

ЛАЗЕРНОЕ ТРАВЛЕНИЕ ВОЛЬФРАМА В ВОЗДУХЕ

М.И. Арзуов, Ж.И. Джумабеков, В.И. Конов, В.Г. Ральченко, Н.И. Чапиев

Исследована связь скорости травления пластин W в воздухе в луче Nd:ИАГ лазера с величиной отражательной способности окисленного металла. Существует диапазон лазерных мощностей, в котором время сверления пластин минимально.

При высокотемпературном ($T > 1000$ °С) окислении вольфрама образуется летучий окисел WO_3 , что позволяет осуществить лазерное травление металла непосредственно в воздухе [1,2]. При нагреве излучением ИК диапазона поглощательная способность металла определяется главным образом наличием окисной пленки [3,4]. С увеличением мощности лазерного излучения стационарная толщина пленки уменьшается и при $T > 1300$ °С трехокись вольфрама испаряется сразу же, как только образуется [5]. Поэтому можно ожидать, что при достаточно большой мощности травлению подвергается совершенно свободная от окисла поверхность металла с низким поглощением, и простое увеличение лазерной мощности не обязательно должно приводить к росту температуры и ускорению травления. Это предположение о существовании оптимального по мощности режима травления проверено экспериментально в данной работе для случая прожигания W под действием непрерывного излучения с длиной волны $\lambda = 1,06$ мкм.

Образцы W толщиной $h = 0,2$ мм и диаметром 5 мм размещались вертикально в интегрирующей сфере и нагревались лучом Nd:ИАГ лазера модели ЛТН-102А мощностью до 100 Вт, сфокусированным в пятно диаметром $d = 2$ мм. Температура измерялась с помощью термпары, приваренной к тыльной стороне диска. Отраженный поток регистрировался фотодиодом. За образцом на оси луча располагался второй фотодиод, сигнал с которого отмечал время t^* сквозного просверливания диска. На различных стадиях травления образцы гасились газовой струей аргона и анализировались с помощью оптической и электронной растровой микроскопии.

На рис. 1 показаны изменения температуры T и отражательной способности R в процессе нагрева мишеней излучением различной мощности P . До выхода температуры на стационарное значение T_s отражение резко падает из-за роста окисной пленки и в дальнейшем либо стабилизируется на уровне $R_\infty \approx 0,2$ при малой мощности (рис. 1а), либо вновь увеличивается до некоторого значения $R_1 > R_\infty$ (рис. 1б) благодаря испарению окисла в ходе продолжающегося нагрева при более высокой мощности, достигая при $P > 60$ Вт величины $R_1 \approx 0,6$, типичной для неокисленного металла.

На образцах, погашенных в моменты всплеска отражения, окисное покрытие вовсе отсутствует в центральной зоне облучения, размеры которой увеличиваются с ростом P ; соответственно растет и величина отражения R_1 (рис. 2). В результате возникает максимум как поглощенной мощности $P_a = (1 - R_1)P$, так и температуры $T_s(P)$.

Примечательным фактом является наличие минимума на кривой $t^*(P)$, который не объясняется, однако, некоторым снижением температуры при $P > 40$ Вт, так как в области $P < 40$ Вт травление идет эффективно и при более низких температурах. Более существенным является, по-видимому, влияние паров WO_3 , служащих диффузионным барьером для кислорода [5]. Для понимания роли паров в данном случае важно подчеркнуть неравномерность скорости травления в пятне облучения. Наблюдаемое по сигналу отражения расширение зоны травления с ростом мощности означает увеличение диаметра струи паров вблизи поверхности и, соответственно, дальнейшее ограничение доступа кислорода к реакционной поверхности. Максимальная скорость травления $V_{max} = h/2t^* = 3,3$ мкм/с (здесь учтен тот экспериментальный факт, что в оптимальном режиме утоньшение термически тонкой пластины происходит равномерно с двух сторон). Максимальная интенсивность тепловыделения реакции окисления на одной стороне пластины составляет $I_p = (E_f - E_v)\rho_w \approx 23$ Вт/см², где ρ_w — плотность вольфрама; $E_f = 4,58$ кДж/г — теплота образования WO_3 ; $E_v = 0,98$ кДж/г — теплота испарения WO_3 . Тепловой вклад горения значительно меньше поглощаемой лазерной интенсивности $I = 0,5 - 1$ кВт/см² и не играет существенной роли в

энергобалансе мишени. В диапазоне мощностей $P = 25 - 30$ Вт с интервалом 6-7 с наблюдались периодические всплески отражения с амплитудой до $\Delta R \approx 0,25 - 0,30$ над средним уровнем $R_{ср} = 0,20$, соответствующим образцу с непрозрачной окалиной. Эти выбросы отражения происходили в моменты кратковременного подъема стационарной температуры, достаточного, по-видимому, для испарения окисной пленки в центральной части пятна облучения. Похожий температурный режим горения был классифицирован [6] как "жудущий" режим, причем в качестве фактора, подавляющего неустойчивость, рассматривались конкуренция тепловыделения реакции окисления и потерь на испарение окисла [6], а также колебания поглощения в результате интерференции в растущей пленке [7].

