

*И. К. БЕЙСЕМБЕТОВ, К. Х. НУСУПОВ, Н. Б. БЕЙСЕНХАНОВ, С. К. ЖАРИКОВ,
Б. К. КЕНЖАЛИЕВ, Т. К. АХМЕТОВ, Б. Ж. СЕИТОВ*

(Казахстанско-Британский технический университет, Алматы, Республика Казахстан)

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АТОМОВ УГЛЕРОДА В КРЕМНИИ ПОСЛЕ ВЫСОКОДОЗОВОЙ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ C⁺ В Si

Аннотация. В работе осуществлен синтез однородных пленок карбида кремния методом многократной ионной имплантации. С этой целью проведена высокодозовая имплантация ионов углерода с энергиями 40, 20, 10, 5 и 3 кэВ в монокристаллические пластины кремния. Выполнено сравнение расчетного профиля рас-пределения атомов углерода в кремнии с экспериментальными профилями, полученными методом Оже-электронной спектроскопии. Показано, что синтезирован однородный слой SiC_{0,7}, концентрация углерода в котором в процессе высокотемпературного отжига существенно не изменилась. Наблюдается окисление поверхности слоя. Значительный избыток атомов кислорода над стехиометрическим составом диоксида кремния (SiO₂) после отжига свидетельствует о насыщении приповерхностного слоя атомами кислорода. Результаты могут быть использованы в нано- и микроэлектронике, а также при синтезе твердых, жаростойких и абразивных материалов, используемых в промышленности. Установлено, что деформация прямоугольного Оже профиля распределения атомов C в Si, проявляющаяся в утончении переходной области «SiC пленка – подложка Si», увеличении концентрации углерода у поверхности и в максимумах распределения углерода для отдельных энергий ионов (40, 20 кэВ), а также уменьшении концентрации углерода между этими максимумами, обусловлены эффектами распыления поверхности и изменением состава слоя при высокодозовой имплантации углерода в кремний.

Ключевые слова: карбид кремния, ионная имплантация, структура, кристаллизация.

Тірек сөздер: кремний карбиді, иондық имплантация, құрылым, кристалдану.

Keywords: silicon carbide, ion implantation, structure, crystallization.

Введение. Широкая запрещенная зона карбида кремния ($E_g = 2.3-3.5$ эВ в зависимости от политипа), его высокая теплопроводность, химическая и радиационная стойкость, высокая температура плавления и высокая твердость (4-е место после алмаза) [1] стали основой для широкого применения как в микроэлектронике [2], так и в качестве жаростойких и абразивных материалов, используемых для конструкций передней стенки термоядерных реакторов, в покрытиях корпуса космических кораблей типа «Спейс Шаттл» [3], при изготовлении буров и нарезных дисков из SiC и т.д. Полевые транзисторы, диоды и другие электронные приборы на основе SiC обладают рядом преимуществ, среди которых – возможность работы при температурах до 600°C, высокие быстродействие и радиационная стойкость [4, 5]. Способность карбида кремния к окислению с образованием SiO₂ может найти применение в устройствах, изготовленных на подложке Si (мощные МОП-транзисторы и др.).

Перспективным методом создания слоев SiC на кремнии, хорошо совместимым с кремниевой приборной технологией, является метод ионно-лучевого синтеза – имплантация ионов углерода C⁺ в кремниевую подложку, позволяющий с малым уровнем загрязнений создавать слои SiC на заданной глубине [6–9]. Кристаллические пленки β-SiC высокого качества на SiO₂ могут быть получены многократной имплантацией ионов C в Si и селективным окислением верхнего слоя Si [10]. Формирование этим методом

наноструктурированных систем, содержащих включения нано-кристаллов и кластеров Si, SiC и C в SiO₂, обеспечивает за счет размерных эффектов люминесценцию во всей видимой области спектра [11].

В данной работе исследуются характеристики пленок SiC_{0,7}, синтезированных методом ионной имплантации. Рассмотрено влияние распыления и изменения состава поверхности при высоко-дозовой имплантации на распределение атомов C в Si.

Эксперимент

Имплантация углерода была произведена в монокристаллические пластины Si ориентации (100) размером 7×7×0,3 мм³ и удельным сопротивлением 4–5 Ом·см [12, 13]. Для предотвращения разогрева образца (20–25°C) плотность ионного тока не превышала 3 мкА/см².

Для получения однородных слоев SiC_{0,7} (N_C/N_{Si} = 0,7) с прямоугольным профилем распределения атомов C в Si имплантация ионов углерода различных энергий и доз в кремний была осуществлена последовательно в порядке, как указано в таблице 1. Отжиг образцов был выполнен при температуре 1250°C в течение 30 мин в атмосфере Ar с незначительным содержанием O₂. Состав слоев измерен методом Оже-электронной спектроскопии: диаметр падающего пучка 1 мкм, энергия 10 кэВ, угол падения 45°, диаметр сканируемой области 300 мкм, вакуум 1,33·10⁻⁸ Па, угол падения Ar⁺ пучка 45°.

Таблица 1 – Величины энергии E , дозы D , проективного пробега $R_p(E)$ среднеквадратичного отклонения $\Delta R_p(E)$

ионов ¹²C⁺ в Si, использованных для формирования слоев SiC_{0,7}

E , кэВ		40	20	10	5	3
$D(\text{SiC}_{0,7})$, 10 ¹⁷ см ⁻²		2,80	0,96	0,495	0,165	0,115
Профиль $N_C(\text{Gibbons})$ [14]	$R_p(E)$, нм	93,0	47,0	24,0	12,3	7,5
	$\Delta R_p(E)$, нм	34,0	21,0	13,0	7,0	4,3

Результаты

Методом Оже-электронной спектроскопии определен в процентном соотношении элементный состав приповерхностного слоя кремния после имплантации ионов углерода (а) с энергиями и дозами согласно таблице 1 и отжига при температуре 1250°C в течение 30 мин (б) (рисунок 1).

