

## Формирование конических микроструктур при импульсном лазерном испарении твердых тел

В.В.Воронов, С.И.Долгаев, С.В.Лаврищев, А.А.Лялин, А.В.Симакин, Г.А.Шафеев

*Исследовано возникновение и развитие крупномасштабных самоорганизующихся микроструктур на поверхности монокристаллического Si и ряда других материалов (Ge, Ti) при их испарении импульсным лазерным излучением (лазер на парах меди,  $\lambda = 510.6$  нм,  $\tau = 20$  нс). Формирование структур происходит при многоимпульсном лазерном воздействии ( $\sim 10^4$  импульсов с плотностью энергии  $1-2$  Дж/см<sup>2</sup>) в отсутствие оптического пробоя среды над поверхностью мишени в диапазоне давлений  $1-10^5$  Па и широком диапазоне углов падения лазерного пучка на поверхность. Структуры представляют собой конусы с углом при вершине  $\sim 20-25^\circ$ , растущие навстречу лазерному пучку. Показано, что пространственный период структур, развивающихся в процессе лазерного испарения, определяется периодом волн, возникающих на поверхности расплава, и составляет  $10-20$  мкм. Методами дифракции рентгеновского излучения установлено, что модифицированная область подложки имеет поликристаллическую структуру и состоит из кристаллитов с размерами от  $40$  до  $70$  нм в зависимости от давления окружающей атмосферы.*

**Ключевые слова:** лазерное испарение, крупномасштабные периодические структуры.

### Введение

Воздействие импульсного лазерного излучения на поверхность твердых тел, как правило, является существенно неравновесным процессом, что связано с характерными для него высокими градиентами температуры и малым временем нагрева поверхности по сравнению с временами релаксации системы. Неравновесность процессов, связанных с лазерным нагревом, также может проявиться в условиях непрерывного лазерного нагрева вследствие возникновения обратной связи между тепловой и «химической» степенями свободы системы [1]. В связи с этим при непрерывном лазерном нагреве имеют место особенности роста структур на модифицированной поверхности твердого тела, такие как образование дендритных кристаллов  $V_2O_5$  [2] или быстрый рост кристаллов  $Cu_2O$  навстречу лазерному пучку [3].

Импульсный лазерный нагрев твердого тела позволяет значительно увеличить плотность паров над его поверхностью по сравнению с непрерывным лазерным нагревом. Характерной особенностью импульсного лазерного воздействия на твердое тело является образование крупномасштабных периодических структур на его поверхности. О формировании таких структур при наносекундной длительности лазерного импульса сообщалось в целом ряде работ [4–7]. Периодические структуры при импульсном лазерном облучении в условиях пробоя среды над мишенью наблюдались на поверхности таких материалов как Ge, Ni, Sn, Al, Cu, ВТСП-керамика, а также латунь и бронза. Механизм формирования этих структур в работах [8, 9] связывался с взаимодействием расплава твердого тела с плазмой оптического пробоя среды.

Образование периодических структур происходит после воздействия на поверхность десятков или сотен лазерных импульсов с плотностью энергии, достаточной для плавления поверхности. Период структур зависит от давления газа над поверхностью, а также от размеров лазерного пятна. Структуры возникают вследствие развития неустойчивостей на границе расплава с плазмой оптического пробоя, таких как неустойчивость Кельвина – Гельмгольца или Рэлея – Тейлора [9].

Формирование крупномасштабных периодических структур в ряде работ связывается с вытеснением материала расплава парами мишени, что приводит к пространственному перераспределению расплавленного вещества (см., напр., [10]). Обзор нелинейно-оптических процессов, приводящих к образованию упорядоченных поверхностных структур при воздействии мощного лазерного излучения на поверхность твердого тела, дан в обзоре [11].

В экспериментальной работе [12] при воздействии на поверхность монокристаллического Si нескольких тысяч импульсов излучения эксимерного KrF-лазера с плотностью энергии  $1-5$  Дж/см<sup>2</sup> наблюдался рост кремниевых микроколонн с большим отношением длины к диаметру, которые выступают над исходной поверхностью на  $10-15$  мкм. Рост колонн происходит в газовых средах, содержащих кислород, а также в  $SF_6$  при давлении  $\sim 1$  атм. В качестве механизма роста кремниевых микроколонн предлагается механизм роста кристаллов, известный под названием «пар – жидкость – кристалл» [13] и реализующийся при росте нитевидных монокристаллов, так называемых вискероов. Авторами [12] предполагается также, что химическое взаимодействие между материалом подложки и газовой средой может быть ответственно за рост структур.

