

03;07;12

Испарительный режим лазерного воздействия на поверхность

© А.Ю. Иванов, Г.Е. Скворцов

С.-Петербургский государственный университет

Поступило в Редакцию 24 марта 2000 г.

Описывается и экспериментально изучается особый испарительный режим лазерного воздействия на различные поверхности. В опытах использован широкий набор образцов из разнообразных материалов. Выявлены особенности этого режима чистого испарения. Указываются разные применения его для модификации поверхностей и чистой резки биополимеров.

Задаче о взаимодействии лазерного излучения с поверхностью твердых тел посвящено большое число работ (см. обзоры [1–3]). Несмотря на обилие результатов, в этом сильно неравновесном процессе имеются неизученные режимы. Одним из таковых является недавно рассмотренное аномальное рассеяние [4].

В данной работе изучается особый режим лазерного воздействия на поверхность — чисто испарительный. Этот режим служит основой целого ряда технологических операций и представляет общий интерес как характерный образец импульсных резонансноподобных режимов.

Далее приводятся результаты экспериментального изучения испарительного режима воздействия на поверхности различных материалов (металлы, диэлектрики, биополимеры). Производится качественный анализ этого режима, даются набор мер действия, описывающих режим, и условия его осуществления. Указываются различные применения испарительного режима.

I. Охарактеризуем режимы импульсного лазерного воздействия (ЛВ) на поверхности, используя закономерности реакции систем [5].

Импульсное ЛВ определяется следующими величинами: ν , λ — частота и длина волны лазерного излучения, δt и Δt — длительность и период следования импульсов, w [W] и j [W/cm²] — мощность и интенсивность ЛВ, $j = w/a$, a — площадь пятна.

Объект воздействия — поверхность, описывается набором структурных факторов: k — коэффициент поглощения излучения, τ_s и λ_s — характерные времена и длины, ε_s — энергия связи частицы на поверхности, j_s — характерная интенсивность поглощаемого излучения. Все структурные факторы зависят от частоты излучения и других указанных факторов действия.

Результат воздействия определяется глубиной проникновения h , площадью воздействия αa , временем релаксации возбуждения τ_2 и временем процесса τ_3 .

Режимы воздействия на систему определяются набором мер действия g и соответствующих им структурных факторов $s(g)$ [5]. Для импульсного ЛВ набор мер действия в согласии с ранее указанными характеристиками имеют вид

$$G = \frac{g}{s[g]} : \quad \Omega = \frac{\nu}{\nu_s}, \quad \Lambda = \frac{\lambda}{\lambda_s}; \quad T_1 = \frac{\delta t}{\tau_1}, \quad T_2 = \frac{\tau_2}{\tau_1}, \quad T_3 = \frac{\Delta t}{\tau_3}; \quad (1)$$

$$W = \frac{w}{w_s}, \quad w_s = \frac{\varepsilon_s}{\tau_1}, \quad J = \frac{j}{j_s}, \quad E = \frac{\omega \delta t}{\varepsilon_s}; \quad (2)$$

$$e = \frac{w \delta t}{ah} = j/v, \quad v = \frac{h}{\delta t}, \quad (3)$$

v — скорость фронта испарения.

В качестве структурных характеристик при отсутствии достаточных данных относительно структуры целесообразно взять особые значения факторов действия g_c , которым соответствуют переходы от одного режима к другому, существенно отличающемуся:

$$s(g) \rightarrow g_c : \quad \nu_s \rightarrow \nu_c, \quad \tau_1 \rightarrow \tau_{1c}, \quad \varepsilon_s \rightarrow \varepsilon_c, \dots \quad (4)$$

Как правило, вблизи особых значений осуществляются динамические структурные переходы.

В настоящее время известны несколько режимов ЛВ, которые имеют особый характер. Первым из них (по интенсивности) является режим аномального рассеяния, указанный в [4], который осуществляется при условиях $\delta t \sim 10^{-8} \text{ s}$, $10^3 < j < 10^7$. Второй режим с особыми свойствами — чистого испарения, которому соответствуют условия $\delta t \sim 10^{-8}$, $10^8 < j < 10^{10}$, рассматривается в данной работе. При повышении интенсивности сверх значений $j > 10^{12}$ происходит переход к особому ударно-волновому режиму [1].

Согласно сказанному выше, в качестве пороговых принимаются значения $j_{c1} = 10^3$, $j_{c2} = 10^8$, $j_{c3} = 10^{12}$.

Целый ряд особых режимов можно выделить, комбинируя подходящие значения критериев (1)–(3):

$$\Omega, \Lambda \leq 1, \quad J \leq 1, \quad T \geq 1 \quad (5)$$

для указанных и других имеющихся порогов. Для трех имеющихся пороговых значений j с учетом частотного резонанса $\Omega = 1$ и релаксационного "резонанса" $T \approx 1$ можно выделить более тридцати возможных особых режимов. Некоторые из них описаны в [6].