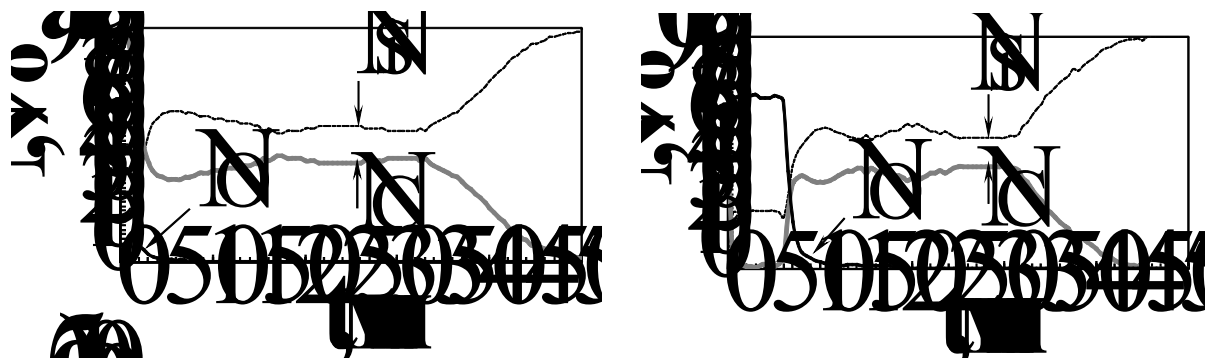


Рисунок 1 – Элементный состав приповерхностного слоя кремния после имплантации ионов углерода (а) (таблица 1) и отжига при температуре 1250°C в течение 30 мин (б), определенный методом Оже-электронной спектроскопии в зависимости от времени травления пучком ионов аргона

На рисунке 2 представлен расчетный профиль $N_C(\text{Gibbons})$ распределения атомов углерода по глубине кремния для значений энергий и доз ионов согласно таблице 1, который является суммой гауссовых распределений, построенных с использованием величин $R_p(E)$ и $\Delta R_p(E)$ [14] (LSS) в соответствии с выражением:

$$N(x) = \frac{D}{\Delta R_p (2\pi)^{1/2}} \exp\left[-\frac{(x - R_p)^2}{2\Delta R_p^2}\right], \quad (1)$$

где x – расстояние от поверхности (таблица 2). При этом сконструированный профиль распределения внедренных атомов оказался по форме близок к прямоугольному с широким переходным слоем «пленка- подложка».

Распределение величин N_C/N_{Si} построено, исходя из допущения, что концентрация атомов Si после имплантации существенно образом не меняется по глубине и приблизительно равна концентрации в монокристалле кремния, то есть $N_{Si} = 5 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$. Действительно, концентрация атомов кремния в монокристалле карбида кремния не отличается существенно и равна $4,83 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$. Это допущение имеет важное значение при высокодозовой имплантации ионов $^{12}\text{C}^+$ в Si и основано на факте, что объем алмазоподобной элементарной ячейки карбида кремния (SiC) приблизительно в два раза меньше объема элементарной ячейки (Si) и высокодозовая имплантация углерода не

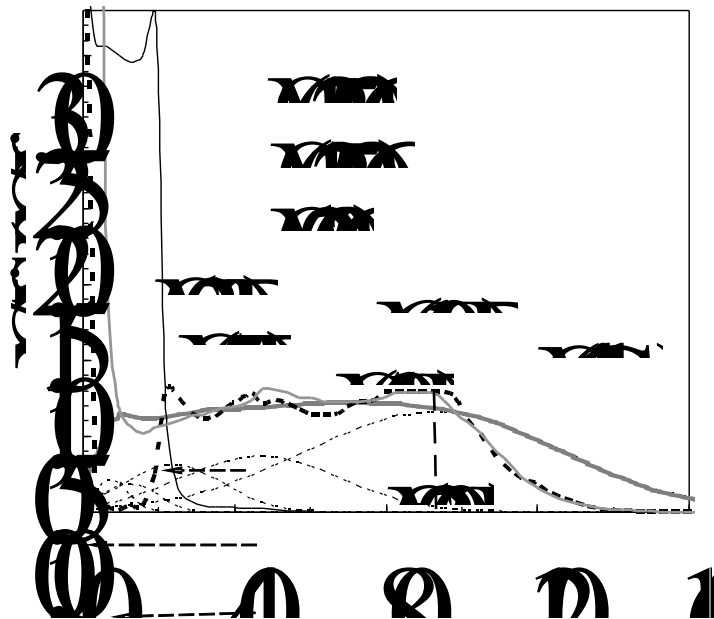


Рисунок 2 – Профиль распределения ^{12}C в Si (слой $\text{SiC}_{0.7}$), полученный методом ионной имплантации (таблица 1): $N_C(\text{Gibbons}) = N_C(40 \text{ кэВ}) + N_C(20 \text{ кэВ}) + N_C(10 \text{ кэВ}) + N_C(5 \text{ кэВ}) + N_C(3 \text{ кэВ})$ – расчетный профиль,

построенный в соответствии с [16], $N_C(20^\circ\text{C})$, $N_C(1250^\circ\text{C})$ и $N_O(1250^\circ\text{C})$ – Оже профили атомов углерода и кислорода, соответственно, в слое после имплантации (20°C) и отжига при $T = 1250^\circ\text{C}$ в течение 30 минут

сопровождается существенными процессами набухания слоя. Разумеется, допущение справедливо только при условии $N_C < N_{Si}$. Действительно, большинство стандартных методов моделирования ионной имплантации сформулировано в приближении низких доз легирования [15, 16]. По мнению [17], такой подход не учитывает целого ряда эффектов, проявляющихся при высокодозовой ионной имплантации и связанных с процессом накопления имплантированной примеси, каскадного перемешивания, распыления и набухания мишени.

Здесь же приведены экспериментальные кривые N_C/N_{Si} и N_O/N_{Si} [рисунок 2, кривые $N_C(20^\circ\text{C})$, $N_C(1250^\circ\text{C})$ и $N_O(1250^\circ\text{C})$], полученные методом Оже-электронной спектроскопии, показывающие отношение концентраций атомов С и О к Si по глубине образца после имплантации (20°C) и отжига при 1250°C в течение 30 мин в атмосфере Ar.

Однако в результате послойного элементного анализа методом Оже-электронной спектроскопии обычно получают зависимость процентного соотношения количества атомов элементов от времени травления поверхности пучком ионов Ar. Трансформация этой зависимости в распределение атомов по глубине представляет собой отдельную задачу. В данном случае при построении экспериментальных зависимостей распределения атомов по глубине сделано предположение, что переходный слой «пленка-подложка» для расчетного и экспериментальных профилей начинается приблизительно на одинаковой глубине [$R_p(40 \text{ кэВ}) = 93 \text{ нм}$]. Кроме того, распределения по глубине построены исходя из условия, что количество атомов С в Si после имплантации, а, следовательно, интегралы и площади под кривыми $N_C(\text{Gibbons})$ и $N_C(20^\circ\text{C})$, в первом приближении должны совпадать (таблица 2). На этом этапе эффекты распыления поверхности не учитываются.

Как выяснилось, суммарные площади под этими кривыми, определенные как $\Sigma(N_C/N_{Si}) \cdot \Delta x$ (где $\Delta x = x_{i+1} - x_i = 3,17105 \text{ нм}$ – толщина i-го слоя, а N_C/N_{Si} – отношение концентраций в середине i-го слоя), оказались равны $S_G = S_{20^\circ\text{C}} = 89,8 \text{ ед. (или 100\%)}$ (таблица 2), а после отжига при 1250°C : $S_{1250^\circ\text{C}} = 71,3 \text{ ед. (или 79,4\%)}$ в связи с появлением слоя оксида кремния. При этом равенство $S_G = S_{20^\circ\text{C}}$ не соблюдается, если $\Delta x \neq 3,17105 \text{ нм}$.

