

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОФИЛЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИОННО-ИМПЛАНТИРОВАННЫХ АТОМОВ Mn МЕТОДОМ РЕЗЕРФОРДСКОГО ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ И ВЛИЯНИЯ НА НИХ ТЕРМООТЖИГА

*Ташкентский государственный технический университет,  
ул. Университетская, 2, г. Ташкент, 700095, Республика Узбекистан*

Получение тонких слоев в приповерхностной области Si с заданными электрофизическими свойствами и определенной толщиной представляет большой интерес как с точки зрения технологии, так и для создания различных датчиков и приборов высокой чувствительности.

Наиболее интересным в этой области является введение легирующих примесей элементов переходных групп, и в частности марганца. С технологической точки зрения создать тонкие слои в кремнии с ограниченной глубиной и достаточной концентрацией диффузионным методом невозможно из-за большого значения коэффициента диффузии этих элементов. Поэтому прибегают к методу ионно-лучевого легирования.

Однако в литературе практически отсутствуют работы по ионной имплантации и исследованию профилей распределения марганца в кремнии по глубине.

Поскольку примеси Mn в Si могут находиться как в узлах, так и в междоузлиях кристаллической решетки и могут взаимодействовать с дефектами решетки, то распределение Mn при ионной имплантации и механизм активации Mn представляют определенный интерес.

Цель настоящих исследований – изучение профилей распределения имплантированных атомов марганца в кремнии в зависимости от дозы облучения и температуры отжига.

Как известно, для изучения профиля распределения ионно-имплантированных слоев используются традиционные методы вторично ионной масс- и Оже-спектроскопии с послойным удалением. Эти методы не дают высокой точности количественных характеристик, хотя точные количественные данные о концентрации легирующих примесей необходимы для получения тонких слоев с заданными электрофизическими свойствами.

Поэтому в данной работе профили распределения легирующих примесей Mn и влияние температуры активации на их распределение исследовали с помощью метода Резерфордского обратного рассеяния (РОР).

При этом использовали пластины монокристаллического кремния марки КДБ при  $p = 10$  Ом·см. Имплантацию ионов Mn в кремнии осуществляли на установке ИЛУ-3 при энергии ионов 40 кэВ вдоль кристаллографической оси (111). Дозу имплантации  $N_0$  варьировали в пределах  $10^{15}$ – $10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>. Удельное сопротивление образцов измеряли 4-зондовым методом.

На рис. 1 приведены профили распределения имплантированных ионов марганца в кремнии с энергией 40 кэВ при различных дозах имплантации; независимо от дозы имплантации распределение описывается гауссовской функцией. При этом глубина проецированного пробега  $R_p$  в зависимости от дозы облучения лежит в пределах 398–410 Å. Это совпадает с данными исследования этих образцов другими методами, например ВИС [1].

Исследования методом РОР образцов Si после имплантации Mn с дозой  $10^{15}$  ион/см<sup>2</sup> дали следующие результаты на поверхности образца: Si–83%, O–15, Mn–2% в атомных единицах. В пределах чувствительности Mn наблюдается до глубины ~ 600 Å, а кислород ~ 900 Å. Для кремниевых пластин после ионной имплантации Mn  $10^{16}$  с дозой ион/см<sup>2</sup> процентное содержание Si, кислорода и Mn в атомных единицах на поверхности составляет Si–76, O–18, Mn–6. Сущест-

венное изменение процентного содержания наблюдается на глубине порядка  $\sim 400\text{\AA}$ , где проявляется соотношение: Si–82%, O–3, Mn–15%. В пределах чувствительности метода Mn наблюдается до глубины  $650\text{\AA}$ . Начиная с этой глубины наблюдается резкое изменение содержания O. На глубине  $\sim 900\text{\AA}$  кислород практически не чувствуется. При имплантации Mn с дозой  $10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> наблюдается следующая картина: на поверхности образца Si–64%, O–34 и Mn–2%. На глубине  $\sim 400\text{\AA}$  Si–82%, O–3, Mn–15% в атомных единицах.

