

УДК 539.104:537.311.33:621.312.5

О МЕХАНИЗМАХ ОБРАЗОВАНИЯ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СТРУКТУР

П. П. ТРОХИМЧУК¹⁾

¹⁾Восточноевропейский национальный университет им. Леси Украинки,
пр. Воли, 13, 43025, г. Луцк, Украина

Обсуждаются проблемы механизмов образования лазерно-индуцированных поверхностных структур. Проведен детальный анализ формирования таких структур на кремнии и германии. Показано влияние спектрального состава, числа импульсов облучения и среды на геометрические размеры полученных структур и на их фазовые состояния. Проанализирована возможность применения теории Chandrasekhar – Haken – Ebeling эффекта Бенара для объяснения наблюдаемых экспериментальных результатов. Эта модель с успехом может быть использована только для объяснения гидро- и аэродинамических задач. В связи с этим предлагается каскадная модель поэтапного возбуждения химических связей в режиме насыщения возбуждения. Для объяснения полученных экспериментальных результатов применяется фазовая диаграмма кремния, согласно которой он имеет четыре кристаллографические модификации. Показано, что каскадная модель более адекватно описывает особенности возникновения поверхностных структур, включая большой разброс по высотам полученных структур и появление новых фаз.

Ключевые слова: лазерно-индуцированные структуры; эффект Бенара; кремний; германий; каскадная модель; релаксационная оптика.

ABOUT MECHANISMS OF THE FORMATION OF SURFACE LASER-INDUCED STRUCTURES

P. P. TROKHIMCHUCK^a

^aLesya Ukrayinka East European National University, 13 Voli Avenue, Lutsk 43025, Ukraine

The problems of the mechanisms the formation of laser-induced surface structures are discussed. A detailed analysis of the formation of such structures on silicon and germanium is carried out. The influence of the spectral characteristics, pulses number of irradiation and matter on the geometric dimensions of the received structures and on their phase states is shown. An analysis is made of the possibility of applying the Chandrasekhar – Haken – Ebeling theory of the Benard effect to explain the observed experimental results. This model can be successfully used to explain hydro and aerodynamic problems only. In connection with this, a cascade model of the phased excitation of chemical bonds in the saturation regime of excitation is proposed and analyzed. To explain the experimental results, a phase diagram of silicon is used, according to which it has four crystallographic modifications. It is shown that cascade model more adequately describes the features of the appearance of surface structures, including a large scatter in the heights of the structures obtained and the appearance of new phases.

Key words: laser-induced structures; Benard effect; silicon; germanium; cascade model; relaxed optics.

Образец цитирования:

Трохимчук П. П. О механизмах образования лазерно-индуцированных поверхностных структур // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. 2018. № 1. С. 58–65.

For citation:

Trokhimchuck P. P. About mechanisms of the formation of surface laser-induced structures. *J. Belarus. State Univ. Phys.* 2018. No. 1. P. 58–65 (in Russ.).

Автор:

Петр Павлович Трохимчук – кандидат физико-математических наук, доцент; доцент кафедры теоретической и математической физики факультета информационных систем, физики и математики.

Author:

Petro P. Trokhimchuck, PhD (physics and mathematics), doцент; associate professor at the department of theoretical and mathematical physics, faculty of information systems, physics and mathematics.
trope1650@gmail.com

Введение

Проблема объяснения механизмов образования лазерно-индуцированных поверхностных структур представляет собой сложную задачу [1–6]. В зависимости от условий облучения на поверхности могут образовываться наноструктуры высотой 15–20 нм [1; 2] и микроструктуры высотой до 50 мкм [4]. При этом может изменяться кристаллическая симметрия облучаемого материала [1].

Плазмон-поляритонная модель Макина [2] позволяет определить лишь особенности формирования необратимой интерференционной картины и влияние поляризации на условия ее создания. Причин возникновения необратимых изменений при облучении материала эта теория не раскрывает.

Для объяснения фазовых лазерно-индуцированных превращений используются либо классические термодинамические теории фазовых переходов [1; 2; 7], либо теория эффекта Бенара [3; 7]. Г. Хакен показал аналогию между фазовыми переходами второго рода и нелинейно-оптическими явлениями по сути – неравновесными фазовыми переходами [7]. В случае фазового перехода необходимо наличие эффекта насыщения, т. е. все микроскопические состояния осуществляют переход. При нелинейно-оптическом явлении эффект насыщения не обязателен, поскольку количество переходов должно быть достаточным для его измерения. Даже в случае эффекта насыщения классические нелинейно-оптические явления неравновесные, так как они проходят в стабильной матрице.

