



Национальный
исследовательский

**Томский
государственный
университет**



Радиофизический
факультет



8-я Международная научно-практическая конференция
**Актуальные проблемы радиофизики
АПР 2019**

Сборник трудов конференции



РОССИЙСКИЙ ФОНД
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1-4 октября 2019 года
г. Томск

Рост квантовых точек Ge на окисленной поверхности Si

Лозовой Кирилл Александрович

Коханенко Андрей Павлович, Дирко Владимир Владиславович, Войцеховский Александр Васильевич
Томский государственный университет
E-mail: lka@sibmail.com

Материальная система германий/кремний является в настоящее время одной из самых перспективных для развития полупроводниковой электроники и фотоники. Структуры с квантовыми точками германия в кремнии представляют интерес с точки зрения создания быстродействующих транзисторов, фотодетекторов и солнечных элементов. Основным способом создания nanoостровков является их самоорганизация при молекулярно-лучевой эпитаксии германия на кремниевую подложку. Несмотря на то, что процессы эпитаксиального формирования квантовых точек в этой системе исследуются уже в течение продолжительного времени, в этом вопросе до сих пор много белых пятен, особенно касающихся теоретического описания процессов, происходящих на различных стадиях роста nanoостровков. Постоянно появляются и новые экспериментальные работы, обнаруживающие неожиданные эффекты при эпитаксии в системе германий/кремний [1].

Для эпитаксии германия исторически первыми использовались чистые поверхности кремния с кристаллографической ориентацией (100) и (111). Однако перед исследователями встала задача максимального уменьшения размеров синтезируемых островков и увеличения их плотности. Тогда стал изучаться рост при наличии на поверхности подложки сурфактантов, модифицирующих ее свойства. В качестве сурфактантов пробовались различные материалы, такие как сурьма, висмут, олово. Для всех этих систем характерен так называемый механизм роста по Странскому–Крастанову, когда на первом этапе формируется двумерный смачивающий слой осаждаемого материала, из которого затем зарождаются островки [2].

Особый интерес представляет рост германия на окисленной поверхности кремния. Именно в этой системе были получены островки с рекордно (предельно) высокой плотностью до 10^{12} – 10^{13} см⁻² и размерами меньше 10 нм [3, 4]. Однако до сих пор закономерности формирования и последующего роста nanoостровков германия на поверхности оксида кремния исследованы слабо. Отсутствуют физико-математические модели, позволяющие рассчитать, поверхностную плотность, средний размер и функцию распределения островков по размерам в этой материальной системе. Даются лишь порядковые оценки поверхностной плотности квантовых точек, полученные в рамках феноменологических теорий скоростей реакции. Тем не менее, для успешного применения структур с квантовыми точками высокой плотности необходимо иметь возможность предсказывать зависимости всех перечисленных параметров массива nanoостровков от условий их синтеза методом молекулярно-лучевой эпитаксии: температуры и скорости роста, количества осажденного материала.

Трудности с моделированием формирования квантовых точек германия на окисленной поверхности кремния связаны, прежде всего, с тем, что на этой поверхности реализуется механизм роста, принципиально отличный от случая чистой поверхности кремния, – по Фольмеру–Веберу, без образования смачивающего слоя. Второй особенностью образования германиевых островков на поверхности оксида кремния является иная форма островка – полусферическая вместо пирамидальной. И, наконец, в зависимости от температуры роста, возможно образование островков германия на поверхности оксида кремния (при низких температурах) или в образующихся за счет десорбции атомов ямках, оголяющих чистую поверхность кремниевой подложки (при высоких температурах) [3].

В настоящей работе описаны основные особенности эпитаксиального зарождения и роста квантовых точек германия на оксидированной поверхности кремния. Впервые построена кинетическая модель зарождения и роста трехмерных островков по механизму Фольмера–Вебера, основанная на общей теории нуклеации Зельдовича. Разработанная модель позволяет оценить не только равновесные параметры системы квантовых точек (их средний размер и поверхностную плотность), но и принципиально неравновесные, такие как скорость зарождения островков, функцию распределения островков по размерам и ее эволюцию во времени. Получены зависимости среднего размера и поверхностной плотности квантовых точек от параметров их синтеза: температуры и скорости роста. Предложенная теоретическая модель может быть легко перенесена и на другие материальные системы, в которых реализуется рост островков по механизму Фольмера–Вебера.

Список публикаций:

- [1] Izhnin I. I., Fitsych O. I., Voitsekhovskii A. V., Kokhanenko A. P., Lozovoy K. A., Dirko V. V. // *Opto-Electronics Review*. 2018. V. 26. P. 195.
- [2] Prieto J. E., Markov I. // *Surface Science*. 2017. V. 664. P. 172.
- [3] Shklyaev A. A., Ichikawa M. // *Physics – Uspekhi*. 2008. V. 51. P. 133.
- [4] Нукифоров А. И., Ульянов В. В., Пчеляков О. П., Тийс С. А., Гутаковский А. К. // *Физика твердого тела*. 2004. V. 46. P. 80.