Влияние поверхности на диффузию и взаимодействие In и As в SiO₂ в условиях ионного синтеза нанокристаллов InAs

Тыщенко И.Е.¹, Voelskow M.², Михайлов А.Н.³, Тетельбаум Д.И.³

¹ ИФП СО РАН, 630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13

² Institute of Ion-Beam Physics and Materials Research, Helmholtz-Center Dresden–Rossendorf, D-01314 Dresden

³ Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, пр. Гагарина, 23/3, Нижний Новгород

DOI 10.34077/Semicond2019-272

Кремниевая технология, базирующаяся на классической интеграции комплементарных транзисторов металл-диэлектрик-полупроводник, исчерпала возможности дальнейшего увеличения плотности элементов интегральных схем. Возможный путь для решения проблемы увеличения быстродействия интегральных схем и снижения выделений тепла видится в создании гибридных интегральных схем, объединяющих элементы с различными функциональными свойствами (электронными, фотонными, спиновыми и др.).

Реализация таких схем требует создания новых многофункциональных материалов. В качестве таких материалов могут быть использованы нанокристаллы соединений A₃B₅, интегрированные в единую кремниевую платформу. Соединения на основе индия, такие как InSb и InAs, обладают низкими значениями эффективной массы электронов и высокими значениями диэлектрической проницаемости, что делает возможным проявление в них квантово-размерного эффекта в широком диапазоне размеров. Это открывает перспективы их использования для создания оптической связи на кремнии. Ионный синтез соединений InAs в оксиде кремния имеет особенности, обусловленные в первую очередь различием их коэффициентов диффузии и сегрегацией In на границу раздела Si/SiO₂. Поэтому в данной работе были изучены диффузионные свойства In и As в SiO₂ и установлены условия предпочтительного их взаимодействия в зависимости от состояния поверхности оксида кремния.

Атомы In и As были имплантированы в термически выращенные пленки SiO₂ толщиной ~280 нм. Ионы As⁺ с энергией 135 кэВ дозой 1×10¹⁶ см⁻² и In⁺ с энергией 50 кэВ дозой 4×10¹⁵ см⁻² создавали профили в форме распределения Гаусса с концентрацией на глубине средних проецированных пробега ~1.5 ат.%, а средний проецированный пробег ионов As⁺ был в 2 раза больше, чем пробег In⁺. Методы резерфордского обратного рассеяния, электронной микроскопии и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии были использованы для анализа пространственного распределения имплантированных атомов и структурных свойств пленок до и после отжига при температуре 800–1100 °С, 30 минут в потоке паров азота. Установлено, что после отжига при T=800–900 °С происходит сегрегация атомов As на глубине средних пробега и формирование нанокристаллов As, которые являются стоками для атомов In. Увеличение температуры отжига до 1100 °С приводит к диффузии и сегрегации атомов In на поверхности SiO₂ и одновременной ускоренной диффузии атомов мышьяка с коэффициентом D_{As} = 3.2×10⁻¹⁴ см²/с. Особенности диффузионных свойств атомов индия и мышьяка рассматриваются с точки зрения их положения в матрице и на поверхности SiO₂.

Рис.1. – Электронно-микроскопическое изображение поперечного среза пленок SiO₂ на кремниевой подложке, имплантированных ионами In⁺ и As⁺ после отжига при температуре 900 (a) и 1100 °С (b) и соответствующие изображения отдельных нанокристаллов.

Атомы In и As были имплантированы в термически выращенные пленки SiO₂ толщиной ~280 нм. Ионы As⁺ с энергией 135 кэВ дозой 1×10¹⁶ см⁻² и In⁺ с энергией 50 кэВ дозой 4×10¹⁵ см⁻² создавали профили в форме распределения Гаусса с концентрацией на глубине средних проецированных пробега ~1.5 ат.%, а средний проецированный пробег ионов As⁺ был в 2 раза больше, чем пробег In⁺. Методы резерфордского обратного рассеяния, электронной микроскопии и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии были использованы для анализа пространственного распределения имплантированных атомов и структурных свойств пленок до и после отжига при температуре 800–1100 °С, 30 минут в потоке паров азота. Установлено, что после отжига при T=800–900 °С происходит сегрегация атомов As на глубине средних пробега и формирование нанокристаллов As, которые являются стоками для атомов In. Увеличение температуры отжига до 1100 °С приводит к диффузии и сегрегации атомов In на поверхности SiO₂ и одновременной ускоренной диффузии атомов мышьяка с коэффициентом D_{As} = 3.2×10⁻¹⁴ см²/с. Особенности диффузионных свойств атомов индия и мышьяка рассматриваются с точки зрения их положения в матрице и на поверхности SiO₂.