

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ
С КЛАСТЕРАМИ АТОМОВ НИКЕЛЯ В КРЕМНИИ

Х.М. Илиев, З.М. Сапарниязова, К.А. Исмаилов, О.Э. Саттаров, С. Нигмонхаджаев

Ташкентский государственный технический университет,
ул. Университетская-2, г. Ташкент, 100095, Республика Узбекистан, mzlixa@mail.ru

Одним из простейших способов, не требующих дорогостоящего технологического оборудования для создания наноструктур в полупроводниках, является формирование в объеме кристаллической решетки кластеров примесных атомов с управляемой концентрацией и структурой [1, 2].

В работе [3] показано, что при определенных термодинамических условиях легирования так называемой «низкотемпературной диффузии» могут формироваться кластеры примесных атомов (Ni, Gd, Mn, S) в решетке кремния. В таких материалах обнаружен ряд новых физических явлений [3–4], свидетельствующих об интересных функциональных возможностях полупроводников с нанокластерами, которые могут быть использованы при разработке принципиально новых приборов электроники и наноэлектроники.

Поэтому представляет определенный научный и практический интерес исследование влияния радиационного облучения γ -квантами на состояние примесных кластеров и на свойства кремния с такими кластерами. Такие исследования, с одной стороны, позволяют оценить радиационную стойкость материала с кластерами и возможность использования приборов, изготовленных на основе таких материалов в условиях повышенной радиации, а с другой стороны – определить состояние кластеров при облучении и взаимодействие их с радиационными дефектами.

На основе новой технологии [3] нами были изготовлены образцы кремния, легированные никелем. При этом исходным образцом служил промышленный монокристаллический кремний *n*-типа с удельным сопротивлением $\rho=20\text{--}100$ Ом·см и *p*-типа с $\rho\sim 100$ Ом·см. Условия легирования выбирались такими, чтобы получить образцы с различной плотностью кластеров и концентрацией электроактивных атомов. Состояние и плотность кластеров атомов никеля в кремнии исследовались инфракрасным микроскопом МИК-5 с максимальной кратностью увеличения. Концентрация электроактивных атомов никеля определялась из измерения эффекта Холла с учетом энергетических уровней никеля в запрещенной зоне кремния. На основе этих результатов образцы были разделены на три группы. Первая – образцы с максимальной концентрацией электроактивных атомов $N\sim 2\cdot 10^{14}$ см⁻³ и с максимальной плотностью кластеров $f\sim 10^6\text{--}10^7$ см⁻², полученные на основе кремния КЭФ-20. Вторая – образцы на основе кремния *p*-типа с $\rho\sim 200$ Ом·см и концентрацией электроактивных атомов никеля $N\sim (5\text{--}7)\cdot 10^{13}$ см⁻³ и плотностью кластеров $f\sim 10^4$ см⁻². Третья – образцы, полученные на основе кремния *n*-типа, с $\rho\sim 60$ Ом·см и такой же плотностью кластеров электроактивных атомов никеля, как у II группы образцов. Основные электрофизические параметры этих образцов до и после легирования приведены в таблице.

Электрические параметры образцов после диффузии и облучения

Группа образцов	До диффузии		После диффузии		После γ -облучения							
	ТП	ρ , Ом·см	ТП	ρ , Ом·см	$10^6 P$		$10^7 P$		$10^8 P$		$10^9 P$	
					ТП	ρ , Ом·см	ТП	ρ , Ом·см	ТП	ρ , Ом·см	ТП	ρ , Ом·см
I	<i>n</i>	20	<i>n</i>	$1,4\cdot 10^4$	<i>p</i>	$9,7\cdot 10^3$	<i>p</i>	$8\cdot 10^2$	<i>p</i>	19	<i>p</i>	10
II	<i>p</i>	$2\cdot 10^2$	<i>p</i>	$2,8\cdot 10^2$	<i>p</i>	$1,9\cdot 10^2$	<i>p</i>	$1,75\cdot 10^2$	<i>p</i>	$2\cdot 10^2$	<i>p</i>	$2,5\cdot 10^2$
III	<i>n</i>	$2\cdot 10^2$	<i>n</i>	$4,2\cdot 10^4$	<i>n</i>	$4,4\cdot 10^4$	<i>n</i>	$4,2\cdot 10^4$	<i>n</i>	$4,1\cdot 10^4$	<i>n</i>	$4,6\cdot 10^4$
I _к	<i>n</i>	20	<i>n</i>	20	<i>n</i>	25	<i>n</i>	27	<i>n</i>	30	<i>n</i>	48
II _к	<i>p</i>	10^2	<i>p</i>	10^2	<i>p</i>	10^2	<i>p</i>	10^2	<i>p</i>	$8\cdot 10^2$	<i>p</i>	$1,5\cdot 10^2$
III _к	<i>n</i>	$2\cdot 10^2$	<i>n</i>	$2\cdot 10^2$	<i>n</i>	$2\cdot 10^2$	<i>n</i>	$3,2\cdot 10^2$	<i>n</i>	$9\cdot 10^4$	<i>n</i>	$5\cdot 10^4$