II. Обсудим условия осуществления режима чистого испарения. При таком режиме достигается интенсивное испарение вещества с сохранением химического состава в области ЛВ. Такой режим должен быть импульсным и резонансноподобным.

Импульсный характер воздействия необходим, поскольку для большинства материалов за время $\delta t > 10^{-7}$ при интенсивностях, превышающих 10^8 , начинается горение [7].

Резонансноподобный характер испарительного режима по интенсивности обусловлен следующими ограничениями. При $j < 10^7$ за время $\delta t \sim 10^{-8}$ испарение мало из-за недостатка энергии $e \cong j\delta t/\lambda = 2 \cdot 10^{-4}j < \rho\varepsilon_{s0}$, $\varepsilon_{s0} \cong 10^4 \text{ J/g}$ — средняя табличная удельная энергия испарения. При $j > 10^{10}$ возникает горение. При $j \sim 10^9$ предписывается пик поглощения [8]. Таким образом, в общем случае интервал режима $10^8 < j < 10^{10}$. Для каждого конкретного материала диапазон интенсивного чистого испарения оказывается весьма ограниченным, а сам процесс — резонансноподобным.

Эффективность испарительного режима повышается, если испарение осуществляется посредством серии импульсов. При этом после импульса пар уходит, и повторный импульс не ионизирует его, а воздействует на освобожденную поверхность. По результатам совокупности опытов наиболее подходящей была принята частота следования импульсов 50–100 Hz. Скорость перемещения лазерного луча по поверхности выбиралась из интервала $(2 \div 4) \text{ mm/s}$. Согласно этим данным, с учетом протяженности пятна $\sim 10^{-3} \text{ cm}$ число воздействующих импульсов было $3 \div 6$.

Для осуществления чистого реза биополимеров важным обстоятельством является близость длин волн лазерного излучения и поглощения

связанной воды $\lambda_s \approx 540$ nm. Это условие частотного (энергетического) резонанса удовлетворяется за счет выбора лазерного излучения с $\lambda = 530$ nm. Такое излучение с вариацией его мощности использовалось в большинстве опытов.

III. Приведем данные экспериментов. Опыты проводились с использованием твердотельного неодимового лазера $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ типа ЛТИП4-5, $\lambda = 530$ или 1060 nm, мощность до 10^6 W в импульсно-периодическом режиме, $\delta t = 2 \cdot 10^{-8}$, $\Delta t = 0.01 \div 0.02$ s.

В опытах воздействию подвергался широкий набор разнообразных материалов: металлы и сплавы, Al, Zn, Cu, Fe, Ti, Mg, нержавеющая сталь, дюралюминий, латунь; диэлектрики C, S, P; стекла, минералы — агат, яшма, лазурит, флюорит, нефрит, малахит, рубин, мрамор, бетон и др.; пластмассы — текстолит, плексиглас, пенопласт и др.; резина, биополимеры — бумага, древесина, ткань, кожа.

Шероховатость обследуемых поверхностей лежала в широком диапазоне среднеквадратичных отклонений ($0.007 \div 100$) μm .

Мощность лазера в опытах варьировалась от 10^4 до 10^6 . Пятно луча при нормальном падении, как правило, было $a = 3.1 \cdot 10^{-6}$ cm^2 . Коэффициент поглощения \bar{k} — средний по опытам, выбирался равным 0.5. При этом $j = 0.5w/a = 1.6 \cdot (10^9 \div 10^{10})$. Глубина испарения при воздействии одного импульса получалась $(1 \div 4) \cdot 10^{-2}$ cm^2 .

Согласно указанным данным, приведем значения усредненных по ряду однотипных материалов основных величин для металлов и биополимеров:

$$\begin{aligned} \text{металлы:} \quad w &= 2 \cdot 10^5, \quad h = 3 \cdot 10^{-2}, \quad v = 1.5 \cdot 10^6, \\ j &= 3.2 \cdot 10^{10}, \quad e = 2.2 \cdot 10^4; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\text{Al:} \quad \varepsilon = e/\rho_{\text{Al}} = 0.85 \cdot 10^4 \text{ J/g}, \quad \varepsilon_s = 1.14 \text{ eV};$$

$$\begin{aligned} \text{древесина:} \quad w &= 2 \cdot 10^4, \quad h = 10^{-2}, \quad v = 5 \cdot 10^5, \quad j = 3.2 \cdot 10^9, \\ e &= 6.4 \cdot 10^3; \quad \varepsilon = 1.1 \cdot 10^4. \end{aligned} \quad (7)$$

Отметим, что для Al энергия "отрыва" частицы в режиме лазерного испарения меньше удельной теплоты испарения ($1.2 \cdot 10^4$) в 1.4 раза; для биополимеров такая величина, как теплота сублимации, не рассматривалась.

