

05;06;11

Динамика самоорганизации гексагональных структур пор при анодном травлении и окислении полупроводников и металлов

© В.И. Емельянов, В.В. Игумнов, В.В. Старков

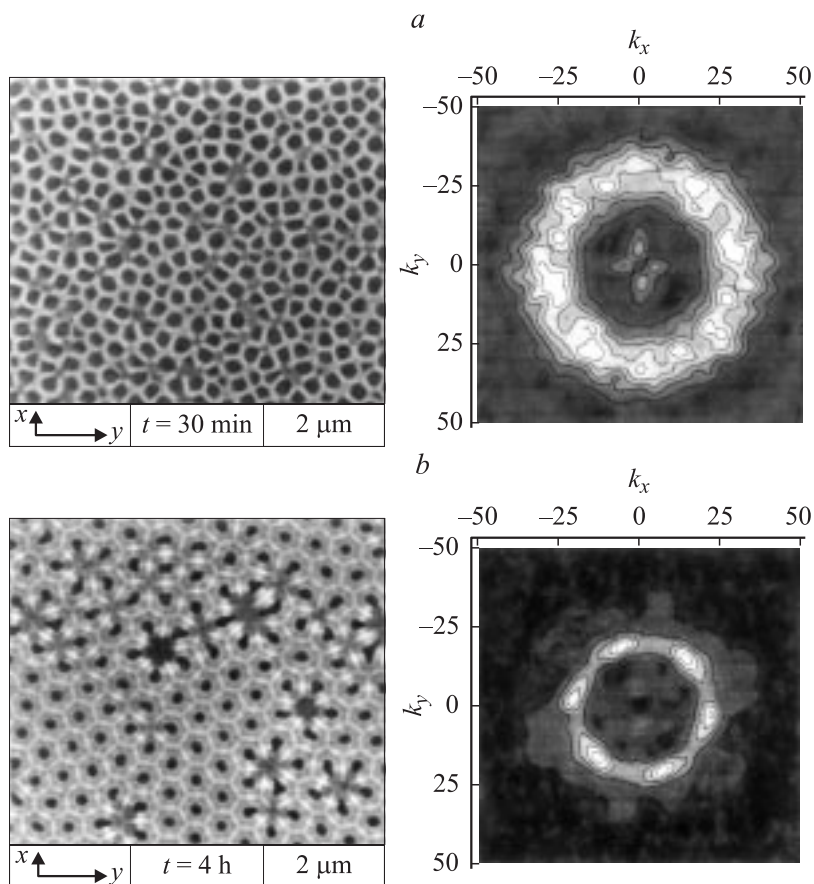
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
Институт проблем технологии микроэлектроники РАН,
Моск. обл., Черноголовка

Поступило в Редакцию 5 ноября 2003 г.

С помощью Фурье-преобразования SEM-сканов поверхности Al_2O_3 и Si, сделанных при различных длительностях анодного окисления Al и травления Si, прослежена динамика самоорганизации в q -пространстве гексагональных ансамблей пор. Качественно излагаются результаты развитой нелинейной дефектно-деформационной теории самоорганизации гексагональных ансамблей пор, описывающей эту динамику.

1. Физический механизм спонтанного образования ансамблей пор при травлении и окислении полупроводников и металлов до сих пор остается предметом обсуждения [1,2]. Недавно нами был предложен дефектно-деформационный (ДД) механизм образования упорядоченных ансамблей пор и обнаружен предсказываемый им квазигексагональный порядок в расположении пор на травимой поверхности Si [3]. В [4] развита линейная ДД теория образования ансамблей пор, а в [5] осуществлено, с помощью внешнего механического напряжения, изменение симметрии травимого ансамбля пор в Si с квазигексагональной на одномерную и проведена интерпретация этого эффекта на основе ДД механизма.

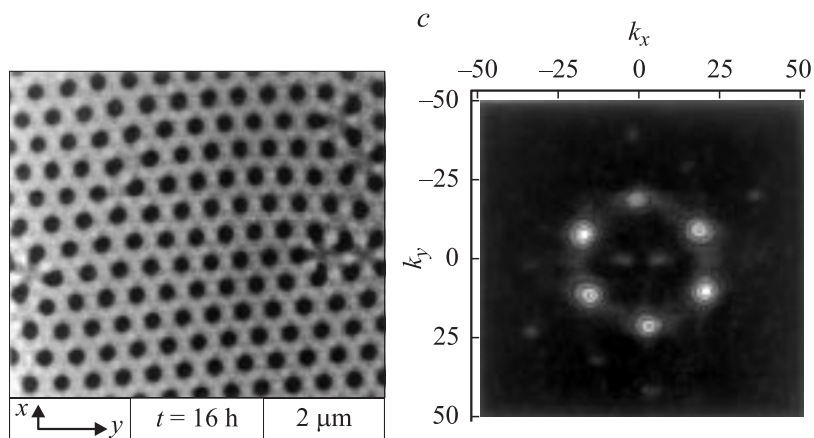
Известно, с другой стороны, что при анодном окислении Al [6] и травлении InP [7] образуются, в отличие от Si, практически идеальные гексагональные ансамбли пор. В настоящей работе проведено сравнительное исследование динамики образования гексагональных ансамблей пор в Al_2O_3 и Si и на основе ДД механизма обсуждаются возможные



