

07; 11; 12

© 1992

ФОРМИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ
ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР НА КРЕМНИИ
ПРИ РАЗЛИЧНОМ ДАВЛЕНИИ ВОЗДУХА

И.А. Д о р о ф е е в, М.Н. Л и б е н с о н

Периодические структуры (ПС) на поверхности кремния наблюдались при действии лазерных импульсов миллисекундной длительности многими авторами [1-3]. Период и ориентация ПС ведут себя по-разному в зависимости от угла падения, поляризации и ориентации кристаллографических осей мишени даже при небольших изменениях плотности светового потока.

В настоящей работе приведены результаты экспериментов по многоимпульсному формированию ПС на поверхности кремниевых пластин типа КДБ с ориентацией (111) и (100) при различном давлении окружающего воздуха. Эти результаты дополняют и позволяют в значительной степени связать воедино разнообразные предшествующие наблюдения.

В экспериментах использовался неодимовый лазер (длительность импульса $\tau_n = 400$ мкс). Излучение фокусировалось на поверхность кремния в пятно диаметром ~ 1 мм. Мишень помещалась в вакуумную камеру, давление воздуха (p) в которой варьировалось от 10^5 до 10^{-3} Па. Воздействие осуществлялось в многоимпульсном режиме (число импульсов $N = 1-10^3$) под различными углами падения α относительно нормали к поверхности образца ($\alpha = 0^\circ - 85^\circ$) в диапазоне плотностей потоков падающего излучения $\varphi = (1-3) \cdot 10^5$ Вт/см² при различной поляризации. При этом на поверхности кремниевых образцов наблюдаются различные виды деструкции: она покрывается точечным рельефом, оплавляется, растрескивается на элементы, форма которых зависит от кристаллографического типа образца, происходит откол элементов с выносом материала, образуются каверны, раковины и т. д. Растрескивание и откол элементов на воздухе атмосферного давления при многоимпульсном облучении всегда сопровождаются появлением выпуклостей и многочисленных разрывов окисной пленки (рис. 1, а).

При любом из перечисленных видов повреждения кремния неполяризованным светом и при углах падения вплоть до скользких ($\alpha \geq 75^\circ$) ПС не обнаружены. При $\alpha \approx 45^\circ - 75^\circ$ наблюдались островки неориентированных и непериодических структур с характерным масштабом ~ 3 мкм.

Отметим, что с увеличением угла α картина становится все более упорядоченной, и облучение кремния под скользкими углами дает одну линейную решетку с периодом $d = 3,3$ мкм - рис. 1, б. Экспериментами установлено, что такая структура прорабатывается