Эффект Бенара обусловлен переходом от теплопередачи к конвективным процессам. Эту теорию создал С. Чандрасекар [8], расширил ее Г. Хакен [7], а с необратимыми процессами связал В. Эбеллинг [9]. В случае собственного поглощения, когда происходят необратимые изменения, возможны следующие явления: прямые фотокристаллохимические фазовые трансформации, плазменные фазовые превращения и тепловые фазовые превращения [3; 6]. Из них наиболее быстро протекающие – фотокристаллохимические. Если создать условия, когда поглощаемая энергия идет непосредственно на фазовые превращения, а не на тепловую или плазменную релаксацию, то будем иметь чистый фотостимулированный эффект. Для достижения макроскопического изменения необходимо насыщение возбуждения. С этой целью была создана каскадная модель возбуждения соответствующего числа и типов химических связей в режиме насыщения возбуждения [3]. Именно эту модель целесообразно использовать для объяснения микроскопического механизма образования поверхностных лазерно-индуцированных микроструктур. В отличие от теории эффекта Бенара данная модель позволяет качественно объяснить возникновение лазерно-индуцированных поверхностных нано- и микроструктур без привлечения гидродинамики.

Представленный подход применялся для кремния, германия и углерода [3]. Для этого использовалась фазовая диаграмма кремния [10], согласно которой кремний имеет четыре кристаллографические модификации с координационными числами 8, 6, 4 и 3.

Показано, что каскадная модель более адекватно объясняет разброс геометрических размеров получаемых поверхностных структур кремния и германия, включая их фазовый состав.

Результаты исследований и их обсуждение

Рассмотрим основные экспериментальные результаты по образованию поверхностных лазерно-индуцированных структур. На рис. 1 представлен рельеф поверхности германия [1]. Кристаллы германия с ориентациями $\{111\}$ и $\{001\}$ облучались сериями импульсов Nd : YAG-лазера (длина волны составляла 1,064 мкм, длительность импульса – 15 нс, частота следования импульсов – 12,5 Гц, плотность мощности – 28 МВт/см²).

Особенность полученных результатов заключается в том, что созданные наноструктуры имеют высоту до 200 нм и гексагональную симметрию. Облучение тем же лазером кристаллов кремния и арсенида галлия приводит к образованию поверхностных наноструктур высотой 15–20 нм [1]. При этом, как правило, изменения кристаллической структуры не происходит.

Более высокие лазерно-индуцированные наноструктуры (высота составляла 20–30 мкм, диаметр – 2–3 мкм) были получены после облучения кремния сериями из 1000 импульсов наносекундного эксимерного KrF-лазера (длина волны равнялась 248 нм, длительность импульса – 25 нс) с плотностью энергии от 2,7 до 3,3 Дж/см² (рис. 2).

Если изменять атмосферу облучения, морфология микроколонн будет другой. На рис. 3 приведены результаты облучения сериями из 600 импульсов того же криптонового лазера в атмосфере воздуха ($N_2 - 18\% O_2$) с последующим облучением сериями из 1200 импульсов в атмосфере $N_2 - 5\% O_2$ [4].

Необходимо отметить значение газовой среды, когда в качестве окружающего газа при лазерном облучении кремния использовался плазменный травитель SF₆. В SF₆ создаются более высокие структуры, которые сначала видны как стены, окружающие глубокие центральные отверстия (рис. 4) [4]. Глубина этих отверстий, или высота микроколонн, достигает 40–50 мкм.

