

Численный анализ влияния типа поляризации TEM_{00} -моды излучения на форму поверхности реза при лазерной резке толстых листов металла

А.В.Зайцев, О.Б.Ковалев, А.М.Оришнич, В.М.Фомин

Проанализировано влияние поляризации гауссова пучка на поглощение излучения в процессе лазерной резки металла. Для расчета коэффициента поглощения излучения предложена обобщенная формула, которая описывает поляризацию трех типов (линейную, эллиптическую и круговую), при этом учитывается, что взаимодействие пучка может происходить с поверхностью металла произвольной формы. Сравнение с существующими аналогами (в случае линейной и круговой поляризации излучения) подтвердило преимущество использования полученной формулы при пространственном описании формы образующейся поверхности, что очень важно для обработки (резка, сварка, сверление) толстых материалов. Численно исследовано влияние характеристик лазерного излучения на форму поверхности и глубину реза при резке листовой нержавеющей стали. Впервые показано, что при генерации моды TEM_{00} резку материалов наиболее выгодно проводить излучением с ориентированной по направлению движения луча эллиптической поляризацией, характеризующейся определенным отношением полуосей.

Ключевые слова: поляризация лазерного излучения, коэффициент поглощения, лазерная резка, толстые материалы, математическое моделирование.

1. Введение

С появлением в настоящее время новых технологических лазеров мощностью до 10 кВт [1] и созданием на их основе автоматизированных лазерных технологических комплексов [2] получили развитие технологии лазерной резки толстых материалов (толщиной до 20–30 мм) [3, 4]. В связи с этим для проведения целенаправленных исследований оптимальных условий качественной обработки материалов возникает необходимость создания более совершенных математических методов описания взаимодействия лазерного излучения с металлами. В опубликованных на эту тему работах [5–9] недостаточно исследованы вопросы влияния характеристик излучения на коэффициент поглощения и форму образующейся в процессе резки поверхности металла. В частности, хорошо известные и широко используемые в литературе формулы для расчета коэффициента поглощения при линейной и круговой поляризациях гауссова пучка неприменимы для описания взаимодействия излучения с поверхностью материала произвольной формы. Необходимость такого описания становится чрезвычайно актуальной при моделировании лазерной обработки толстых листовых металлов.

2. Постановка задачи

Предположим, что при резке энергия излучения идет только на нагрев и плавление металла (при этом испаре-

нием твердого материала и взаимодействием излучения с парами пренебрегается), удаление расплава осуществляется обдувом нейтральным газом, толщина пленки расплава на фронте реза пренебрежимо мала, коэффициент поглощения не зависит от температуры и учитывается только однократное поглощение излучения. Традиционная постановка задачи преобразования свободной поверхности материала, подверженного воздействию лазерного излучения, сводится к уравнению кинематической совместности точек поверхности [6–8]:

$$\frac{\partial z_m}{\partial t} - V_c \frac{\partial z_m}{\partial x} = -V_n \left[1 + \left(\frac{\partial z_m}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z_m}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (1)$$

$$z_m(x, y, 0) = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial z_m}{\partial x}(-\infty, y, t) = \frac{\partial z_m}{\partial x}(\infty, y, t) = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial z_m}{\partial y}(x, -\infty, t) = \frac{\partial z_m}{\partial y}(x, \infty, t) = 0,$$

где t – время; x, y, z – пространственные координаты; $z = z_m(x, y, t)$ – уравнение поверхности; V_c – скорость движения луча (или скорость резки), совпадающая по направлению с осью x .

