

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ РОР ПРОФИЛЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИОННО-ИМПЛАНТИРОВАННЫХ АТОМОВ Fe В Si

Б.Э. Эгамбердиев<sup>1</sup>, А.Т. Рахманов<sup>2</sup>, А.С. Маллаев<sup>3</sup>, С. Розиков<sup>4</sup>

<sup>1</sup> доктор физико-математических наук, профессор,

<sup>2</sup> кандидат технических наук, доцент,

<sup>3</sup> кандидат физико-математических наук, доцент, <sup>4</sup> магистр

Ташкентский государственный технический университет, Узбекистан

**Аннотация.** Приводятся результаты исследования профилей распределения имплантированных атомов железа в кремнии в зависимости от дозы облучения и температуры отжига методом резерфордовского обратного рассеяния (РОР). Изучены влияния термического отжига на распределение Fe и других примесей, в частности кислорода. Отмечена возможность использования метода РОР для анализа как концентрационного распределения легирующих примесей, так и взаимодействия примесей.

**Ключевые слова:** примеси, профили, влияние, резерфордовское обратное рассеяние, термический отжиг, имплантированные атомы, тонкие слои, глубина, дозы облучения, температуры активации.

Как известно, в кремнии, легированным элементом переходных групп, в частности железом, наблюдается ряд физических явлений, представляющих научный и практический интерес [1, 3].

Получения тонких слоёв имплантированных атомов в приповерхностной области Si с заданными электрофизическими свойствами и определенной толщиной важно, в частности, для технологий создания различных датчиков и приборов высокой чувствительности. Наиболее интересными в этой области являются введение примесей элементов переходных групп, в частности железа. С технологической точки зрения создать тонкие слои в кремнии с ограниченной глубиной и достаточной концентрацией диффузным методом невозможно из-за большого значения коэффициента диффузии этих элементов. Поэтому прибегают к методу ионно-лучевого легирования.

Так как примеси Fe в Si могут находиться как в узлах, так и междуузлиях кристаллической решётки и взаимодействовать с дефектами решётки, то распределение их при ионной имплантации и механизм их активации представляют определённый интерес. Однако в литературе практически отсутствуют работы, посвящённые ионной имплантации и исследованию профиля распределения по глубине железа в кремнии.

Целью настоящих исследований является изучение профилей распределения имплантированных атомов железа в кремнии в зависимости от дозы облучения и температуры отжига.

Как известно, традиционными методами изучения профиля распределения ионно-имплантированных слоёв являются вторично ионная масса – спектрометрия и Оже- спектроскопия с послойным удалением. Этими методами не удается получить достаточно точных количественных данных о концентрации легирующих примесей, необходимых для получения тонких слоёв с заданными электрофизическими свойствами. Поэтому в данной работе для исследования профилей распределения легирующей примеси Fe и влияния температуры активации на её распределение применён метод РОР.

Для исследований использовали пластины монокристаллического кремния марки КДБ с  $\rho=10$  Ом·см. Имплантация ионов Fe в кремнии осуществляли на установке ИЛУ-3 при энергии ионов 40 кэВ вдоль кристаллографической оси (111). Дозу имплантации ( $N_0$ ) варьировали в пределах  $10^{14}$ - $10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>. Измерение профилей распределения железа в кремнии осуществляли на установке LAS-2200, а также изучили методом РОР. Удельное сопротивление образцов измеряли 4-зондовым методом.

На рис.1 представлены спектры обратного рассеяния ионов He<sup>+</sup> от монокристалла Si (111), имплантированного ионами Fe<sup>+</sup> с дозой от  $10^{15}$  до  $10^{17}$  ион/ см<sup>2</sup>.