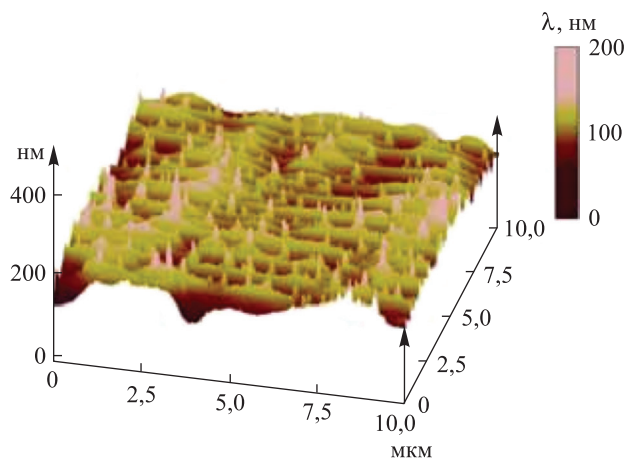


Рис. 1. Объемное изображение наноструктур после облучения Nd : YAG-лазером поверхности германия, полученное методом атомной силовой микроскопии [1]

Fig. 1. Three-dimensional AFM image of nanostructures after Nd : YAG laser irradiation on Ge surface [1]

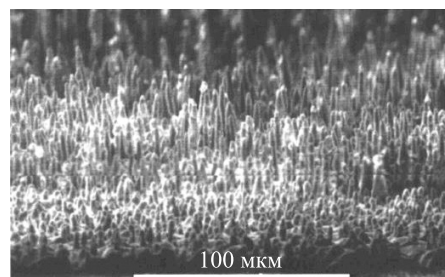


Рис. 2. Изображение поверхностных микроструктур на кремнии после облучения серий из 1000 импульсов криптонового лазера с плотностью энергии 3 Дж/см² в воздухе, полученное при помощи сканирующей электронной микроскопии [4]

Fig. 2. SEM images of silicium nanocolumns after 1000 laser shots in air at 3 J/sm² [4]

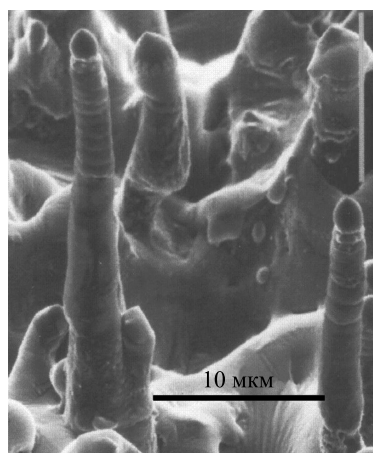


Рис. 3. Изображение, полученное методом сканирующей электронной микроскопии, показывающее изменение морфологии микроколонн Si, контролируемое составом окружающего газа при плотности энергии, равной 2,7 Дж/см². Более низкие структуры образовались после облучения серий из 600 лазерных импульсов в воздухе (N₂ – 18 % O₂).

Остальная часть колонн была увеличена при облучении серий из 1200 лазерных импульсов в атмосфере N₂ – 5 % O₂ [4]

Fig. 3. SEM image showing a change in Si microcolumn morphology controlled by the ambient gas composition at E_d 2.7 J/cm². The arrows indicate the height achieved after 600 laser pulses in air (N₂ – 18 % O₂); the remainder of the columns was grown by 1200 laser pulses in N₂ – 5 % O₂ [4]

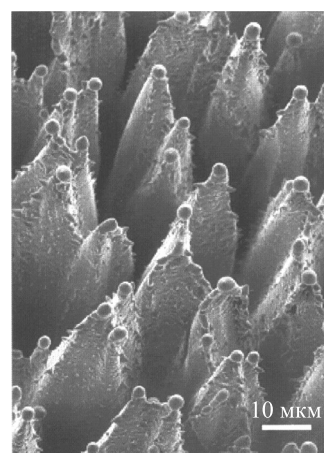


Рис. 4. Структура Si, создаваемая 2040-лазерными импульсами при облучении с плотностью энергии, составляющей 1,5 Дж/см², давления, равном 1 атм, в атмосфере SF₆ [4]

Fig. 4. Walled Si structure produced by 2040 laser pulses at $E_d = 1.5$ J/cm² in 1 atm of SF₆ [4]

Более высокие структуры, как видно из рис. 3, образуются при меньшем окислении. Поверхностная окислительная пленка сдерживает рост наноструктур. Данные рис. 4 подтверждают эту гипотезу. Облучение в антиокислительной среде SF₆ приводит к образованию более высоких шероховатых наноструктур, не покрытых оксидом кремния.

Упорядоченные лазерно-индуцированные наноструктуры, созданные на поверхности Si после лазерного облучения серий фемтосекундных импульсов (длина волны составляет 0,8 мкм, длительность импульса – 100 фс, количество импульсов – 200) через слой воды, представлены на рис. 5. Генерируются три типа наноструктур [2; 11].

