

ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫЕ ЯЧЕИСТЫЕ НАНОСТРУКТУРЫ КАК ПЛАТФОРМА ДЛЯ ГЕТЕРОЭПИТАКСИИ SiC/Si

П.И. Гайдук

*Белорусский государственный университет,
пр. Независимости 4, Минск 220030, Беларусь, gaiduk@bsu.by*

Сформированы нанопрофилированные поверхности кремния для последующего выращивания гетероэпитаксиальных слоев с высоким несоответствием параметров кристаллических решеток. Формирование профилированных буферных поверхностей проводили с использованием термического испарения или анодного травления самоорганизованных ячеистых SiGe структур. Методами просвечивающей электронной микроскопии показано формирование островковой структуры с высотой островков до 500 нм и их поперечным сечением 200-300 нм, разделенных канавками шириной 3-30 нм. Показано, что нанопрофилированные буферные слои пригодны для выращивания эпитаксиальных слоев SiC.

Ключевые слова: импульсная лазерная обработка; ячеистые профилированные поверхности; гетероэпитаксиальные структуры SiC/SiGe/Si.

LASER-INDUCED CELLULAR NANO-STRUCTURES: A PLATFORM FOR SiC/Si HETEROEPITAXY

Peter Gaiduk

*Belarusian State University,
4 Nezavisimosti Ave., Minsk 220030, Belarus, gaiduk@bsu.by*

Structural changes and segregation in SiGe alloy layers during laser-induced melting and fast crystallization are investigated. A special attention is devoted to formation of nanometer-scale cellular network. Initial structures of SiGe were grown by MBE. The samples were then treated by pulsed laser beam (25-100 ns, 0.2-3.5 J/cm²); time-resolved reflectivity measurements of melting, crystallization and segregation are proceeded. The structure, composition and optical properties of SiGe layers are studied by electron microscopy. A new approach for nano-profiling of the surface is proposed and implemented. The approach consists of pulsed laser melting of SiGe layers, self-organized formation of a cellular nanostructure followed by selective etching of Ge out of walls of the cells. The regimes of laser melting and anodic or thermal etching are achieved, in which the formation of epitaxial Si columns (200-300 nm in diameter and 500 nm in height), separated by grooves of 3-30 nm wide takes place. The nano-profiled SiGe/Si surface is finally applied for high-temperature growth of epitaxial SiC layers.

Keywords: pulsed laser treatment; cellular profiled surfaces; heteroepitaxial SiC/SiGe/Si structures.

Введение

Гетероструктуры SiC/Si представляют интерес в связи с возможностью монолитной интеграции приборов опто- и силовой электроники на Si-платформе [1]. Однако для выращивания структур SiC/Si эпитаксиального качества необходимо решить проблемы, связанные с несоответствием кристаллических решеток и различием термических параметров. При этом зачастую используют буферные слои переменного состава, в которых происходит релаксация напряжений несоответствия. В настоящей работе, для улучшения качества слоев SiC использованы нано-

профилированные буферные слои, которые потенциально позволяют уменьшать возникающие упругие напряжения [2]. При создании таких буферных слоев предложено использовать селективное травление ячеистой нано-сегрегационной структуры в SiGe сплавах.

Методическая часть

Эпитаксиальные слои Si_{1-x}Ge_x (x = 0.3 – 0.5) толщиной 1,3 мкм выращивали методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на Si-подложках. Структуры SiGe/Si облучали 80 нс импульсами рубинового лазера (λ=694.3 нм). Плотность энер-

гии лазерного излучения W изменялась от 0.9 до 2.5 Дж/см². Такие режимы импульсной лазерной обработки (ИЛО) позволяли формировать ячеистые наносегрегационные структуры различной морфологии. Процесс формирования ячеистой структуры мониторился путем измерения отражательной способности поверхности с временным разрешением (рис.1). Установлено, что продолжительность существования расплавленной фазы коррелирует с формированием ячеистой структуры на поверхности.

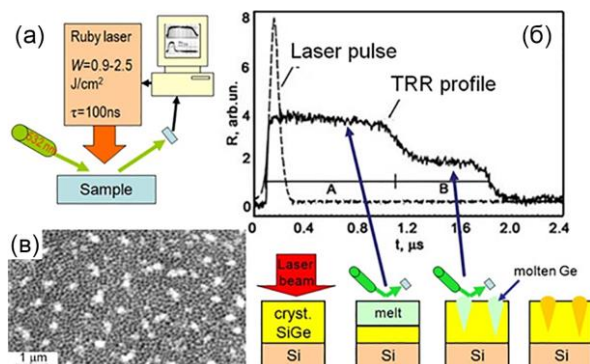


Рис. 1. (а) - схема эксперимента по импульсной лазерной обработке (ИЛО), (б) - отражательная способность с временным разрешением, (в) - РЭМ-изображение ячеистой структуры на поверхности

Наконец, структуры подвергались анодному или термическому оксидированию: при таких обработках происходит преимущественное образование оксида германия, который либо растворялся в водном растворе плавиковой кислоты (анодный процесс), либо испарялся (термическое оксидирование) из стенок ячеистой структуры. Термическое оксидирование проводили в установке быстрого термического отжига при 650 - 950 °С в атмосфере сухого кислорода.

