

СТРУКТУРА СЛОЕВ КРЕМНИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО ЖЕЛЕЗОМ ИЛИ ЭРБИЕМ, ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ МОЩНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

П. И. Гайдук¹⁾, Р. И. Баталов²⁾, Р. М. Баязитов²⁾, Г. Д. Ивлев³⁾

¹⁾Белгосуниверситет (220030, Минск, Беларусь, пр. Ф. Скарины, 4)

²⁾Казанский ФТИ КНЦ РАН (420029, Казань, Сибирский тракт, 10/7)

³⁾ИЭ НАНБ (220090, Минск, Беларусь, Логойский тракт, 22)

Мощные импульсные потоки лазерного излучения в наносекундном диапазоне длительности (10 – 100 нс) успешно используются для модификации поверхности полупроводников. В частности, применение лазерного облучения для отжига ионно-легированных слоев кремния позволяет формировать структуры с уникальными свойствами – пересыщенные твердые растворы, неравновесные фазы, ячеистые сегрегационные структуры, наноразмерные преципитаты и др. [1, 2]. Кратковременность импульсного воздействия (менее 1 мкс) и его локальность по глубине материала (менее 5 мкм) позволяют проводить отжиг имплантированных слоев и синтез новых соединений без значительного нагрева всего кристалла. Особый интерес представляет синтез структур на основе кремния, способных излучать в области 1.5 – 1.6 мкм – сплошных и наноразмерных слоев полупроводникового дисилицида железа (β -FeSi₂), а также слоев кремния, легированных ионами Er⁺. Эти структуры имеют прямые переходы и обладают приемлемыми люминесцентными свойствами в области 1.5 – 1.6 мкм при температурах выше 300 К [3, 4]. В настоящей работе исследованы структурно-фазовые превращения в слоях кремния, имплантированных ионами Fe⁺ или Er⁺ после лазерного отжига, а также закономерности синтеза гетероструктур FeSi₂/Si и получения легированных слоев Si:Er⁺.

Пластины монокристаллического (100)-Si *n*-типа проводимости имплантировались ионами Fe⁺ (40 кэВ, 6×10^{16}) или Er⁺ (100 кэВ, 10^{15} см⁻²) при $T_{\text{комн}}$. Последующий лазерный отжиг (ЛО) имплантированного Si проводился импульсами рубинового лазера ($\lambda = 0.69$ мкм, $\tau = 80$ нс, $W = 0.6 - 2.5$ Дж/см²) на воздухе. Для исследования термической устойчивости структур в ряде случаев проводился дополнительный отжиг при температуре 800^oС длительностью 30 мин. Микроструктура и фазовый состав слоев исследовались методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и электронной дифракции. Распределение по глубине атомов Fe или Er после ионной имплантации и импульсных воздействий определялось методом резерфордовского обратного рассеяния (ROR).

Исследованы процессы синтеза тонких пленок силицидов железа при

ЛО слоев Si, имплантированных ионами Fe^+ с дозой $6 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$. На рис.1 приведены ПЭМ изображения в светлом и темном полях, полученные в планарных сечениях образцов Si после имплантации и ЛО с различной плотностью энергии в импульсах ($W = 1.4$ и 2.2 Дж/см^2). Обнаружено, что импульсный отжиг аморфных слоев Si с энергией 1.4 Дж/см^2 приводит к формированию мелкозернистого слоя, состоящего из случайно ориентированных включений вторичной фазы с размерами менее 50 нм (рис. 1а). Согласно данным электронной дифракции, включения вторичной фазы являются частицами метастабильной фазы $\gamma\text{-FeSi}_2$ с кубической кристаллической структурой типа CaF_2 и параметром решетки близким к кремнию. Увеличение W до 2.2 Дж/см^2 приводит к существенному изменению микроструктуры ионно-легированных слоев (рис. 1б), а именно, к формированию ячеистой сегрегационной структуры. Такая структура характерна для жидкофазной кристаллизации слоев, содержащих малорастворимую примесь в высокой концентрации [2]. Из результатов ПЭМ исследований получено, что ячейки имеют поперечные размеры $40 - 60 \text{ нм}$ и состоят из монокристаллического кремния. Атомы Fe сосредоточены в стенках ячеек толщиной $1 - 5 \text{ нм}$ (Рис. 1б) в виде метастабильной фазы $\gamma\text{-FeSi}_2$ с кристаллической структурой.