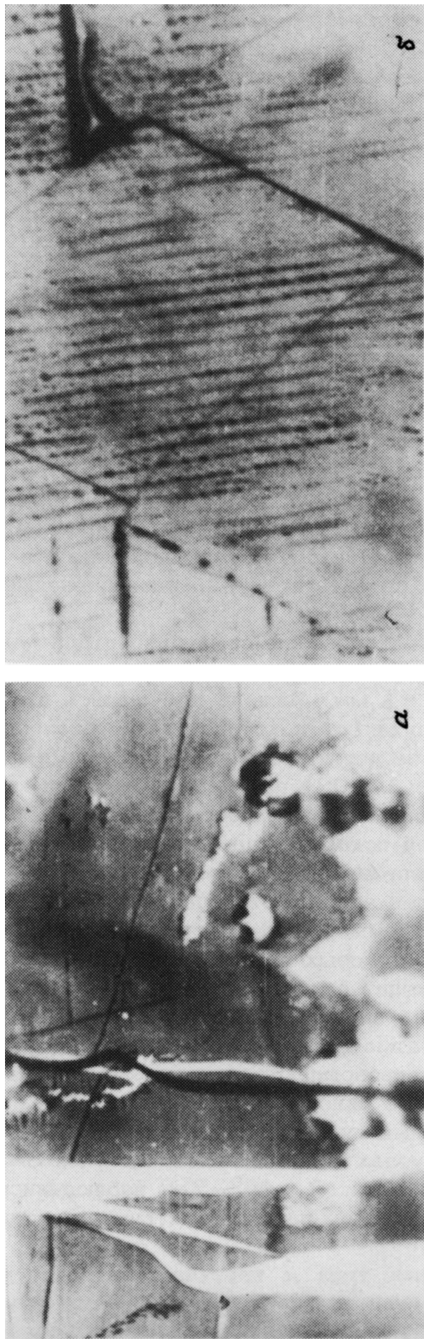
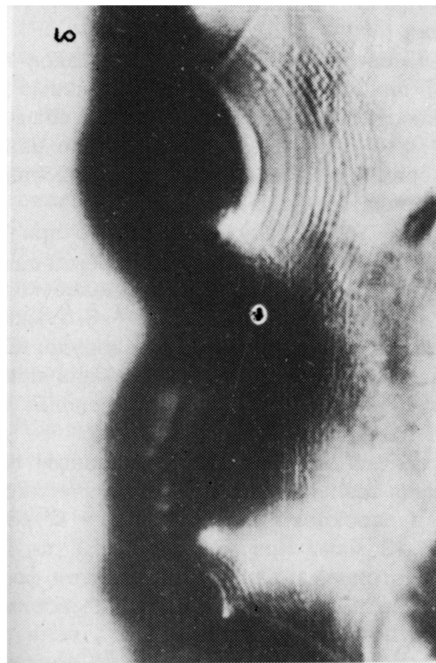
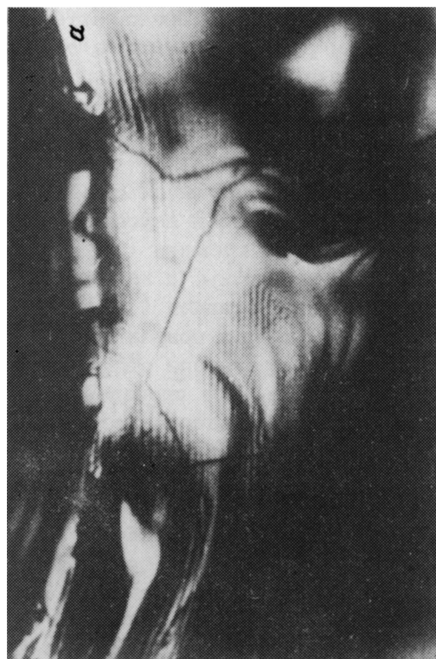


Рис. 1. Фотографии облученной поверхности кремния типа (111) после многоимпульсного ($N = 30$) лазерного воздействия на воздухе атмосферного давления при $\alpha = 0^\circ$, $\beta = 2 \cdot 10^5$ Вт/см² (а) и $\alpha = 80^\circ$, $\beta = 1.8$ х 10^5 Вт/см² (б).



20 мкм

Рис. 2. Фотографии облученной при давлении $P = 10^{-3}$ Па поверхности кремния типа (111) при $N = 10$, $\alpha = 45^\circ$, $\varphi = 2 \cdot 10^5$ Вт/см² (а) и типа (100) при $N = 7$, $\alpha = 0^\circ$, $\varphi = 2.8 \cdot 10^5$ Вт/см² (б).

всегда при произвольной ориентации образца относительно плоскости падения лазерного излучения, причем вектор решетки $\vec{\zeta}$ строго перпендикулярен плоскости падения.

Облучение неполяризованным светом аналогичных образцов кремния в вакууме ($p = 10^{-3}$ Па) при любых N , α и независимо от характера повреждения поверхности приводит к генерации обширных массивов ПС с $d = 0.9-3.3$ мкм (рис. 2, а). Уменьшение давления воздуха приводило к исчезновению окисной пленки; одновременно с этим при $p < 5.5 \cdot 10^2$ Па появлялись фрагменты ПС.

Некоторые ПС, получаемые только в вакууме и только при отколах, повторяли симметрию источника их возбуждения например, цилиндрического типа (рис. 2, б). Облучение мишеней под скользящими углами в вакууме дает ПС с $d = 3.3$ мкм, свойства которых такие же, как и при облучении на воздухе. Сравнение показывает, что картина ПС, образуемых на кремнии при многоимпульсном воздействии в вакууме, при наличии отколов поверхностных элементов становится гораздо богаче.