В настоящей работе формирование периодических микроструктур под действием излучения лазера на парах меди исследуется на примере Si, а также Ge и Ti в ши-

роком диапазоне давлений ( $1 - 10^5$  Па) при отсутствии пробоя газовой среды над поверхностью мишени. В этих условиях формируются микроструктуры с морфологией, отличной от таковой в случае плазмообразования. Рост структур происходит в широком диапазоне давлений окружающей атмосферы и, по-видимому, не связан с химическим взаимодействием с ней. Поскольку за время между лазерными импульсами поверхность мишени затвердевает, то морфологические изменения поверхности могут накапливаться и развиваться от импульса к импульсу.

Образование и рост микроструктур происходят лишь при достаточно большом числе лазерных импульсов (более  $10^3$ ). С этой точки зрения несомненным преимуществом лазера на парах меди по сравнению с другими лазерными источниками является высокая частота повторения импульсов – около 10 кГц. По этой причине применение именно лазера на парах меди позволяет легко реализовывать условия роста микроструктур как по плотности энергии, так и по числу лазерных импульсов. Методами рентгеновской дифракции исследована также кристаллическая структура модифицированной поверхности Si и зависимость морфологии структур от угла падения лазерного пучка на поверхность твердого тела.

## 1. Техника эксперимента

В качестве подложек для роста микроструктур в работе использовались пластины монокристаллического Si с ориентацией (100) или (111). Ряд экспериментов был выполнен с монокристаллическим Ge и поликристаллическим Ti. Облучение подложек проводилось в воздухе при атмосферном давлении или в низком вакууме ( $\sim 1$  Па). С целью увеличения размеров области, подвергнутой лазерному воздействию, пучок сканировался по поверхности образца. Для этого образец помещался на управляемый от компьютера столик. Характерная скорость сканирования лазерного пучка по поверхности образца составляла около 0.1 мм/с.

В экспериментах применялось излучение лазера на парах меди с длиной волны  $\lambda = 510.6$  нм, частотой следования импульсов  $f = 10$  кГц и длительностью импульсов  $\tau = 20$  нс. Неполяризованное лазерное излучение фокусировалось линзой с фокусным расстоянием 5 см на поверхность образца в пятно диаметром 40 мкм. Угол падения лазерного излучения на поверхность образца мог варьироваться от нуля до  $60^\circ$ .

В условиях нашего эксперимента при плотностях лазерной энергии около  $1 - 2$  Дж/см<sup>2</sup> как в воздухе, так и в вакууме образования плазмы оптического пробоя газовой среды над поверхностью образца не наблюдалось. Морфология поверхности после лазерного воздействия изучалась с помощью сканирующего электронного микроскопа Jeol. Кристаллическая структура кремния с возникшими после лазерного воздействия микроструктурами исследовалась методами дифракции рентгеновского излучения с помощью дифрактометров ДРОН-2 и УРД-63 (характеристическое излучение меди  $K_\alpha$ ,  $\lambda = 0.154$  нм).

## 2. Экспериментальные результаты

Многоимпульсное лазерное воздействие на поверхность твердого тела с плотностью энергии, достаточной для плавления материала, приводит к существенному из-