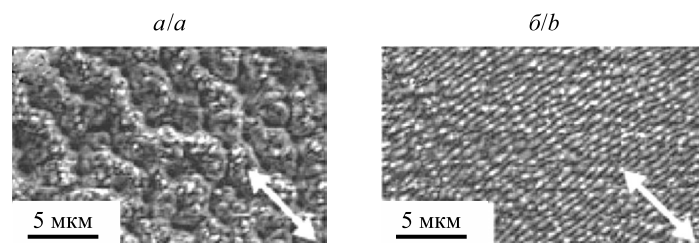


Рис. 5. Упорядоченные структуры, сформированные на поверхности кремния после лазерного облучения через слой воды, плотность энергии облучения составляла: 25 кДж/м² (а); 5 кДж/м² (б) [11].

Стрелка в нижнем углу показывает направление поляризации лазерного излучения
Fig. 5. Ordered structures, which were generated on surface of silicon after laser irradiation through lay of water, density of energy the irradiation 25 kJ/m² (a); 5 kJ/m² (b) [11].
Arrow in lower angle show the direction of polarization of laser radiation

Наноструктуры имеют типичный пространственный масштаб, равный 600 и 120 нм, ориентированным здесь является вектор-решетка. Он соответствует интерференции между поверхностным плазмон-поляритоном (ППП) и поперечно-магнитной волной (ТМ). Структуры с периодом 600 нм генерируются при интерференции падающей волны с волной ППП, возникающей на электронах кремния, пограничных с облученными без воды. Структуры с периодом 120 нм генерируются при взаимной интерференции двух ППП, которые распространялись во взаимно обратных направлениях вдоль пограничного слоя кремний – плазма. Структуры с периодом 120 нм не зависят от природы жидкости, с которой контактировал кремний.

Лазерно-индуцированные кремниевые наноструктуры после облучения серией лазерных фемтосекундных импульсов (длина волны составляла 0,8 мкм, длительность импульса – 100 фс, количество импульсов – 200) с периодом, равным 90 нм, генерировались при изменении ориентации вектора по сравнению с первоначальной на предыдущем этапе облучения. Мощность лазерного облучения была меньше в два раза, нежели исходной структуры. Полученные периодические структуры (рис. 6 и 7) представляют собой нанокolonны высотой до 400 нм с пространственным периодом 90 нм и вектором ориентации волны [2; 11].

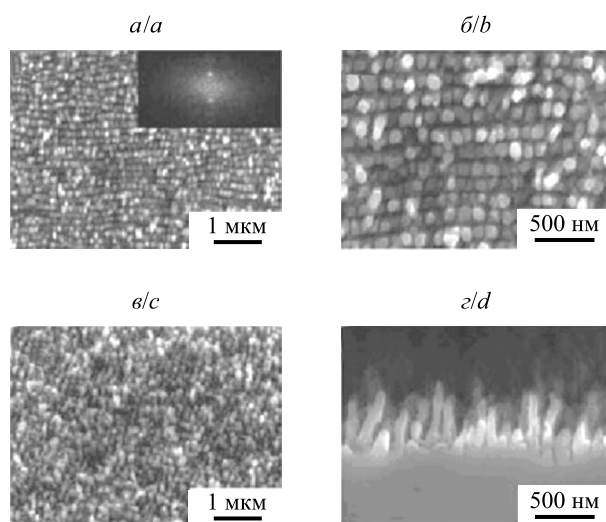


Рис. 6. Нанокolonны, которые генерируются после облучения структур кремния с периодом, равным 90 нм (длина волны облучения составляла 800 нм, количество импульсов – 200, плотность энергии облучения – 0,5 кДж/м²): поворот поляризации на угол 90° (а, б); поворот поляризации на угол 45° (в); поперечное сечение нанокolonн (г).