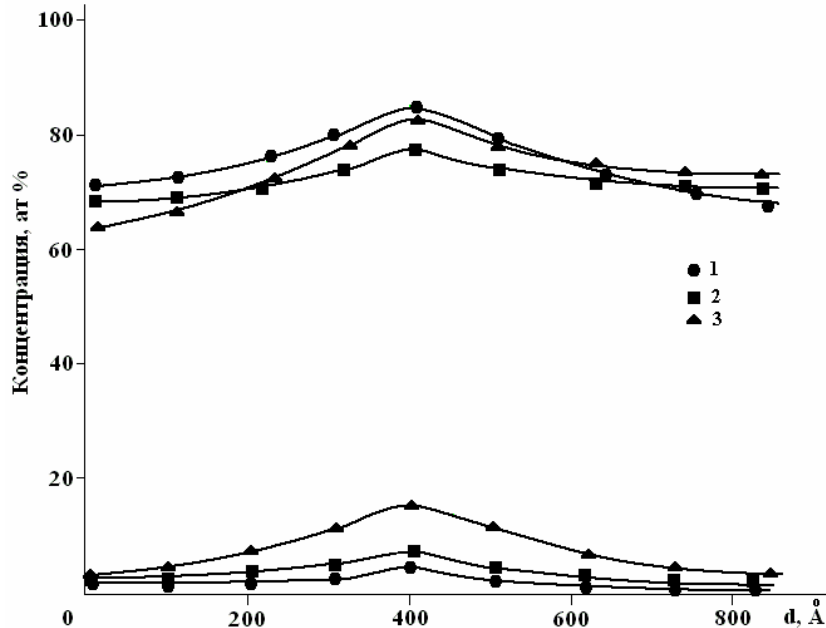


Рис. 1. Распределение концентрации Mn в Si по глубине при дозе облучения  $10^{15}-10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>.  
(1 –  $1 \cdot 10^{15}$  ион/см<sup>2</sup>, 2 –  $1 \cdot 10^{16}$  ион/см<sup>2</sup>, 3 –  $1 \cdot 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>)

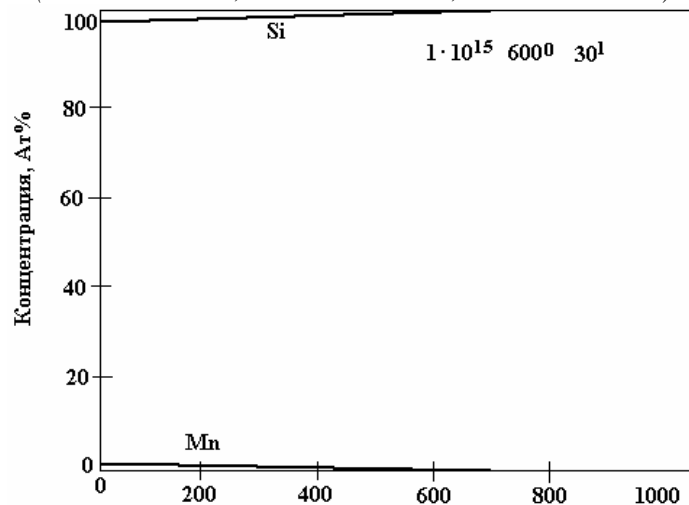


Рис. 2. Распределение концентрации Mn в Si по глубине при дозе облучения  $10^{15}$  ион/см<sup>2</sup> после отжига при температуре  $600^{\circ}\text{C}$  в течение 30 мин

Анализ полученных данных показывает, что в процессе ионной имплантации как на поверхности образца, так и на глубине максимума распределения Mn в основном меняется содержание кислорода. Можно предположить, что внедренные ионы Mn повсеместно вытесняют кислород. Эта догадка оправдается в случае, если кислород в кристалле кремния будет находиться в свободном состоянии [2, 3].

Большой научный и практический интерес представляет влияние термического отжига на поведение легирующих примесей, в частности на распределение по глубине. Ниже приводятся результаты влияния термического отжига на распределение Mn по глубине для образцов Si в течение 30 мин (рис. 2).

