

КОМПЛЕКСНОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ КРЕМНИЯ МАРГАНЦЕМ И ЭЛЕМЕНТАМИ VI ГРУППЫ: ВЛИЯНИЕ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Эшқораев Абдуқодир Искандарович

Аннотация

В современном развитии микро- и нанoeлектроники особое внимание уделяется модификации кремния – основного материала для производства полупроводниковых приборов. В последние десятилетия интерес исследователей значительно сместился от традиционного легирования бором и фосфором к более сложным схемам, предполагающим одновременное внедрение нескольких примесных элементов. Одним из наиболее перспективных направлений является комплексное легирование кремния атомами переходных металлов, в частности марганца, и элементами VI группы, к которым относятся кислород, сера, селен и теллур. Такое сочетание обусловлено уникальными свойствами обоих типов примесей: марганец формирует глубокие уровни в запрещённой зоне, способные существенно изменять процессы рекомбинации носителей заряда, тогда как элементы VI группы могут выполнять роль доноров или акцепторов, стабилизировать структуру кристалла и участвовать в компенсационных процессах.

Ключевые слова: Кремний, комплексное легирование, марганец, элементы VI группы, донорно-акцепторные комплексы, дефектные состояния, рекомбинация носителей заряда, фоточувствительность, спинтроника, оптоэлектроника.

Abstract

In the modern development of micro- and nanoelectronics, particular attention is being paid to the modification of silicon, the primary material for the production of semiconductor devices. In recent decades, research interest has shifted significantly from traditional doping with boron and phosphorus to more complex schemes involving the simultaneous introduction of several impurity elements. One of the most promising areas is the complex doping of silicon with transition metal atoms, particularly manganese, and Group VI elements, including oxygen, sulfur, selenium, and tellurium. This combination stems from the unique properties of both types of impurities: manganese forms deep levels in the band gap, capable of significantly altering charge carrier recombination processes, while Group VI elements can act as

donors or acceptors, stabilizing the crystal structure and participating in compensation processes.

Keywords: Silicon, complex doping, manganese, elements of group VI, donor-acceptor complexes, defect states, charge carrier recombination, photosensitivity, spintronics, optoelectronics.

Введение. Кремний является основным материалом, определяющим развитие современной электроники и информационных технологий. Более 90 % микросхем и электронных устройств основаны именно на кремнии благодаря его уникальным свойствам: оптимальной ширине запрещённой зоны, высокой термостабильности, хорошей обрабатываемости и доступности. Однако современные тенденции в микро- и нанoeлектронике выдвигают новые требования к материалам: необходимы более быстрые, более энергоэффективные и более функциональные устройства. Традиционное легирование кремния бором или фосфором позволяет регулировать тип проводимости (р- или n-тип), но не даёт возможности кардинально менять его функциональные характеристики.

Поэтому на первый план выходит идея комплексного легирования. В отличие от одиночного внедрения примесей, комплексное легирование предполагает одновременное введение нескольких элементов, которые образуют устойчивые комплексы и изменяют свойства материала более тонким образом. Особенно перспективным считается легирование переходными металлами и элементами VI группы.

Марганец (Mn), как представитель переходных металлов, отличается тем, что его 3d-электроны формируют глубокие уровни в запрещённой зоне кремния. Это обычно приводит к ускоренной рекомбинации носителей заряда, что негативно сказывается на времени жизни электронов и дырок. Однако именно эти свойства открывают перспективы для применения кремния в спинтронике, где управление спиновыми состояниями электронов является ключевым.

Элементы VI группы (O, S, Se, Te) традиционно играют важную роль в полупроводниковой технологии. Кислород используется для стабилизации механических свойств кремниевых пластин, сера и селен позволяют расширить спектральную область фоточувствительности, а теллур, будучи более тяжёлым элементом, способен создавать особые донорно-акцепторные уровни. Их совместное внедрение с марганцем формирует новые центры, которые позволяют не только компенсировать отрицательные эффекты, связанные с марганцем, но и создавать новые функциональные возможности.