На вставке рис. 6, а, представлено фурье-изображение структур [11]
Fig. 6. Ordered structures, which were generated on surface of silicon after laser irradiation through lay of water (arrow in lower angle show the direction of polarization of laser radiation); duration of pulse – 90 fs, wavelength – 800 nm, number of pulses – 200, density of energy the irradiation – 0.5 kJ/m²: turn of polarization on 90° (a, b); turn of polarization on 45° (c); cross chip of nanocolumns (d). On insertion to fig. 6, a, – fourier-picture of structures [11]

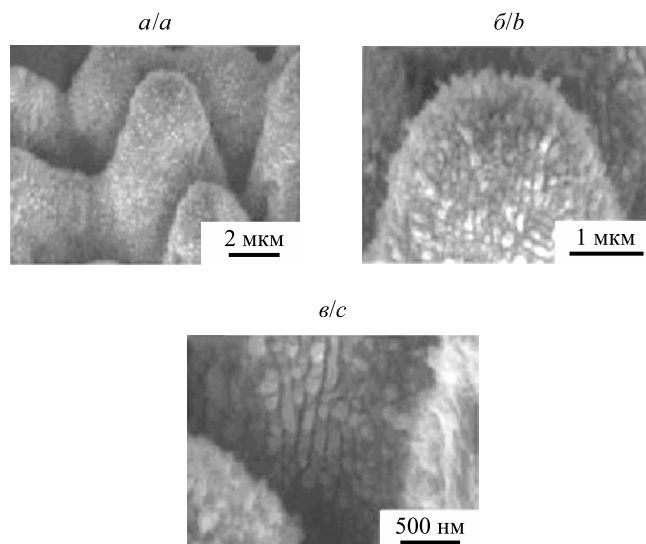


Рис. 7. Поверхностные кремниевые наноклонны небольшого масштаба, имеющие ортогональную ориентацию к гребням нанорельефа большого масштаба [11]

Fig. 7. Surface silicon nanocolumns of little scale, which have orthogonal orientation to a crests of nanorelief of large scale [11]

Анализ экспериментальных результатов на основе теории эффекта Бенара, приведенный в [1], не позволяет однозначно их объяснить. Эта теория описывает появление гексагональных двумерных структур при подогреве нижнего слоя жидкости. Согласно теории Чандрасекара это возможно лишь при довольно больших числах Рэлея [9]. Объяснения этого явления с микроскопической точки зрения не существует. Хотя, исходя из качественных соображений, это можно представить следующим образом. Известно, что молекулы воды образуют треугольники. Как показано в [8] и [7], наиболее плотная их упаковка образует шестигранник. Другие жидкости также имеют тригональную или гексагональную структуру молекул. В жидкости они образуют своеобразные листы подобно графену [12]. Конвективные потоки при малых интенсивностях выходят наружу как раз по граням шестиугольника, в случае повышения интенсивности конвекции они преобразуются в вихри. При этом гексагональная структура внутри этих вихрей может сохраняться. Однако при облучении кристаллов германия со структурой алмаза образуются гексагональные объемные, а не поверхностные структуры.

Сомнения и противоречия, которые возникают при этом, следующие:

- 1) полученные наноструктуры германия (см. рис. 1) имеют пространственную, а не двумерную гексагональную структуру;
- 2) непонятно, каким образом можно определить процесс перехода теплопереноса к конвекции при лазерном облучении;
- 3) неизвестно, как можно определить зависимости высоты образуемых структур от режимов облучения.

С нашей точки зрения, для объяснения полученных результатов целесообразнее применить каскадную модель поэтапного возбуждения химических связей в режиме насыщения – возбуждения [3]. В основу этой модели положена фазовая диаграмма кремния (рис. 8) [10]. Дальнейший фотохимический расчет очень прост. Рассчитывается плотность химических связей, или координационных чисел, по следующей формуле [3]:

$$n_a = \frac{\rho N_A}{A},$$

где ρ – плотность среды; A – атомный вес облучаемого материала; N_A – число Авогадро. Для кремния $n_{aSi} = 5 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$, для германия $n_{aGe} = 4,4 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$.

Далее, определяется количество энергии, необходимое для разрыва соответствующего количества связей в режиме насыщения возбуждения. Будем считать, что одному координационному числу соответствует энергия ковалентной связи (кристаллы кремния и германия со структурой алмаза имеют только ковалентный тип связи). Она равна 1,6–1,8 эВ для кремния, 0,9–1,2 эВ – для германия. Это есть значение химических ковалентных связей в кремнии и германии согласно [3]. Если энергию образования точечного дефекта в соответствии с теорией Зейтца (смещения атома из узла кристаллической решетки в междоузельное состояние) [13] разделить на координационное число, то получим практически те же значения энергии.

