

04;06;11

## **Влияние температуры на формирование кремниевых нанокристаллитов на некристаллических подложках в плазме СВЧ газового разряда низкого давления**

© Д.В. Нефедов, Р.К. Яфаров

Институт радиотехники и электроники РАН, Саратовский филиал  
E-mail: pirpc@genet.ru

Поступило в Редакцию 14 февраля 2007 г.

Исследованы условия получения наноразмерных островков кремния в плазме СВЧ газового разряда низкого давления на подложках со слабым взаимодействием на межфазной границе. Показано, что формирование наноструктур кремния происходит через зарастание углублений первоначального рельефа поверхности подложки. Установлены влияние параметров режима осаждения на кинетику образования наноструктур и способы управления их морфологическими параметрами.

PACS: 81.07.Ta, 52.77.-j

Полупроводниковые сверхрешетки представляют собой одну из наиболее активно развивающихся областей физики твердого тела. Интерес к ним существует уже не только теоретический, но и практический, так как экспериментально уже показана принципиальная возможность создания приборов на основе этих квантовых объектов, например лазеров с параметрами лучшими, чем у существующих в настоящее время. С начала 1990-х годов интерес исследователей все больше перемещается на гетероструктуры с квантовыми точками (КТ), особенно после того, как была выяснена возможность самоорганизованного роста массивов бездефектных включений нанокристаллитов одного полупроводникового материала в матрице другого, проявляющих свойства квантовых точек. Самоорганизация нанокристаллитов происходит по механизму Странского–Крастанова, когда сначала происходит послойный рост слоя В, который при некоторой толщине смачивающего

слоя сменяется островковым ростом. Этот механизм реализуется при наличии смачивания и значительном рассогласовании решеток А и В (несколько процентов).

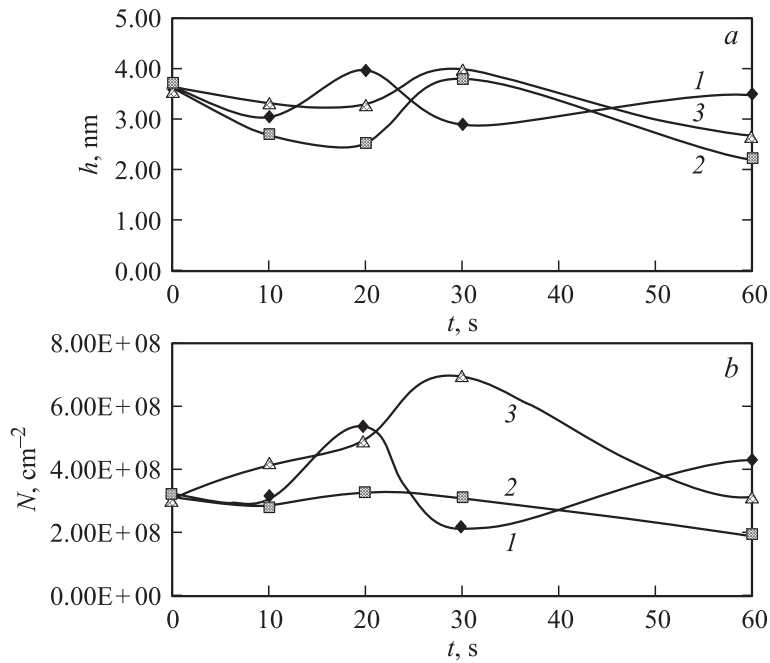
Изменяя размеры квантовых точек, их форму и состав с помощью контролируемых технологических приемов, можно получать аналоги многих природных элементов, создавать совершенно новые квантовые устройства и системы с широкими функциональными возможностями для опто- и нанoeлектроники, информационных технологий нового поколения, средств связи и пр. Отклик таких систем на внешнее воздействие напрямую связан с количеством КТ. Поэтому основными направлениями технологических исследований в этой области являются разработка методов получения КТ заданного размера, повышение их однородности и концентрации [1].