Для расчета нормальной составляющей скорости перемещения поверхности V_n существует локальный закон сохранения [6, 7]. Мы будем использовать аналог этого закона, который получен нами [10] с учетом температурных зависимостей плотности и теплоемкости материала:

$$V_n = Q \left[\rho_m H_m + c_s^0 \rho_s^0 (T_m - T_0) \int_0^1 v(\tau) d\tau \right]^{-1}, \quad (4)$$

А.В.Зайцев, О.Б.Ковалев, А.М.Оришнич, В.М.Фомин. Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

Поступила в редакцию 9 июня 2004 г., после доработки – 26 октября 2004 г.

$$Q = AI(x, y, z) \cos \gamma,$$

где A – коэффициент поглощения; $I(x, y, z)$ – плотность мощности излучения; γ – угол падения луча; ρ_m – плотность материала при температуре плавления T_m ; H_m – удельная теплота плавления; ρ_s^0, c_s^0 – плотность и удельная теплоемкость материала при начальной температуре T_0 . Функция $v(\tau)$, где $\tau = (T - T_0)/(T_m - T_0)$, учитывает температурную зависимость произведения плотности и теплоемкости металла [10].

Рассматривается постоянно действующее излучение СО₂-лазера с длиной волны $\lambda_0 = 10.6$ мкм. Интенсивность описывается распределением Гаусса, что соответствует ТЕМ₀₀-моду [11]:

$$I(x, y, z) = \frac{2W}{\pi\omega_z^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_z^2}\right), \quad (5)$$

$$\omega_z = \left\{ \omega_0^2 + \left[\frac{(z - z_f)\lambda_0}{\pi\omega_0} \right]^2 \right\}^{1/2}, \quad r = (x^2 + y^2)^{1/2},$$

где W – мощность излучения; z_f – расстояние от плоскости $z = 0$ до фокальной плоскости; ω_0 – радиус пучка в фокальной плоскости.

С использованием известных уравнений Френеля [12] выражения для коэффициентов отражения можно привести к виду

$$R_s = \left| \frac{\cos \gamma - (N_\omega^2 - \sin^2 \gamma)^{1/2}}{\cos \gamma + (N_\omega^2 - \sin^2 \gamma)^{1/2}} \right|^2, \quad (6)$$

$$R_p = \left| \frac{N_\omega^2 \cos \gamma - (N_\omega^2 - \sin^2 \gamma)^{1/2}}{N_\omega^2 \cos \gamma + (N_\omega^2 - \sin^2 \gamma)^{1/2}} \right|^2,$$

где R_s и R_p – коэффициенты отражения для волн, поляризованных перпендикулярно (s-волна) и параллельно (р-волна) плоскости падения; $N_\omega = n_\omega + i\kappa_\omega$ – комплексный показатель преломления; n_ω – показатель преломления; κ_ω – коэффициент поглощения.

Рассмотрим случай линейной поляризации гауссова пучка. На рис.1 показан элемент поверхности, расположенной под углом к оси x декартовой системы координат x, y, z . Волновые векторы падающего (\mathbf{k}) и отраженного (\mathbf{k}_r) излучений, а также единичный вектор нормали \mathbf{N} к поверхности образуют плоскость падения. Вектор \mathbf{k} параллелен оси z . Вектор напряженности электрического поля \mathbf{E} разложен на две проекции. Проекция \mathbf{E}_p , лежащей в плоскости падения, соответствует коэффициенту отра-

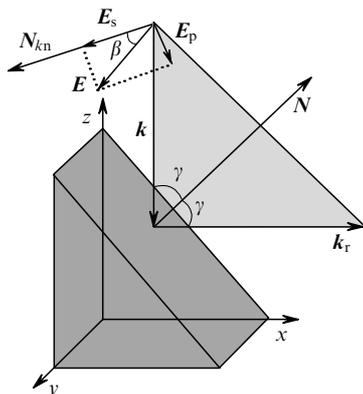


Рис.1. Схема взаимодействия луча с элементом поверхности.

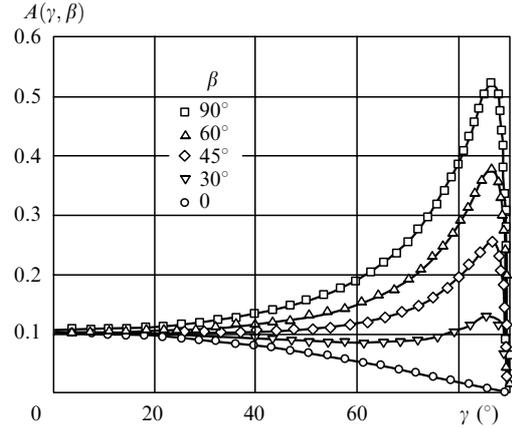


Рис.2. Зависимости коэффициента поглощения A от углов γ и β в случае линейно поляризованного излучения.