В случае умножения координационного числа на плотность атомов можно получить удельную объемную плотность энергии связи кремния и германия со структурой алмаза, или же то значение энергии, которое требуется для разрыва соответствующего числа химических связей. В табл. 1 приведены данные по плотности энергии, необходимой для разрыва соответствующего числа координационных чисел.

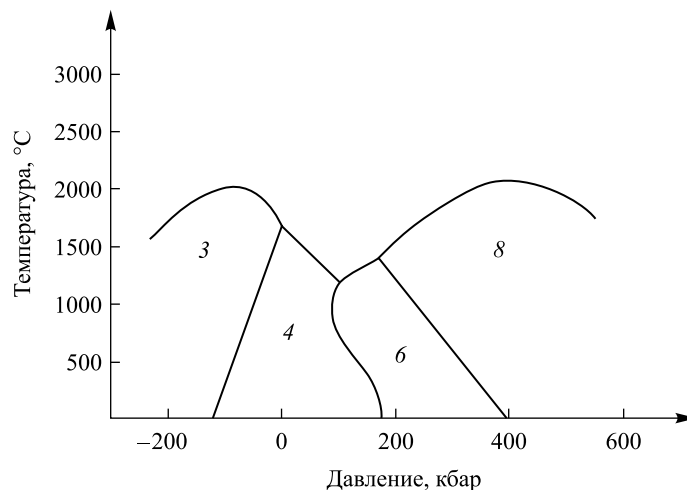


Рис. 8. Фазовая диаграмма кремния. Каждой фазе соответствует свое координационное число (3, 4, 6, 8) [10]

Fig. 8. A schematic phase diagram for Si (CN).

The coordination numbers (CN) of the various phases are indicated (3, 4, 6, 8) [10]

Таблица 1

Объемная плотность энергии I_{vi} (10^3 Дж/см³), которая необходима для разрыва соответствующего числа координационных связей

Table 1

Volume density I_{vi} (10^3 J/cm³), which is necessary for the break of proper numbers of coordination bonds

Химический элемент	I_{v1}	I_{v2}	I_{v4}	I_{v5}
Si	12,8–14,4	25,6–28,8	51,2–57,6	63–72
Ge	6,3–8,4	12,6–16,8	25,2–33,6	31,5–42,0

Если данные табл. 1 разделить на соответствующие коэффициенты поглощения [14], то получим поверхностные плотности энергии, которые необходимы для разрыва установленного числа координационных связей (табл. 2). Эти значения энергии, кроме первого, соответствуют переходу от кубической симметрии к трем другим кристаллографическим модификациям кремния и германия. Первое значение определяет максимальную плотность энергии облучения, при которой не изменяется структура (релаксация в основном излучательная).

Таблица 2

Поверхностная плотность энергии I_{si} (Дж/см²), которая необходима для разрыва соответствующего числа координационных связей

Table 2

Surface density I_{si} (J/cm²), which is necessary for the break of proper numbers of coordination bonds

Элемент, длина волны облучения, мкм	I_{s1}	I_{s2}	I_{s4}	I_{s5}
Si, 1,06	128–144	256–288	512–576	630–720
Si, 0,53	1,28–1,44	2,56–2,88	5,12–5,76	6,3–7,2

Окончание табл. 2
 Ending table 2

Элемент, длина волны облучения, мкм	I_{s1}	I_{s2}	I_{s4}	I_{s5}
Si, 0,248	0,0128–0,0144	0,0256–0,0288	0,0512–0,0576	0,063–0,072
Ge, 1,06	0,63–0,84	1,26–1,68	2,52–3,36	3,15–4,2
Ge, 0,53	0,32–0,42	0,63–0,84	1,26–1,68	1,58–2,1

Данные табл. 2 лишь качественно отображают основные фотохимические процессы, которые могут происходить в облучаемом материале. Известно, что более низкие кристаллографические модификации имеют меньшую плотность, поэтому при переходе к структурам с более низкой симметрией и происходит разбухание поверхности.

Для реальных условий поглощения излучения следует учесть еще и отражение излучения. И для германия, и для кремния для видимого и инфракрасного облучения коэффициент отражения составляет $\sim 0,2$, а для ультрафиолетового для кремния он равен $\sim 0,6$ [14], т. е. данные табл. 1 и 2 следует умножить на 1,25 для видимого и инфракрасного облучения и на 2,5 – для ультрафиолетового.