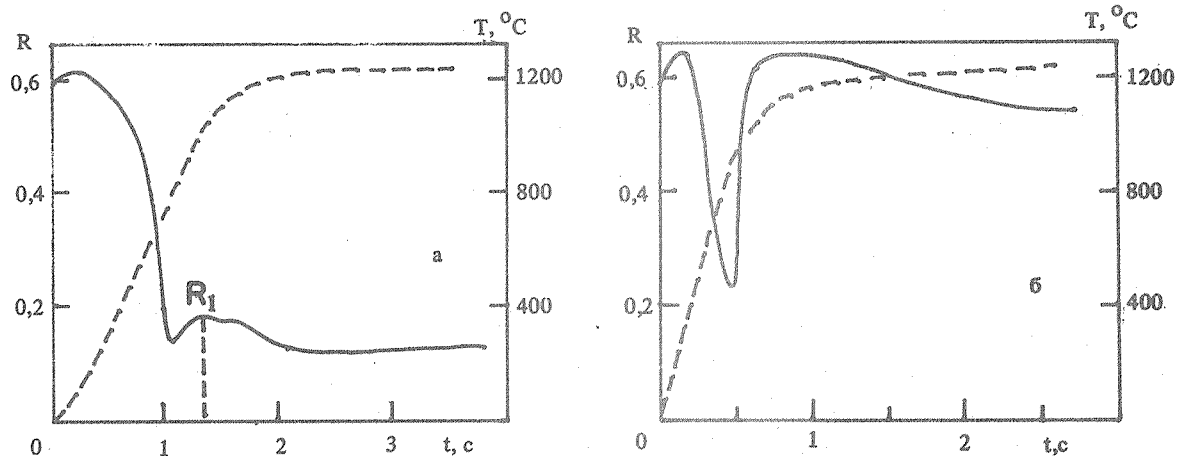


Рис. 1. Осциллограммы температуры T (пунктир) и отражательной способности R (сплошная линия) вольфрама при нагреве лучом Nd:ИАГ лазера мощностью 34 (а) и 58 Вт (б).

Оценки показывают, что в данном случае изменение поглощаемой лазерной мощности в окрестности пика отражения в результате полного оголения металла в лазерном пятне существенно превосходит вклады экзотермической мощности горения или теплотраты на испарение пленки и является основным фактором, ограничивающим температурную неустойчивость лазерного горения вольфрама. Поскольку контраст в поглощении металла и окисла еще выше на длине волны CO_2 лазера, вероятно, что именно изменение величины R было ответственно за проявление автоколебательных режимов горения W в работах [6,7].

Рассмотрим, как соотносятся измеренные скорости травления с максимальной скоростью реакции, которую еще может обеспечить диффузионный подвод кислорода в воздухе (без учета паров) в зону травления.

Предельная плотность потока кислорода, реагирующего на поверхности, $j_0 = D\rho_0/\Lambda$ [8], где D и ρ_0 — коэффициент диффузии и плотность кислорода в воздухе; $\Lambda = \pi L/4Nu$ — характерная диффузионная длина; L — диаметр зоны локализации реакции; $Nu \approx 2$ — число Нуссельта. Скорость травления W в результате удаления летучего окисла WO_3 равна $V = M_w \rho_0 D / 3M_o \rho_w \Lambda = 4,7$ мкм/с, где M_o и M_w — атомные массы O и W ; $L = d = 0,15$ см; D и ρ_0 берутся здесь при среднеарифметическом значении температуры в пятне облучения $T = 1300$ °C и комнатной температуры. Таким образом, измеренная скорость травления металла V_{max} близка к предельно возможной в данных условиях.