жения R_p , а проекция \mathbf{E}_s , перпендикулярной плоскости падения, – коэффициент отражения R_s . Пусть β – угол между вектором \mathbf{E} и нормалью к плоскости падения $N_{kn} = N \times \mathbf{k}/|\mathbf{k}|$, тогда $\mathbf{E}_p = \mathbf{E} \sin \beta$, $\mathbf{E}_s = \mathbf{E} \cos \beta$. Поскольку вектор \mathbf{k} совпадает по направлению с ортом \mathbf{e}_z , а вектор \mathbf{E} перпендикулярен (или параллелен) движению луча, то $\cos^2 \beta = N_x^2$ (или $\cos^2 \beta = N_y^2$), где N_x, N_y – компоненты вектора нормали к поверхности. Согласно [13] выражение для коэффициента поглощения запишем в виде

$$A(\gamma, \beta) = 1 - R(\gamma, \beta) = 1 - \frac{I_r}{I_0} = 1 - \frac{E_r^2}{E^2} \quad (7)$$

$$= 1 - \frac{R_p(\gamma)E_p^2 + R_s(\gamma)E_s^2}{E^2} = 1 - R_s(\gamma) \cos^2 \beta - R_p(\gamma) \sin^2 \beta,$$

где I_r и I_0 – интенсивности отраженного и падающего излучений, которые пропорциональны квадратам напряженности электрических полей E_r и E соответственно. На рис.2 приведены зависимости коэффициента A от угла падения γ при различных β . При $\beta = \pi/2$ будем иметь линейную р-волну, а при $\beta = 0$ – линейную s-волну.

Теперь рассмотрим случай эллиптической поляризации пучка, при которой конец вектора \mathbf{E} в плоскости x, y описывает эллипс с полуосями a и b , расположенными параллельно осям x и y . При этом выполняется соотношение $a^2 + b^2 = 1$. Выражение для коэффициента поглощения запишем в виде $A = a^2 A_x + b^2 A_y$, где A_x, A_y – коэффициенты поглощения для излучения, линейно поляризованного параллельно осям x и y . Согласно (7) получаем

$$A_x(\gamma, \beta_x) = 1 - R_s(\gamma) \cos^2 \beta_x - R_p(\gamma) \sin^2 \beta_x, \quad (8)$$

$$A_y(\gamma, \beta_y) = 1 - R_s(\gamma) \cos^2 \beta_y - R_p(\gamma) \sin^2 \beta_y,$$

где β_x и β_y – углы между нормалью к плоскости падения N_{kn} и осями x и y соответственно. Для углов β_x и β_y имеют место следующие равенства:

$$\cos^2 \beta_x = \left[\left(\frac{\mathbf{k}}{|\mathbf{k}|} \times \mathbf{N} \right) \mathbf{e}_x \right]^2 = (N e_y)^2 = N_y^2, \quad (9)$$

$$\cos^2 \beta_y = \left[\left(\frac{\mathbf{k}}{|\mathbf{k}|} \times \mathbf{N} \right) \mathbf{e}_y \right]^2 = (N e_x)^2 = N_x^2.$$

Подставляя (9) в (8), получаем выражение для коэффициента поглощения в случае эллиптической поляризации:

$$A(\gamma, N) = a^2 A_x + b^2 A_y = 1 - R_s(a^2 N_y^2 + b^2 N_x^2) - R_p[a^2(1 - N_y^2) + b^2(1 - N_x^2)]. \quad (10)$$

Коэффициент поглощения A сильно зависит от угла падения, пространственной ориентации вектора нормали к поверхности и поляризации излучения, которая характеризуется отношением полуосей эллипса b/a .

