

УДК 535:621.373.8

ПОГЛОЩЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МЕТАЛЛАМИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ НАНОСТРУКТУР

Академик РАН В. Ю. Хомич^{1,*}, В. А. Шмаков^{2,*}

Поступило 19.04.2018 г.

Предложен механизм поглощения лазерного излучения металлической поверхностью при формировании поверхностных наноструктур. В основе механизма лежит гетерогенный характер такого поглощения за счёт образования в старой возбуждённой структуре зон поглощения. Показано, что процесс поглощения лазерного излучения металлами может носить нелинейный характер.

Ключевые слова: металлы, лазерное излучение, поглощение, поверхностные структуры.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5652484126-28>

Вопрос о формировании наноструктур на поверхности твёрдых тел при фазовых и структурных превращениях привлекает в последние годы всё большее внимание. К настоящему времени наметился определённый прогресс в понимании общих закономерностей, управляющих формированием реальной наноструктуры с заданными свойствами при превращениях в твёрдых телах в условиях лазерного воздействия [1–3].

В настоящей работе рассматривается механизм поглощения лазерного излучения металлической поверхностью при формировании поверхностных наноструктур. Поглощение здесь может носить гетерогенный характер за счёт образования в старой возбуждённой структуре зон поглощения. Это связано с коллективным поведением взаимодействующих между собой возбуждённых атомов, делающим процесс поглощения нелинейным.

Неравновесное состояние твёрдого тела при лазерном облучении определяется температурой T , напряжённостью электрического поля E_{ik} , которая для наноструктурированной поверхности является тензорной величиной, и совокупностью дополнительных внутренних параметров $\kappa_{ik}^{(1)}$, $\kappa_{ik}^{(2)}$, ..., $\kappa_{ik}^{(N)}$, характеризующих степень отклонения состояния системы от равновесного при заданных T и E_{ik} . При этом число внутренних параметров вместе с T и E_{ik} полностью определяет состояние системы. Величины $\kappa_{ik}^{(\alpha)}$ являются тензорами второго ранга. Назовём их тензорами поглощения.

Скорость изменения тензора поглощения можно определить из известного уравнения, в котором

скорость процесса линейно зависит от термодинамической силы:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \kappa_{ik}^{(\alpha)}} = \sum_{\beta} h_{iklm}^{(\alpha,\beta)} \kappa_{lm}^{(\beta)}, \quad (1)$$

где Φ — термодинамический потенциал единицы объёма твёрдого тела. Материальные постоянные $h_{iklm}^{(\alpha,\beta)}$ таковы, что изменение термодинамического потенциала в единицу времени при постоянной температуре и напряжённости электрического поля отрицательно.

Для анализа поведения твёрдого тела при световой нагрузке необходимо найти выражение для термодинамического потенциала Φ как явной функции величин T , E_{ik} и $\kappa_{ik}^{(\alpha)}$. Считая температуру постоянной, а величины E_{ik} и $\kappa_{ik}^{(\alpha)}$ малыми, разложим Φ в ряд и ограничим членами четвёртого порядка малости. Термодинамический потенциал является величиной скалярной, поэтому каждый член в разложении должен быть скаляром:

$$\begin{aligned} \Phi(T, E_{ik}, \kappa_{ik}^{(\alpha)}) = & \Phi_0(T) + A_{iklm} E_{ik} E_{lm} + \\ & + \sum_{\alpha} B_{ikim}^{(\alpha)} E_{ik} \kappa_{lm}^{(\alpha)} + \sum_{\alpha,\beta} C_{iklm}^{(\alpha,\beta)} \kappa_{ik}^{(\alpha)} \kappa_{lm}^{(\beta)} + \\ & + \frac{1}{24} \left\{ A'_{(i...s)} E_{ik} E_{lm} E_{np} E_{rs} + 4 \sum_{(i...s)} B'^{(\alpha)}_{(i...s)} E_{ik} E_{lm} E_{np} \kappa_{rs}^{(\alpha)} + \right. \\ & + 6 \sum_{\alpha,\beta} C'^{(\alpha,\beta)}_{(i...s)} E_{ik} E_{lm} \kappa_{np}^{(\alpha)} \kappa_{rs}^{(\beta)} + 4 \sum_{\alpha,\beta,\gamma} D'^{(\alpha,\beta,\gamma)}_{(i...s)} E_{ik} \kappa_{lm}^{(\alpha)} \kappa_{np}^{(\beta)} \kappa_{rs}^{(\gamma)} + \\ & \left. + \sum_{\alpha,\beta,\gamma,\sigma} E'^{(\alpha,\beta,\gamma,\sigma)}_{(i...s)} \kappa_{ik}^{(\alpha)} \kappa_{lm}^{(\beta)} \kappa_{np}^{(\gamma)} \kappa_{rs}^{(\sigma)} \right\}, \quad (2) \end{aligned}$$