Поскольку в диффузионном режиме должно быть $V \propto d^{-1}$, представляет интерес сопоставить полученный результат со скоростью травления при других диаметрах пятна фокусировки. Одномодовый непрерывный CO_2 лазер мощностью 700 Вт использовался для сверления пластин W диаметром 60 мм и толщиной 200 мкм. При диаметре пятна облучения $d = 5$ мм время сквозного прожигания составляло $t^* = 67$ с ($V = 1,5$ мкм/с) в спокойном воздухе, снижаясь до $t^* = 20$ с при тангенциальном воздушном обдуве со ско-

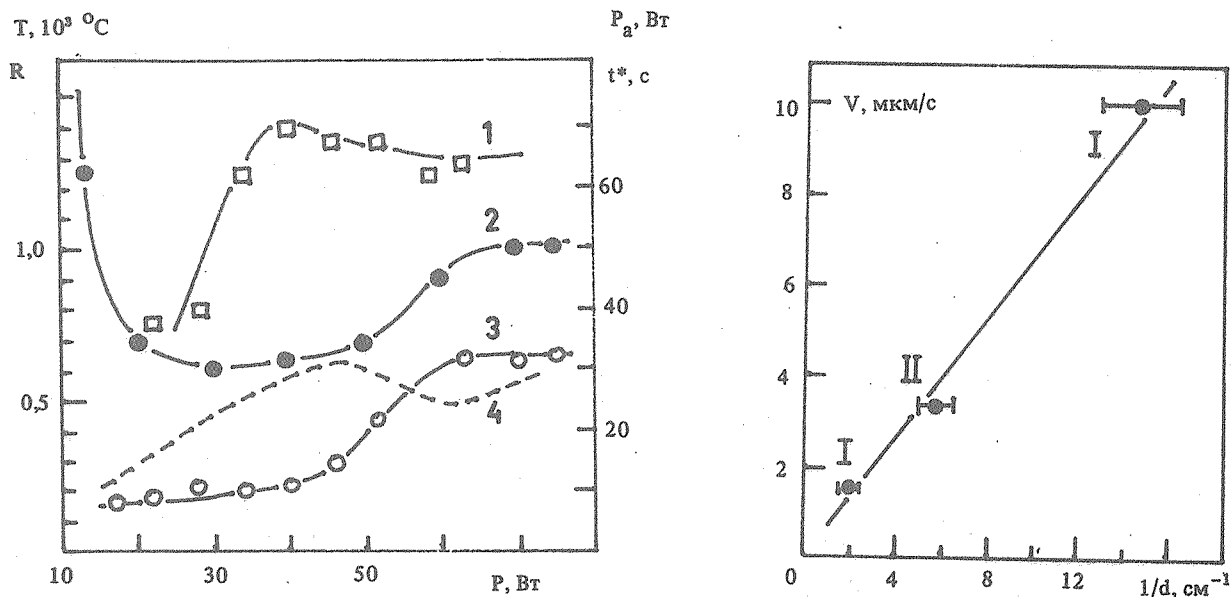


Рис. 2. Зависимости стационарной температуры T_s (1), времени сверления t^* (2), амплитуды всплеска отражения R_1 (3) и поглощенной мощности P_a (4) от мощности лазерного излучения P .

Рис. 3. Зависимость скорости травления от обратного диаметра пятна фокусировки CO₂ (I) и Nd:ИАГ лазера (II).

ростью потока около 10 см/с. При фокусировке излучения в пятно диаметром 0,6 – 0,8 мм на полированный торец вольфрамового стержня диаметром 1 см скорость травления, оцененная по глубине кратера, составляла около 10 мкм/с.

Линейная зависимость скорости травления от обратного диаметра пятна облучения (рис. 3) согласуется с возможностью реализации диффузионного режима горения во всех трех случаях. Среди способов ускорения травления можно отметить переход к меньшим диаметрам пятна /2/ и обдув зоны горения воздухом или кислородом; эффективность нагрева можно повысить при наклонном падении луча /9/.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арзуов М. И. и др. Квантовая электроника, 2, 1717 (1975).
2. Коген Г. Appl. Phys., A40, 215 (1986).
3. Арзуов М. И. и др. Квантовая электроника, 6, 1339 (1979).
4. Длугунович В. А., Ждановский В. А., Снопко В. Н. ЖПС, 34, 799 (1981).
5. Кофстад П. Высокотемпературное окисление металлов. М., Мир, 1969.
6. Бобырев В. А. и др. Квантовая электроника, 10, 793 (1983).
7. Могуорóси Р., Nanai L., Antal K. Infrared Phys., 25, 625 (1985).
8. Бурмистров В. А. ЖТФ, 51, 1733 (1981).
9. Арзуов М. И. и др. Квантовая электроника, 6, 2232 (1979).

Институт общей физики АН СССР

Поступила в редакцию 18 мая 1987 г.