В тонком приповерхностном слое величина $N_C/N_{Si} \geq 1$ и достигает величин 5,2 и 48 (таблица 2). Однако увеличение N_C/N_{Si} происходит не из-за соответствующего роста концентрации атомов углерода, а вследствие уменьшения концентрации атомов кремния и существенного нарушения условия $N_{\text{кремний}} = 5 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$. Действительно, в этой области процентное содержание атомов Si существенно меняется по глубине (от 0 до 62% в пределах 0-4 мин травления ионами Ar) (рисунок 1а) и

Таблица 2 – Величины $k = N_C/N_{Si}$ по глубине кремния, имплантированного ионами углерода с энергиями 40, 20, 10, 5 и 3 кэВ ($N_C(x) = [D/(\Delta R_p \sqrt{2\pi})] \cdot \exp[-(x - R_p)^2 / 2\Delta R_p^2]$) и величины элементарных площадей S_i , пропорциональных количеству атомов углерода в слоях i толщиной 3,17 нм

E, кэВ	40	20	10	5	3	$N_C/N_{Si} = [N_C(40 \text{ кэВ}) + N_C(20 \text{ кэВ}) + N_C(10 \text{ кэВ}) + N_C(5 \text{ кэВ}) + N_C(3 \text{ кэВ})] / (5 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3})$			Площадь элемента под кривой профиля $S_i = \Delta x \cdot (k_i + k_{i+1}) / 2$, где $k = N_C/N_{Si} \leq 2,3$
						расчет н. Gibbons	экспер. 20°C	экспер. 1250°C	
$\Delta R_p, \text{ нм}$	34	21	13	7	4,3				$\Delta x = x_{i+1} - x_i = 3,17105$

$D, 10^{17} \text{ cm}^{-2}$	2,80	0,96	0,50	0,16 5	0,11 5	4,54	4,54	4,54	4,54	4,54	4,54
x, HM	k = Nc/Nsi								S _{Gibbons}	S _{20°C}	S _{1250°C}
0,0	0,01 6	0,030	0,05 6	0,04 0	0,04 7	0,188	48,00 0	5,200	0,86 1	7,29 3	3,81 2
3,2	0,02 0	0,041	0,08 5	0,08 0	0,12 9	0,355	11,10 0	0,104	1,42 0	6,04 6	0,23 0
6,3	0,02 6	0,056	0,12 2	0,13 1	0,20 6	0,540	1,513	0,041	1,86 5	3,46 4	0,07 8
9,5	0,03 2	0,074	0,16 5	0,17 4	0,19 1	0,636	0,672	0,008	2,01 9	1,97 1	0,08 9
12,7	0,04 0	0,096	0,21 0	0,18 8	0,10 3	0,637	0,571	0,048	1,99 6	1,72 2	0,13 3
15,9	0,05 0	0,121	0,25 2	0,16 5	0,03 2	0,621	0,515	0,036	1,97 0	1,70 3	0,45 3
19,0	0,06 2	0,150	0,28 5	0,11 9	0,00 6	0,621	0,559	0,250	1,98 5	1,80 6	1,68 1
22,2	0,07 5	0,182	0,30 4	0,06 9	0,00 1	0,631	0,580	0,810	2,02 0	1,88 4	2,48 1
25,4	0,09 1	0,215	0,30 5	0,03 3	0,00 0	0,644	0,608	0,755	2,06 4	1,97 7	2,23 6
28,5	0,10 9	0,248	0,28 9	0,01 3	0,00 0	0,658	0,639	0,655	2,10 7	2,02 6	2,01 7
31,7	0,12 9	0,280	0,25 7	0,00 4	0,00 0	0,671	0,639	0,617	2,13 9	2,07 9	1,98 2
34,9	0,15 2	0,309	0,21 6	0,00 1	0,00 0	0,678	0,672	0,633	2,15 8	2,16 7	2,09 6
38,1	0,17 8	0,333	0,17 1	0,00 0	0,00 0	0,682	0,695	0,689	2,16 8	2,21 3	2,26 1
41,2	0,20 6	0,351	0,12 8	0,00 0	0,00 0	0,685	0,701	0,737	2,17 7	2,28 3	2,40 7
44,4	0,23 7	0,362	0,09 0	0,00 0	0,00 0	0,688	0,739	0,781	2,19 0	2,46 9	2,35 9
47,6	0,26 9	0,365	0,05 9	0,00 0	0,00 0	0,693	0,818	0,707	2,20 8	2,56 9	2,28 9

50,7	0,30 3	0,359	0,03 7	0,00 0	0,00 0	0,699	0,802	0,737	2,22 9	2,51 8	2,28 9
53,9	0,33 9	0,346	0,02 2	0,00 0	0,00 0	0,707	0,786	0,707	2,25 1	2,44 2	2,19 6
57,1	0,37 6	0,325	0,01 2	0,00 0	0,00 0	0,713	0,754	0,678	2,27 0	2,39 1	2,08 8
60,2	0,41 3	0,299	0,00 6	0,00 0	0,00 0	0,718	0,754	0,639	2,28 3	2,34 3	2,02 6
63,4	0,45 0	0,269	0,00 3	0,00 0	0,00 0	0,722	0,724	0,639	2,29 2	2,29 6	2,02 6
66,6	0,48 6	0,236	0,00 1	0,00 0	0,00 0	0,723	0,724	0,639	2,29 4	2,29 6	2,11 5
69,8	0,52 0	0,203	0,00 1	0,00 0	0,00 0	0,724	0,724	0,695	2,29 3	2,29 6	2,25 0
72,9	0,55 2	0,170	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,722	0,724	0,724	2,28 8	2,32 0	2,29 6
76,1	0,58 1	0,140	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,720	0,739	0,724	2,28 0	2,36 7	2,39 4
79,3	0,60 6	0,112	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,718	0,754	0,786	2,27 0	2,44 2	2,49 2
82,4	0,62 6	0,088	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,714	0,786	0,786	2,25 6	2,49 2	2,49 2
85,6	0,64 2	0,067	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,709	0,786	0,786	2,23 8	2,49 2	2,49 2
88,8	0,65 2	0,050	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,702	0,786	0,786	2,21 3	2,49 2	2,49 2
92,0	0,65 7	0,037	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,694	0,786	0,786	2,18 1	2,41 8	2,49 2
95,1	0,65 6	0,026	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,682	0,739	0,786	2,14 0	2,20 7	2,44 2
98,3	0,64 9	0,018	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,668	0,653	0,754	2,08 8	1,97 4	2,16 7
101,5	0,63 7	0,013	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,650	0,592	0,613	2,02 6	1,77 4	1,78 8
104,6	0,62 0	0,008	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,628	0,527	0,515	1,95 2	1,53 2	1,46 3