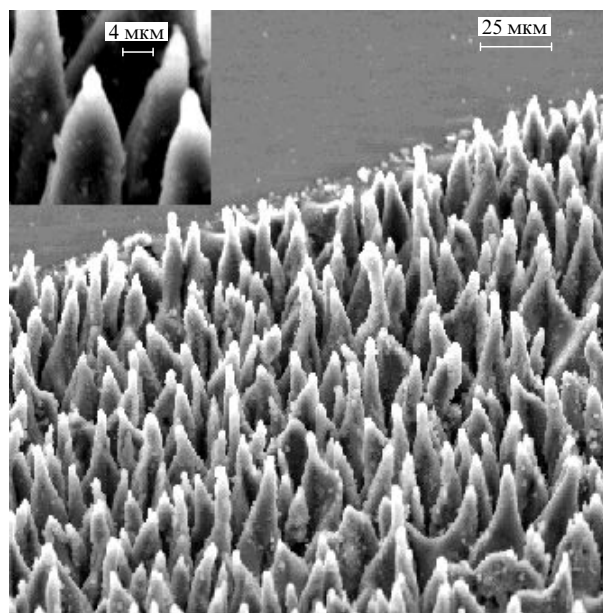


Рис.1. Морфология монокристаллического Si после воздействия на его поверхность в вакууме около  $10^4$  лазерных импульсов при плотности энергии 1 Дж/см<sup>2</sup> и увеличенное изображение микроконусов Si (вставка).

менению его морфологии. Облученная в вакууме поверхность кремния оказывается покрытой периодическими конусообразными структурами, среднее расстояние между которыми составляет 10–20 мкм (рис.1). Угол при вершине конусов равен  $20 - 25^\circ$ . Подобные же структуры образуются на германии и титане.

Плотность энергии лазерного излучения на  $\lambda = 510.6$  нм, необходимая для формирования структур, составляет  $1 - 2$  Дж/см<sup>2</sup>, а число лазерных импульсов – примерно  $10^4$ . Такое число импульсов лазера на парах меди реализуется при суммарном времени экспозиции данной точки образца, равном 1 с. При большем числе импульсов и/или большей плотности энергии преобладает абляция, т.е. образуется впадина, глубина которой растет со временем экспозиции. На фотографии скола образца, представленной на рис.2, видны структуры, выступающие над плоскостью образца на 20–30 мкм, при этом кремниевая

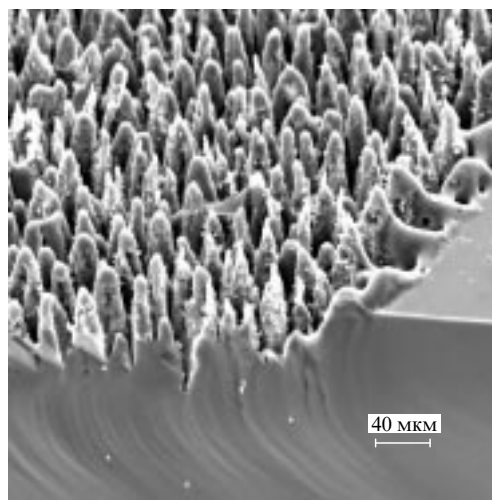


Рис.2. Скол кремниевой пластины, показывающий глубину модифицированной области после лазерного воздействия в воздухе (слой окисла снят травлением в водном растворе HF).



Рис.3. Микроструктуры, растущие при наклонном падении лазерного излучения на поверхность кремния в вакууме под углом  $60^\circ$ .

подложка между ними примерно на столько же углублена ниже поверхности образца.

Образование микроструктур на поверхности Si сопровождается появлением характерных спеклов в отраженном от образца лазерном излучении. Участки поверхности Si, содержащие микроструктуры, в отраженном свете выглядят совершенно черными из-за поглощения в результате многократных отражений от боковых поверхностей конусов.

Лазерное воздействие на Si в воздухе сопровождается образованием толстого слоя оксида, выступающего над поверхностью образца. Стравливание этого слоя в водном растворе плавиковой кислоты (HF) выявляет структуру, подобную образующейся при облучении в вакууме. Как видно из приведенных фотографий, в результате формирования микроструктур происходит многократное увеличение площади поверхности. Из простых геометрических оценок следует, что при формировании на поверхности микроконусов с углом раствора  $25^\circ$  площадь поверхности увеличивается приблизительно в 5 раз. Косвенно это подтверждается и тем обстоятельством, что выделение газовых пузырьков, сопровождающее растворение оксида Si в водном растворе HF, продолжается в течение нескольких дней.

При изменении угла падения излучения на образец изменяется наклон микроструктур: их рост происходит навстречу лазерному пучку, как это показано на рис.3. Наличие структур, растущих навстречу лазерному пучку, является особенностью настоящей работы, поскольку в предыдущих работах при наклонном падении пучка такие структуры не наблюдались [4, 6].

