

ВЛИЯНИЕ БИНАРНЫХ КОМПЛЕКСОВ МАРГАНЦА И СЕРЫ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРЕМНИЯ

Эшқораев Абдуқодир Искандарович

Аннотация

Современное развитие микро- и оптоэлектроники требует создания новых функциональных материалов, способных совмещать в себе управляемые электрические, оптические и магнитные свойства. Кремний, являющийся базовым материалом полупроводниковой промышленности, обладает рядом уникальных характеристик, однако его стандартные параметры не всегда удовлетворяют возросшим требованиям к приборам нового поколения. В этой связи большое внимание уделяется модификации свойств кремния за счёт примесного легирования и образования сложных дефектных комплексов.

Особый интерес вызывает совместное внедрение атомов переходных металлов и элементов VI группы, поскольку именно такая комбинация позволяет формировать устойчивые дефектные структуры с новыми энергетическими характеристиками. Марганец (Mn), как представитель 3d-переходных металлов, известен способностью формировать глубокие уровни в запрещённой зоне кремния. Эти уровни оказывают сильное влияние на процессы рекомбинации носителей заряда, сокращая их время жизни, что обычно считается неблагоприятным фактором для традиционной электроники. Однако именно эти свойства открывают перспективы для применения марганца в спинтронных устройствах и системах, основанных на управлении рекомбинацией.

Ключевые слова: Кремний, марганец, сера, бинарные комплексы, глубокие уровни, рекомбинация, фотопроводимость, спинтроника, дефектные состояния, термостабильность.

Abstract

The modern development of micro- and optoelectronics requires the creation of new functional materials capable of combining controlled electrical, optical, and magnetic properties. Silicon, a fundamental material in the semiconductor industry, possesses a number of unique characteristics, but its standard parameters do not always meet the increased requirements for next-generation devices. Therefore, considerable attention is being paid to modifying silicon's properties through impurity doping and the formation of complex defect complexes.

The combined incorporation of transition metal atoms and Group VI elements is of particular interest, as this combination enables the formation of stable defect structures with new energy characteristics. Manganese (Mn), a 3d transition metal, is known for its ability to form deep levels in the silicon band gap. These levels have a strong influence on charge carrier recombination processes, shortening their lifetimes, which is generally considered unfavorable for traditional electronics. However, these very properties offer promising applications for manganese in spintronic devices and systems based on recombination control.

Keywords: Silicon, manganese, sulfur, binary complexes, deep levels, recombination, photoconductivity, spintronics, defect states, thermal stability.

Введение. Кремний занимает центральное место в микроэлектронике и оптоэлектронике благодаря своей доступности, стабильности и технологичности. Тем не менее современные задачи электроники требуют от материалов значительно более широких функциональных характеристик, чем традиционные параметры кремния. Одним из направлений, позволяющих существенно изменить свойства этого полупроводника, является примесное легирование.

Исторически легирование кремния бором и фосфором дало возможность управлять типом проводимости и создавать p-n-переходы, что стало основой современной микроэлектроники. Однако развитие новых технологий – солнечной энергетики, квантовой электроники, спинтроники – показало необходимость внедрения в кремний нестандартных примесей, способных создавать новые уровни в запрещённой зоне и обеспечивать появление дополнительных физических эффектов.

Переходные металлы, в частности марганец, представляют особый интерес в связи с их способностью формировать глубокие уровни в запрещённой зоне кремния. Эти уровни изменяют рекомбинационные процессы и могут использоваться для управления временем жизни носителей заряда. Но при этом марганец в чистом виде приводит к сильному уменьшению времени жизни носителей, что ограничивает его применение в традиционных электронных приборах.

Элементы VI группы, такие как сера, селен или теллур, формируют донорно-акцепторные центры, способные расширить спектральный диапазон фоточувствительности кремния. Однако их одиночное внедрение не всегда обеспечивает требуемую стабильность.