107,8	0,59 8	0,006	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,603	0,439	0,408	1,86 8	1,25 9	1,14 8
111,0	0,57 1	0,004	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,575	0,355	0,316	1,77 3	1,01 0	0,89 7
114,2	0,54 1	0,002	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,544	0,282	0,250	1,67 1	0,77 2	0,72 1
117,3	0,50 9	0,001	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,510	0,205	0,205	1,56 1	0,56 6	0,60 4
120,5	0,47 4	0,001	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,475	0,152	0,176	1,44 7	0,41 7	0,47 4
123,7	0,43 7	0,000	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,438	0,111	0,123	1,33 0	0,30 4	0,33 1
126,8	0,40 0	0,000	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,401	0,081	0,086	1,21 2	0,22 0	0,22 8
130,0	0,36 3	0,000	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,363	0,058	0,058	1,09 5	0,15 9	0,14 6
133,2	0,32 7	0,000	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,327	0,042	0,034	0,98 0	0,10 8	0,08 6
136,4	0,29 1	0,000	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,291	0,026	0,020	0,87 1	0,07 3	0,04 8
139,5	0,25 8	0,000	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,258	0,020	0,010	0,76 7	0,05 5	0,02 4
142,7	0,22 6	0,000	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,226	0,015	0,005	0,66 9	0,04 0	0,00 8
145,9	0,19 6	0,000	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,196	0,010	0,000	0,57 9	0,02 5	0,00 0
149,0	0,16 9	0,000	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,169	0,006	0,000	0,49 7	0,01 6	0,00 0
152,2	0,14 4	0,000	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,144	0,004	0,000	0,42 2	0,01 0	0,00 0
155,4	0,12 2	0,000	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,122	0,002	0,000	0,35 6	0,00 3	0,00 0
158,6	0,10 2	0,000	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,102	0,000	0,000	0,29 7	0,00 0	0,00 0
161,7	0,08 5	0,000	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,085	0,000	0,000	0,24 6	0,00 0	0,00 0

164,9	0,07 0	0,000	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,070	0,000	0,000	0,20 2	0,00 0	0,00 0
168,1	0,05 7	0,000	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,057	0,000	0,000	0,16 5	0,00 0	0,00 0
171,2	0,04 7	0,000	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,047	0,000	0,000	0,13 3	0,00 0	0,00 0
174,4	0,03 7	0,000	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,037	0,000	0,000	0,10 6	0,00 0	0,00 0
177,6	0,03 0	0,000	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,030	0,000	0,000	0,08 4	0,00 0	0,00 0
180,7	0,02 4	0,000	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,024	0,000	0,000	0,06 6	0,00 0	0,00 0
183,9	0,01 8	0,000	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,018	0,000	0,000	0,05 2	0,00 0	0,00 0
187,1	0,01 4	0,000	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,014	0,000	0,000	0,04 0	0,00 0	0,00 0
190,3	0,01 1	0,000	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,011	0,000	0,000	0,03 1	0,00 0	0,00 0
193,4	0,00 8	0,000	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,008	0,000	0,000	0,02 3	0,00 0	0,00 0
196,6	0,00 6	0,000	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,006	0,000	0,000	0,01 8	0,00 0	0,00 0
199,8	0,00 5	0,000	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,005	0,000	0,000	0,01 3	0,00 0	0,00 0
202,9	0,00 4	0,000	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,004	0,000	0,000	0,01 0	0,00 0	0,00 0
206,1	0,00 3	0,000	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,003	0,000	0,000	0,00 7	0,00 0	0,00 0
209,3	0,00 2	0,000	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,002	0,000	0,000	0,00 5	0,00 0	0,00 0
212,5	0,00 1	0,000	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,001	0,000	0,000	0,00 4	0,00 0	0,00 0
215,6	0,00 1	0,000	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,001	0,000	0,000	0,00 3	0,00 0	0,00 0
218,8	0,00 1	0,000	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,001	0,000	0,000	0,00 2	0,00 0	0,00 0

222,0	0,00 0	0,000	0,00 0	0,00 0	0,00 0	0,000	0,000	0,000	0,00 1	0,00 0	0,00 0
Итого ($\Sigma S_{(0-222 \text{ нм})}$), ед.:									89,8 0	89,8 0	71,3 2
Итого ($\Sigma S_{(0-222 \text{ нм})}$), %:									100, 00	100, 00	79,4 2
Итого ($\Sigma S_{(22,2-222 \text{ нм})}$), ед.:									77,6 8	65,8 0	64,8 5
Итого ($\Sigma S_{(22,2-222 \text{ нм})}$), %:									86,5 1	73,2 7	72,2 1

его концентрация много меньше, чем $5 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$. Кривая профиля N_C/N_{Si} в этой области не отражает распределение атомов углерода. Слой по составу преимущественно состоит из атомов углерода и $N_C/N_{Si} \sim 48$, но его концентрация не более чем в 2,3 раза ($N_{\text{графит}} = 11,6 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$) превосходит концентрацию атомов углерода в карбиде кремния. Поэтому при оценке количества атомов углерода в тонкой приповерхностной области, где $N_C > N_{Si}$, было сделано допущение, что N_C/N_{Si} не превышает 2,3 ($N_{\text{графит}} = 11,6 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ и $N_{\text{кремний}} = 5 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$).

Площади под кривыми профиля для участка $x > 22,2 \text{ нм}$ оказались оценочно $S_G = 77,7$ ед, $S_{20^\circ\text{C}} = 65,8$ ед и $S_{1250^\circ\text{C}} = 64,8$ ед, или 86,5%, 73,3% и 72,2%, соответственно (таблица 2). Эти величины до и после отжига для $x > 22,2 \text{ нм}$ почти равны, но меньше расчетной, так как существенная часть атомов углерода после имплантации оказалась сконцентрированной возле поверхности ($0 < x < 8 \text{ нм}$), при этом после отжига произошла десорбция углерода из слоя $0 < x < 22,2 \text{ нм}$ с формированием оксида кремния.

В итоге можно заключить, что синтезирован однородный слой $\text{SiC}_{0,7}$, концентрация углерода в котором в процессе высокотемпературного отжига не изменяется. Наблюдается окисление поверхности слоя. В первом приближении около 20,6% углерода в процессе отжига при температуре 1250°C в течение 30 мин десорбировало из слоя. Средние значения концентрации углерода и кислорода составили: $N_C/N_{Si} = 0,7$ в интервале $22,2 < x < 110 \text{ нм}$ и $N_O/N_{Si} \approx 3,0$ в поверхностном слое $0 < x < 22,2 \text{ нм}$. Значительный избыток атомов кислорода над стехиометрическим составом диоксида кремния (SiO_2) свидетельствует о насыщении приповерхностного слоя атомами кислорода после отжига. При этом наблюдается проникновение атомов кислорода до 45 нм вглубь слоя. Граница «пленка SiC – подложка Si» в эксперименте оказалась более резкой, чем ожидалось.