Примечание. I_к, II_к, III_к – контрольные образцы, ТП – тип проводимости, ρ – электрическое удельное сопротивление

На рис. 1 представлено распределение кластеров в полученных образцах. Расчет показывает, что плотность кластеров можно изменить в зависимости от условий легирования ($f \sim 10^4 - 10^7 \text{ см}^{-2}$). Размеры кластеров $d = 0,1 - 10 \text{ мкм}$. Если учесть, что основная часть введенных атомов никеля в кремний находится в электронейтральном состоянии (99,9%), а максимальная концентрация электроактивных атомов составляет $N \sim 4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ [5], то можно предполагать, что кластеры состоят в основном из электронейтральных атомов.

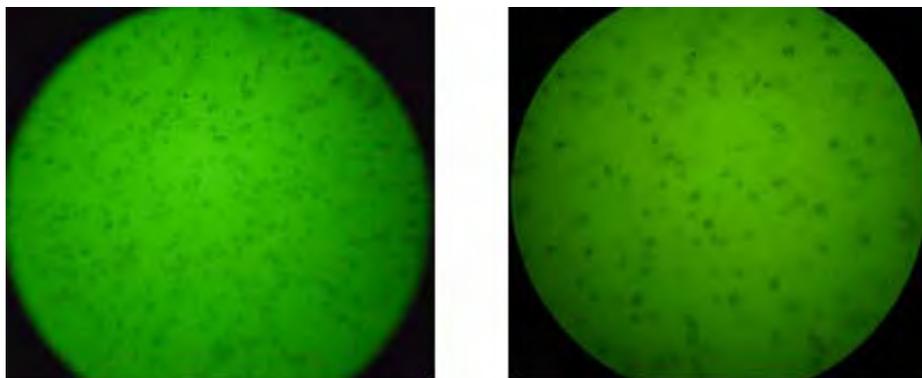


Рис. 1. Распределение кластеров атомов никеля в образцах $\text{Si}\langle\text{Ni}\rangle$

Образцы I, II и III групп подвергались γ -облучению Co^{60} с $E=1,17 \text{ МэВ}$ и интенсивностью 3000 р/с в идентичных условиях. После каждого этапа облучения измерялись электрические параметры и распределение кластеров.

Следует отметить, что кластеры по всему объему кристалла распределены равномерно, о чем свидетельствуют результаты исследования состояния кластеров в образцах, которые подвергались поэтапной шлифовке с поверхности по 50 мкм до половины толщины образцов.

Как видно из таблицы, первая группа образцов после легирования становится n -типа с $\rho \sim 10^4 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, и с ростом дозы облучения в ней происходит инверсия типа проводимости, то есть материал становится p -типа, а удельное сопротивление уменьшается и достигает 10 Ом·см при высоких дозах облучения.

Исследование температурной зависимости постоянной Холла и фотопроводимости таких образцов показало, что в них наблюдается энергетический уровень с энергией ионизации $E = E_v + 0,2 \text{ эВ}$, который соответствует уровню атомов никеля в кремнии [6]. Таким образом, можно утверждать, что в таких образцах в процессе облучения увеличивается концентрация электроактивных атомов никеля.

Эти результаты можно объяснить тем, что вакансия, возникающая при облучении, видимо, взаимодействует с кластерами и захватывает атомы никеля, что и приводит к увеличению концентрации электроактивных атомов никеля. Установлено, что с помощью облучения концентрацию электроактивных атомов никеля можно увеличить на 1,5–2 порядка. Результаты исследования состояния кластеров в таких образцах показали, что существенных изменений в них практически не происходит. Это, видимо, связано с тем, что концентрация электроактивных атомов никеля составляет около 0,5–1% от общей концентрации никеля, введенного в кремний.