Большой практический интерес представляют аморфные сверхрешетки, а также системы в виде нанобъектов, заключенных в матрицах из стекла, окислов (например,  $\text{SiO}_2$ ), металлов (например, Hg), полимерных пленок и др. В таких системах механизм формирования квантовых точек до настоящего времени еще не получил должного экспериментального обоснования и развития. Это ограничивает возможность управления процессом и получение гетероструктур с заданными свойствами.

Целью настоящей работы было исследование закономерностей формирования кремниевых наноразмерных кристаллитов на некристаллических подложках со слабым взаимодействием на межфазной границе.

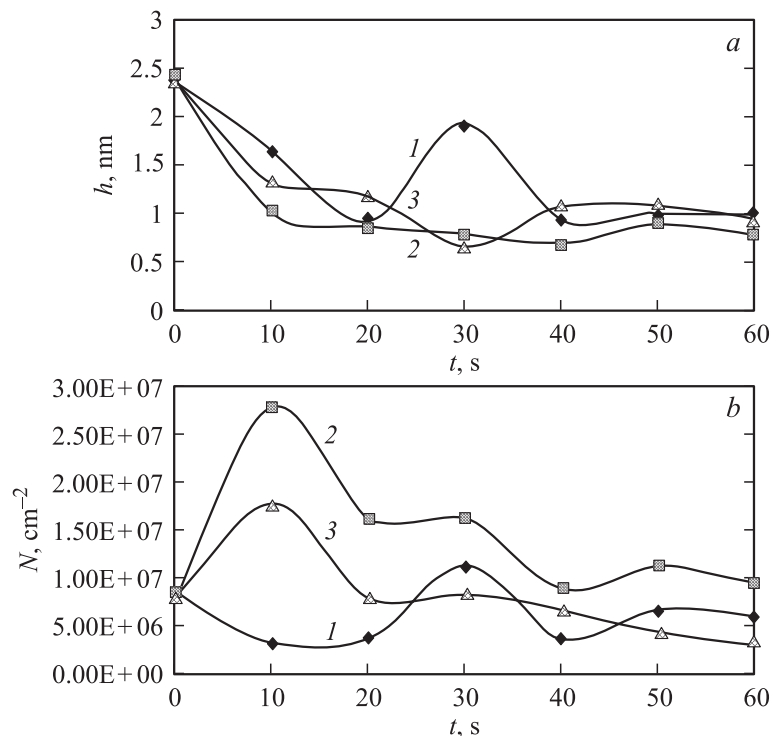
Осаждение кремниевых нанокристаллитов осуществлялось на стеклянную подложку методом разложения моносилана в плазме СВЧ газового разряда низкого давления в установке, описанной в работе [2]. СВЧ мощность, вводимая в источник плазмы, составляла 250 W. Микрофотография поверхности изучались с помощью сканирующего атомно-силового микроскопа (АСМ) P4-SPM-MDT. Исследованы зависимости размеров и поверхностной концентрации кремниевых nanoостровков от параметров режима осаждения: температуры подложки, потенциала на подложкодержателе, давления плазмообразующего газа и времени осаждения.

На рис. 1 приведены зависимости высоты и поверхностной концентрации наноразмерных кристаллитов от времени осаждения кремния при температуре подложки, равной  $100^\circ\text{C}$ , потенциале на подложкодержателе  $+300\text{ V}$  и различных давлениях моносилана в плазме СВЧ



**Рис. 1.** Зависимости среднего размера (*a*) и поверхностной концентрации (*b*) микровыступов кремния от времени осаждения при различных давлениях моносилана в плазме СВЧ газового разряда (1 —  $P = 0.1$  Pa, 2 —  $P = 0.5$ , 3 —  $P = 1$  Pa).

газового разряда. На приведенных зависимостях точкам с  $t = 0$  s соответствуют высота и концентрация наноразмерных выступов исходной стеклянной подложки. Можно видеть, что при осаждении кремния происходит зарастание неровностей исходной поверхности подложки. В зависимости от величины пересыщения в газовой фазе в первые 10–20 s процесса высота неровностей поверхности уменьшается от 3.8 до 2.8–3.2 nm, а их концентрация на поверхности практически не изменяется. По истечении этого времени концентрация нановыступов начинает увеличиваться, а темп увеличения зависит от давления. Наиболее ранним по времени и сильным по величине он является для давления моносилана в газовой фазе 0.1 Pa. Зарастание углублений рельефа поверхности для  $P = 0.5$  и 1 Pa происходит в течение 20–30 s



**Рис. 2.** Зависимости среднего размера (а) и поверхностной концентрации (б) микровыступов кремния от времени осаждения при давлении моносила в плазме СВЧ газового разряда 0.1 Па и различных температурах подложки (1 — 100°C, 2 — 200, 3 — 300°C).