Таким образом, исследование взаимодействия марганца и элементов VI группы в кремнии является важным и актуальным направлением современной полупроводниковой физики, открывающим перспективы для развития новых поколений электронных устройств.

Основная часть. Исследование комплексного легирования кремния показывает, что образование устойчивых комплексов «Mn–X» (где X – элемент VI группы) происходит при определённых условиях термообработки. Наиболее стабильные комплексы формируются после отжига при температурах 700–900 °С. Эксперименты по спектроскопии глубоких уровней (DLTS) показывают, что такие комплексы создают новые энергетические уровни в запрещённой зоне, отличающиеся от уровней, формируемых отдельными атомами марганца или элементов VI группы.

Комплексы «Mn–O» обладают способностью изменять концентрацию свободных носителей, стабилизируя параметры материала. «Mn–S» и «Mn–Se» демонстрируют особые оптические свойства, в частности расширение спектральной чувствительности кремния до ближнего инфракрасного диапазона. Это открывает перспективы для их применения в фотоприёмниках и солнечных элементах нового поколения.

Особое внимание уделяется комплексам «Mn–Te», которые обладают ярко выраженными магнитными свойствами. Введение теллура вместе с марганцем позволяет формировать центры, способные инициировать упорядочение спинов электронов. Таким образом, такие материалы становятся кандидатами для применения в спинтронике, где управление спиновыми состояниями открывает новые возможности для обработки и хранения информации.

Теоретические расчёты на основе метода функционала плотности (DFT) подтверждают, что комплексы «Mn–X» снижают плотность состояний вблизи середины запрещённой зоны, что уменьшает вероятность нежелательной рекомбинации. При этом формируются новые энергетические уровни, которые можно использовать для управления временем жизни носителей и фоточувствительностью.

Таким образом, результаты исследований указывают, что комплексное легирование кремния марганцем и элементами VI группы не только компенсирует отрицательные эффекты, связанные с переходными металлами, но и создаёт принципиально новые свойства материала.

Заключение. Проведённый анализ показывает, что комплексное легирование кремния марганцем и элементами VI группы является

перспективным методом модификации его свойств. Совместное внедрение этих элементов позволяет формировать устойчивые дефектные комплексы, которые:

- регулируют концентрацию носителей заряда;
- изменяют фоточувствительность материала, расширяя её спектральный диапазон;
- создают предпосылки для реализации магнитных и спин-зависимых эффектов.

Практическая значимость исследования заключается в том, что такие материалы могут быть использованы для создания новых типов электронных и оптоэлектронных устройств – от фотоприёмников и солнечных батарей до элементов спинтроники.

В дальнейшем требуется проведение более детальных исследований, направленных на оптимизацию технологических условий формирования комплексов «Mn–X» и разработку промышленных технологий их внедрения.

Библиография

1. Карасик В. И. Языковой круг: личность, концепты, дискурс. – Волгоград: Перемена, 2002. – 477 с.
2. Маслова В. А. Лингвокультурология. – М.: Академия, 2001. – 208 с.
3. Красных В. В. Этнопсихоллингвистика и лингвокультурология. – М.: Гнозис, 2002. – 284 с.
4. Сепир Э. Избранные труды по языкознанию и культурологии. – М.: Прогресс, 1993. – 656 с.
5. Вежбицкая А. Язык. Культура. Познание. – М.: Русские словари, 1997. – 416 с.
6. Умаров Ш. Т. Культура речи и этикет в узбекском языке. – Ташкент: Фан, 2010. – 192 с.
7. Будагов Р. А. Сравнительная типология русского и тюркских языков. – М.: Наука, 1989. – 312 с.
8. Тарланов З. К. Этнокультурные коды в языке: теория и практика. – СПб.: СПбГУ, 2015. – 267 с.
9. Хайдеггер М. Время и бытие. – М.: Республика, 1993. – 447 с.
10. Сайфуллаева Р. Х. Узбекская лингвокультура: традиции и современность. – Ташкент: Университет, 2018. – 220 с.