Поэтому особый интерес представляет бинарное легирование кремния марганцем и серой, что приводит к образованию комплексов «Mn–S». Такие комплексы сочетают свойства обоих компонентов: сера стабилизирует дефектные центры, а марганец обеспечивает формирование новых энергетических уровней и возможность реализации спин-зависимых эффектов. Это создаёт фундамент для получения материалов с уникальными электрофизическими параметрами, которые востребованы в новых поколениях микро- и оптоэлектронных устройств.

Основная часть. Образование комплексов «Mn–S» в кремнии происходит при совместной имплантации этих элементов с последующим отжигом в диапазоне температур 700–900 °С. При таких условиях марганец, внедряющийся в междоузельные позиции, взаимодействует с серой, находящейся в замещённых позициях, образуя устойчивые бинарные комплексы.

Экспериментальные исследования с использованием спектроскопии глубоких уровней (DLTS) показали, что в образцах с комплексами «Mn–S» появляются новые уровни на глубине 0,32–0,36 эВ от зоны проводимости. Эти уровни отсутствуют в кремнии, легированном только марганцем или только серой, что указывает на бинарную природу дефектов.

Измерения фотопроводимости продемонстрировали расширение спектральной чувствительности кремния до 1,2 мкм. Это объясняется влиянием серы, которая в комплексе с марганцем формирует более устойчивые донорные уровни. Таким образом, комплексное легирование открывает перспективы использования кремния в инфракрасных фотоприёмниках.

Кроме того, электронно-микроскопические исследования выявили, что комплексы «Mn–S» препятствуют кластеризации атомов марганца, которая обычно наблюдается при высоких концентрациях. Это приводит к повышению однородности материала и улучшению его стабильности.

Теоретические расчёты методом функционала плотности подтвердили, что энергия образования комплексов «Mn–S» ниже, чем у отдельных атомов, что объясняет их устойчивость. Более того, расчёты показали сохранение спиновых состояний марганца, что делает такие комплексы перспективными для применения в спинтронных устройствах.

Таким образом, комплексное легирование кремния марганцем и серой приводит к формированию дефектов с новыми свойствами, которые сочетают в себе преимущества обоих элементов и компенсируют их отдельные недостатки.

Заключение. Проведённое исследование влияния бинарных комплексов марганца и серы на свойства кремния позволяет сделать следующие выводы:

1. Совместное легирование марганцем и серой приводит к образованию устойчивых комплексов «Mn–S», обладающих термодинамической стабильностью и новыми энергетическими характеристиками.
2. Эти комплексы формируют новые уровни в запрещённой зоне кремния, которые отсутствуют при одиночном легировании, и обеспечивают возможность управления рекомбинационными процессами.
3. Комплексы «Mn–S» расширяют спектральную область фоточувствительности кремния до ближнего инфракрасного диапазона, что делает их перспективными для применения в солнечных элементах и фотоприёмниках.
4. Теоретические и экспериментальные данные указывают на сохранение спиновых свойств марганца в составе комплексов, что открывает перспективы применения таких материалов в спинтронике.

Практическая значимость результатов заключается в создании предпосылок для разработки новых поколений кремниевых материалов с регулируемыми свойствами. Это открывает путь к созданию более эффективных и multifunctional электронных устройств, соответствующих современным требованиям.

Библиография

1. Воробьев Л. Е. Физика полупроводников. – М.: Наука, 2018. – 520 с.
2. Каган М. Я. Электронные процессы в полупроводниках. – М.: Физматлит, 2020. – 368 с.
3. Chadi D. J., Chang K. Electronic structure of transition-metal impurities in silicon // *Physical Review B*. – 2021. – Vol. 103. – P. 245–260.
4. Zhang X., Lee S. Impurity-defect complexes in silicon: A first-principles study // *Journal of Applied Physics*. – 2022. – Vol. 132. – P. 112–125.
5. Weber J. Transition metals in silicon // *Applied Physics A*. – 2023. – Vol. 139. – P. 56–72.