и только после этого концентрация микровыступов на поверхности начинает увеличиваться, достигая величины  $(5 - 7) \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2}$ . Высота образующихся кристаллитов составляет около 4 nm и в данном диапазоне давлений практически не зависит от степени пересыщения в газовой фазе.

На рис. 2 приведены зависимости высоты и поверхностной концентрации наноразмерных кристаллитов от времени осаждения кремния на стеклянную подложку с исходной шероховатостью, имеющей среднюю высоту выступов 2.5 nm. Температура подложки в процессе осажде-

ния составляла 100, 200 и 300°С, потенциал на подложкодержателе +300 V, давление моносилана в плазме СВЧ газового разряда 0.1 Па. Можно видеть, что при температуре подложки 100°С зарастивание углублений рельефа происходит более медленно, чем при больших температурах, а максимумы высоты и поверхностной концентрации микровыступов достигаются только после 30 с осаждения кремния. При этом максимальная высота нанокристаллитов кремния, так же как и на рис. 1, *a*, составляет величину, близкую к размерам микровыступов исходной подложки. При увеличении температуры подложки увеличиваются скорости „зарастивания“ углублений рельефа поверхности и образования новых кристаллитов, пленки становятся более гладкими. Так, например, через 10 с осаждения кремния при  $T = 200^{\circ}\text{C}$  величина выступов на подложке уже не превышала 1–1.2 nm. При этом их поверхностная концентрация сразу же увеличивалась по сравнению с исходной. При дальнейшем увеличении времени осаждения до 20–30 с и более концентрация выступов постепенно уменьшается до уровня шероховатости исходной подложки и стабилизируется.

Как известно, процесс зарождения и роста пленок при гетерогенной конденсации в различных комбинациях материалов пленки и подложки в первую очередь определяется характером их взаимодействия на межфазной границе подложка–пленка. Основной тип межатомных взаимодействий на поверхности при осаждении из газовой фазы — электростатическое взаимодействие [3]. Поэтому приповерхностное электрическое поле (электростатический рельеф) существенно влияет на термодинамику и кинетику зародышеобразования. Шероховатость поверхности только модулирует ее потенциальный рельеф. При слабом взаимодействии на межфазной границе механизм формирования пленок описывается моделью Фольмера–Вебера. Согласно этой модели зарождение пленки происходит путем образования изолированных трехмерных островков — зародышей; дальнейший рост, сопровождающийся увеличением размеров островков, их коалесценцией. При коалесценции в зависимости от сочетания материалов подложки и пленки и условий роста формируется сплошная поликристаллическая или монокристаллическая пленка.

Морфологическая неоднородность пленки проявляется как результат неодинаковых скоростей зародышеобразования, характера или скорости протекания коалесценции на различных участках одной поверхности подложки. Ее проявление зависит от условий кристаллизации —

степени вакуума, скорости поступления атомов на поверхность, температуры подложки и др. Понижение температуры роста, так же как и увеличение потока частиц в условиях интенсивной ионной и электронной бомбардировки поверхности, ведет к уменьшению диффузионной длины адатомов на подложке. Соответственно область сбора адатомов для одного островка уменьшается, уменьшаются его размеры, а плотность возрастает. Адаптомы располагаются преимущественно в минимумах потенциального рельефа подложки, обладающих наибольшей, по сравнению с другими участками, симметрией сил взаимодействия.