На рисунке 2 видно, что имеются некоторые различия между формой экспериментальных и расчетной кривых профиля распределения углерода. Распределение N_C (Gibbons) построено без учета эффекта распыления и изменения состава слоя при высокодозовой имплантации. Учет эффекта распыления поверхности при высокодозовой имплантации ионов углерода (40 кэВ , $2,8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$) предполагает смещение профиля вглубь слоя с ростом дозы, то есть к некоторому расширению профиля и, как следствие, к уменьшению концентрации углерода в пике распределения по сравнению с расчетным значением, поскольку площадь под кривой профиля должна остаться неизменной. Однако изменение состава подложки во время имплантации от монокристаллического Si до смеси атомов C и Si предполагает появление значительного количества Si-C- и C-C-связей, двойных Si=C-, C=C- и тройных связей, которые являются более сильными, чем Si-Si-

связи, а также появление прочных углеродных и углеродно-кремниевых кластеров. Это приводит к уменьшению величин $R_p(E)$ и $\Delta R_p(E)$ во время имплантации.

Уменьшение $R_p(E)$ снижает влияние эффекта распыления поверхности на положение максимума распределения атомов углерода, который должен остаться почти на прежней глубине. А уменьшение $\Delta R_p(E)$ должно вызвать рост концентрации углерода в максимуме пика и более резкое его снижение в направлениях вглубь и к поверхности слоя. Это вызовет уменьшение глубины залегания перехода «пленка SiC – подложка Si», который становится более резким с ростом дозы, а также появления впадины между максимумами 40 и 20 кэВ и, возможно, между 20 и 10 кэВ. Действительно, на рисунке 2 [кривые $N_C(20^\circ\text{C})$ и $N_C(1250^\circ\text{C})$] для слоя $\text{SiC}_{0,7}$ наблюдаются впадины на глубине 60–75 нм, которые могут быть вызваны этими эффектами.

Распыление поверхности при имплантации ионов углерода с энергиями 10, 5 и 3 кэВ должно привести к увеличению концентрации углерода у поверхности за счет сдвига максимумов распределения $N_C(3 \text{ кэВ})$ и $N_C(5 \text{ кэВ})$ в направлении максимума $N_C(10 \text{ кэВ})$. В результате этого наблюдается значительный рост концентрации углерода у поверхности.

Можно провести приблизительную оценку толщины слоя, подвергшегося распылению. Как видно из таблицы 2, в случае расчетного профиля величина $x = R_p + \Delta R_p$ для ионов с энергией 40 кэВ составляет $93 + 34 = 127$ нм, которой соответствует относительная концентрация углерода $N_C/N_{\text{Si}} = 0,40$. В случае Оже-профилей до и после отжига величина $N_C/N_{\text{Si}} = 0,40$ соответствует глубине $x \approx 109$ нм. Так как переходный слой «пленка-подложка» для расчетного и экспериментальных профилей начинается на одинаковой глубине $R_p(40 \text{ кэВ}) = 93$ нм, то уменьшение глубины залегания должно произойти вследствие уменьшения ΔR_p с 34 до 16 нм ($93 + 16 = 109$ нм).

Мы предполагаем, что уменьшение толщины слоя вследствие распыления было сравнимо с уменьшением величины R_p вследствие изменения состава слоя. Можно произвести оценку величины толщины слоя, подвергшегося распылению.

Как известно [18, с. 113], основным параметром, характеризующим процесс распыления, является коэффициент распыления K – число атомов, выбиваемых одним падающим ионом. Толщина h (м) распыленного слоя материала мишени равна $h = DK/N_0$, где D – доза ионов (м^{-2}), N_0 – концентрация атомов в мишени (м^{-3}).

Согласно модели, описывающей механизм катодного распыления [19, с. 20-21], коэффициент распыления для изотропных мишеней определяется выражением:

$$K = \frac{2K_0 \cdot N \cdot \sigma \cdot \sqrt{E/E_m}}{F \cdot E_s \cdot (1 + E/E_m)} \quad (2)$$

Здесь E – энергия бомбардирующих мишень ионов; N – концентрация атомов мишени, которую можно рассчитать по формуле

$$N = \frac{\rho}{M} N_A, \quad (3)$$

где ρ и M – плотность и молярная масса материала мишени, соответственно; N_A – число Авогадро.

Коэффициент K_0 зависит от заряда ядра бомбардирующих ионов z_1 и атомов мишени z_2 и периодически изменяются с изменением z_2 [19]:

$$\text{при } 3 \leq z_2 \leq 16$$

$$K_0 = 1,3 \cdot 10^{-10} \cdot z_2^{1/2} \left(1 + 0,25 \cdot \cos \left(\frac{2\pi z_2}{8} \right) \right) - 4,65 \cdot 10^{-12} (z_1 - 18) \text{ см}, \quad (4)$$

при $z_2 \geq 19$

$$K_0 = 1,3 \cdot 10^{-10} \cdot z_2^{1/2} \left(1 + 0,25 \cdot \cos \left(\frac{2\pi(z_2 + 2)}{18} \right) \right) - 4,65 \cdot 10^{-12} (z_1 - 18) \text{ см}. \quad (5)$$

Сечение экранирования $\sigma = \pi a^2$, где a – радиус экранирования, рассчитываемый по формуле [19]:

$$a = \frac{4,7 \cdot 10^{-9}}{\left(z_1^{2/3} + z_2^{2/3} \right)^{1/2}} \text{ см}. \quad (6)$$

Нормирующий коэффициент энергии F определяется по формуле [19]:

$$F = \frac{6,9 \cdot 10^6 \cdot a \cdot M_2}{z_1 \cdot z_2 \cdot (M_1 + M_2)} \text{ эВ}^{-1}, \quad (7)$$

где M_1 и M_2 – молярные массы бомбардирующих ионов и атомов мишени соответственно. E_m – это энергия, соответствующая максимуму в зависимости $K(E)$. Она связана с нормирующим коэффициентом энергии F соотношением $E_m = 0,3/F$. Энергия сублимации E_s для кремния равна 3,91 [19].

Результаты вычислений величин, представленных в выражениях (2)–(7), приведены в таблице 3. Величины коэффициентов распыления в таблице 3 получены для случая имплантации ионов углерода в кремний и не учитывают изменения состава пленки.