Проведем анализ полученной формулы (10). При $a = b = 1/\sqrt{2}$ будем иметь круговую поляризацию излучения. С учетом равенства $N_x^2 + N_y^2 + N_z^2 = 1$ из (10) для коэффициента поглощения получим выражение

$$A_c = 1 - \frac{R_s(1 - N_z^2) + R_p(1 + N_z^2)}{2}. \quad (11)$$

Пусть поверхность разрезаемого материала такова, что фронт реза и боковые стенки мало отклоняются от вертикали. Для тонких листов (толщиной до 1–3 мм) этот факт экспериментально подтверждается. В данном случае компонента N_z вектора нормали N близка к нулю, тогда из (11), полагая $N_z = 0$, нетрудно получить $A_c = 1 - 0.5(R_s + R_p)$. Это известная и широко используемая в литературе формула для приближенной оценки коэффициента поглощения при круговой поляризации.

При $a = 1, b = 0$ будем иметь линейную р-волну (т. е. волну, поляризованную параллельно направлению реза) и из (10) получим

$$A_p = 1 - R_p + N_y^2(R_p - R_s). \quad (12)$$

Заметим, что при $N_y = 0$ из (12) следует $A_p = 1 - R_p$. Это тоже широко используемая в литературе формула для расчета коэффициента поглощения при параллельной поляризации излучения, которая согласно (10) правильно описывает поглощение только на одной линии фронта реза, где вектор нормали N может иметь отличные от нуля компоненты N_x и N_y . Такое возможно, если ширина реза очень мала.

Наконец, если $a = 0, b = 1$, будем иметь линейную s-волну (т. е. волну, поляризованную перпендикулярно направлению реза) и из (10) найдем

$$A_s = 1 - R_p + N_x^2(R_p - R_s). \quad (13)$$

Если теперь в (13) положить $N_x = 1$, то получим формулу $A_s = 1 - R_s$, используемую в литературе для расчета коэффициента поглощения при перпендикулярной поляризации. Эта формула может правильно описывать поглощение лишь в точках фронта реза, где $N_y = 0$ и $N_z = 0$.

Таким образом, соотношения (10) – (13) позволяют рассчитывать коэффициент поглощения при эллиптической (10), круговой (11) и линейной (12), (13) поляризациях излучения в общем случае произвольной формы поверхности материала.

3. Результаты расчетов и их обсуждение

В расчетах использовались физические параметры нержавеющей стали, приведенные ниже.

Температура плавления T_m (К)	1700
Удельная теплоемкость c_s^0 (Дж·кг ⁻¹ ·град ⁻¹)	477
Плотность (кг/м ³):	
ρ_s^0 при начальной температуре $T_0 = 300$ К	7870
ρ_m^0 при температуре плавления T_m	6610
Удельная теплота плавления H_m (кДж/кг)	276
Коэффициент преломления n_ω	17.87
Коэффициент поглощения κ_ω	4.2

Уравнение (1) с начальными (2) и граничными (3) условиями, а также замыкающими соотношениями (4)–(8), (12) решалось численно методом установления по явной конечно-разностной схеме второго порядка точности [14]. В рамках поставленной задачи (1)–(3) поверхность реза отсчитывается от верхней плоскости металлического листа $z = 0$ до предельной глубины разрушения материала $z < 0$. Основная часть излучения, взаимодействуя с металлом, падает на поверхность реза под большими углами. Главной особенностью при этом является сильная зависимость коэффициента поглощения от угла падения (рис.2).