SEM-снимки поверхности Al_2O_3 , контактной с поверхностью Al, сделанные при трех длительностях процесса окисления [6], и соответствующие Фурье-спектры.

причины различия в степени когерентности гексагональных ансамблей пор в Al_2O_3 , InP и Si.

2. На рисунке показаны SEM-сканы поверхности Al_2O_3 (контактной с Al), сделанные при трех временах t_0 анодного окисления Al [6] и соответствующие Фурье-спектры. При $t_0 = 0.5 \text{ h}$ спектр состоит из кругового кольца (плато) конечной толщины, на котором расположены 12 максимумов (см. рисунок, *a*). При $t_0 = 4 \text{ h}$ толщина кольца уменьшилась и на нем теперь осталось лишь 6 максимумов (см. рисунок, *b*).



Продолжение рисунка.

Эти спектры соответствуют квазигексагональным ансамблям пор (см. рисунок, *a* и *b*). Наконец, при $t_0 = 16$ h кольцо обращается в круг, а спектр состоит из шести узких максимумов, расположенных эквидистантно на этом круге (см. рисунок, *c*). Такой спектр соответствует идеальной гексагональной структуре пор (см. рисунок, *c*). SEM-сканы поверхности Si, сделанные при двух различных временах травления t_T , и соответствующие двумерные Фурье-спектры приведены на рис. 5 работы [4]. При $t_T = 10$ min спектр состоит из кругового плато конечной толщины с 12 максимумами (8 максимумов из них слиты в 4 пары), что соответствует разупорядоченной структуре пор (рис. 5, *a* [4]). При $t_T = 30$ min толщина плато не изменилась, но на нем теперь осталось 6 максимумов, что соответствует квазигексагональной структуре пор (рис. 5, *b* [4]). Дальнейшее травление Si не изменяет вида спектра [4].

3. В соответствии с ДД механизмом [3–5] симметрия и периодичность ансамбля пор повторяют симметрию и периодичность затравочной ДД структуры, возникающей на обрабатываемой поверхности в результате развития ДД неустойчивости в приповерхностной дефектно-обогащенной „пленке“ толщиной h (см. обзоры [8,9]). При превышении в пленке критической концентрации (или скорости генерации) междоузлий или вакансий, образующихся в процессе травления или окисления, на поверхности с инкрементом λ_q , нарастает ДД решетка, в которой концентрация дефектов $n_d(\mathbf{r})$ и рельеф поверхности ξ изменяются как $n_d(\mathbf{r})$, $\xi(\mathbf{r}) = n_q, \xi_q \exp(i\mathbf{q}\mathbf{r} + \lambda_q t)$, причем вектор решетки \mathbf{q} лежит в

плоскости поверхности (междоузлия собираются в выступах рельефа, а вакансии — в его впадинах). В соответствии с развитой нами на основе кинетических уравнений для фурье-амплитуд n_q [4] нелинейной теорией, самоорганизация затравочной ДД структуры в \mathbf{q} -пространстве происходит в 4 этапа. На 1-м (линейном) этапе из исходного хаотического набора флуктуационных ДД решеток с векторами \mathbf{q} , случайно распределенными как по величине, так и по направлению, выделяются решетки с волновыми векторами \mathbf{q}_m , для которых инкремент λ_{q_m} максимален. Кроме доминирующих решеток нарастает континуум ДД решеток с волновыми векторами, случайно распределенными по направлениям, модули которых лежат вблизи значения q_m в полосе усиления $\lambda_q > 0$ [4]. Фурье-спектр такой структуры представляет собой кольцо, толщина которого соответствует ширине полосы усиления. На 2-м этапе волновые векторы равной длины выделенных ДД решеток, благодаря их нелинейному взаимодействию, связываются в правильные треугольники (триады), ориентация которых на поверхности случайна. Каждая триада соответствует гексагональной ДД структуре со случайной ориентацией. Благодаря нелинейным взаимодействиям между триадами на 3-м этапе происходит ориентационное упорядочение триад (пороговый по концентрации дефектов коллапс углового спектра ДД мод). Результирующая ориентация триад выбирается благодаря спонтанному нарушению симметрии либо благодаря наличию внутренней упругой анизотропии на поверхности. Фурье-спектр ДД структуры с ориентированными одинаковым образом триадами состоит из кольца конечной толщины и 6 максимумов, расположенных эквидистантно на этом кольце. Каждая пара максимумов, лежащих на одном диаметре кольца, соответствует одной из трех решеток, составляющих триаду. Наконец, на последнем 4-м этапе в результате нелинейных взаимодействий ДД решеток происходит пороговый коллапс спектра ДД мод в скалярном пространстве, при котором толщина кольца в Фурье-спектре обращается в ноль. Результирующий спектр, представляющий собой круг с 6 эквидистантными максимумами, соответствует идеальной гексагональной ячеистой ДД-структуре. 3-й и 4-й этапы могут происходить одновременно.

