

## Аномальное распределение атомов железа при одновременной имплантации ионов $\text{Co}^+$ и $\text{Fe}^+$ в кремний

© Г.Г. Гумаров, В.Ю. Петухов, В.А. Жихарев, В.А. Шустов, И.Б. Хайбуллин

Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского Российской академии наук, 420029 Казань, Россия

(Получена 13 марта 1996 г. Принята к печати 25 октября 1996 г.)

Обнаружено аномальное двугорбое распределение атомов Fe по глубине при одновременной имплантации ионов  $\text{Fe}^+$  и  $\text{Co}^+$  в Si при невысоких плотностях ионного тока ( $j \leq 10 \text{ мкА/см}^2$ ) и соотношении ионов железа и кобальта в пучке 1:3. Образование такого профиля происходит при условии, что время диффузии атомов железа к стокам (поверхности и области линейных дефектов в глубине образца) становится меньше эффективного времени силицидообразования.

Интерес к сложным силицидам в технологии микроэлектроники обусловлен широким разнообразием физических свойств, расширяющих области их использования. В частности, двойной орторомбический силицид  $\beta\text{-(Fe}_{1-x}\text{Co}_x)\text{Si}_2$  интересен как полупроводник с переменной (в зависимости от  $x$ ) шириной запрещенной зоны. В работе [1] была показана возможность формирования такого соединения последовательной имплантацией ионов  $\text{Fe}^+$  и  $\text{Co}^+$  в Si с двухступенчатым термическим отжигом после каждого шага имплантации. Ранее нами в работах [2,3] была показана возможность синтеза двойного силицида путем одновременной имплантации ионов разных 3d-металлов в кремний без какой-либо высокотемпературной обработки.

В данной работе изучены фазовый состав ионно-синтезированных пленок, а также распределения внедренных атомов по глубине, возникающие при одновременной имплантации ионов  $\text{Co}^+$  и  $\text{Fe}^+$  в кремний (при доминировании ионов кобальта в пучке,  $x = 0.75$ ) как до, так и после термической обработки.

Исходным материалом служили пластины монокристаллического кремния марки ЭКДБ-10 с ориентацией (111). Имплантация ионов  $^{56}\text{Fe}^+$  и  $^{59}\text{Co}^+$  проводилась одновременно из одного источника на установке ИЛУ-3 с энергией 40 кэВ и интегральной дозой  $2.5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ . Плотность ионного тока составляла  $10 \text{ мкА/см}^2$ , а отношение количества ионов  $\text{Fe}^+$  к количеству ионов  $\text{Co}^+$  в пучке соответствовало 1:3. Образцы тщательно крепились на дюралевой кассете, охлаждаемой водой. При этом температура образца, измеренная термопарой, не превышала  $100^\circ \text{C}$ .

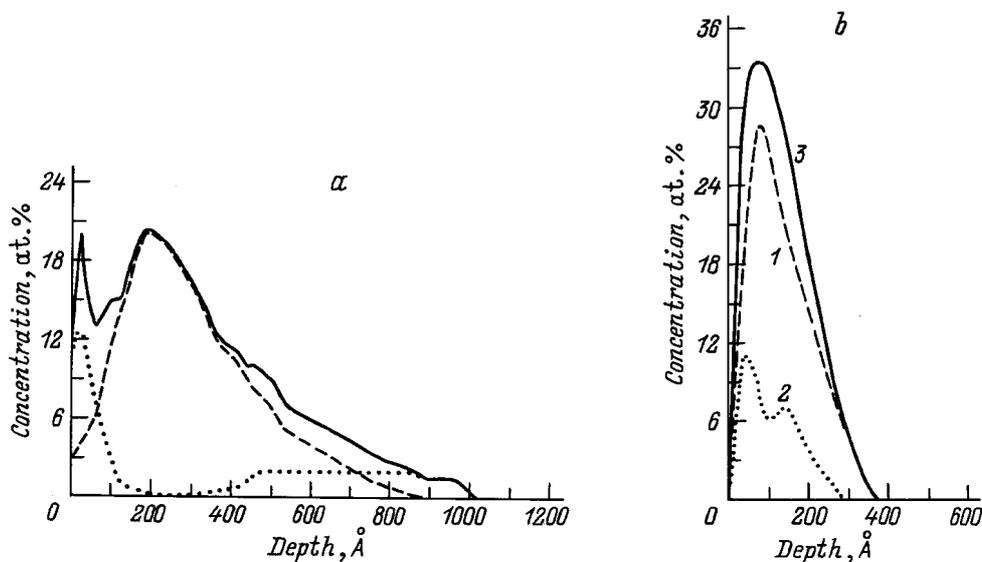
Термический отжиг проводился при температуре  $T = 750^\circ \text{C}$  в течение 32 ч в потоке сухого азота.