A_{iklm} , B_{ikim} , C_{iklm} , ... — материальные постоянные, Φ_0 — термодинамический потенциал в состоянии равновесия. При постоянных E_{ik} его величина минимальна и является функцией только напряжённости электрического поля. С учётом этого термодинамический потенциал можно представить

¹ Институт электрофизики и электроэнергетики Российской Академии наук, Санкт-Петербург

² Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской Академии наук, Москва

* E-mail: khomich@ras.ru

в виде

$$\Phi(T, E_{ik}, \kappa_{ik}^{(\alpha)}) = \Phi_0 + \sum_{\alpha, \beta} C_{iklm}^{(\alpha, \beta)} \kappa_{ik}^{(\alpha)} \kappa_{lm}^{(\beta)} + \sum_{\alpha, \beta, \gamma, \sigma} E_{(i, \dots, s)}^{(\alpha, \beta, \gamma, \sigma)} \kappa_{ik}^{(\alpha)} \kappa_{lm}^{(\beta)} \kappa_{np}^{(\gamma)} \kappa_{rs}^{(\sigma)}. \quad (3)$$

Здесь и в дальнейшем знак суммирования по одинаковым нижним индексам опускается, при суммировании по верхним индексам удерживается.

Для упрощения (1) и (3) необходимо ввести “нормальные координаты” подобно тому, как это делается в задачах о колебаниях сложных систем. Другими словами, мы должны ввести такие новые переменные, являющиеся линейными комбинациями старых переменных $\kappa_{ik}^{(\alpha)}$, чтобы каждое из уравнений (1) и (3) содержало только одну из величин $\kappa_{ik}^{(\alpha)}$. Линейным преобразованием [4] переменных $\kappa_{ik}^{(\alpha)}$ выберем новые так, чтобы положительные квадратичные формы в выражениях (1) и (3) приняли вид

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \Psi_{ik}^{(\alpha)}} = H_{iklm}^{(\alpha)} \dot{\kappa}_{lm}^{(\alpha)},$$

$$\Phi = \Phi_0 + \sum_{\alpha} D_{iklm}^{(\alpha)} \kappa_{ik}^{(\alpha)} \kappa_{lm}^{(\alpha)} + \sum_{\alpha} F_{iklmnp}^{(\alpha)} \kappa_{ik}^{(\alpha)} \kappa_{lm}^{(\alpha)} \kappa_{np}^{(\alpha)} \kappa_{rs}^{(\alpha)}, \quad (3)$$

а для изотропного твёрдого тела

$$\dot{\kappa}_{ik}^{(\alpha)} = 2D^{(\alpha)} \kappa_{ik}^{(\alpha)} + 4F^{(\alpha)} (\kappa_{ik}^{(\alpha)})^3, \quad (4)$$

$$\Phi = \Phi_0 + \sum_{\alpha} D^{(\alpha)} (\kappa_{ik}^{(\alpha)})^2 + \sum_{\alpha} F^{(\alpha)} (\kappa_{ik}^{(\alpha)})^4. \quad (5)$$

Уравнения (4) и (5) определяют кинетику процесса поглощения лазерного излучения металлической поверхностью при формировании наноструктур.

Чтобы определить константы, входящие в уравнение (4), представим весь спектр параметров поглощения $\kappa_{ik}^{(\alpha)}$ одним параметром, в качестве которого выберем остаточную величину поглощения $\kappa_{ik}^0(r, t)$, и введём мезоскопический параметр

$$\varphi_{ik}(r, t) = \frac{1}{V_0} \int_{V_0} \kappa_{ik}^0(r, t) dV,$$

определяющий поле процесса поглощения. Здесь V_0 — объём, по которому проводится усреднение $\kappa_{ik}^0(r, t)$. Таким образом, рассматриваемую систему — металлическую поверхность, находящуюся под световой нагрузкой, — можно представить в виде трёх сосуществующих фаз: поля поглощения, определяемого параметром $\varphi_{ik}(r, t)$, поля напряжённости электрического поля E_{ik} , соответствующего внешней световой нагрузке, и зон поглощения с концентрацией n , соответствующей плотности поверхностных наноструктур.