Как видно, температурный отжиг при  $600^{\circ}\text{C}$  существенно не влияет на распределение примесей по глубине. Сильное влияние начинается при температурах  $900^{\circ}\text{C}$ . Для образцов, леги-

рованных Mn при дозе  $10^{15}$  ион/см<sup>2</sup>, максимум распределения перемещается на глубину  $\sim 800\text{\AA}$ , а содержание Mn – до 2% ат.ед. (рис. 3). При этом на поверхности не чувствуется содержание Mn, кислород уменьшается до 27% ат.ед., а на глубине  $800\text{\AA}$  он не регистрируется.

Для образцов, легированных при дозе  $10^{16}$  ион/см<sup>2</sup>, отжиг в течение 30 мин при температуре  $600^\circ\text{C}$  существенно влияет на распределение Mn. Наблюдается разрыв максимума. При температуре отжига  $900^\circ\text{C}$  максимум распределения перемещается на глубину  $800\text{\AA}$  с уменьшением максимума Mn до 5% ат.ед. Распределение примесей для образцов, легированных Mn с дозой  $10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> при термическом отжиге, претерпевает существенные изменения. Температурный отжиг при  $600^\circ\text{C}$  в течение 30 мин приводит к сдвигу максимума распределения на глубину  $380\text{\AA}$  и некоторому увеличению содержания их на поверхности. Температурный отжиг при  $900^\circ\text{C}$  в течение 30 мин сильно влияет на распределение Mn. Максимум смещается на глубину  $600\text{\AA}$ . Форма распределения становится более полой, Mn наблюдается до глубины порядка  $1200\text{\AA}$  в пределах до 5% ат.ед.

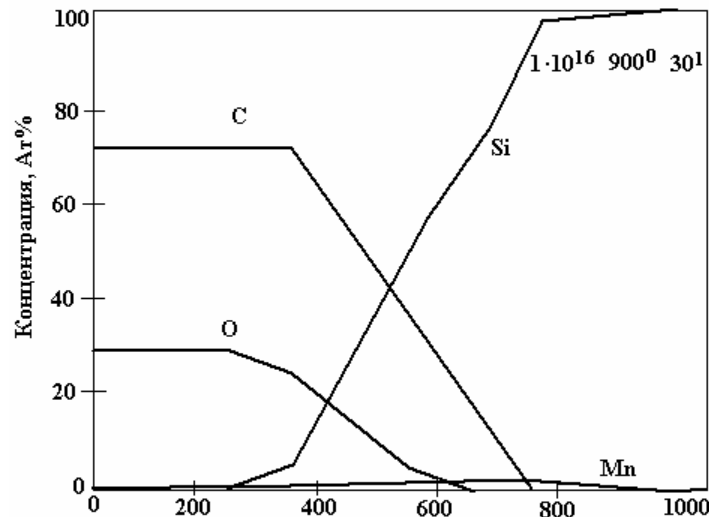


Рис. 3. Распределение концентрации Mn в Si по глубине при дозе облучения  $10^{16}$  ион/см<sup>2</sup> после отжига при температуре  $900^\circ\text{C}$  в течении 30 минут

Анализ полученных данных дает основание утверждать, что с помощью РОР можно получить сведения не только о распределении примесей по глубине образцов, но и количественные характеристики.

На наш взгляд, интересной является связь между распределением Mn и кислорода в кристаллах кремния. Сопоставление этих распределений показывает, что на глубине максимума распределения Mn содержит минимально O, и наоборот – в местах максимума содержания O имеют минимум концентрации Mn. Для нелегированных исходных образцов Si наблюдается распределение кислорода с некоторым избытком на поверхности с монотонным убыванием его в глубь образца, далее имеет место равномерное распределение. После ионной имплантации это распределение претерпевает сильное изменение. Концентрация на поверхности и приповерхностных областях увеличивается, в области максимума концентрации распределения Mn наблюдается резкий спад концентрации кислорода. Такое изменение происходит для всех образцов с различной дозой облучения.

Процесс ионной имплантации влияет на состояние не только кислорода, но и дефектов. Созданные дефекты как на поверхности, так и на глубине Si открывают свободные радикалы, которые притягивают к себе свободные частицы, в частности O.

