

07; 11

© 1992

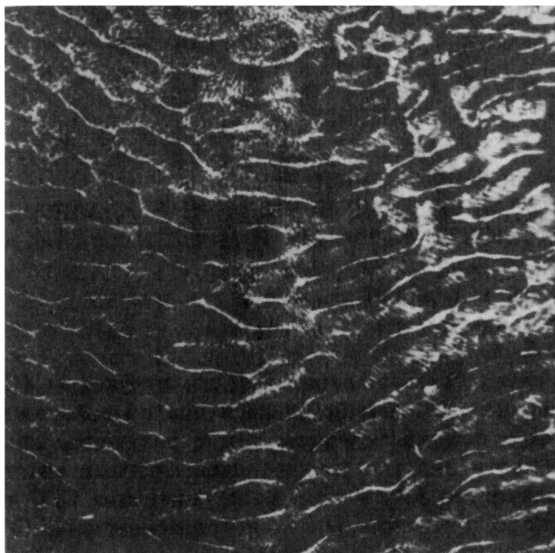
ПЕРИОДИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ,
ИНДУЦИРОВАННЫЕ ИЗЛУЧЕНИЕМ KrF ЛАЗЕРА
НА ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ И МНОГОСЛОЙНЫХ СИСТЕМВ.Л. К а н ц ы р е в, П.Б. С е р г е е в
М.А. Т ю н и н а

Лазерно-индуцированные периодические структуры (ППС) на поверхности твердых тел, формирующиеся под воздействием как импульсного, так и непрерывного лазерного излучения видимой и инфракрасной области спектра, наблюдались многими авторами. Лишь небольшое количество работ посвящено генерации ППС под воздействием лазерного излучения (ЛИ) ультрафиолетового (УФ) диапазона. За основу распространенной теории образования ППС принята интерференция падающего излучения с поверхностной электромагнитной волной [1]. При этом период ППС (d) соизмерим с длиной волны излучения и зависит, как и их ориентация, от угла падения и направления поляризации ЛИ. Наряду с ППС подобного типа описаны крупномасштабные периодические структуры (КПС) с различными механизмами формирования [2, 3].

Более сложной является проблема формирования КПС на поверхности многослойных систем. Впервые образование хаотически ориентированных КПС с $d = 10$ мкм в системах диэлектрик – на – кремнии под воздействием импульсного излучения KrF лазера с наносекундной длительностью импульса описано в [4]. В настоящей работе проведены дополнительные экспериментальные исследования изменения морфологии поверхности кремния и многослойных систем на его основе под воздействием излучения KrF лазера, а также рассмотрены возможные механизмы этих измерений.

Исследования проводились с помощью эксимерного лазера на KrF с электронно-пучковой накачкой [5]. Длина волны излучения 248 нм, длительность импульса 80 нс, энергия в импульсе до 10 Дж. Плотность энергии на подложке E составляла от 0,5 до 6,0 Дж/см² при площади области воздействия ЛИ до 2 см². Поляризация ЛИ осуществлялась с помощью стопы из плоскопараллельных кварцевых пластин, установленных под углом Брюстера. Облучение образцов проводилось при вакууме 10^{-5} мм рт. ст. и комнатной температуре.

В качестве подложек использовались пластины кремния p - и n -типа, ориентации (100) и (111) с полированной поверхностью, а также пластины со сформированными на них слоями термического окисла SiO_2 толщиной 0,08...1,0 мкм, тонкими пленками $Al(0.1...1.1$ мкм) или $Mo(0.1...0.8$ мкм). После облучения образцы исследовались методами оптической и растровой электронной микроскопии, Оже-спектроскопии, рентгеноструктурного анализа.



40 мкм

Рис. 1. Поверхность монокристаллического Si после воздействия импульса KrF лазера, $E = 4.5 \text{ Дж/см}^2$. Вакуум - 10^{-5} мм рт.ст.

Исследования изменений морфологии поверхности монокристаллической подложки Si после воздействия импульсов ЛИ с различной E показали, что вплоть до $E = 3.5 \text{ Дж/см}^2$ поверхность Si остается гладкой. При $E = 3.5 \dots 4.0 \text{ Дж/см}^2$, помимо значительного количества кратеров и трещин, на поверхности Si обнаружены КПС с $d = 5 \dots 10 \text{ мкм}$. Многоимпульсная обработка Si с $E = 3.5 \dots 5.0 \text{ Дж/см}^2$ привела к образованию КПС с $d = 5 \dots 30 \text{ мкм}$. При этом наблюдалась ориентация КПС к области, соответствующей максимальному значению в распределении E по сечению лазерного пучка, что сопровождалось увеличением d КПС по мере приближения к указанной области (рис. 1). Зависимости ориентации и d КПС от направления поляризации и угла падения ЛИ не обнаружено.