Фазовый состав полученных пленок определялся по электронограммам на отражение на установке ЭМР-100 при энергиях электронов 50 и 75 кэВ. Исследование более глубоких слоев проводилось методом рентгеновской дифракции в параллельных скользящих лучах (угол  $\alpha = 2^\circ$ ) с использованием установки ДРОН-3М. Для определения элементного состава синтезированной пленки и распределения атомов по глубине применялась оже-электронная спектроскопия.

Распределение элементов по глубине для образцов непосредственно после имплантации (без последующих обработок), полученное методом оже-электронной спектроскопии, показано на рисунке, а. Видно, что профили распределения атомов Co и Fe сильно различаются, и это весьма удивительно, так как их атомные массы близки. Расчет распределения, полученный по модифицированной программе TRIM для ионов  $\text{Fe}^+$  и  $\text{Co}^+$ , имплантированных в кремний с энергией 40 кэВ, дает практически совпадающие профили с параметрами: средний проецированный пробег  $\bar{R}_p \simeq 350 \text{ \AA}$ , среднее проецированное отклонение  $\Delta \bar{R}_p \simeq 150 \text{ \AA}$ . В то время как профиль распределения атомов кобальта близок к теоретически ожидаемому, распределение атомов железа аномально и имеет два явно выраженных максимума разной интенсивности, причем первый пик расположен в непосредственной близости к поверхности, а второй — в области границы распределения кобальта в глубине образца. Анализ оже-спектров показывает также наличие в приповерхностной области тонкой углеродсодержащей пленки толщиной  $10 \div 20 \text{ \AA}$  и пленки оксида кремния толщиной несколько десятков  $\text{ \AA}$ . Электронография на отражение для образца после имплантации дает только рефлексы от поликристаллического кубического силицида кобальта. Остальные фазы, в том числе и железосодержащая, по данным электронографии аморфны. Рентгеновские дифрактограммы для образца после имплантации показали также образование лишь кубической фазы  $\text{CoSi}_2$ .

В случае бомбардировки кремния при тех же режимах только ионами  $\text{Fe}^+$  (либо  $\text{Co}^+$ ), в отличие от экспериментов по одновременной имплантации ионов двух типов, аномального распределения и диффузии из области внедрения не наблюдалось [4,5]. Этот факт указывает на решающее влияние атомов кобальта, находящихся в области внедрения, на аномальное распределение атомов железа (при данных режимах имплантации).

Термический отжиг полученных образцов при  $750^\circ \text{C}$  в течение 32 ч приводит к существенному изменению профилей распределения внедренных элементов (рисунок, б). Именно, происходит стягивание профилей атомов Fe и Co и их смещение к поверхности. При этом



Распределение атомов кобальта (1), железа (2) и их суммарное содержание (3) по глубине образца, полученное методом оже-спектроскопии: *a* — непосредственно после имплантации; *b* — после имплантации и термического отжига при 750°С в течение 32 ч.

не происходит заметного изменения толщины углеродсодержащей и оксидной пленок. На электронограммах для отожженного образца обнаружены линии, соответствующие фазам  $\text{CoSi}_2$  и  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . В то же время анализ спектров рентгеновской дифракции показывает, что основными фазами ионно-синтезированной пленки после термического отжига являются  $\text{CoSi}_2$  и  $\beta\text{-FeSi}_2$ .

Неклассический имплантационный профиль, подобный приведенному на рисунке, *a* для атомов железа, был получен также в [6] при имплантации только ионов  $\text{Ni}^+$  в Si. Такой эффект авторы объяснили исключительно эффектом диффузии к стокам, каковыми являются поверхность подложки и область линейных дефектов, находящаяся за нормальным профилем распределения имплантированных атомов. В рассматриваемой нами одновременной имплантации ионов двух типов в кремний мы учитывали также процессы фазообразования. Согласно [7], диффузия атомов Fe к поверхности (или к другому рода стокам) возможна, если для них в процессе имплантации выполняется условие

$$\tau_d < \tau_c,$$

где  $\tau_d \approx a^2/D$  — время диффузии от области внедрения до стоков,  $a$  — расстояние от максимума распределения первично внедренных атомов до стоков,  $D$  — коэффициент диффузии внедренных атомов;  $\tau_c$  — характеристическое время комплексообразования, в данном случае образования комплекса Fe–Si. Вследствие малой растворимости 3d-металлов в кремнии [8] образование вторичных фаз (силицидов) начинается уже при малых дозах имплантации. Так как плотность потока ионов  $\text{Co}^+$  в пучке втрое превышает плотность потока ионов  $\text{Fe}^+$ , в процессе имплантации в области внедрения доминируют кобальтсодержащие частицы ( $\text{CoSi}_2$ ). Вероятно, в процессе имплантации они препятствуют образованию

устойчивых зародышей силицидов железа, т.е. увеличивают эффективное время силицидообразования для атомов железа. Вследствие высокой скорости диффузии в кремнии [8] основная часть атомов железа уходит на стоки, каковыми являются поверхность и приповерхностный слой, а также область линейных дефектов в глубине образца [9].

