

ФОРМИРОВАНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ КЛАСТЕРОВ АТОМОВ ГАДОЛИНИЯ В КРЕМНИИ

Х.М. Илиев, З.М. Сапарниязова, К.А.Исмаилов, М.Х. Маджитов

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

Полупроводниковые материалы с наноразмерными структурами, особенно с нанокластерами примесных атомов, представляют большой научный и практический интерес [1, 2]. В таких материалах обнаружен ряд новых интересных физических явлений, вносящих большой вклад в развитие современной микро- и нанoeлектроники [3], в частности формирование нанокластеров атомов редкоземельных элементов.

Разработка технологии формирования кластеров примесных атомов редкоземельных элементов с управляемой структурой и свойствами в решетке кремния является одной из актуальных и перспективных задач современной нанoeлектроники. Ведь создание кластеров примесных атомов редкоземельных элементов в кремнии позволяет не только управлять фундаментальными параметрами кремния, его магнитными свойствами, но и выявляет ряд новых, еще неизвестных физических явлений [4].

Низкие значения коэффициента диффузии редкоземельных элементов [5] создают определенные трудности при использовании высокотемпературной диффузии для формирования нанокластеров этих примесных атомов в кристаллической решетке кремния.

Поэтому разработана технология поэтапной низкотемпературной диффузии гадолия в кремний, позволяющая создать нанокластеры примесных атомов с существенным магнитным моментом, распределенных по всему объему материала. Такие магнитные кластеры позволяют не только управлять магнитными свойствами материала, но и использовать эти материалы при разработке новых приборов спинтроники. Результаты исследования поверхности образцов после диффузии показали, что в отличие от образцов, полученных высокотемпературным диффузионным легированием, в образцах, выполненных по новой технологии, не было обнаружено эрозии поверхности, образования сплавов и силицидов в приповерхностной области.

Нанокластеры примесных атомов гадолия в объеме кристаллической решетки кремния исследованы при помощи инфракрасного микроскопа МИК-5. МИК-5 дает возможность не только наблюдать поверхность образца кремния, но и рассмотреть все его слои, то есть позволяет исследовать образец по всему объему.

На рис. 1 изображена микрофотография образца кремния, в который проводилась диффузия гадолия по обычной высокотемпературной диффузионной технологии. Как видно из рисунка, в образце, легированном гадолинием по обычной технологии, кластерообразования не происходит. Микрофотография поверхности образца кремния, легированной гадолинием поэтапной низкотемпературной диффузии, приведена на рис. 2. Для определения глубины проникновения диффундирующей примеси гадолия и наличия её кластеров в объеме образцы кремния, полученные по новой диффузионной технологии, подвергались последовательной шлифовке по 50 мкм, начиная с поверхности, с последующим измерением удельного сопротивления 4-зондовым методом и исследованием под микроскопом. После каждой шлифовки наличие кластеров гадолия проверялось микроскопом. Определено, что при толщине образца кремния в 1000 мкм гадолий проник на глубину 700 мкм от поверхности, а кластеры образовались в слое толщиной 400 мкм и распределены равномерно по всей толщине. После снятия слоя толщиной 350 мкм кластеры гадолия оказались на поверхности образца (рис. 3).

Нами установлено, что при поэтапной низкотемпературной диффузии температура и время диффузии влияют не только на глубину проникновения примеси, но и на размеры формирующихся кластеров, а также могут стать причиной их неформирования. На рис. 4 изображена микрофотография образца кремния, полученного двухстадийной диффузией гадолия при

относительно низких конечных температурах и времени выдержки. Как видно, количество образовавшихся кластеров очень мало, а также малы их размеры, которые составляют порядка сотен нанометров.



Рис. 1. Микрофотография объема образца кремния, в который проводилась диффузия гадолиния по обычной высокотемпературной диффузионной технологии

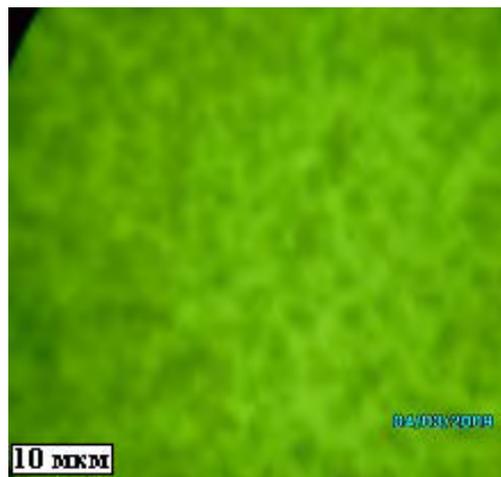


Рис. 2. Микрофотография поверхности образца кремния, легированного гадолинием поэтапной низкотемпературной диффузией