На поверхности систем SiO_2 -на- Si с толщиной окисла от 0.08 до 0.6 мкм после воздействия ЛИ с $E = 1.0 \dots 3.5 \text{ Дж/см}^2$ наблюдались КПС с $d = 2 \dots 20 \text{ мкм}$. Ориентация и d КПС не зависели ни от поляризации ЛИ, ни от толщины пленки окисла. Обнаружено изменение характера КПС и d в зависимости от E .

После воздействия ЛИ с $E = 1.0 \text{ Дж/см}^2$ на поверхности SiO_2 -на- Si обнаружены хаотически расположенные центры деформации с $d = 2 \text{ мкм}$. При увеличении E до $1.5 \dots 2.0 \text{ Дж/см}^2$, наряду с увеличением плотности центров, обнаружено формирование в них нескольких расположенных рядом гексагональных ячеек с $d = 2 \dots 10 \text{ мкм}$, которые при определенных условиях покрывали всю область

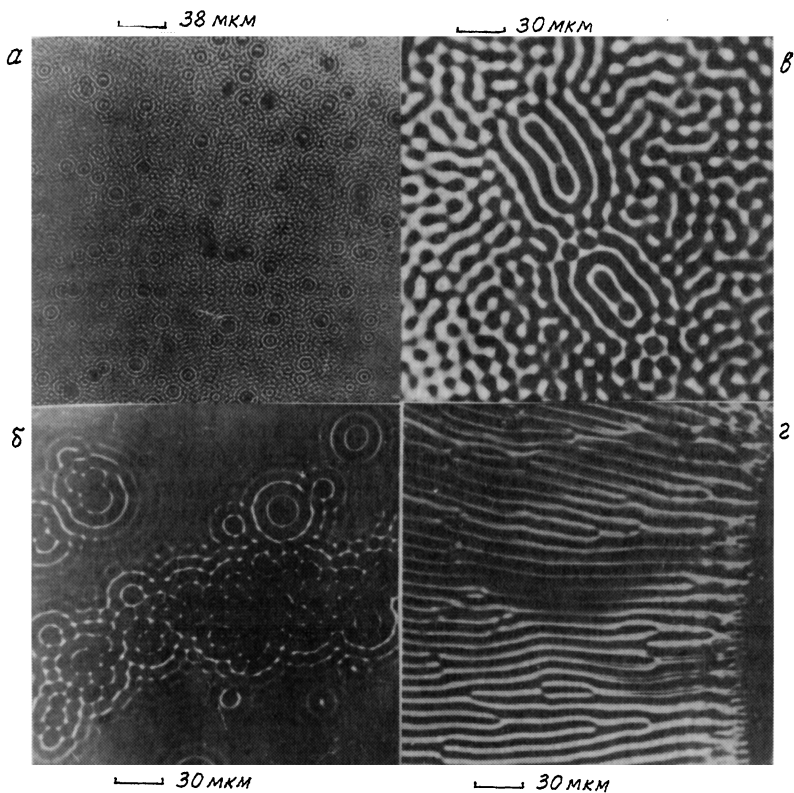


Рис. 2. а) Поверхность SiO_2 на Si после воздействия импульса KrF лазера, $E = 1.5 \text{ Дж/см}^2$. Вакуум - 10^{-5} мм рт.ст. Исходная толщина SiO_2 - 0.28 мкм .
 б) Поверхность SiO_2 на Si после воздействия импульса KrF лазера. $E = 2 \text{ Дж/см}^2$. Вакуум - 10^{-5} мм рт.ст., исходная толщина SiO_2 - 0.5 мкм . Видны гексагональные ячейки.
 в) Формирование „цилиндрических“ ячеек слиянием нескольких гексагональных на поверхности SiO_2 на Si после воздействия импульса KrF лазера. $E \geq 2 \text{ Дж/см}^2$. Вакуум - 10^{-5} мм рт.ст. Исходная толщина SiO_2 - 0.28 мкм .
 г) Развития КПС на поверхности SiO_2 на Si после воздействия импульса KrF -лазера. $E = 3 \text{ Дж/см}^2$. Вакуум - 10^{-5} мм рт.ст. Исходная толщина SiO_2 - 0.28 мкм . Область абляции SiO_2 справа.

воздействия ЛИ (рис. 2, б). При дальнейшем росте E соседние гексагональные ячейки сливались с образованием „цилиндрических“ ячеек длиной до $l = 100 \text{ мкм}$ (рис. 2, в), и затем, при $E = 2.5 \dots 3.5 \text{ Дж/см}^2$ формировались группы длинных (до $l = 500 \text{ мкм}$) „цилиндрических“ ячеек вплоть до абляции пленки SiO_2 , начинавшейся в самых крупных „цилиндрических“ ячейках. „Цилиндрические“ ячейки

радиальны как к краю пятна абляции, так и к краю области воздействия ЛИ, по мере приближения к которым наблюдалось характерное сдвигание структур (рис. 2, г).