Лазерное воздействие на поверхность кремния сопровождается модификацией его кристаллической структуры. На дифрактограммах в области воздействия лазерного излучения как в вакууме, так и в воздухе кроме сильного пика от монокристалла наблюдаются пики всех возможных отражений Si (рис.4). Образующийся в результате лазерного воздействия в воздухе оксид Si является рентгеноаморфным и не дает пиков на дифрактограмме.

Дифрактограмма Si после лазерного воздействия в вакууме отличается от дифрактограммы после лазерного воздействия в воздухе меньшей интенсивностью поликристаллических пиков. Соотношение интенсивностей поликристаллических пиков указывает на отсутствие ка-

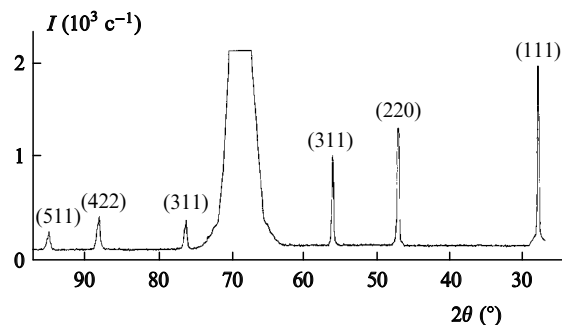


Рис.4. Дифрактограмма монокристаллического кремния ориентации (100) с микроструктурами, возникающими при облучении в воздухе, полученная в режиме  $\theta/2\theta$ -сканирования.

кой-либо текстуры. Пики существенно уширены по сравнению с пиками эталонного образца поликристаллического Si. Уширение пиков образца, облученного в воздухе, больше, чем у образца, облученного в вакууме.

Для образца, облученного в воздухе, расчет размеров областей когерентного рассеяния по формуле Шерера [14] дает 46 нм, а для образца, облученного в вакууме, – 72 нм. Размеры областей когерентного рассеяния соответствуют размерам частиц, возникающих при конденсации испаренного вещества. Высокая интегральная интенсивность поликристаллических пиков показывает, что значительная часть материала в облученной области Si переходит в поликристаллическое состояние. Наночастицы в облученной области могут способствовать еще большему увеличению удельной поверхности образца.

Начальной стадией развития микроструктур являются волны, возникающие на поверхности расплава. Именно они определяют период микроструктур. При монотонном росте числа лазерных импульсов и/или энергии излучения возникновение таких волн предшествует образованию конических структур. Пример волн, развившихся на поверхности Si после лазерного воздействия в вакууме, представлен на рис.5. Виден переход от волн к коническим структурам. С увеличением числа лазерных импульсов во впадинах волн начинают формироваться углубления, а в пучностях начинается рост конусов.

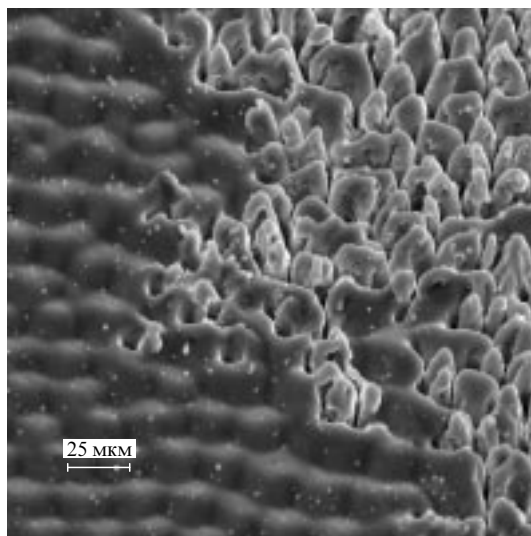


Рис.5. Структуры, возникающие на поверхности Si при импульсном лазерном воздействии в вакууме для плотности энергии лазерного излучения  $1 \text{ Дж/см}^2$ .