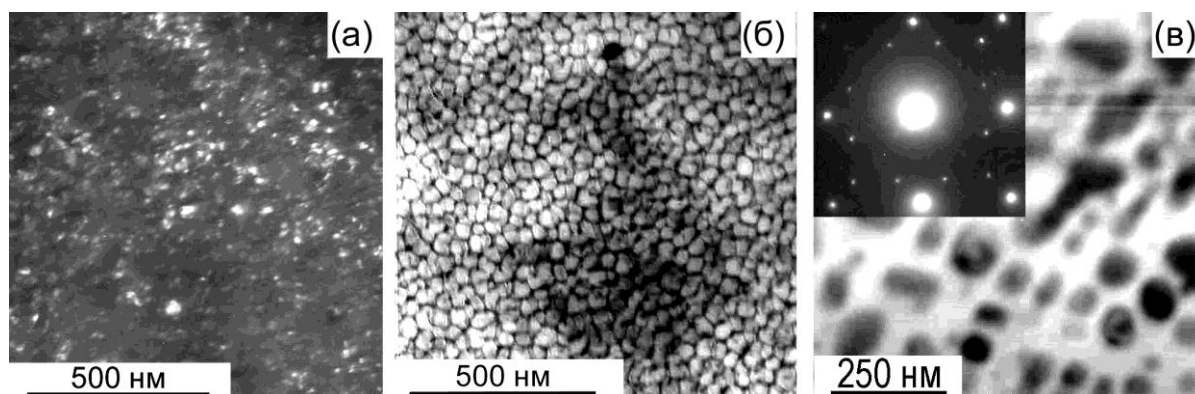


Рис. 1. Темнопольное (а) и светлопольные (б, в) ПЭМ изображения слоев Si после имплантации ионов Fe^+ (40 кэВ , $6 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$), импульсного лазерного отжига с плотностью энергии 1.4 Дж/см^2 (а) или 2.2 Дж/см^2 (б,в), а также после дополнительного термического отжига при 800°C , 30 мин

Таким образом, при ЛО слоев Si, имплантированных ионами Fe^+ , не происходит формирования полупроводниковой фазы $\beta\text{-FeSi}_2$, но образуется метастабильная фаза $\gamma\text{-FeSi}_2$ кубической модификации типа CaF_2 . Естественно ожидать, что при последующей термообработке, возможна трансформация $\gamma\text{-FeSi}_2$ в равновесную фазу силицида железа. Результаты ПЭМ исследований подтверждают эти ожидания, что иллюстрируется микрофотографиями структуры на рис. 1в. Установлено, что равновес-

ная 30–минутная термообработка при 800^oC лазерно-отожженных слоев приводит к исчезновению метастабильной фазы γ -FeSi₂ и трансформации ячеистой структуры в островковую (сравни рис. 1б и 1в). Электронная дифракция (вставка в рис. 1в) свидетельствует о полном отсутствии фазы γ -FeSi₂, вместо нее сформирован слой силицида β -FeSi₂. Установлено, что кристаллы β -FeSi₂ размером \sim 50-150 нм в основном, имеют ориентацию А-типа [5], т.е. FeSi₂(100)/Si(001) и FeSi₂[010] || Si<110>.

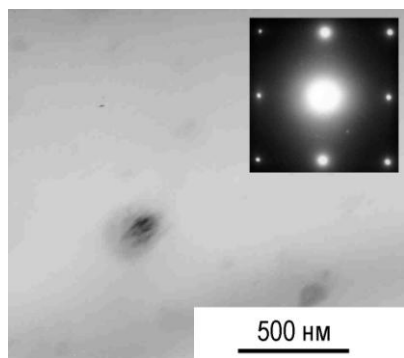


Рис. 2. ПЭМ изображение структуры Si после имплантации ионов Er⁺ (100 кэВ, 10¹⁵ см⁻²) и ЛО с плотностью энергии 2.0 Дж/см². На вставке приведена картина микродифракции

Микродифракция (вставка на рис. 2) обнаруживают, наряду с сильными рефлексами от подложки кремния, следы диффузных колец, указывающих на аморфное состояние материала в темных областях. Предполагается, что указанные области являются следствием поверхностной сегрегации и, возможно, окисления атомов Er. Этот вывод подтверждается также и результатами измерений РОР, которые демонстрируют как смещение пика от Er к поверхности, так и увеличение выхода РОР от кислорода.

Работа выполнялась при поддержке БРФФИ в рамках проекта T05-020, программы «Электроника», программы ОФН РАН «Новые материалы и структуры», Фонда содействия отечественной науке.

1. Двуреченский А. В., Качурин Г. А., Нудаев Е. В., Смирнов Л. С. Импульсный отжиг полупроводниковых материалов. М.: Наука, 1982. 208 с.
2. Поут Дж. М. Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками. М.: Машиностр., 1987. 424 с.
3. Leong D., Harry M., Reeson K. J., Homewood K. P. // Nature. 1997. Vol. 387. P. 686–688.
4. Coffa S., Tsybeskov L. Silicon-based optoelectronics. MRS bulletin, 1998. Vol. 23, № 4. P. 16–64.
5. Geib K. M., Mahan J. E., Long R. G. et. al. // J.Appl.Phys. 1991. Vol. 70. P. 1730–1736.