Удаление химическим травлением пленки SiO_2 показало, что описанный рельеф образовался на поверхности Si . Формирование КПС обнаружено также для пленок Al и Mo толщиной 0.2 мкм при $E = 3.0$ Дж/см².

Для анализа результатов по данным [6] проведена численная оценка порогов плавления и испарения кремния под воздействием ЛИ с указанными выше параметрами: они составили соответственно $E_{пл} = 0.9 \dots 1.1$ Дж/см² и $E_{ис} = 3.6$ Дж/см². Максимальная глубина проплава Si 0.8 мкм при времени существования расплава до $t_3 = 300$ нс. Отсутствие связи рельефа в Si с поляризацией ЛИ, а также соответствие порога формирования рельефа на Si порогу испарения Si , позволяют приписать генерацию КПС капиллярной волне, застывшей при затвердевании Si , если время затвердевания Si меньше периода колебаний и временем затухания волны.

Формирование КПС в системах SiO_2 -на- Si нельзя связать с капиллярной волной, поскольку порог образования КПС был ниже порога испарения, а наличие пленки SiO_2 на Si должно было привести к уменьшению времени затухания волны и выглаживанию рельефа. В настоящей работе предложена модель формирования КПС, основывающаяся на вероятности генерации под воздействием УФЛИ высокой концентрации локальных вакансий в Si [7] (слой SiO_2 прозрачен для УФЛИ), приводящей к локальному плавлению [8, 9] и образованию пор [10] с возможностью испарения Si в эти поры под пленкой SiO_2 . Диаметр ячеек оценивался по данным [8, 9] и оказался равным от нескольких микрон до нескольких десятков микрон, что и наблюдалось экспериментально. Первоначальная гексагональная форма ячеек определялась требованием минимума свободной энергии. Формирование „цилиндрических“ ячеек связано, вероятно, с наличием градиента температуры на поверхности облучаемой подложки. При локальном увеличении температуры и давления паров в ячейке происходил „прорыв“ ее стенок с соседней ячейкой и образование „цилиндрической“ ячейки, ориентированной вдоль градиента температуры радиально к краю области абляции SiO_2 и к краю пятна воздействия ЛИ.

Таким образом, экспериментально обнаружено формирование на поверхности кремния и многослойных систем на его основе КПС с $d = 2 \dots 20$ мкм, индуцированных воздействием импульсного УФ-излучения KrF лазера. Энергетический порог образования КПС на Si совпал с порогом испарения Si , а КПС в системах SiO_2 -на- Si — с порогом плавления Si . Период КПС не зависел от поляризации ЛИ и увеличивался с ростом E . КПС на Si и КПС в многослойных системах на отличны по характеру. Формирование КПС на Si связано, вероятно, с капиллярной волной. Для объяснения образования КПС в системе SiO_2 -на- Si предложена оригинальная модель явления.

- Емельянов В.И., Земсков В.М., Семиногов В.Н. // Квантовая электроника. 1983. Т.10. № 12. С. 2389-2398.
- Ковалев А.А., Кондратенко П.С., Левинский Б.Н. // Поверхность: Физ., химия, мех. 1990. № 8. С. 122-125.
- Демчук А.В., Лабуннов В.А. // Поверхность: Физ., химия, мех. 1991. № 1. С. 62-66.
- Канцырев В.Л., Морозов Н.В., Сергеев П.Б., Тюнина М.А. // Краткие сообщения по физике (ФИАН). 1990. № 9. С.3-5.
- Канцырев В.Л., Сергеев П.Б., Тюнина М.А. // Письма в ЖТФ. 1991. Т.17. В.17. С.29-33.
- Wood R.F., White C.W. // Semiconductors and Semimetals. 1984. С. 250.
- Алиева М.А., Мирзоев Ф.Х., Шелепин Л.А. // Краткие сообщения по физике (ФИАН). 1990. № 3. С. 9-11.
- Малевиц В.М., Ивлев Г.Д. // Поверхность: Физ., химия, мех. 1990. № 5. С.157-159.
- Яковлев Е.Б. // Известия АН СССР. сер.физич. 1989. Т. 53. № 3. С. 591-594.
- Емельянов В.И., Макин В.С., Уварова И.Ф. // Физика и химия обработки материалов. 1990. № 2. С. 12-19.

Поступило в Редакцию
3 февраля 1992 г.