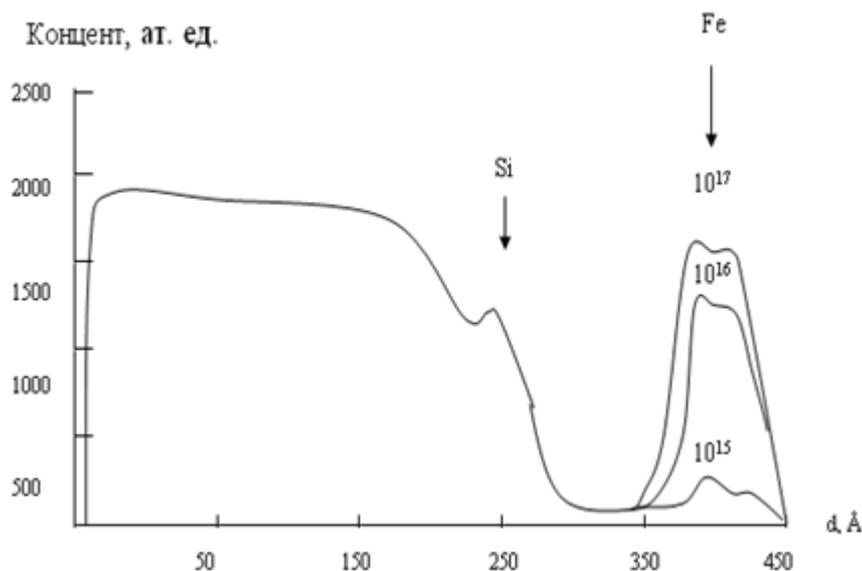


Рис. 1. Спектры POP ионов  $He^+$  на монокристалле Si, легированного ионами Fe с энергией 40 кэВ и дозами облучения  $10^{15}$ - $10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>

Из рисунка видно, что на спектре пик, характерный для Fe, начинает появляться при дозе  $D \approx 10^{15}$  ион/см<sup>2</sup>. Одновременно изучались кристаллическая структура поверхности и электрофизические свойства ионно-легированных слоёв.

Результаты проведенных экспериментов показали, что при  $D \leq 10^{15}$  ион/см<sup>2</sup> пока ещё не происходит заметное разупорядочение приповерхностных слоёв, а концентрация электроактивных атомов Fe не превышает  $\sim 5 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>. Увеличение дозы до  $5 \cdot 10^{15}$  ион/см<sup>2</sup> практически не приводит к увеличению концентрации электроактивных атомов Fe. При этом приповерхностная область частично разупорядочивается, а пик обратного рассеяния от Fe становится более чётким и интенсивным. При дозе облучения  $D \approx 10^{16}$  ион/см<sup>2</sup> происходит аморфизация приповерхностного слоя и существенный рост пика Fe, а на отдельных участках ионно-легированного слоя начинают появляться кластерные фазы Fe+Si. Эти изменения происходили до дозы  $(8 \div 10) \cdot 10^{16}$  ион/см<sup>2</sup>. Дальнейшее увеличение дозы не приводит к заметному изменению относительной интенсивности пиков Si и Fe. Поэтому дозу  $D \approx 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> можно принимать как дозу насыщения.

В указанном выше случае наибольшее значение концентрации электроактивных атомов достигала до  $5 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup>. Представляет интерес характер распределения атомов металлов по глубине в Si в зависимости от дозы облучения. При средних дозах облучения ( $D \approx 10^{15} - 10^{16}$  см<sup>-2</sup>) профиль распределения имеет очень сложную форму с несколькими максимумами. В качестве примера на рис.2 приведена зависимость концентрации Fe и Si по глубине для дозы ионов  $D \approx 10^{16}$  ион/см<sup>2</sup>.

Из рис.2 видно, что концентрации Fe на поверхности в области первого максимума ( $d \approx 100$  Å) достигает до 25-30 ат. %.

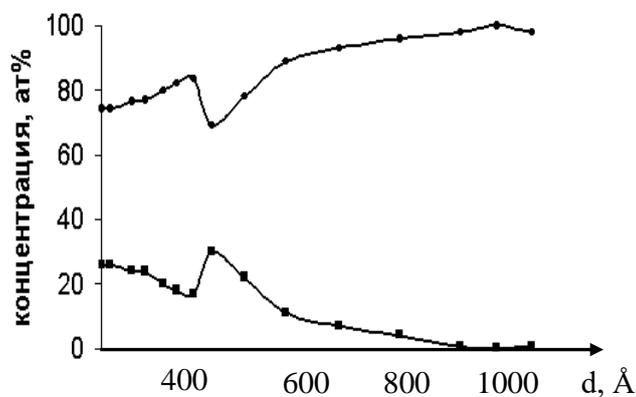


Рис. 2. Профили распределения Fe в Si с энергией 40 кэВ и дозой  $10^{16}$  ион/см<sup>2</sup>