Спектры, представленные на рис. 1 и 5 из [4], соответствуют различным этапам описанной выше временной эволюции ДД структуры в \mathbf{q} -пространстве. В случае Al (см. рисунок): a соответствует 2-му этапу, b соответствует 3-му и частично 4-му этапам и, наконец, c соответствует концу 4-го этапа эволюции. В случае Si (рис. 5 [4]): a соответствует 2-му и частично 3-му этапу, а b — концу 3-го этапа.

4. Такое различие в виде конечных спектров (и в степени когерентности соответствующих ансамблей пор) может быть объяснено различием в сценариях синхронизации ДД структуры и системы пор при анодировании Al и Si. При окислении затравочная ДД структура образуется и эволюционирует на поверхности Al, контактирующей с окислом, а поры нуклеируют на контактной поверхности окисла и затем прорастают в его объем. Поэтому в процессе окисления система пор на контактной поверхности окисла может постоянно (вплоть до окончания финального 4-го этапа) подстраиваться под эволюционирующую на контактной поверхности металла ДД структуру. Конечное распределение пор при этом представляет собой реплику финального ДД распределения и имеет идеальную гексагональную симметрию (см. рисунок, *c*). В соответствии с ДД механизмом [3–5] расстояние между порами порядка толщины дефектной пленки $2h$. В качестве h в Al может фигурировать длина диффузии вакансий, а в полупроводниках — толщина области поверхностного заряда (ОПЗ) (корреляция изменений расстояния между порами и толщины ОПЗ в Si установлена в широкой области изменения концентрации доноров (N_D) и акцепторов (N_A): $10^{14} \text{ cm}^{-3} < N_{D,A} < 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ [10]). Поскольку ОПЗ („пленка“) движется при травлении вместе с границей раздела пористый полупроводник–полупроводник, то ДД структура в пленке и синхронизированная с ней система пор могут завершить последний, 4-й этап самоорганизации, что, как и в случае окисления, должно сопровождаться образованием когерентных структур пор (случай InP). В Si же после начала глубокого травления пор по местам скопления вакансий в ДД структуре распределение пор предположительно перестает зависеть от дальнейшей эволюции ДД структуры. Таким образом, конечное распределение пор в Si соответствует распределению ДД ячеек на ранней стадии ДД эволюции и поэтому обладает низкой когерентностью.

Список литературы

- [1] *Crouse D., Lo Y.H., Miller A.E.* // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 76. P. 49.
- [2] *Горячев Д.Н., Беляков Л.В., Сресели О.М.* // ФТП. 2000. Т. 34. С. 1130.
- [3] *Емельянов В.И., Еремин К.И., Старков В.В.* // Квантовая электроника. 2002. Т. 32. С. 473.
- [4] *Emel'yanov V.I., Eriomin K.I., Starkov V.V., Gavrilin E.Yu.* // Laser. Phys. 2003. V. 13. N 11. P. 1442.

- [5] *Емельянов В.И., Еремин К.И., Старков В.В., Гаврилин Е.Ю.* // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 6. С. 19.
- [6] *Masuda H., Yada K., Osaka A.* // Jpn. J. Appl. Phys. 1998. V. 37. P. L1340.
- [7] *Langa S., Christophersen V., Carstensen J., Tiginyanu I.M., Foll H.* // Phys. Stat. Sol. (a). 2003. V. 197. P. 77.
- [8] *Emel'yanov V.I.* // Microelectronic Engineering. 2003. V. 69. N 2–4. P. 435.
- [9] *Емельянов В.И.* // Квантовая электроника. 1999. Т. 28. С. 2; ФТТ. 2000. Т. 42. С. 1026.
- [10] *Lehman V., Stengl R., Luigart A.* // Materials Sci. and Engineering. 2000. V. B69–70. P. 11.