Если рассчитать рост поверхностных структур в зависимости от импульса, то получится 15–20 нм для рис. 1, 10–15 нм – для рис. 2 и 3, 20–25 нм – для рис. 4, 2,0–2,5 нм – для рис. 6. Как видно, длительность импульса облучения мало влияет на высоту поверхностных структур. Условия насыщения возбуждения для эксимерного лазера в основном определяются высоким коэффициентом поглощения излучения ($\sim 10^6 \text{ см}^{-1}$), для неодимового лазера – многофотонными процессами поглощения. Согласно адаптированной к проблемам релаксационной оптики модели, взятой из радиационной физики твердого тела [13], количество химических связей, которые может ионизировать (разорвать) один фотон, можно определить с помощью формулы

$$n = 2 \ln \frac{h\nu}{E_a},$$

где $h\nu$ – энергия фотона; E_a – энергия активации (разрыва) связи. При режимах облучения эксимерным лазером один фотон может разорвать в кремнии $\sim 3,7$ связи, $\sim 0,7$ связи – неодимовым лазером, меньше одной связи – лазером с длиной волны 800 нм. Если нет режима насыщения возбуждения, то процесс образования поверхностных структур при использовании двух последних лазеров будет менее интенсивным, чем для первого режима. В этом случае существенную роль играют процессы переизлучения (оптический Угса-процесс) [3; 5]. Аналогичное объяснение подходит и для германия (см. рис. 1).

При подсчете интенсивностей облучения наноструктур германия с помощью этого метода определены значения, которые приводят к образованию гексагональной структуры. В случае же облучения кремния большими сериями импульсов (1500–2000 имп.) эксимерного лазера [4] получены интенсивности, достаточные для формирования тригональной структуры и даже квазикристаллов. При этом структура может изменяться по высоте с понижением порядка от основы к вершине. Аналогично можно объяснить создание наноструктур кремния высотой до 450 нм при облучении сериями фемтосекундных лазерных импульсов с длиной волны 800 нм в воде [11]. В этом случае интенсивность образования новой фазы значительно меньше, чем указано в [4].

Таким же образом можно определить и процесс лазерного распыления материала. Для этого следует полную энергию разрыва всех связей разделить на два. Так, для кремния плотность энергии облучения без учета отражения и излучательных механизмов релаксации составит $\sim 5\text{--}7 \text{ Дж/см}^3$, для германия она будет равна $\sim 3,2\text{--}5,7 \text{ Дж/см}^3$. Однако, когда на промежуточных этапах происходит образование новых фаз, это значение может изменяться в ту или другую сторону или же сублимация может быть заменена абляцией.

Заключение

Таким образом, проанализированы экспериментальные результаты по лазерно-индуцированному образованию поверхностных структур на германии и кремнии.

Выполнен сравнительный анализ теории Чандрасекара – Хакена – Эбелинга, примененной к эффекту Бенара, а также каскадной модели возбуждения (разрыва) химических связей в режиме насыщения – возбуждения. Показано, что каскадная модель более адекватно описывает всю совокупность представленных экспериментальных результатов. Приведены оценки и критерии образования соответствующих структур.