Основная часть имплантированных атомов располагаются в приповерхностной области до глубины  $d \approx 300$  Å. При  $d \geq 400$  Å с ростом  $d$  концентрация железа резко уменьшается, а при глубине 800-850 Å ее значение не превышает 1-2 ат. %. При высоких дозах облучения ( $D > 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>) вместо нескольких максимумов

появляется один максимум, и концентрация железа на поверхности резко уменьшается. Последняя объясняется увеличением скорости распыления поверхностных атомов. При  $D \approx 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> распределение Fe имеет гауссовскую форму, максимум формируется в при поверхностных слоях  $d \approx 400-450 \text{ \AA}$ . Содержание железа в максимуме равно  $\sim 30-35$  ат. %. Дальнейшее увеличение дозы ионов приводит к смещению максимума в сторону поверхности и его уширению. Это связано как с интенсивным распылением поверхностных слоев, так и с увеличением плотности приповерхностных слоёв вследствие образования силицидов металла. При этом концентрация железа в области широкого максимума составляла 35-40 ат. %. В этих слоях преимущественно образовывались соединения типа  $\text{FeSi}_2$  [2, 4].

Анализ полученных результатов исследований показывает, что ионное легирование кремния переходными металлами имеет ряд преимуществ по сравнению с диффузионным легированием:

- активация примесей непосредственно в процессе имплантации или при низкотемпературном отжиге;
- резкое увеличение концентрации электроактивных атомов в тонком приповерхностном слое;
- получение резких n-p переходов;
- Получение термостабильных легированных слоев.

Иная картина наблюдается при прогреве образцов, легированных ионами высокой дозы ( $D > 10^{16}$  ион/см<sup>2</sup>). На рис.3 приведена зависимость  $C_{\text{Fe}}(d)$ , полученная после прогрева при разных температурах Si (111), легированного ионами  $\text{Fe}^+$  с  $D = 10^{16}$  ион/см<sup>2</sup>.

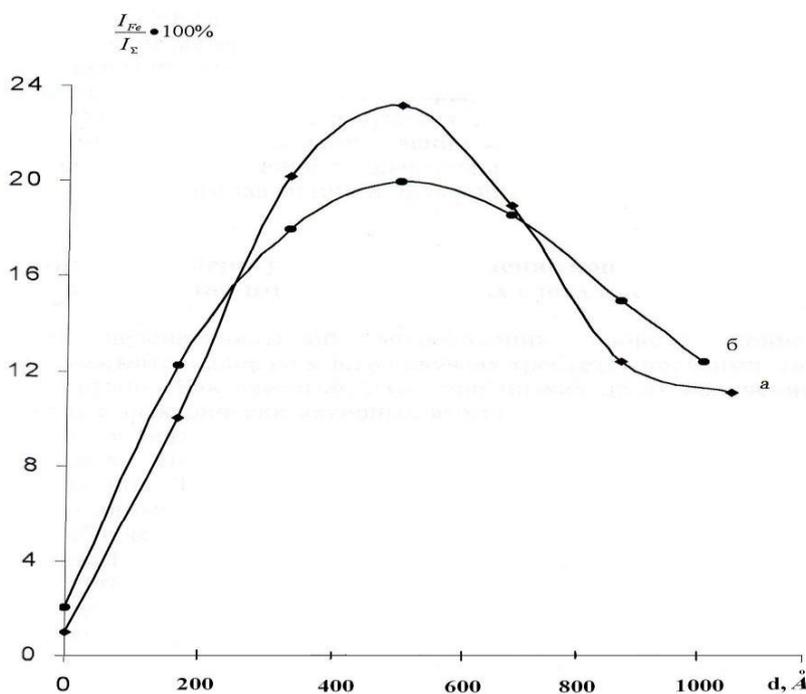


Рис. 3. Профили распределения Fe в Si при имплантации с энергией 40 кэВ и дозой  $10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>: а - без отжига; б - после отжига при температуре 1200°C

Отметим, что при отжиге основные изменения состава и структуры легированного слоя происходят в течение 25-30 минут. Поэтому время отжига для всех температур и доз облучения выбиралось равным 30 минут. На рис.3 видно, что после отжига при  $T = 800^\circ\text{C}$  концентрация электроактивных атомов железа в области максимума увеличивается в 1,3 раза. Увеличение температуры до  $1000^\circ\text{C}$  приводило к увеличению концентрации железа в максимуме до 20 ат. %.