Многоимпульсное воздействие на кремний поляризованным излучением на воздухе атмосферного давления, когда электрический вектор световой волны \vec{E} лежит в плоскости падения и $\alpha = 0^\circ-30^\circ$, создает фрагменты ПС с $d \approx 1-3$ мкм. При увеличении α до 60° на поверхности образцов с ориентацией (111) наблюдаются фрагменты ПС только с $d \approx 3$ мкм, а на образцах (100) — массивы ПС с $d \approx 3$ мкм и ориентацией вектора решетки $\vec{\zeta} \perp \vec{E}$, если растрескивание поверхности не происходит на элементы (в данном случае прямоугольники) большой площади, когда их характерный размер $l \gg d$. При мелкомасштабном растрескивании на элементы с $l \approx d$ ПС ориентированы преимущественно вдоль трещин. При углах $\alpha > 60^\circ$, наряду с ПС, период которых составляет 2-3 мкм, наблюдаются фрагменты ПС с $d \approx 6$ мкм. При скользящем падении излучения на поверхности появляется квазирешетка — набор неровных прерывистых образований, ориентированных преимущественно вдоль плоскости падения. Если вектор \vec{E} ориентирован перпендикулярно плоскости падения, то при $\alpha = 0^\circ-30^\circ$ на кремнии (111) наблюдаются фрагменты решеток с $d \approx 1.5 \pm 0.3$ мкм, а при $\alpha = 30^\circ-60^\circ$ ПС такого же периода. На образцах с ориентацией (100) в аналогичных условиях образуется система точечных повреждений.

Существенно иная картина ПС имеет место при облучении кремния поляризованным излучением в вакууме. При произвольной ориентации вектора \vec{E} относительно плоскости падения лазерного излучения на образцах с ориентацией (111) и (100) всегда возникают массивы ПС с $d = 1-3$ мкм при $\alpha = 0^\circ-60^\circ$. Наряду с ними наблюдаются решетки, образованные в результате интерференции падающей и поверхностной электромагнитных волн (ПЭВ), с характерной зависимостью периода от α и \vec{E} [4]. При скользящих углах падения выявляется квазирешетка, вытянутая вдоль плоскости падения с фрагментами другой, ортогональной ей структуры.

Таким образом, в данной работе показано, что генерация ПС на кремнии существенно зависит от давления окружающего воздуха.

В условиях пониженного давления ($p \ll 10^5$ Па) при многоимпульсном воздействии на поверхности кремния образуется массив ПС с $d^* = 1-3$ мкм, период и ориентация которых не связаны с углом падения света α , состоянием поляризации излучения и кристаллографическим типом кремния. Наряду с этими структурами, наблюдаются ПС интерференционного типа, а также решетки, ориентация которых зависит от кристаллографии образца. Обнаружены ПС, форма которых определяется симметрией источника их возбуждения, не связанного с ПЭВ. Механизмом генерации таких ПС может быть локальная деформация поверхности при отколах. При повышенном давлении воздуха ($p \sim 10^5$ Па) генерации ПС, по-видимому, препятствует окисление поверхности. Воздействие поляризованным излучением в тех же условиях может вызывать сложные процессы резонансного возбуждения ПЭВ при плавлении полупроводника и волноводных мод в растущем слое окисла. Интерференция волн с учетом кристаллографии образца определяет период и ориентацию ПС. Следует отметить возможность формирования линейной решетки с периодом ~ 3.3 мкм при скользящем падении неполяризованного излучения на мишень, физический механизм формирования которой остается не до конца ясным.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] V o n A l l m e n M. // Appl. Phys. Lett. 1978. V. 33. N. 9.
- [2] В е й к о в П., Д о р о ф е е в И.А., И м а с Я.А. К а л у г и н а Т.И., Л и б е н с о н М.Н., Ш а н д ы б и н а Г.Д. // Письма в ЖТФ. Т. 10. № 1. С. 15-20.
- [3] К о к и н А.Н. // ЖТФ. 1989. Т. 59. С. 174-176.
- [4] Б о н ч - Б р у е в и ч А.М., К о ч е н г и н а М.А., Л и б е н с о н М.Н., М а к и н В.С., П у д к о в С.Д., Т р у б а е в. // Изв. АН СССР. 1982. Т. 46. № 6. С. 1186-1193.

Поступило в Редакцию
15 апреля 1992 г.