

К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМАХ ОБРАЗОВАНИЯ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРУЕМЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СТРУКТУР

П.П. Трохимчук

Восточноевропейский национальный университет им. Леси Украинки,
Луцк, Украина

E-mail: trope1650@gmail.com

Проблема объяснения механизмов образования лазерно-индуцируемых структур представляет собой сложную задачу [1–7]. В зависимости от условий облучения на поверхности могут образоваться наноструктуры высотой 15–20 нм и микроструктуры высотой 20 – 30 мкм. При этом может изменяться кристаллическая симметрия облучаемого материала.

Плазмон-поляритонная модель В. Макина позволяет объяснить лишь особенности формирования необратимой интерференционной картины и влияние поляризации на условия ее формирования. Причины же возникновения необратимых изменений при облучении материала эта теория не объясняет.

Для объяснения фазовых лазерно-индуцируемых превращений используются либо классические «термодинамические» теории фазовых переходов, либо теория эффекта Бенара. Хотя Г. Хакен показал аналогию между фазовыми переходами второго рода и нелинейнооптическими явлениями. При этом нелинейнооптические явления – это неравновесные фазовые переходы. Аналогия очевидная – при фазовом переходе система переходит из одного состояния в другое и при нелинейнооптическом явлении состояния системы переходят из одного состояния в другое. В первом случае должен быть эффект насыщения, т. е. все микроскопические состояния должны осуществить переход. Во втором случае эффект насыщения не обязателен: количество переходов должно быть достаточным для измерения явления. Даже в случае эффекта классические насыщения нелинейнооптические явления неравновесные, так как концентрация центров отвечающих за явление намного меньше концентрации атомов матрицы облучаемого материала.

Эффект Бенара обусловлен переходом от теплопередачи к конвективным процессам. Эту теорию создал Чандрасекар, раздвинул ее Хакен, а с неравновесными процессами связал Эбелинг. Она описывает появление гексагональных двумерных структур при подогреве нижнего слоя жидкости на сковороде. Согласно Чандрасекара это возможно лишь при довольно больших числах Релея. Микроскопического объяснения этому явлению нет. Хотя исходя из качественных соображений это явление можно представить следующим образом. Известно, что молекулы воды образуют треугольники. Как показал Хакен, наиболее плотная их упа-

ковка образует шестигранник. Другие жидкости также имеют тригональную или гексагональную структуру молекул. В жидкости они образуют своеобразные листы подобно графену. Конвективные потоки при малых интенсивностях выходят наружу как раз по граням шестиугольника, при повышении 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 поверхностные объемные наноструктуры.

В случае собственного поглощения, когда происходят необратимые изменения, возможны следующие явления: прямые фотокристаллохимические фазовые трансформации; плазменные фазовые превращения и тепловые фазовые превращения. Наиболее «быстрые» из них 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 мы должны иметь также насыщение возбуждения. С этой целью была создана каскадная модель возбуждения соответствующего числа и типов химических связей в режиме насыщения возбуждения.

Именно эту модель целесообразно использовать для объяснения микроскопического механизма образования поверхностных лазерно-индуцируемых микроструктур. В отличие от теории эффекта Бенара эта модель позволяет качественно объяснить возникновение лазерно-индуцируемых поверхностных нано- и микроструктур без привлечения гидродинамики.

Причиной возникновения поверхностных лазерно-индуцируемых поверхностных наноструктур есть электромагнитный свеллинг (поверхностный блистеринг) приповерхностной области, связанный с интенсивной фотоионизацией и, как следствие, изменением кристаллической симметрии облучаемого материала. Интенсивность фотоионизации используется для расчета режимов облучения необходимых для разрыва соответствующего числа ковалентных связей в решетке алмаза. Этот подход был использован для кремния, германия и углерода. Для этого была использована фазовая диаграмма кремния согласно которой кремний имеет четыре кристаллографические модификации с координационными числами 8, 6, 4 и 3. Кроме того, если учесть еще восемь квазикристаллических модификаций, то число возможных вариаций на тему фазовые превращения в лазерно-облученных кристаллах четвертой группы еще больше. При этом эти фазовые превращения могут идти толь вверх,

потому что более низкие симметрии, как правило, имеют большую электронегативность, больший объем и меньший удельный вес.

При подсчете интенсивностей облучения для наноструктур германия по этому методу мы получили значения которые приводят к образованию гексагональной структуры. В случае же облучения кремния большими сериями импульсов (1500 – 2000 импульсов) эксимерного лазера мы имеем интенсивности достаточные для получения тригональной структуры и даже квазикристаллов. При этом структура может изменяться по высоте с понижением порядка от основы к верхушке. Аналогичное можно объяснить результаты получения наноструктур кремния высотой до 450 нм при облучении сериями фемтосекундных лазерных импульсов с длиной волны 800 нм в воде.

Эти соображения используются и для объяснения лазерно-индуцируемых фазовых превращений в более сложных соединениях, таких как антимонид индия, теллурид кадмия, КРТ и т.п. Здесь целесообразно использовать представления о различной фотостимулированной диффузии атомов-компонентов соответствующего соединения.

В целом каскадная модель поэтапного возбуждения соответствующего типа и числа химических связей облучаемого материала более адекватно объясняет разброс геометрических размеров получаемых поверхностных структур, включая их фазовый состав.

1. *Medvid A.* Nanowires Science and Technology, ed. Nicoletta Lupu Vukovar: Inech. 2010. P. 61–82.
2. *Макин В.С.* Особенности образования упорядоченных микро и наноструктур в конденсированных средах при лазерном возбуждении мод поверхностных поляритонов. Дисс. на соиск. ученой степени д.ф.-м.н. Санке Петербург: Государственный университет информационных технологий, механики и оптики, 2013. 384 с.
3. *Trokhimchuck P.P.* Nonlinear and Relaxed Optical Processes. Lutsk: Vezha–Print, 2013. 280 p.
4. *Pedraza A.J., Fowlkes J.D., Lowndes D.H.* // Appl. Phys. Lett. Vol. 1999. 74. №10. P. 2222–2224.
5. *Trokhimchuck P.P.* // International Journal of Advanced Research in Physical Science (IJARPS). 2017. 4. № 2. P. 37–50.
6. *Trokhimchuck P.P.* Relaxed Optics: Realities and Perspectives. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2016. 250 p.
7. *Трохимчук П. П.* // Электроника – ИНФО. 2016. №1. С. 57–61.
8. *Chandrasekar S.* Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability. New York: Dover Publications, 1961. 656 p
9. *Хакен Г.* Синергетика. М.: Мир, 1980. 324 с.
10. *Эбелинг В.* Образование структур при необратимых процессах. М.: Мир, 1979. 324 с.
11. *Philips J. C.* // Journal of Applied Physics. 1981. Vol. 52. № 12. P. 7397–7402.
12. *Алексенко А. Г.* Графен. Москва: Бином, 2014. 168 с.
13. *Shen M., Carey J.E., Crouch C.H., et al.* // Nanoletters. 2008. Vol. 8. №7. P. 2087–2091.