При имплантации только ионов железа в кремний, либо при имплантации в режиме, когда в пучке доминируют ионы железа, эффективное время силицидообразования для атомов железа существенно меньше и двугорбое распределения не образуется.

Как известно [10], после термического отжига при  $T > 700^\circ\text{C}$  происходит отжиг линейных дефектов. Поэтому при длительном термическом отжиге (750°С) атомы Fe и Co мигрируют в область гранулярной пленки  $\text{CoSi}_2$ , являющейся теперь стоком, достраивая дисилицид кобальта и образуя силицид железа с оставшимся кремнием. Эффект стягивания профиля имплантированных атомов при образовании силицидов после термического отжига наблюдался также и рядом других авторов [11,12]. Судя по суммарной концентрации металла, можно утверждать, что при таком отжиге сформировалась сплошная дисилицидная пленка, состоящая из  $\text{CoSi}_2$  и  $\beta\text{-FeSi}_2$ .

Таким образом, в данной работе обнаружено аномальное двугорбое распределение атомов Fe по глубине при одновременной имплантации ионов  $\text{Fe}^+$  и  $\text{Co}^+$  в Si при невысоких плотностях ионного тока ( $j \leq 10 \text{ мкА/см}^2$ ) и соотношении количества ионов железа и кобальта в пучке 1:3. Образование такого профиля происходит при условии, что время диффузии атомов железа к стокам (поверхности и области линейных дефектов в глубине образца) становится меньше эффективного времени силицидообразования.

В заключение авторы выражают благодарность В.Ф. Маковскому за получение оже-электронных спектров.

Работа выполнялась в рамках Государственной научно-технической программы "Перспективные технологии и устройства микро- и наноэлектроники", проект № 142/57/2.

## Список литературы

- [1] E. Wieser, D. Panknin, W. Skorupa, G. Querner, W. Henrion, J. Albrecht. Nucl. Instr. Meth. B, **80/81**, 867 (1993)
- [2] В.Ю. Петухов, И.Б. Хайбуллин, Г.Г. Гумаров. Тез. докл. I Рос. конф. по физике полупроводников (Н. Новгород, 1993) т. 2, с. 353.
- [3] Г.Г. Гумаров, В.Ю. Петухов, В.А. Шустов, И.Б. Хайбуллин. Высокочистые вещества, № 2, 95 (1995).
- [4] V.Yu. Petukhov, I.B. Khaibullin, M.M. Zaripov, R. Groetzschel, H. Voelskow, R. Klages. Phys. St. Sol. (a), **96**, 463 (1986).
- [5] K. Radermacher, S. Mantl, Ch. Dieker, H. Holzbrecher, W. Speier, H. Luth. Proc. MRS (1992) v. 235, p. 273.
- [6] M.F. Wu, J. De Wachter, P. Hendrickx, A.-M. Van Bavel, H. Pattyn, G. Langouche, J. Vanhellefont, H. Bender, M. Maenhoudt, Y. Bruyseraede. Appl. Phys. Lett., **63**, 542 (1993).
- [7] В.Л. Винецкий, Г.А. Холодарь. Радиационная физика полупроводников (Киев, Наук. думка, 1979).
- [8] В.М. Глазов, В.С. Земсков. Физико-химические основы легирования полупроводников (М., Наука, 1967).
- [9] V.Yu. Petukhov, I.B. Khaibullin, M.M. Zaripov, E. Wieser, R. Groetzschel, H. Bartsch. Phys. St. Sol. (a), **117**, 477 (1990).
- [10] K. Seshan, J. Washburn. Rad. Eff., **37**, 147 (1978).
- [11] C.W.T. Bulle-Lieuwma, A.H. Van Ommen, L.J. van IJzen-doorn. Appl. Phys. Lett., **54**, 244 (1989).
- [12] F. Namavar, N.M. Kalkhoran, J.M. Manke, L. Luo, J.T. McGinn. Proc. MRS (1992) v. 235, p. 285.

Редактор Л.В. Шаронова

## Anomalous distribution of iron atoms at simultaneous implantation of $\text{Co}^+$ and $\text{Fe}^+$ ions into silicon

G.G. Gumarov, V.Yu. Petukhov, V.A. Zhikharev,  
V.A. Shustov, I.B. Khaibullin

Zavoisky Physical-Technical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
420029 Kazan, Russia

**Abstract** An anomalous double-peak depth distribution of iron atoms at simultaneous implantation of  $\text{Co}^+$  and  $\text{Fe}^+$  ions into silicon at low ion current densities ( $j < 10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) and correlation of  $\text{Co}^+:\text{Fe}^+ = 3:1$  in the beam has been revealed. The rise of this iron profile takes place when the time of diffusion of the atoms to getters (the surface and the end of range defects) is less than an effective time of silicide formation.

e-mail: gumarov@ksc.iasnet.ru