На рис.3 в безразмерных переменных ($L/\omega_0, b/a$) представлены результаты серии вычислительных экспериментов по определению максимальной глубины реза L в зависимости от отношения полуосей эллипса b/a . При этом варьировался безразмерный параметр $\sigma = 2W \times \{\pi\omega_0^2 V_c [\rho_m H_m + \rho_s^0 c_s^0 (T_m - T_0)]\}^{-1}$. Оказалось, что максимальная глубина реза при круговой поляризации ($b/a = 1$) значительно больше, чем при линейной поляризации ($b/a = 0$). Расчетные зависимости имеют явно выраженный максимум, который соответствует эллиптически поляризованному пучку с отношением $b/a = 0.75-0.8$. Кривые на рис.3 имеют осцилляции, обусловленные счетом, для устранения которых необходимо использовать разностную схему более высокого порядка точности. Типичная форма лазерного реза, полученная с использованием эллиптически поляризованного пучка, показана на рис.4. Горизонтальные линии уровня соответствуют контуру получающейся поверхности. Максимальная глубина реза составляет около 10 мм.

На рис.5 в безразмерных координатах в плоскости xu представлены изолинии коэффициента поглощения $A(x, y, z_m(x, y))$ для линейной (a, b) и круговой (σ) поляризации пучка. Безразмерный параметр $\sigma = 300$, что соответствует мощности $W = 2.2$ кВт и скорости резки

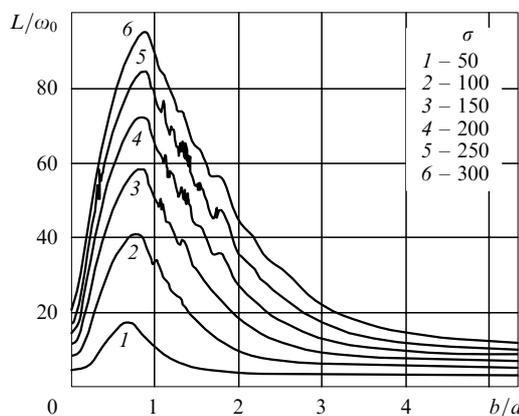


Рис.3. Зависимости максимальной нормированной глубины реза L/ω_0 от отношения полуосей эллипса b/a при различных параметрах σ .

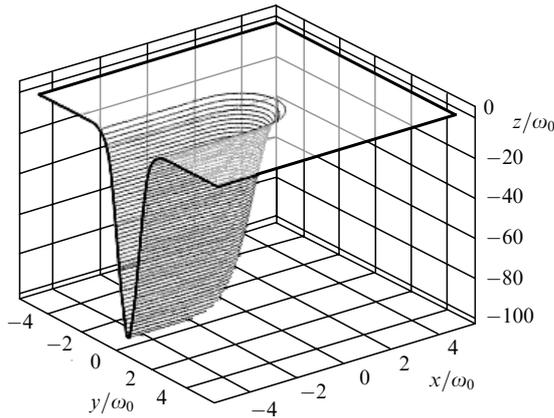


Рис.4. Типичная форма поверхности реза $z = z_m(x, y)$ при $\sigma = 300$, $b/a = 0.75$, $\omega_0 = 100$ мкм.

$V_c = 45$ мм/с. При резке s-поляризованным излучением ($b = 1, a = 0$), когда вектор напряженности электрического поля E перпендикулярен движению луча, максимум коэффициента поглощения приходится на боковые стенки (рис.5,а). Коэффициент поглощения на фронте реза минимален, поэтому малы и предельные параметры резки. Рез получается гладким и широким, его глубина составляет около 1 мм, т.к. максимальный коэффициент поглощения распределен по боковой поверхности. В случае резки р-поляризованным излучением ($b = 0, a = 1$), вектор E параллелен движению луча, максимум коэффициента поглощения находится на фронте реза (рис.5,б), где излучение падает под углом $85^\circ - 87^\circ$. Рез получается узким, его глубина равна ~ 2 мм, потому что большая часть излучения не проникает в глубь реза, отражаясь от его фронта.

При круговой поляризации ($b = a = 1/\sqrt{2}$) максимум коэффициента поглощения распределен по всей поверхности реза относительно равномерно (рис.5,в), что дает максимальную глубину реза 9 мм. При этом боковая поверхность эволюционирует к вертикальной стенке. Высокая крутизна стенок реза обеспечивает такое же высокое поглощение излучения, которое резко снижается до нуля при приближении угла падения к 90° . Во всех случаях облучаемая поверхность стремится принять форму, которая обеспечивает минимальное поглощение излучения.