В случае кремния, легированного с  $D=10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>, после прогрева зависимость  $C_{\text{Fe}}(d)$  приобретает П-образную форму. При  $T = 1000^\circ\text{C}$  в этих слоях образуются соединения  $\text{FeSi}_2$  со строгой стехиометрией, имеющей монокристаллическую структуру. Начиная с  $T = 1110^\circ\text{C}$ , увеличение  $T$  приводит к разложению пленки  $\text{FeSi}_2$  и испарению ее компонентов с поверхности [5].

Проведенная по специальной методике термообработка в температурном интервале  $t = 600-1200^\circ\text{C}$  показала, что при температуре  $600^\circ\text{C}$  происходит заметная активация атомов железа, о чём можно судить по увеличению поверхностного сопротивления образцов. При изотермическом отжиге независимо от температуры с ростом дозы имплантации эффективность имплантации усиливается.

## ВЫВОДЫ

Анализ полученных данных подтверждает, что в процессе ионной имплантации как на поверхности образца, так и на глубине максимум распределения железа в основном меняется за счёт содержания и

измерения концентрации кислорода. Можно предположить, что внедрённые ионы железа в кремний в основном вытесняет кислород.

Приведенное выше предположение оправдывается в случае, если кислород в кристалле кремния находится в не химическом соединении. Процесс ионной имплантации влияет не только на состояние кислорода, но также и на состояние дефектов. Созданные дефекты, как на поверхности, так и на глубине кремния, открывают свободные радикалы, в частности кислород.

Полученные результаты хорошо согласуются с аналогичными данными полученными ВИМС. Отмечена возможность использования метода РОР для анализа как концентрационного распределения легирующих примесей, так и взаимодействия примесей между собой.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гумаров, Г.Г. Физика и техника полупроводников. / Г.Г. Гумаров и др. – 1997. – Т. 31. – № 6. – С. 719–721.
2. Маллаев, А.С. Исследование механизмов образования силицидов  $Mn_2Si_3$ ,  $FeSi_2$ ,  $CoSi_2$ ,  $NiSi_2$  на кремнии полученных ионным легированием. / А.С. Маллаев – Автореферат канд. диссертации. – Ташкент, 2009. – С. 20.
3. Риссел, Х., Руге, И. Ионная имплантация. / Х. Риссел, И. Руге – М: Наука, 1983. – С. 360.
4. Эгамбердиев, Б.Э., Абдугабборов, М. Изучение некоторых особенностей профилей распределения имплантированных атомов Mn, Fe и Ni в Si. / Б.Э. Эгамбердиев, М. Абдугабборов // Вестник ТГТУ: 1994. – Т. 1-2. – С. 39–44.
5. Egamberdiev, B.E. Photoelectric properties of silicon-based solar cells implanted with rare earth elements. / B.E. Egamberdiev, etc. // Conference. Russia, Vladivostok, 2006. – P. 204–208.

*Материал поступил в редакцию 20.12.17.*

#### RESEARCH BY METHOD OF RUTHERFORD BACKSCATTERING DISTRIBUTION OF ION-IMPLANTED ATOMS OF Fe IN Si

**B.E. Egamberdiyev<sup>1</sup>, A.T. Rakhmanov<sup>2</sup>, A.S. Mallayev<sup>3</sup>, S. Rozikov<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Doctor of Physico-Engineering Sciences, Professor

<sup>2</sup> Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,

<sup>3</sup> Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor, <sup>4</sup> Master of Sciences  
Tashkent State Technical University, Uzbekistan

**Abstract.** *The article presents the research results of distribution profiles of implanted Fe atoms in Silicon depending on irradiation dose and temperature of annealing by method of Rutherford backscattering. The influence of thermal annealing on distribution of Fe and other impurities, particularly oxygen was studied. The possibility of use of Rutherford backscattering for analysis of both concentration distribution of dopant impurities and interaction of impurities.*

**Keywords:** *impurities, profiles, influence, Rutherford backscattering, thermal annealing, implanted atoms, thin layers, depth, irradiation dose, activation temperature.*