Основываясь на полученных данных, можно сделать следующие выводы:

- во всех исследованных образцах профили распределения легирующих примесей имели гауссовскую форму. Глубина максимума распределения зависела от дозы облучения и энергии ионов. Например, при  $N_0=10^{15}$  ион/см<sup>2</sup> в случае Mn Rp достигала  $400\text{\AA}$ . Дальнейшее увеличение концентрации приводило к снижению Rp до  $290\text{\AA}$ ;

- эксперименты показали, что, управляя дозой имплантированных ионов, можно сформировать резкую переходную область вблизи поверхности кремния. В зависимости от типа и дозы ионов эта глубина находится в пределах  $290\text{--}380\text{\AA}$ ;

– изучение влияния температурного отжига на профили распределения легирующих примесей показало, что в отличие от элементов 3-й и 5-й групп после термообработки поверхностная концентрация элементов переходных групп не увеличивается, а, наоборот, уменьшается;

– осязаемая диффузия начинается при температурах выше 600<sup>0</sup>С. При этом смещение максимумов в глубь образца происходит согласно законам диффузии;

– исследование концентрационных соотношений легирующих примесей и самого кремния методом РОР дали следующие результаты: для марганца, имплантированного дозой 10<sup>15</sup> ион/см<sup>2</sup>, на поверхности образца оказалось 83% кремния, 15 – кислорода и 2% марганца в атомных единицах. В пределах чувствительности метода марганец наблюдается до глубины 600 Å. При дозе облучения 10<sup>16</sup> ион/см<sup>2</sup> соотношения элементов на поверхности следующие: кремний – 76%, кислород – 18 и марганец – 6% в атомных единицах. При дозе облучения 10<sup>17</sup> ион/см<sup>2</sup> на глубине 400 Å соотношения элементов оказались следующими: Si–82%, O–3 и Mn–15% атомных единиц. Существенное влияние на процентное соотношение оказывает температурный отжиг. Так, для легированных образцов с дозой облучения 10<sup>16</sup> ион/см<sup>2</sup> максимум распределения перемещается на глубину 800 Å с уменьшением содержания в максимуме до 5%.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Баходырханов М.К., Эгамбердиев Б.Э., Абдугаббаров М.С., Хайдаров К. Свойства поверхностных и приповерхностных слоев кремния, имплантированного марганцем // Неорганические материалы. РАН. 1995. Т. 31. № 3. С. 301–303.
2. Bulle-Lienwma C.W.T., Van Ommen A.H., Uzendorn L.j. van. // Appl. Phys. lett. 1989. 54. P. 244.
3. Namavar F., Kalkhoran N.M., Manke J.M., Luo L., McGinn J.T. // Proc. MRS 1992. V. 235. P. 285.

Поступила 29.07.06

### Summary

In this work the results of investigation of studying profiles of distribution of implanted atom of Mn into Si depending on the dose of irradiation and temperature of annealing are given by the method RBS. The influence of thermal annealing on the distribution of Mn and other admixtures, in particular, of oxygen is studied. The possibility of using the method of RBS for analysis of both concentrated distribution of alloyed admixtures and the interaction of admixtures between each other is marked.

К.З. Нуриев

## УГЛОВОЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИОНОВ, ЭМИТИРУЕМЫХ С ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОГО ТЕЛА ПРИ ЛАЗЕРНОМ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОМ АНАЛИЗЕ

*Азербайджанское национальное аэрокосмическое агентство,  
пр. Азадлыг 159, г. Баку, AZ-1106, Азербайджан*

В настоящее время разработано большое количество масс-спектрометрических приборов с лазерным способом ионизации вещества. В этих приборах лазеры в режиме модулированной добротности позволяют получить импульсы с длительностью 10<sup>9</sup>–10<sup>7</sup> с и интенсивностью потока излучения 10<sup>8</sup>–10<sup>12</sup> Вт/см<sup>2</sup>. В результате воздействия такого мощного излучения образуется плазма, которая служит источником поставки ионов для масс-спектрометрического анализа [1, 2].

С помощью лазерной масс-спектрометрии были получены основополагающие результаты о свойствах лазерной плазмы, дана ее характеристика как эмиттера ионов, сформулированы требования к различным типам лазерных источников ионов [3, 4]. Все это позволило построить приборы, обладающие высокой чувствительностью, надежностью и воспроизводимостью при анализе твердых веществ этим методом.