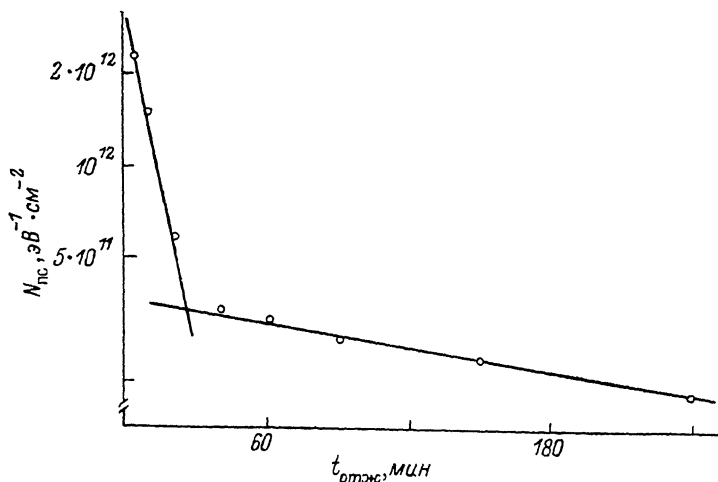


Рис. 3. Зависимость плотности ПС на ГР кремний—окисел кремния КМОП структуры от длительности отжига.

1. Первые 20—30 мин отжиг ПС идет по типу химической реакции с участием некоторой компоненты (например, водорода). В случае малого содержания этой компоненты на ГР она полностью потребляется в первые 20 мин и происходит изменение механизма отжига. Сильная обратимая потоковая зависимость параметра A и постоянной отжига a объясняется увеличением с ростом потока быстрых электронов до $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ количества освобожденного в окисле водорода, который мигрирует к ГР. Снижение значений параметров при потоке выше $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ обуславливается захватом в окисле освобожденного водорода генерируемыми облучением ловушками.

2. На ГР существуют два типа ПС, различные по своей природе. Первый тип ПС соответствует U -образному непрерывному распределению плотности ПС, второй — его максимумам.

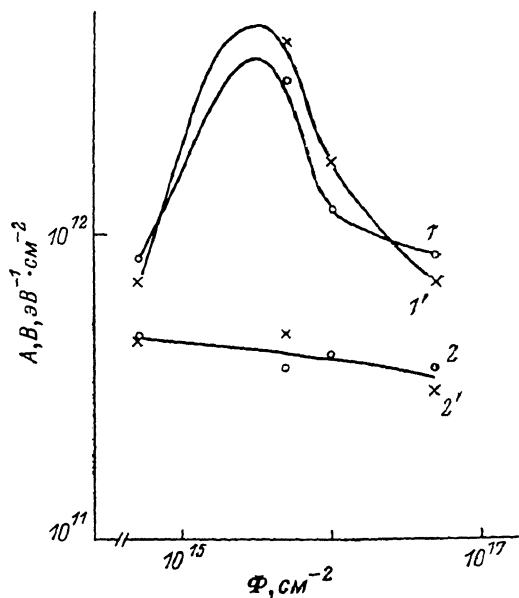


Рис. 4. Потоковая зависимость параметров аппроксимации A (1, 1'), B (2, 2').

1, 2 — n -канальный, 1', 2' — p -канальный МОП транзисторы.

Результаты эксперимента (близость количественных характеристик накопления и отжига) позволяют сделать вывод, что ПС, соответствующие максимумам распределения плотности ПС, имеют одну природу. Из анализа литературных данных [3, 4] можно предположить, что в результате облучения быстрыми электронами на ГР кремний—окисел кремния образуется амфотерный комплекс — кремний с одним несвязанным электроном $\equiv \text{Si}$, характеризующийся двумя глубокими уровнями в запрещенной зоне кремния.

ПС, соответствующие U -образному непрерывному распределению, представляют собой напряженные связи на ГР [5]. Поскольку максимумы распределения плотности ПС наблюдаются при длительности отжига выше 60 мин, можно предположить, что быстрое изменение плотности ПС в течение первых 20 мин обусловлено отжигом напряженных связей, имеющим меньшую энергию активации по сравнению с амфотерным комплексом. Обратимая потоковая зависимость параметра A и постоянной отжига a объясняется увеличением с ростом потока быстрых электронов до $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ упругих напряжений на ГР [6]. Дальнейшее снижение значений параметров обуславливается структурной перестройкой ГР. Изменение плотности ПС после 20 мин обуславливается отжигом амфотерного комплекса. Отметим, что параметр B (плотность амфотерного комплекса после облучения) слабо зависит от величины потока быстрых электронов. Это обуславливается, вероятно, насыщением плотности комплекса в области используемых значений потока.

Таким образом, с помощью методики снятия подпороговых ВАХ были получены данные о распределении плотности ПС на ГР кремний—окисел кремния КМОП структур до и после облучения быстрыми электронами. В этом распределении обнаружены два максимума: первый расположен вблизи $E_c + 0.35 \text{ эВ}$, второй — вблизи $E_c - 0.34 \text{ эВ}$. Распределения плотности ПС, аналогичные полученным в данной работе спектрам, наблюдались ранее с помощью методики снятия вольфарадных характеристик [7] и метода релаксационной спектроскопии глубоких уровней [8]. Поточковые зависимости плотности ПС имеют максимум вблизи $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Показано, что кинетика изотермического отжига плотности ПС при температуре $200 \text{ }^\circ\text{C}$ имеет двухстадийный характер. Представлены возможные модели, объясняющие качественно наблюдаемые потоковые и временные зависимости.

Список литературы

- [1] Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Т. 2. М., 1984. 456 с.
- [2] Крылов Д. Г. // Электрон. техн. Сер. 2. 1989. № 3. С. 79—83.
- [3] Griscom D. L. // J. Appl. Phys. 1986. V. 58. N 7. P. 2524—2533.
- [4] Johnson N. M. et al. // Appl. Phys. Lett. 1983. V. 43. N 6. P. 563—565.
- [5] Vengurlekar A. S., Lakshmana V., Ramanathan R. V. // Appl. Surf. Sci. 1985. V. 22/23. P. 974—982.
- [6] Герасименко Н. Н., Мордкович В. Н. // Поверхность. 1987. № 6. С. 5—17.
- [7] Poindexter E. H., Geradi G. J., Ruckel M.-E., Caplan P. J. // J. Appl. Phys. 1984. V. 56. N 10. P. 2844—2849.
- [8] Biegelsen D. K., Johnson N. M., Stuzmann M., Poindexter E. H., Caplan P. J. // Appl. Surf. Sci. 1985. V. 22/23. P. 879—890.

Московский институт стали и сплавов

Получена 25.09.1989
Принята к печати 17.01.1990