Таблица 3 – К расчету коэффициента K распыления кремния ионами углерода с энергиями 40, 20, 10, 5 и 3 кэВ в соответствии с выражением (2)

E	40000	20000	10000	5000	3000
N_{Si}	$4,996 \cdot 10^{22}$	$4,996 \cdot 10^{22}$	$4,996 \cdot 10^{22}$	$4,996 \cdot 10^{22}$	$4,996 \cdot 10^{22}$
Z_1	6	6	6	6	6
Z_2	14	14	14	14	14
K_0	$5,422 \cdot 10^{-10}$	$5,422 \cdot 10^{-10}$	$5,422 \cdot 10^{-10}$	$5,422 \cdot 10^{-10}$	$5,422 \cdot 10^{-10}$
ρ_2	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33
N_A	$6,022 \cdot 10^{23}$	$6,022 \cdot 10^{23}$	$6,022 \cdot 10^{23}$	$6,022 \cdot 10^{23}$	$6,022 \cdot 10^{23}$
M_1	12,011	12,011	12,011	12,011	12,011

M_2	28,086	28,086	28,086	28,086	28,086
A	$1,557 \cdot 10^{-9}$	$1,557 \cdot 10^{-9}$	$1,557 \cdot 10^{-9}$	$1,557 \cdot 10^{-9}$	$1,557 \cdot 10^{-9}$
Σ	$7,617 \cdot 10^{-18}$	$7,617 \cdot 10^{-18}$	$7,617 \cdot 10^{-18}$	$7,617 \cdot 10^{-18}$	$7,617 \cdot 10^{-18}$
F	$8,961 \cdot 10^{-5}$	$8,961 \cdot 10^{-5}$	$8,961 \cdot 10^{-5}$	$8,961 \cdot 10^{-5}$	$8,961 \cdot 10^{-5}$
E_m	3347,81	3347,81	3347,81	3347,81	3347,81
E_s	3,91	3,91	3,91	3,91	3,91
E/E_m	11,948	5,974	2,987	1,494	0,896
K	0,314	0,413	0,511	0,577	0,588
D	$2,8 \cdot 10^{17}$	$0,96 \cdot 10^{17}$	$0,495 \cdot 10^{17}$	$0,165 \cdot 10^{17}$	$0,115 \cdot 10^{17}$
h, нм	17,63	7,93	5,06	1,91	1,35
Σh , нм	33,88				

Таким образом, распыление кремния ионами углерода с энергиями и дозами согласно таблице 1 приводит к уменьшению толщины имплантированного слоя на 33,9 нм. Однако изменение состава слоя при высокодозовой имплантации и появление значительного количества Si-C- и C-C- связей, двойных Si=C-, C=C- и тройных связей, которые являются более сильными, чем Si-Si-связи, а также появление прочных углеродных и углеродно-кремниевых кластеров приведет к уменьшению коэффициента распыления и толщины распыленного слоя. При этом также происходит уменьшение толщины всего имплантированного слоя за счет уменьшения величин R_p и ΔR_p . Таким образом, предполагается существенное уменьшение толщины слоя. Принципиальное отличие от имплантации других типов ионов, например, азота [17], заключается в отсутствии распухания слоя, приводящего к компенсации уменьшения толщины слоя за счет уменьшения величин R_p и ΔR_p , вызванного увеличением плотности имплантируемой подложки. Все это предполагает продолжение исследований с применением современных программ расчета (TRIM, SRIM и др.), позволяющих решать задачи распыления неоднородных по составу и многослойных мишеней, а также программ, предназначенных для расчета профилей распределения при высокодозовой ионной имплантации.

Кроме того, формирование резкого перехода «пленка SiC – подложка Si» в случае высокодозовой имплантации ионов углерода в кремний позволяет предположить, что можно провести измерения толщины и плотности пленки методом рентгеновской рефлектометрии. Этот метод используется для осажденных пленок с очень резким переходом «пленка-подложка» и для ионно-имплантированных слоев обычно не применяется. Поэтому будут продолжены исследования имплантированного слоя методом рентгеновской рефлектометрии.

Заключение. Синтезирован однородный слой $SiC_{0,7}$, концентрация углерода в котором в процессе высокотемпературного отжига существенно не изменяется. Наблюдается окисление поверхности слоя. Средние значения концентрации углерода и кислорода

составили: $N_C/N_{Si} = 0,7$ в интервале $22,2 < x < 110$ нм и $N_O/N_{Si} \approx 3,0$ в поверхностном слое $0 < x < 22,2$ нм. Значительный избыток атомов кислорода над стехиометрическим составом диоксида кремния (SiO_2) свидетельствует о насыщении приповерхностного слоя атомами кислорода после отжига. В первом приближении около 20,6% атомов углерода в процессе отжига при температуре $1250^\circ C$ в течение 30 мин десорбировало из слоя. При этом наблюдается проникновение атомов кислорода до 45 нм вглубь слоя. Граница «пленка SiC – подложка Si» в эксперименте оказалась более резкой, чем ожидалось.

Показано, что деформация прямоугольного Оже профиля распределения атомов C в Si по сравнению с расчетным профилем, проявляющаяся в утончении переходной области «SiC пленка – подложка Si», увеличении концентрации углерода у поверхности и в областях между максимумами распределения углерода для отдельных энергий ионов (40, 20 кэВ), обусловлена эффектами распыления поверхности и изменением состава слоя при высокодозовой имплантации углерода в кремний. Вычислены коэффициенты распыления K подложки Si ионами C^+ с энергиями 40, 20, 10, 5 и 3 кэВ, которые составили: $K_{40} = 0,314$, $K_{20} = 0,413$, $K_{10} = 0,511$, $K_5 = 0,577$ и $K_3 = 0,588$. Толщина распыленного слоя кремния для использованных в работе доз ионов составила 33,9 нм. Предполагается уменьшение толщины имплантированного и распыленного слоев вследствие увеличения плотности и изменения состава слоя.

ЛИТЕРАТУРА

1 Liao F., Girshick S.L., Mook W.M., Gerberich W.W., Zachariah M.R. Superhard nanocrystalline silicon carbide films // *Appl. Phys. Lett.* – 2005. – Vol. 86. – P. 171913-171915.

2 Афанасьев А.В., Ильин В.А., Корляков А.В., Лебедев А.О., Лучинин В.В., Таиров Ю.М. Карбид кремния. Вклад СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Признание и перспективы // В кн. Физика и Технология микро- и наносистем / Под редакцией В. В. Лучинина и В. В. Малиновского. – СПб.: Изд. "Русская коллекция", 2011. – С. 50-86.

3 Oguri K., Sekigawa T. Heat resistant material and hot structure member both space shuttle, space shuttle, and method for producing heat resistant material for space shuttle // *United State Patent.* – Sep.16, 2004. – Pub. № US 2004/0180242 A1.

4 Yan H., Wang B., Song X.M., Tan L.W., Zhang S.J., Chen G.H., Wong S.P., Kwok R.W.M., Leo W.M.L. Study on SiC layers synthesized with carbon ion beam at low substrate temperature // *Diamond and related materials.* – 2000. – Vol. 9. – P. 1795-1798.