### 3. Обсуждение

Рост структур на поверхности твердого тела при лазерном испарении происходит вследствие перераспределения материала мишени, испаряемого при воздействии каждого лазерного импульса. Оценки показывают, что за один лазерный импульс испаряется приблизительно  $10^{12}$  атомов Si. Принимая длину диффузии паров равной средней высоте структур (20 мкм) и температуру паров равной 2000 К, можно оценить давление этих паров как идеального газа в 30 атм. Плотность паров кремния при этом составляет  $10^{20}$  см<sup>-3</sup>. Такая высокая плотность паров обеспечивает быстрый рост структур.

Испаренный из участков мишени между конусами материал конденсируется в основном на возвышающихся над поверхностью вершинах конусов. Такое перераспределение происходит вследствие установления обратной связи между морфологией структуры и ее поглощательной способностью. При глубине поглощения излучения, малой по сравнению с характерным размером структуры по вертикали, наибольшую температуру в однородном по интенсивности лазерном пучке будут иметь те участки поверхности микроструктуры, для которых угол падения излучения близок к нормальному. Прямые измерения показывают, что коэффициент отражения поверхности Si на длине волны лазера на парах меди составляет 0.38 при нормальном падении и 0.72 – при угле падения  $78^\circ$  (угол падения излучения на боковую поверхность конуса).

При плотности лазерной энергии, близкой к порогу плавления Si, увеличение коэффициента отражения с увеличением угла падения излучения обеспечивает сохранность конусообразных структур от импульса к импульсу. Лазерное излучение отражается от боковой поверхности в направлении впадин между конусами, что увеличивает локальную плотность энергии излучения в них. При наличии конусов на поверхности даже в условиях однородного распределения интенсивности излучения распределение температуры по поверхности становится неоднородным, что приводит к преимущественной конденсации паров на относительно «холодных» участках поверхности конусов. В этом смысле развивающиеся структуры являются самоорганизующимися. В процессе лазерного испарения структуры испарение с вершины конуса идет с большей скоростью, чем с боковой поверхности, в силу малого радиуса кривизны последней, что способствует заострению структуры. Аналогично при наклонном падении лазерного излучения наибольшим коэффициентом отражения обладают структуры, ориентированные на лазерный пучок.

Как видно из рис.5, микроструктуры развиваются из волн на поверхности расплава, которые и являются источником стартовой неоднородности поглощательной способности поверхности. Природа исходного рельефа (волн) на поверхности, служащего стартовой неоднородностью для развития микроконусов, нуждается в дальнейшем исследовании. В качестве возможных механизмов образования исходной периодической структуры могут выступать капиллярные волны. Дисперсионное соотношение для капиллярных волн на поверхности жидкости выглядит следующим образом [15]:

$$\omega^2 = hk^4 \sigma / \rho,$$

где  $\omega$  – частота волны;  $\sigma$ ,  $h$  и  $\rho$  – коэффициент поверх-

ностного натяжения, глубина и плотность расплава соответственно;  $k$  – волновой вектор капиллярной волны;  $k = 2\pi/\lambda$ ;  $\lambda$  – длина волны.

Поскольку кремний затвердевает за время между лазерными импульсами, в качестве периода волны  $T = 2\pi/\omega$  следует брать время существования жидкой фазы. Это время, вообще говоря, зависит от превышения температуры расплава над температурой плавления. При плотности энергии лазерного пучка, близкой к порогу плавления, это время можно принять равным длительности лазерного импульса  $\tau$ , т. е. в рассматриваемом случае  $T = 20$  нс. Полагая, что глубина расплава  $h \sim 1$  мкм (порядка глубины диффузии тепла в кремнии за время лазерного импульса) и  $\sigma = 850$  мН/м при  $T = 1550^\circ\text{C}$  [16], получаем длину волны  $\lambda \sim 1$  мкм, что существенно меньше, чем наблюдаемый период структур.

Однако в экспериментальных условиях настоящей работы указанное дисперсионное соотношение неприменимо, т. к. оно получено для волн на свободной поверхности расплава. Конечные размеры ванны расплава, возникающей под действием лазерного пучка размером  $a \times b$ , накладывают ограничения на спектр капиллярных волн. При этом возможные модули волнового вектора  $k$  капиллярной волны становятся дискретными и определяются следующим соотношением:  $k^2 = \pi^2(m^2/a^2 + n^2/b^2)$ , где  $m$  и  $n$  – целые числа [15].