Принято считать [15, 16], что наиболее эффективным является использование линейно поляризованного излу-

чения при поглощении р-волны во фронте. Однако на практике обычно используется излучение с круговой поляризацией. Это связано с техническими трудностями управления плоскостью поляризации вектора электрического поля при резке деталей сложных конфигураций [15–17]. Расчетным путем в работах [7, 8] установлено, что волна с круговой поляризацией по эффективности резки не хуже линейной р-волны. Анализ результатов расчетов, приведенных на рис.3 и 5 (с применением более точных формул (10)–(13) для вычисления коэффициента поглощения), показал, что эффективность резки излучением с круговой поляризацией значительно выше, чем эффективность резки линейной р-волной. При этом максимально эффективной для резки является эллиптическая поляризация.

Таким образом, при генерации ТЕМ₀₀-моды резку листовых материалов наиболее выгодно проводить излучением с ориентированной по направлению движения луча эллиптической поляризацией, характеризующейся определенным отношением полюсов ($b/a = 0.75 - 0.8$).

В работах [7–9] обсуждается возможность существования пучка с радиальной поляризацией (г-поляризацией), которая обеспечивается наложением двух взаимно перпендикулярных мод ТЕМ₀₁. Согласно [7–9] преимущества резки г-поляризованным пучком по сравнению с резкой излучением с круговой поляризацией, выражаются в увеличении в первом случае глубины или скорости резки более чем в 1.5–2 раза. С такой оценкой трудно согласиться, поскольку она получена из физического анализа влияния на форму реза различных мод излучения или их комбинаций и поскольку расчеты в [7–9] представлены лишь для тонких пластин (толщиной до 4.5 мм), а эффективность оценивается только по глубине реза.

Вопросы о возможности генерации различно поляризованных ТЕМ₀₁-мод высокого качества и об эффективности радиальной поляризации в настоящее время еще недостаточно проработаны и обоснованы. При генерации моды ТЕМ₀₁ неизбежно происходит потеря мощности излучения (по сравнению с модой ТЕМ₀₀) и увеличивается толщина пучка, что приводит к увеличению ширины реза.

4. Выводы

Исследована задача описания формы поверхности, образующейся при лазерной резке металлов мощным