Изучаемый испарительный режим в сравнении с известным термическим режимом (горения) имеет целый ряд существенных отличий.

1. Испарение происходит без расплавления, непосредственно из твердой фазы.

2. Ширина и глубина реза меньше, а качество выше.

3. В областях испарения не обнаружено окислов или других изменений веществ (за исключением титана, серы и фосфора).

4. Все параметры резки — ширина, глубина и скорость зависят от рода материала и шероховатости; вместе с тем они хорошо регулируются рядом способов.

5. Возможно прецизионное послойное снятие материала, вплоть до снятия текста на бумаге.

6. Качество реза тем выше, чем однородней материал; оно обратно пропорционально интегральному коэффициенту отражения и шероховатости поверхности.

7. Из обширного ряда хорошо испаряющихся веществ выпадают титан, сера и фосфор, пары которых воспламеняются практически одновременно с началом испарения. Не удается завершить чистая резка стекол: будучи испарительно разрезаны, они раскалываются нерегулярным образом через несколько часов.

8. Как правило, процессу лазерного испарения при взаимодействии луча с возникающей паровой плазмой (без контакта с поверхностью) сопутствует генерация звука.

При увеличении энерговклада (дозы облучения) рассматриваемый режим переходит в известный термический.

IV. По результатам опытов и оценке технологических возможностей испарительного режима сделаем ряд замечаний.

В рамках закона чередования режимов [5] рассматриваемый режим-3 находится между режимом-2 аномального рассеяния [4] и испарительно-термическим режимом-4, который предшествует режиму-5, описанному в [1–3].

Каждому режиму соответствуют свой основной и сопутствующие динамические структурные переходы. Так, режиму-2 соответствует образование поверхностной электромагнитной структуры. Режим-3 определяется в основном испарительным (сублимационным) переходом; режиму-4 соответствуют испарительный и ионизационный переходы и т.д.

Поскольку в каждом структурном переходе имеется аномальная стадия [9], при детальном изучении режимов в каждом из них можно обнаружить аномалии. В частности, для рассматриваемого режима

генерация звука свидетельствует о нестационарном (пульсационном) характере неравновесного испарения.

Существенным свойством рассматриваемого режима является его резонансное подобие. Мету этого свойства целесообразно определять, используя зависимость

$$G_r = \frac{1}{1 + r_{\pm}^2(1 - G)^2}, \quad G = \frac{g}{g_c}, \quad (8)$$

r_{\pm} — степень резонантности при $g \geq g_c$.

Резонансными можно считать режимы, для которых (8) описывает достаточно узкий импульс; например, удовлетворяются условия $r_{\pm} > 2$. Согласно этому определению, по отношению к логарифмической интенсивности $G = \log(j/j_s)$, $j_s = 10^9$ рассматриваемый режим является резонансноподобным, а для каждого материала эффективный режим имеет вполне резонансный характер. Такой индивидуальный режим приходится уточнять экспериментальным образом.

Рассматриваемый режим имеет многочисленные возможные применения. Он позволяет для всевозможных материалов осуществлять испарительную модификацию различных поверхностей (очистка, полировка, реставрация), чистую прецизионную резку тонких слоев, высококачественную перфорацию. Представляется весьма перспективным использовать пар, полученный лазерным воздействием, при подходящих условиях его конденсации, для получения кластеров различных размеров, в том числе и нанокластеров. Имеется возможность получать различные структурные образования типа фуллеренов [10].

Список литературы

- [1] Анисимов С.И., Прохоров А.М., Форттов В.Е. // УФН. 1984. Т. 142. № 3. С. 395.
- [2] Chapter G. // Rev. Mod. Phys. 1987. V. 59. N 3. P. 119–143.
- [3] Анисимов С.И., Имас Я.Р., Хадыко Ю.В. Действие излучения большой мощности на металлы. М., 1970. 272 с.
- [4] Иванов А.Ю. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. В. 16. С. 29.
- [5] Скворцов Г.Е. // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. В. 6. С. 85; В. 7. С. 23; В. 10. С. 17.
- [6] Акулин В.М., Карлов Н.В. Интенсивные резонансные взаимодействия в квантовой электронике. М., 1987. 311 с.

- [7] Дымищ Ю.И. // ЖТФ. 1977. Т. 47. В. 3. С. 532.
- [8] Виленская Г.Г., Немчинов И.В. // ДАН СССР. 1969. Т. 186. № 5. С. 1048.
- [9] Скворцов Г.Е. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. В. 1. С. 81.
- [10] Hunter J.M., Fys J.L., Jarrold M.F. // J. Chem. Phys. 1993. V. 3. P. 1785.