В качестве других причин, приводящих к неоднородности поверхности расплава, можно также указать на ячейки Бенара, дефектно-деформационную неустойчивость [17], неустойчивости Рэлея–Тейлора и Кельвина–Гельмгольца [9]. Два последних эффекта, однако, представляются маловероятными в силу низкой плотности окружающей среды в экспериментальных условиях настоящей работы.

Отметим, что для Ge и Ti коэффициенты поверхностного натяжения имеют тот же порядок, что и для кремния:  $\sigma = 558$  и  $1558$  мН/м при  $1550$  и  $1670^\circ\text{C}$  соответственно. Наблюдаемые периоды структур оказываются близкими и составляют около 10 мкм.

Испаренный во время лазерного импульса кремний вновь осаждается на остывший кристалл в виде кластеров, размер которых составляет десятки нанометров. Состоящие из таких кластеров микроконусы, сформированные на монокристалле, имеют, в отличие от подложки, поликристаллическую структуру. Их внешний вид заметно отличается от вида микроструктур, возникающих в условиях лазерного пробоя среды. В последнем случае микроструктура заканчивается шаровидным утолщением, диаметр которого близок диаметру конуса в конце структуры или даже превышает его [12].

Следует отметить, что в [12] микроколонны, сформированные излучением эксимерного лазера на поверхности Si, свободны от слоя оксида, что, по-видимому, связано с воздействием на поверхность ударной волны, возникающей при оптическом пробое среды. В работе [12] не указано на возникновение пробоя среды при воздействии УФ излучения, но о его наличии косвенно свидетельствует отсутствие роста структур при давлениях ниже атмосферного, при которых пробой среды значительно облегчается. В условиях настоящей работы пробой среды в рабочем диапазоне давлений, по-видимому, не происходит, что связано с меньшей энергией кванта излучения и большей длительностью лазерного импульса по сравнению с эксимерным лазером. Поверхность Si, испаряемая излучением лазера на парах меди в воздухе, покрыта

толстым слоем некомпактного оксида кремния, как и в случае абляции керамики SiC в воздухе [18]. Отметим, что в присутствии плазмы пробоя роста структур навстречу лазерному пучку при его наклонном падении не происходит [9], т. к. давление плазменного облака, расширяющегося перпендикулярно поверхности, приводит к механическому разрушению таких структур.

## Заключение

Итак, в отсутствие пробоя среды при импульсном лазерном испарении твердых тел на их поверхности возникают самоорганизующиеся микроструктуры, представляющие собой конусы, выступающие над поверхностью на 20–30 мкм, оси которых направлены вдоль оси лазерного пучка. Структуры развиваются при достаточно большом числе лазерных импульсов ( $\sim 10^4$ ) и при плотности энергии в лазерном пучке, превышающей порог плавления материала. Стартовой неоднородностью для развития структур, определяющей их пространственный период, являются волны на поверхности расплава твердого тела. В состав кремниевых структур входит поликристаллический кремний, размеры частиц которого составляют десятки нанометров. Формирование конусообразного профиля оказывается возможным вследствие увеличения коэффициента отражения с увеличением угла падения лазерного излучения. Плавление и испарение происходят преимущественно в углублениях между соседними конусами, а сами конусы не плавятся в силу отражения лазерного излучения от их боковых поверхностей.

Рассмотренные самоорганизующиеся структуры, которые возникают при лазерном испарении твердых тел, имеют широкий спектр потенциальных применений. Так, например, модифицированная поверхность кремния обладает высоким коэффициентом поглощения в видимой области, что представляет несомненный интерес для технологии изготовления солнечных батарей. Увеличение поглощательной способности поверхности кремния позволяет увеличить эффективность генерации фототока и отказаться от нанесения просветляющих покрытий, которые эффективны лишь в узком интервале углов падения лазерного излучения и весьма нестойки в эксплуатации.

Заостренные конические микроструктуры представляют интерес в качестве полевых эмиттеров электронов, которые легко интегрируются в кремниевую микроэлектронику. Заметим, что наблюдавшиеся ранее структуры, возникающие при лазерном пробое среды, едва ли могут быть использованы как эмиттеры из-за шаровидной формы острия. Наконец, формирование структур приводит к значительному росту площади поверхности твердого тела, что может найти применение в катализе и при создании сенсорных устройств.