Библиографические ссылки

1. Medvid' A. Nano-cones formed on a surface of semiconductors by laser radiation: technology model and properties // *Nano-wires Sci. Technol.* / ed. by N. Lupu. Vukovar : InTech, 2010. P. 61–82. DOI: 10.5772/39493.
2. Макин В. С. Особенности образования упорядоченных микро- и наноструктур в конденсированных средах при лазерном возбуждении мод поверхностных поляритонов : дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Санкт-Петербург : Государственный университет информационных технологий, механики и оптики, 2013.
3. Trokhimchuk P. P. *Relaxed Optics: Realities and Perspectives*. Saarbrücken : Lambert Academic Publishing, 2016.
4. Pedraza A. J., Fowlkes J. D., Lowndes D. H. Silicon microcolumn arrays growth by nanosecond pulse laser irradiation // *Appl. Phys. Lett.* 1999. Vol. 74, issue 16. Article ID: 2322. DOI: 10.1063/1.123838.
5. Trokhimchuk P. P. Problems of reradiation and reabsorption in Nonlinear and Relaxed Optics // *Int. J. Adv. Res. Phys. Sci.* 2017. Vol. 4, issue 2. P. 37–50.
6. Трохимчук П. П. Проблемы моделирования механизмов образования лазерно-генерированных микро- и наноструктур // *Электроника инфо*. 2016. № 2. С. 57–61.
7. Хакен Г. Синергетика. М. : Мир, 1980.
8. Chandrasekar S. *Hydrodynamic and hydromagnetic stability*. New York : Dover Publications, 1961.
9. Эбелинг В. Образование структур при необратимых процессах. М. : Мир, 1979.
10. Philips J. C. Metastable honeycomb model of laser annealing // *J. Appl. Phys.* 1981. Vol. 52, issue 12. Article ID: 7397. DOI: 10.1063/1.328729.
11. Shen M., Carey J. E., Crouch C. H., et al. High-density regular arrays of nano-scale rods formed on silicon surfaces via femto-second laser irradiation in water // *Nano Lett.* 2008. Vol. 8, № 7. P. 2087–2091. DOI: 10.1021/nl080291q.
12. Алексенко А. Г. Графен. М. : Бином, 2014.
13. Трохимчук П. П. Радіаційна фізика твердого тіла. Луцьк : Видавництво ВНУ ім. Лесі Українки «Вежа», 2007.
14. Тауц Я. Оптические свойства полупроводников в видимой и ультрафиолетовой областях спектра. УФН. 1968. Т. 94, вып. 3. С. 501–534.

References

1. Medvid' A. Nano-cones formed on a surface of semiconductors by laser radiation: technology model and properties. In: *Nano-wires Sci. Technol.* Vukovar : InTech, 2010. P. 61–82. DOI: 10.5772/39493.
2. Makin V. S. [Peculiarities of the formation the ordered micro and nanjstructures in condensed matter after laser excitation of surface polaritons modes] : dissertatsiya... doktora phys.-mat. nauk. Saint Petersburg : State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2013 (in Russ.).
3. Trokhimchuk P. P. *Relaxed Optics: Realities and Perspectives*. Saarbrücken : Lambert Academic Publishing, 2016.
4. Pedraza A. J., Fowlkes J. D., Lowndes D. H. Silicon microcolumn arrays growth by nanosecond pulse laser irradiation. *Appl. Phys. Lett.* 1999. Vol. 74, issue 16. Article ID: 2322. DOI: 10.1063/1.123838.
5. Trokhimchuk P. P. Problems of reradiation and reabsorption in Nonlinear and Relaxed Optics. *Int. J. Adv. Res. Phys. Sci.* 2017. Vol. 4, issue 2. P. 37–50.
6. Trokhimchuk P. P. [Problems of modeling the mechanisms of formation the laser-generated micro and nanostructures]. *Elektronika info*. 2016. No. 2. P. 57–61 (in Russ.).
7. Haken H. *Synergetics*. Moscow : Mir, 1980 (in Russ.).
8. Chandrasekar S. *Hydrodynamic and hydromagnetic stability*. New York : Dover Publications, 1961.
9. Ebeling W. [Creation structures under irreversible processes]. Moscow : Mir, 1979 (in Russ.).
10. Philips J. C. Metastable honeycomb model of laser annealing. *J. Appl. Phys.* 1981. Vol. 52, issue 12. Article ID: 7397. DOI: 10.1063/1.328729.
11. Shen M., Carey J. E., Crouch C. H., et al. High-density regular arrays of nano-scale rods formed on silicon surfaces via femto-second laser irradiation in water. *Nano Lett.* 2008. Vol. 8, No. 7. P. 2087–2091. DOI: 10.1021/nl080291q.
12. Alexenko A. G. *Graphen*. Moscow : Binom, 2014 (in Russ.).
13. Trokhimchuk P. P. [Radiation physics of status solid]. Lutsk : Lesya Ukrayinka Volyn' National University Press «Vezha», 2007 (in Ukrainian).
14. Tauc Ya. [Optical properties of semiconductors in visible and ultraviolet ranges]. *Usp. fiz. nauk.* 1968. Vol. 94, issue 3. P. 501–534 (in Russ.).

Статья поступила в редколлегию 13.11.2017.
Received by editorial board 13.11.2017.