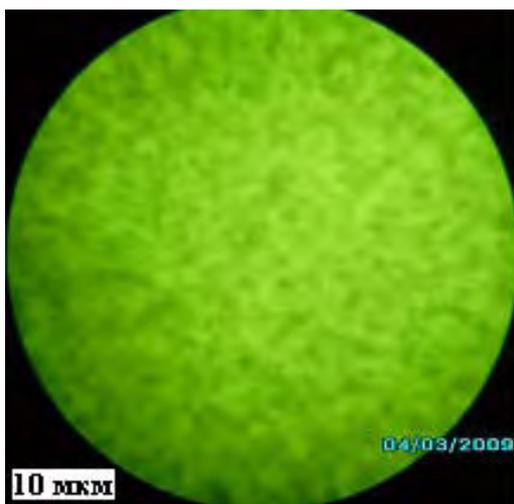


Рис. 3. Микрофотография образца кремния, легированного гадолинием поэтапной низкотемпературной диффузией после снятия слоя толщиной 350 мкм (кластеры гадолиния оказались на поверхности образца)



Рис. 4. Микрофотография образца кремния, полученного двухстадийной диффузией гадолиния при относительно низких конечных температурах и времени выдержки

При дальнейшем увеличении количества этапов диффузии, их продолжительности и температуры получены крупные кластеры примесных атомов гадолиния размером в несколько микрон, равномерно распределенные по объему образца.

Интересные результаты были получены при трехстадийной диффузии. При этом образовывались кластеры с участием дефектов кристаллической решетки кремния (рис. 5).

Исследование влияния низкотемпературных обработок на размеры и распределение кластеров показало, что при отжиге в интервале температур $500 \div 700^{\circ}\text{C}$ наблюдается упорядочение кластеров примесных атомов гадолиния. Дальнейшее повышение температуры отжига приводит к разрушению кластеров гадолиния в объеме кремния.

Анализ проведенных исследований и полученных результатов по формированию кластеров примесных атомов гадолиния показал, что при более тонких исследованиях данного явления будет возможным установление технологических условий и режимов, позволяющих перемещать кластеры

в нужное место и изготавливать различные приборы типа диодов, транзисторов, резисторов и конденсаторов в объеме полупроводника на их основе.

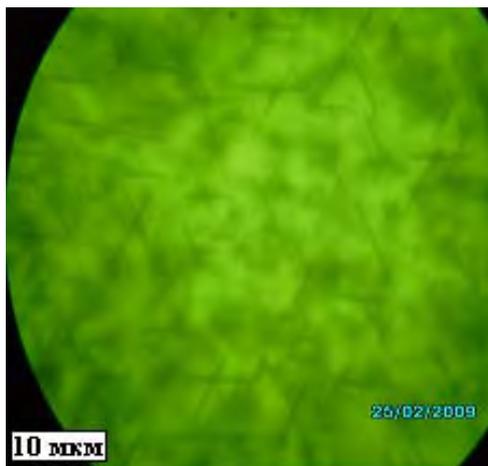


Рис. 5. Микрофотография образца кремния, полученного трехстадийной диффузией гадолиния при относительно высоких конечных температурах и длительном времени выдержки

Предварительные исследования показали, что такие материалы обладают достаточно высокой радиационной стойкостью и высокими значениями отрицательного магнитосопротивления при комнатной температуре.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мильвидский М.Г., Чалдышев В.В. Наноразмерные кластеры в полупроводниках – новый подход к формированию свойств материалов. *ФТП*. 1998, **32**(5), 513–520.
2. Суздаев И.П. *Нанотехнология: физикохимия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов*. М.: Ком. Книга, 2006. 592 с.
3. Бахадирханов М.К., Аюпов К.С., Мавлянов Г.Х., Зикриллаев Н.Ф., Исамов С.Б., Ковешников С.В. *Исследования зависимости отрицательного магнитосопротивления в кремнии от концентрации нанокластеров атомов марганца*. Труды международной конференции “Кремний-2009”. 7–9 июля. Новосибирск. 194 с.
4. Баграев Н.Г., Романов В.В. Магнетизм кристаллов $A^{III}B^V$, легированных редкими землями. *ФТП*. 2005, **39**(10), 1173–1182.
5. Назыров Д.Э. Диффузия европия в кремнии. *ФТП*. 2003, **37**(5), 570–571.

Поступила 07.06.10

Summary

The technology of step-by-step low-temperature diffusion of gadolinium in silicon, which allows to create nanoclusters of impurity atoms with significant magnetic moments distributed throughout the volume of material has been developed. It is shown that in contrast to the samples obtained by high temperature doping the samples obtained by the new technology do not have surface erosion, formation of oxides and silicides of the surface region. Nanoclusters of impurity atoms of gadolinium in the volume of the crystal lattice of silicon were studied using an infrared microscope MIC-5. It was determined that during the step-by-step low-temperature diffusion process the temperature and diffusion time affect not only the depth of penetration of impurities, but also on the dimensions of the emerging clusters, and may cause them not to form. Studies of the effect of low-temperature treatments on the size and distribution of the clusters showed that at annealing in the temperature range 500–700 °C the ordering of clusters of impurity atoms of gadolinium. Was observed further increase of annealing temperature leads to the destruction of gadolinium impurity clusters in the silicon bulk.