Авторы выражают благодарность В.П.Агееву и В.И.Лучину за полезные обсуждения результатов исследования. Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты № 98-02-16104 и 98-02-16207).

1. Бункин Ф.В., Кириченко Н.А., Лукьянчук Б.С. *УФН*, **138**, 45 (1982).
2. Бобырев В.А., Бункин Ф.В., Кириченко Н.А., Лукьянчук Б.С., Нанаи Л., Симакин А.В., Хевеши И., Шафеев Г.А. *Квантовая электроника*, **14**, 1170 (1985).
3. Алимов Д.Т., Атабаев Ш., Бункин Ф.В., Журавский В.Л., Кириченко Н.А., Лукьянчук Б.С., Омельченко А.И., Хабибулаев П.К. *Письма в ЖТФ*, **8**, № 1, 10 (1982).
4. Брайловский А.Б., Дорофеев И.А., Езерский А.Б., Ермаков В.А., Лучин В.И., Семёнов В.Е. *ЖТФ*, **61**, № 31, 129 (1991).
5. Агеев В.П., Горбунов А.А., Конов В.И. *Квантовая электроника*, **16**, 1214 (1989).
6. Ursu I., Mihailescu I.N., Popa Al., Prokhorov A.M., Ageev V.P., Gorbunov A.A., Konov V.I. *J. Appl. Phys.*, **58**, 3909 (1985).
7. Kautek W., Roas B., Schultz L. *Thin Solid Films*, **191**, 317 (1990).
8. Голубев В.Н., Дорофеев И.А., Либенсон М.Н., Лучин В.И., *Письма в ЖТФ*, **17**, № 24, 67 (1991).
9. Brailovsky A.B., Gaponov S.V., Luchin V.I. *Appl. Phys. A*, **61**, 81 (1995).
10. Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Дунаевский Н.А., Решетин В.П. *ДАН*, **316**, 347 (1991).
11. Ахманов С.А., Емельянов В.И., Коротеев Н.И., Семиногов В.Н. *УФН*, **147**, 675 (1985).
12. Pedraza A.J., Fowlkes J.D., Lowndes D.H. *Appl. Phys. Letts*, **74**, 2322 (1999).
13. Гиваргизов Е.И. *Рост нитевидных и пластинчатых кристаллов из пара* (М., Наука, 1977).
14. Иверонова В.И., Ривкевич Г.П. *Теория рассеяния рентгеновских лучей* (М., Изд-во МГУ, 1978).
15. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Гидродинамика* (М., Наука, 1988).
16. *Физические величины (справочник)*. Под ред. И.С.Григорьева и Е.З.Мейлихова (М., Энергоатомиздат, 1991).
17. Емельянов В.И. *Квантовая электроника*, **28**, 2 (1999).
18. Воронов В.В., Долгаев С.И., Лялин А.А., Шафеев Г.А. *Квантовая электроника*, **23**, 637 (1996).

V.V.Voronov, S.I.Dolgaev, S.V.Lavrishchev, A.A.Lyalin, A.V.Simakin, G.A.Shafeev. Formation of conic microstructures in the pulsed laser evaporation of solids.

A study was made of the origination and the development of large-scale self-organising microstructures on the surface of monocrystalline Si and several other materials (Ge, Ti) in their vaporisation by pulsed laser radiation (copper vapour laser,  $\lambda = 510.6$  nm,  $\tau = 20$  ns). The structure formation occurs under repeated pulsed laser irradiation ( $\sim 10^4$  pulses with an energy density of  $1-2$  J cm $^{-2}$ ) in the absence of optical breakdown of the medium above the target surface in the  $1-10^5$  Pa pressure range in a wide range of angles of laser radiation incidence on the surface. The structures are cones with an apex angle of  $\sim 20-25^\circ$ , which grow towards the laser beam. It is shown that the spatial period of the structures developing during laser evaporation is determined by the period of the waves arising on the melt surface and is equal to  $10-20$   $\mu$ m. It was determined employing x-ray diffraction analysis that the modified substrate region has a polycrystalline structure and consists of crystallites with dimensions ranging from 40 to 70 nm, depending on the pressure of the ambient atmosphere..