5 Chen D., Wong S.P., Yang Sh., Mo D. Composition, structure and optical properties of SiC buried layer formed by high dose carbon implantation into Si using metal vapor vacuum arc ion source // *Thin Solid Films.* – 2003. – Vol. 426. – P. 1-7.

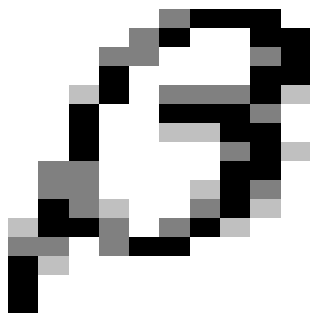
6 Liangdeng Y., Intarasiri S., Kamwanna T., Singkarat S. Ion beam synthesis and modification of silicon carbide // In book: Ion beam applications in surface and bulk modification of insulators. – Austria, Vienna: IAEA-TECDOC-1607. – 2008. – P. 63-92.

7 Lindner J.K.N. High-dose carbon implantations into silicon: fundamental studies for new technological tricks // *Appl. Phys. A.* – 2003. – Vol. 77. – P. 27-38.

8 Borders J.A., Picraux S.T., Beezhold W. Formation of SiC in silicon by ion implantation // Appl. Phys. Lett. – 1971. – Vol. 18. – 11. – P. 509-511.

9 Bayazitov R.M., Haibullin I.B., Batalov R.I., Nurutdinov R.M., Antonova L.Kh., Aksenov V.P., Mikhailova G.N. Structure and photoluminescent properties of SiC layers on Si, synthesized by pulsed ion-beam treatment // Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. B. – 2003. – Vol. 206. – P. 984-988.

10 Serre C., Romano-Rodríguez A., Pérez-Rodríguez A., Morante J. R., Fonseca L., Acero M.C., Kögler R. and Skorupa W. β -SiC on SiO₂ formed by ion implantation and bonding for



micromechanics applications // Sensors and Actuators A (Physical). – 1999. – 74. – № 1-3. – P. 169-173.

micromechanics applications // Sensors and Actuators A (Physical). –

11 Tetelbaum D.I., Mikhaylov A.N., Belov A.I., Vasiliev V.K., Kovalev A.I., Wainshtein D.L., Golan Y., Osherov A. Luminescence and structure of nanosized inclusions formed in SiO₂ layers under double implantation of silicon and carbon ions // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2009. – Vol. 3, N 5. – P. 702-708.

12 Nussupov K. Kh. and Beisenkhanov N.B. The Formation of Silicon Carbide in the SiC_x Layers (x = 0.03–1.4) Formed by Multiple Implantation of C Ions in Si // In book: Silicon Carbide – Materials, Processing and Applications in Electronic Devices / Moumita Mukherjee (Ed.). – Chapter 4. – Rijeka, Croatia: *InTech*. – 2011. – P. 69-114.

13 Nussupov K.Kh., Beisenkhanov N.B., Valitova I.V., Mit' K.A., Mukhamedshina D.M., Dmitrieva E.A. Structure pro-perties of carbon implanted silicon layers // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. – 2008. – 19. – P. 254-262.

14 Gibbons J.F., Johnson W.S., Mylroie S.W. Projected Range Statistics: Semiconductors and Related Materials. – 2nd Ed. – Stroudsburg, Penn: Dowden, Hutchinson and Ross, Inc. – 1975.

15 Ziegler J.F., Biersack J.P., Littmark U. The Stopping and Range of Ions in Solids. – New York: Pergamon Press, 1985.

16 Burenkov A.F., Komarov F.F., Kumakhov M.A., Temkin M.M. Tables of Ion Implantation Spatial Distributions. – New York; London; Paris: Gordon and Breach, 1986.

17 Комаров А.Ф. Моделирование процесса двухпучковой высокодозной ионной имплантации в твердотельные мишени // Журнал технической физики. – 2001. – Т. 71, вып. 11. – С. 119-123.

18 Данилина Т.И., Кагадей В.А. Технология СБИС. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2007. – 287 с.

19 Смирнов В.И. Физико-химические основы технологии электронных средств. – Ульяновск: УЛГТУ, 2006. – 22 с.

REFERENCES

1 Liao F., Girshick S.L., Mook W.M., Gerberich W.W., Zachariah M.R. Superhard nanocrystalline silicon carbide films. *Appl. Phys. Lett.* **2005**. Vol. 86. P. 171913.

2 Afanas'ev A.V., Il'in V.A., Korlyakov A.V., Lebedev A.O., Luchinin V.V., Tairov Yu.M. Karbid kremniya. Vklad SPbGETU «LETI». Priznanie i perspektivy. V kn.: *Fizika i tekhnologiya mikro- i nanosistem. Pod redakciei Luchinina V.V. i Malinovskogo V.V. Sankt-Peterburg: Izd. "Russkaya kolleksiya". 2011. S. 50–86. (in Russ.)*.

3 Oguri K., Sekigawa T. Heat resistant material and hot structure member both space shuttle, space shuttle, and method for producing heat resistant material for space shuttle. *United State Patent. Sep.16, 2004. Pub. № US 2004/0180242 A1*.

4 Yan H., Wang B., Song X.M., Tan L.W., Zhang S.J., Chen G.H., Wong S.P., Kwok R.W.M., Leo W.M.L. Study on SiC layers synthesized with carbon ion beam at low substrate temperature. *Diamond and related materials.* **2000**. V. 9. P. 1795–1798.

5 Chen D., Wong S.P., Yang Sh., Mo D. Composition, structure and optical properties of SiC buried layer formed by high dose carbon implantation into Si using metal vapor vacuum arc ion source. *Thin Solid Films.* **2003**. V. 426. P.1–7.

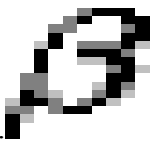
6 Liangdeng Y., Intarasiri S., Kamwanna T., Singkarat S. Ion beam synthesis and modification of silicon carbide. In book: *Ion beam applications in surface and bulk modification of insulators. Austria, Vienna: IAEA-TECDOC-1607. 2008. P. 63–92*.

7 Lindner J.K.N.. High-dose carbon implantations into silicon: fundamental studies for new technological tricks. *Appl.Phys. A.* **2003**. Vol. 77. P. 27-38.

8 Borders J.A., Picraux S.T., Beezhold W. Formation of SiC in silicon by ion implantation. *Appl.Phys.Lett.* **1971**. V. 18. 11. P. 509–511.

9 Bayazitov R.M., Haibullin I.B., Batalov R.I., Nurutdinov R.M., Antonova L.Kh., Aksenov V.P., Mikhailova G.N. Structure and photoluminescent properties of SiC layers on Si, synthesized by pulsed ion-beam treatment. *Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. B.* **2003**. V. 206. P. 984–988.