Временная зависимость этих величин определяется системой дифференциальных уравнений

$$\dot{\varphi}_{ik} = -\beta \varphi_{ik} + g_1 n,$$

$$\dot{n} = -\gamma n + \frac{\varphi_{ik} E_{ik}}{g_2},$$

$$\dot{E}_{ik} = \nu(E_{ik} - E_0) - g_3 \varphi_{ik} n. \quad (6)$$

Здесь $\nu, \gamma, \beta, g_1, g_2, g_3$ — материальные константы. Величина E_0 определяется приложенными внешними нагрузками и соответствует установившейся в результате формирования зон поглощения остаточной напряжённости электрического поля. Первые слагаемые в правой части этих уравнений описывают соответственно затухание процесса поглощения лазерного излучения, распад образующихся зон поглощения и релаксацию напряжённости электрического поля в линейном приближении, когда их взаимное влияние отсутствует. Вторые слагаемые делают процесс поглощения нелинейным. В первом уравнении он связан с генерацией поля поглощения за счёт образования зон поглощения, во втором учитывается влияние поля поглощения $\varphi_{ik}(r, t)$ и напряжённости электрического поля E_{ik} на зарождение зон поглощения, в третьем обусловлен влиянием поля поглощения и зон поглощения на скорость релаксации напряжённости электрического поля.

Скорость изменения поля поглощения значительно меньше скорости процессов атомной релаксации, описываемой константами γ и ν . Это позволяет использовать в (6) адиабатическое исключение переменных. В результате получим уравнение для изменения поля поглощения с определёнными константами

$$\dot{\varphi}_{ik} = A \varphi_{ik} - B \varphi_{ik}^3,$$

где

$$A = \frac{g_1}{g_2 \gamma} (E_0 - \frac{g_2 \gamma}{g_1} \beta); \quad B = \frac{g_1 g_3}{g_2^2} \frac{E_0}{\gamma^2 \nu}.$$

Необходимо отметить, что такой подход не учитывает возможных пространственных флуктуаций величины поглощения, роль которых возрастает с увеличением напряжённости электрического поля и температуры. С учётом таких флуктуаций кинетическое уравнение для величины поглощения запишется в виде

$$\dot{\varphi}_{ik} = A \varphi_{ik} - B \varphi_{ik}^3 + D \Delta \varphi_{ik}, \quad (7)$$

а если принять во внимание дисперсию диффузии, уравнение (7) перейдёт в обобщённое уравнение Гинзбурга—Ландау [5].

При $E_0 \leq \frac{g_2 \gamma}{g_1} \beta$ уравнение (7) имеет одно устойчивое решение $\varphi_{ik}(r, t) = 0$. В случае превышения критического значения $E_0 \geq E_c = \frac{g_2 \gamma}{g_1}$ реализуются

новые “когерентные” состояния системы, и на металлической поверхности образуются зоны поглощения.

Таким образом, в настоящей работе показано, что механизм поглощения лазерного излучения наноструктурированной металлической поверхностью может носить нелинейный характер, в результате чего удаётся объяснить некоторые особенности такого поглощения.

Источник финансирования. Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН № 31 “Фундаментальные исследования физико-технических проблем энергетики”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хомич В. Ю., Шмаков В. А. // УФН. 2015. Т. 185. № 5. С. 489—499.
2. Токарев В. Н., Хомич В. Ю., Шмаков В. А., Ямщиков В. А. // ДАН. 2008. Т. 419. № 6. С. 754—758.
3. Хомич В. Ю., Шмаков В. А. // ДАН. 2012. Т. 416. № 3. С. 276—278.
4. Шилов Г. Е. Математический анализ (Конечномерные линейные пространства). М.: Наука, 1969.
5. Хакен Г. Синергетика: Иерархии неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах. М.: Мир, 1985.

ABSORPTION OF LASER RADIATION BY METALS AT FORMATION SUPERFICIAL NANOSTRUCTURE

Academician of the RAS V. J. Khomich, V. A. Shmakov

Received April 19, 2018

The absorption mechanism of laser radiation is offered by a metal surface at the formation of superficial nanostructure. Principally, the heterogeneous character of such absorption depends on formation in the old, excited structure of zones of absorption. It is shown herein that the absorption process of laser radiation by metals can have a nonlinear character.

Keywords: metals, laser radiation, absorption, superficial nanostructures.