Поверхностный слой SiC формировали при высокотемпературной термообработке в вакууме, содержащем остаточные пары углеводородных соединений в условиях: 1000 - 1200 °С, 10 мин, 3×10^{-3} Па. Структура образцов исследовалась методом просвечивающей (ПЭМ) и растровой (РЭМ) с использованием приборов Phillips CM 200 и Hitachi S860.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 (а, в) представлены типичные ПЭМ микрофотографии структуры слоя Si_{0.5}Ge_{0.5} после ИЛО с плотностью энергии 2 Дж/см². ПЭМ изображения имеют вид сетчатой (ячеистой) структуры. Анализ ПЭМ-контраста, полученного вдали от сильных дифракционных рефлексов, показал, что стенки ячеек содержат более тяжелые атомы (Ge) по сравнению с внутренним материалом ячеек (Si). Планарное сечение (рис. 2а) демонстрирует средний размер ячеек ~ 150 - 200 нм при толщине границ между ячейками – 5 - 30 нм. ПЭМ изображение слоев в поперечном сечении (рис. 1в) показывает, что стенки ячеек распространяются вглубь нормально к поверхности и, в зависимости от плотности энергии ИЛО, ячеистая структура проникает на глубину до 200 – 500 нм. Картины электронной дифракции (здесь не показаны) выявляют точечные рефлексы и отсутствие признаков поликристаллической структуры. Таким образом, ячеистая структура, представленная на рис. 2, представляет собой цилиндрические колонны монокристаллического кремния нанометровых размеров, окруженные стенками монокристаллического Ge толщиной 3-5 нм. Установлено, что средний диаметр ячеек увеличивается с ростом плотности энергии лазерного излучения с ~60 нм при $W=1.5$ Дж/см² до почти 300 нм при $W=2.5$ Дж/см², что связано с возрастанием глубины проплавления слоя и, как следствие, с уменьшением скорости фронта кристаллизации. В соответствии с результатами измерений временных зависимостей оптического отражения (рис. 1), величина скорости движения фронта рекристаллизации в использованных нами условиях отжига уменьшалась от 3 м/с до 0.8 м/с при увеличении плотности энергии от 1.5 до 2.5 Дж/см².

РЭМ микрофотографии на рис. 2 (б, г) демонстрируют вытравливание Ge из стенок ячеистой структуры и формирование островковой структуры после отжига в окисляющей среде (650°С, 10 мин).

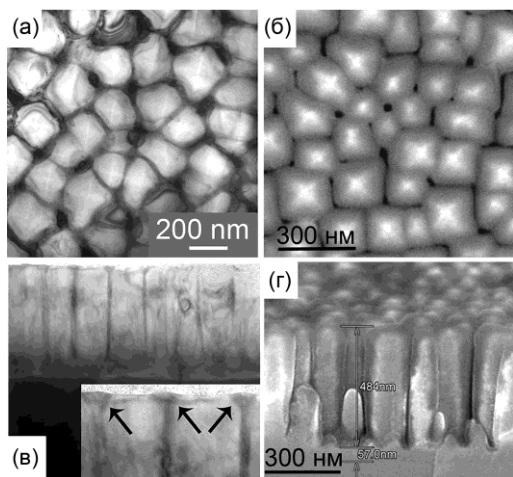


Рис. 2. ПЭМ (а, в) и РЭМ (б, г) - изображения эпитаксиальных слоев $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$ после ИЛО (а, в) и последующего БТО при 650°C , 10 мин в окисляющей среде

Островки Si высотой до 500 нм и с поперечным размером до 300 нм имеют сложную форму. Предположительно, в паре Si – Ge происходит преимущественное окисление атомов Ge с образованием оксидов Ge, которые, в свою очередь, являются летучими и испаряются при высокой температуре. Толщина вытравленных канавок (бывших стенок ячеистой структуры) между колонками типично составляет 10-20 нм, но в некоторых местах достигает и 50-80 нм. Форма большинства колонок в латеральном направлении близка к прямоугольной, что является следствием (001) ориентации Si.

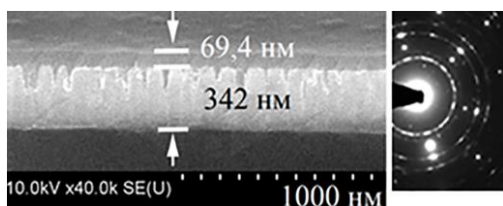


Рис. 3. РЭМ и ПЭД-изображения эпитаксиального слоя SiC, выращенного на ячеистой подложке

Структуры Si/SiGe с профилированными поверхностями использованы для выращивания слоев карбида кремния. Мето-

дами ПЭМ и электронной дифракции установлено, что высокотемпературная обработка профилированных подложек в вакуумной камере, содержащей остаточные пары углеводородных соединений (остаточный вакуум – 3×10^{-3} Па) при температуре 1100°C в течении 10 мин приводит к формированию слоя SiC толщиной около 70 нм (рис. 3). ПЭД-исследования показывают эпитаксиальное качество слоев с двойниками и дефектами упаковки.

Закключение

С помощью лазерного плавления и вакуумного травления изготовлены ячеистые структуры, которые можно использовать для выращивания гетероэпитаксиальных структур. Методами электронной микроскопии показана возможность получения островковой структуры с высотой островков до 500 нм и поперечным размером 200-300 нм, разделенных канавками шириной 3-30 нм. Показано, что нанопрофилированные буферные слои пригодны для выращивания тонких эпитаксиальных слоев карбида кремния.

Благодарности

Исследования проводили при финансовой поддержке БРФФИ в рамках проекта № T22-030 и проекта ГПНИ (№ Г/Р 20212702). Автор выражает благодарность Ивлеву Г.Д., Прокопьеву С.Л., Новикову А.Г. и Лобанку М.В. за помощь при проведении эксперимента.

Библиографические ссылки

1. Ferro G. 3C-SiC Heteroepitaxial Growth on Silicon: The Quest for Holy Grail. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sci.* 2015; 40: 56–76.
2. Luryi S., Suhir E. New approach to the high quality epitaxial growth of lattice-mismatched materials. *Appl. Phys. Lett.* 1986; 49: 140-142.