10 Serre C., Romano-Rodríguez A., Pérez-Rodríguez A., Morante J. R., Fonseca L., Acero M.C., Kögler R. and Skorupa W. β -SiC on SiO₂ formed by ion implantation and bonding for



micromechanics applications. Sensors and Actuators A (Physical). 1999. 74. №1–3. P.169–173.

11 Tetelbaum D.I., Mikhaylov A.N., Belov A.I., Vasiliev V.K., Kovalev A.I., Wainshtein D.L., Golan Y., Osherov A. Luminescence and structure of nanosized inclusions formed in SiO₂ layers under double implantation of silicon and carbon ions. *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2009. V. 3. № 5. P. 702–708.

12 Nussupov K. Kh. and Beisenkhanov N.B. The Formation of Silicon Carbide in the SiC_x Layers (x = 0.03–1.4) Formed by Multiple Implantation of C Ions in Si. In book: *Silicon Carbide - Materials, Processing and Applications in Electronic Devices*. Moumita Mukherjee (Ed.). Chapter 4. Rijeka, Croatia: InTech. 2011. P. 69-114.

13 Nussupov K.Kh., Beisenkhanov N.B., Valitova I.V., Mit' K.A., Mukhamedshina D.M., Dmitrieva E.A. Structure properties of carbon implanted silicon layers. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2008. 19. P. 254–262.

14 Gibbons J. F., Johnson W.S., and Mylroie S.W. Projected Range Statistics: Semiconductors and Related Materials. 2nd Ed. Stroudsburg, Penn: Dowden, Hutchinson and Ross, Inc. 1975.

15 Ziegler J.F., Biersack J.P., Littmark U. The Stopping and Range of Ions in Solids. New York: Pergamon Press. 1985.

16 Burenkov A.F., Komarov F.F., Kumakhov M.A., Temkin M.M. Tables of Ion Implantation Spatial Distributions. New York; London; Paris: Gordon and Breach. 1986.

17 Komarov A.F. Modelirovanie processa dvukhpuchkovoі vysokodoznoi ionnoi implantacii v tverdotelnye misheni. *Zhurnal tehnichekskoi fiziki*. 2001. T.71, vyp.11. S. 119-123. (in Russ.).

18 Danilina T.I., Kagadey V.A. Tehnologiya SBIS. Tomsk: Tomskii gosudarstvennyi universitet sistem radioupravleniya i elektroniki. 2007. 287 s. (in Russ.).

19 Smirnov V.I. Fiziko-khimicheskie osnovy tehnologii elektronnykh sredstv. Ul'yanovsk: UIGTU. 2006. 22 s. (in Russ.).

Резюме

И. Қ. Бейсембетов, К. Х. Нүсіпов, Н. Б. Бейсенханов, С. Қ. Жарықов,
Б. К. Кенжалиев, Т. К. Ахметов, Б. Ж. Сейітов

(Қазақстан-Британ техникалық университеті, Алматы, Қазақстан Республикасы)

С⁺ ИОНДАРЫН Si-ГЕ ЖОҒАРЫ МӨЛШЕРДЕ ИМПЛАНТАЦИЯЛАУДАН КЕЙІНГІ

КӨМІРТЕГІ АТОМДАРЫНЫҢ КРЕМНИЙДЕ ТАРАЛУЫ

Жұмыста, көп дүркін иондық имплантациялау әдісі арқылы кремний карбидінің біртекті пленкаларын синтездеу жүзеге асырылған. Осы мақсатта энергиялары 40, 20, 10, 5, 3 кэВ көміртегі иондарын моно-кристалды кремний пластиналарына жоғары мөлшерде имплантациялау жүргізілген. Көміртегі атомдарының кремнийде таралуының есептелген және Оже – электрондық спектроскопия әдісімен алынған эксперименталдық профильдері салыстырылған. Жоғары температуралы күйдіру процесінде көміртегі концентрациясы өзгеріссіз қалатын біртекті $\text{SiC}_{0.7}$ қабаты синтезделгені көрсетілген. Қабат бетінің тотығуы байқалады. Күйдіруден кейін, кремний қостотығының (SiO_2) стехиометриялық құрамының үстінде оттегі атомдарының айтарлықтай көбеюі беттік қабаттың оттегі атомдарымен қаныққандығын көрсетеді. Зерттеу нәтижелерін нано- және микроэлектроникада, сонымен қатар өндірісте қолданылатын ыстыққа төзімді, қатты және кесуге арналған материалдарды синтездеуде қолдануға болады. «SiC қабыршақ – Si матрица» өтпелі аймағының жіңішкеруінен, иондардың жекелеген энергиялары үшін (40, 20 кэВ) көміртегінің таралуының макси-мумдарында және қабыршақ бетінде көміртегі концентрациясының артуынан, сонымен қатар осы макси-мумдар арасында көміртегі концентрациясының азаюынан көрінетін С атомдарының Si де таралуының Оже профилінің деформациясы байқалады. Бұл деформация, қабыршақ бетінің тозаңдану әсерлерінен және көміртегіні кремнийге жоғары мөлшерде имплантациялау кезінде қабат құрамының өзгеруінен болады.

Тірек сөздер: кремний карбиді, иондық имплантация, құрылым, кристалдану.

Summary

I. K. Beisembetov, K. Kh. Nussupov, N. B. Beisenkhanov, S. K. Zharikov,

B. K. Kenzhaliev, T. K. Akhmetov, B.Zh. Seitov

(Kazakh-British Technical University, Almaty, Republic of Kazakhstan)

THE DISTRIBUTION OF CARBON ATOMS IN SILICON AFTER HIGH DOSE IMPLANTATION OF C^+ IONS INTO Si

In this paper, the synthesis of homogeneous films of silicon carbide was carried out by multiple ion implantation. For this purpose, the high dose implantation of carbon ions with energies of 40, 20, 10, 5 and 3 keV into monocrys-talline silicon wafers was made. The calculated profile of the distribution of carbon atoms in silicon was compared with the same experimental profiles obtained by Auger electron spectroscopy. It was shown that a uniform layer $\text{SiC}_{0.7}$ was synthesized, wherein the carbon concentration during high temperature annealing was not significantly changed. The oxidation of the surface layer was observed. Considerable excess of oxygen atoms above stoichio-metric composition of silicon dioxide (SiO_2) after annealing indicates a saturation of the surface layer by oxygen atoms. Results may

be used in nano- and microelectronics, and in the synthesis of solid, heat-resistant and abrasive materials used in the industry. It is established that the deformation of the rectangular Auger profile of the C atom distribution in Si, which is manifested both in the refinement of the transition region «SiC film - Si substrate» and, in the increase of the carbon concentration both at the surface and at the peaks of carbon distribution for single-energy ions (40, 20 keV), as well as in the decrease of the carbon concentration between these peaks, are caused by the effects of sputtering of the surface and changes in the composition of the layer during high dose carbon implantation into silicon.

Keywords: silicon carbide, ion implantation, structure, crystallization.

Поступила 30.09.2013 г.