Во второй и третьей группах образцов наблюдаются очень интересные явления. Так, с ростом дозы облучения электрические параметры этих образцов практически не меняются, хотя они имели достаточно высокие удельные сопротивления после легирования как n -типа (II группа образцов), так и p -типа (III группа образцов). В то же время свойства контрольных образцов без кластеров атомов никеля с такими же электрическими параметрами существенно изменяются (см. таблицу). На основе этих результатов можно утверждать, что при формировании небольшой плотности кластеров примесных атомов и концентрации электроактивных атомов никеля можно получить материал с высокой радиационной стойкостью до достаточно высоких доз облучения 10^9 Р . Исследования методом ИК микроскопии показали, что в образцах II и III групп в процессе облучения существенно меняются состояние и плотность кластеров, то есть вместо однородного распределения кластеров появляются так называемые «вакансионные петли» с различной ориентацией. Эти вакансионные петли состоят из многочисленных взаимосвязанных кластеров (рис. 2).

Эти результаты показывают, что, когда плотность кластеров невысокая, они могут захватывать как вакансии, так и междоузельные атомы кремния, то есть они являются центрами аннигиляции для радиационных дефектов.

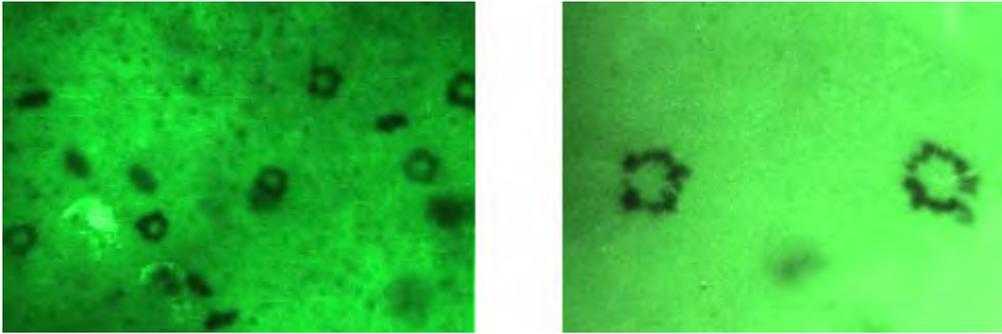


Рис. 2. Образование вакансионных петель, состоящих из кластеров атомов никеля

Таким образом, можно однозначно утверждать, что, управляя плотностью кластеров (когда $f \sim 10^6 \div 10^7 \text{ см}^{-3}$) атомов никеля в решетке кремния, можно заметно увеличить концентрацию электроактивных атомов никеля и существенно повысить радиационную стойкость кремния при $f \sim 10^5 \div 10^4 \text{ см}^{-3}$, что трудно достигнуть другими методами.

Авторы выражают благодарность профессору М.К. Бахадырханову за обсуждение и интерес к работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мильвидский М.Г., Чалдышев В.В. Наноразмерные атомные кластеры в полупроводниках – новый подход к формированию свойств материалов. *Физика и техника полупроводников*. 1998, **32**(5), 513–522.
2. Суздалев И.П. *Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов*. М.: Ком Книга, 2006. 592 с.
3. Бахадырханов М.К., Аюпов К.С., Илиев Х.М., Мавлонов Г.Х., Саттаров О.Э. Влияние электрического поля, освещенности и температуры на отрицательное магнетосопротивление в кремнии, легированном по методу «низкотемпературной диффузии». *Письма в ЖТФ*. 2010, **36**(16), 11–18.
4. Бахадырханов М.К., Мавлонов Г.Х., Аюпов К.С., Исамов С.Б. Отрицательное магнетосопротивление в кремнии с комплексами атомов марганца $[\text{Mn}]_4$. *Физика и техника полупроводников*. 2010, **44**(9), 1181–1184.
5. Бахадырханов М.К., Аюпов К.С., Арзукулов Э.У., Сражев С.Н., Тошбоев Т.У. Термические свойства кремния с кластерами атомов никеля. *Известия высших учебных заведений. ФИЗИКА*. ТГУ. 2008, (11/3), 170–172.
6. Болтакс Б.И., Бахадырханов М.К., Городецкий С.С., Куликов Г.С. *Компенсированный кремний*. М.: Наука, Л., 1972. 120 с.

Поступила 10.02.11
После доработки 09.03.11

Summary

In the article on the base of infrared microscopic investigations it is shown that clusters of nickel atoms impurity are equally distributed on the whole volume of the silicon crystal, as well as at gamma irradiation by changing density of clusters in silicon it is possible to control the concentration of electroactive atoms, as well clusters structure of nickel. It is shown, that presence of clusters in lattice essential increase radiation stability of silicon.