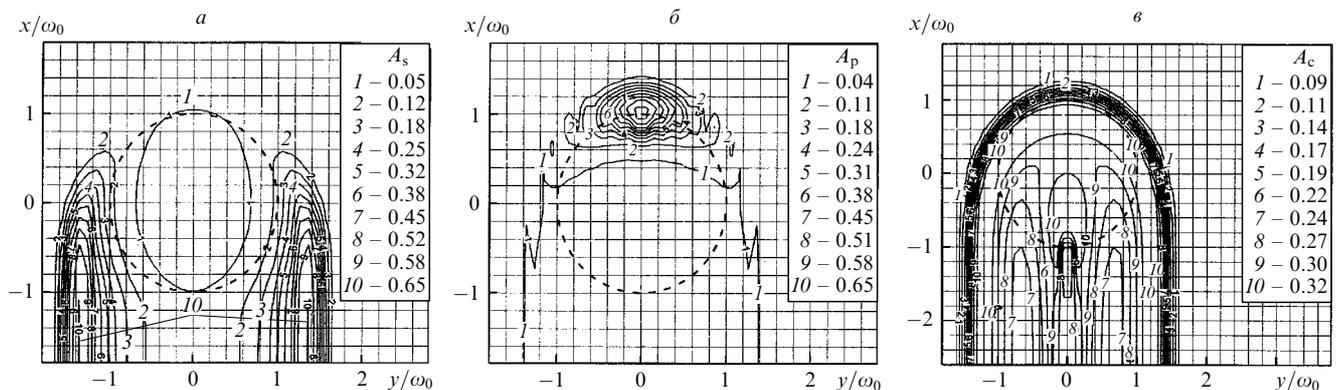


Рис.5. Изолинии распределения коэффициента поглощения $A(x, y, z_m(x, y))$ на свободной поверхности металла для трех типов поляризации пучка: $A_s = 1 - R_p + N_x^2(R_p - R_s)$, линейная s-волна (а), $A_p = 1 - R_p + N_y^2(R_p - R_s)$, линейная р-волна (б) и $A_c = 1 - 0.5[R_s(1 - N_z^2) + R_p(1 + N_z^2)]$, круговая поляризация (в). Штриховая линия – сечение пучка в перетяжке с радиусом $\omega_0 = 100$ мкм.

одноименным лазерным излучением (ТЕМ₀₀-мода). Для расчета коэффициента поглощения предложена функциональная зависимость (10), которая учитывает пространственную ориентацию плоскости падения излучения, что очень важно для резки толстых материалов с большим отношением глубины реза к диаметру пучка. Формула (10) позволяет рассчитывать коэффициент поглощения в случае эллиптической поляризации пучка, ориентированной либо перпендикулярно ($a < b$), либо параллельно ($a > b$) движению луча, с произвольным отношением a/b . Численно исследовано влияние характеристик лазерного излучения на форму поверхности и глубину реза. Показано, что максимально эффективным может быть излучение с ориентированной по направлению движения луча эллиптической поляризацией, характеризующейся определенным отношением полуосей ($b/a \approx 0.75$).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 04-01-00798).

1. Афонин Ю.В., Гольшев А.П., Иванченко А.И., Малов А.Н., Оришич А.М., Печурин В.А., Филев В.Ф., Шулятьев В.Б. *Квантовая электроника*, **34**, 307 (2004).
2. Afonin Yu.V., Golyshv A.P., Ivanchenko A.I., Konstantinov S.A., Maslov N.A., Orishich A.M., Filev V.F., Shikhalev E.G., Shulyat'ev V.B. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4900**, 929 (2002).
3. Малов А.Н., Малов Н.А., Оришич А.М., Шулятьев В.Б. и др. *Матер. IV Междунар. научно-техн. конф. «Лазерные технологии и средства их реализации»* (С.-Петербург: Изд-во СПбГПУ, 2004, с. 39–46).
4. Afonin Yu.V., Ermolaev G.V., Malov A.N., Malov N.A., Orishich A.M., Shulat'ev V.B., Pechurin V.A., Filev V.F. *Proc. XII Int. Conf. «Methods of Aerophysical Research»* (Novosibirsk, 2004, pt 3, pp 3–9).
5. Веденов А.А., Иванов О.П., Черняков А.Л. *Квантовая электроника*, **11**, 2397 (1984).
6. Черепанов Г.П., Черепанов А.Г. *Физика и химия обработки материалов*, № 2, 133 (1990).
7. Нестеров А.В., Низьев В.Г. *Изв. АН. Сер. физич.*, **63**, 2039 (1999).
8. Niziev V.G., Nesterov A.V. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **32**, 1455 (1999).
9. Nesterov A.V., Niziev V.G. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **33**, 1817 (2000).
10. Ковалев О.Б., Оришич А.М., Фомин В.М., Шулятьев В.Б. *Ж. прикл. мех. и техн. физики*, **42**, 106 (2001).
11. Ораевский А.Н. *Труды ФИАН*, **187**, 3 (1988).
12. Stuart E., Rutt H.N. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **22**, 901 (1989).
13. Борн М., Вольф Э. *Основы оптики* (М.: Наука, 1970).
14. Самарский А.А. *Теория разностных схем* (М: Наука, 1977).
15. Веденов А.А., Гладуш Г.Г. *Физические процессы при лазерной обработке материалов* (М.: Энергоатомиздат, 1985).
16. Pawell J. *CO₂-Laser Cutting* (London: Springer-Verlag, 1998).
17. Григорьянц А.Г. *Основы лазерной обработки материалов* (М.: Машиностроение, 1989).