В соответствии с этим при давлении 0.1 Па, где имеет место наибольшая степень ионизации в СВЧ плазме и, следовательно, при положительном потенциале на подложкодержателе наблюдается наибольшая интенсивность бомбардировки поверхности отрицательными ионами и электронами, прилипание частиц кремния, скорость и хаотичность зародышеобразования выше, чем при других давлениях [4]. В результате этого при  $P = 0.1$  Па зарастивание углублений поверхности подложки прекращается раньше (в первые десять секунд), чем при 0.5 и 1 Па, при которых степень ионизации СВЧ плазмы существенно ниже и, как следствие, доля электростатических сил в процессе зародышеобразования также меньше. Как следует из экспериментов, при давлении 0.1 Па и длительности процесса осаждения более 20 с размер неровностей и поверхностная концентрация кремниевых кристаллитов синхронно уменьшаются. Это свидетельствует о переходе процесса от стадии образования островковой пленки в стадию коалесценции, когда отдельные островки начинают срастаться. При  $P = 0.5$  и 1 Па длительность процесса осаждения до инициирования коалесценции наноразмерных островков составляет 30 ns. При дальнейшем увеличении времени осаждения идет формирование сплошной пленки с микротопографическими параметрами, определяемыми выбранными режимами осаждения [5].

С увеличением температуры подложки увеличиваются коэффициент диффузии адатомов и размер зон захвата. В результате этого уменьшается частота зародышеобразования и сразу же после образования критический зародыш начинает расти, присоединяя к себе адатомы, мигрирующие по поверхности подложки в поисках области с сильной связью. Вследствие этого скорость зарастивания углублений рельефа увеличивается. Спонтанное образование nanoостровков кремния в начале процесса осаждения увеличивает концентрацию микровыступов на подложке. Однако быстрый последующий латеральный рост nanoостровков за счет интенсивной поверхностной диффузии вызывает их

коалесценцию и уменьшение концентрации. Так, согласно данным, приведенным на рис. 2, коалесценция островков при  $T \geq 200^\circ\text{C}$  начинается уже после 10 s осаждения кремния.

Таким образом, формирование в СВЧ плазме низкого давления наноразмерных островков на подложках со слабым взаимодействием на межфазной границе происходит через спонтанное зарождение углублений первоначального рельефа поверхности подложки. Для уменьшения разброса в размерах нанокристаллитов в результате неконтролируемого латерального их роста и коалесценции процесс должен проводиться при наиболее низкой температуре подложки. При получении наноразмерных кристаллитов кремния из моносилана в СВЧ плазме газового разряда при  $P = 0,1$  Pa и остальных заданных параметрах режима осаждения длительность процесса зависит от исходной шероховатости подложки и ее температуры и не должна превышать 20–30 s. При увеличении пересыщения в газовой фазе и уменьшении степени ионизации плазмы оптимальная длительность процесса увеличивается. Размер кристаллитов при оптимальных длительностях процесса осаждения для каждого рабочего давления остается одинаковым и определяется размером шероховатости исходной подложки. При увеличении давления до 1 Pa поверхностная плотность кристаллитов возрастает в 1.5 раза, по сравнению с  $P = 0.1$  Pa, и составляет  $7 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2}$ . Так как самоорганизация нанокристаллитов на этапе зарождения осуществляется в минимумах потенциального рельефа поверхности, определяемых ее шероховатостью, это позволяет управлять их поверхностной концентрацией в гетероструктурах и аморфных сверхрешетках, за счет выбора режимов получения наиболее развитого рельефа пленочной гетероструктуры, на которой предполагается их выращивание.

## Список литературы

- [1] Леденцов Н.Н., Устинов В.М., Шукин В.А., Копьев П.С., Алфёров Ж.И., Бимберг Д. // ФТП. 1998. Т. 32. В. 4. С. 385–410.
- [2] Былинкина Н.Н., Муштакова С.П., Олейник В.А. и др. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. В. 6. С. 43–47.
- [3] Иевлев В.М., Трусов Л.И., Холмянский В.А. Структурные превращения в тонких пленках. М.: Металлургия, 1982. 247 с.
- [4] Гуляев Ю.В., Яфаров Р.К. // Зарубежная электронная техника. 1997. № 1. С. 77–120.
- [5] Нефедов Д.В., Яфаров Р.К. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. В. 7. С. 26–34.