

УДК: 539.141;537.868.531

**ФОРМИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ЭРОЗИОННОЙ ПЛАЗМЫ  
НА ПОВЕРХНОСТИ ПРИРОДНЫХ МИНЕРАЛОВ****О.Ю. Головченко, С. Х. Акназаров**Казахский Национальный Университет им. аль-Фараби,  
Институт проблем горения МОН РК  
Казахстан, Алматы, Богенбай батыра 172, sestager@mail.ru**Аннотация**

Экспериментально изучен процесс формирования эрозионной плазмы при воздействии модулированного лазерного излучения на поверхность сложных геохимических соединений. Делается попытка объяснить газодинамическую картину разлета образующегося газо-плазменного сгустка. Показаны зависимость массы эродированного вещества, объема и формы кратера лазерной эрозии от длительности импульса излучения. Экспериментально показано, что изменением длительности импульса можно эффективно управлять параметрами плазмохимического процесса и ответной реакции образцов.

**Ключевые слова:** плазма, эрозия, лазер, минералы, арсеницит

**Введение**

В последние годы при исследовании элементного состава химических соединений в различных областях науки и техники широкое распространение получил метод спектрального анализа с применением лазеров.

Одной из основных трудностей исследований с применением лазеров является проблема правильности результатов анализа неоднородных по химическому составу, физико-химическим свойствам и текстурно-структурным особенностям проб [1]. Эта проблема тесно связана с проблемой адекватного эталонирования [1-3] и сложностью дозирования исследуемых образцов [3-5]. Все это вызывает необходимость всестороннего изучения динамики плазмохимического процесса, сопровождающего лазерное разрушение материала.

Характер разрушения мишени, размер и форма кратера, количество и фазовый состав эродированного вещества, а также параметры плазменного факела зависят от соотношения многих действующих факторов: как от основных характеристик лазерного излучения - энергии  $E_u$ , длительности  $\tau_u$ , плотности мощности  $q_u$ , так и от химико-физических свойств и структурных особенностей облучаемой мишени [6-8].

Поглощение сильно сконцентрированного в пространстве и времени лазерного излучения приводит к возникновению в приповерхностном слое облучаемой мишени целого каскада процессов преобразования энергии, включающих в себя ряд последовательных этапов возбуждения и релаксации. Финальной стадией развития про-

цесса поглощения лазерного излучения в зоне облучаемого участка образца являются разнообразные химико-физические эффекты, которые носят макроскопический характер: нагрев, плавление, обратимые и необратимые изменения свойств материалов, термохимические превращения, испарение, возникновение эрозионной плазмы, излучение и многие другие явления [9,10].

Целью данной работы является экспериментальное исследование процесса формирования эрозионной плазмы при воздействии модулированного лазерного излучения на поверхность сложных химических соединений.

**Экспериментальная часть**

Эксперименты осуществлялись на установке, сконструированной и изготовленной на базе импульсного частотно-периодического лазера «АРЗНИ-210», работающего как в режиме свободной генерации, так и с модуляцией добротности излучения [3]. Энергия  $E_u$  в импульсе на длине волны излучения лазера  $\lambda_u = 694,3$  нм может варьироваться в диапазоне 0,05 - 2,5 Дж. Длительность импульса в режиме свободной генерации  $\tau_u = 0,5$  мс, с модуляцией добротности  $\tau_u = 30$  нс. Частота повторения импульса  $f_u = 2$  Гц.

Для регистрации спектров применялся спектрограф СТЭ-1 с кварцевой призмой и дифракционной решеткой 600 штрихов на 1 мм, работающий в третьем, четвертом и пятом порядках [11]. Спектры размещаются в три строки, охватывающие область 220 ÷ 450 нм.

Величина обратной линейной дисперсии составляет 0,64; 0,47; 0,38 нм/мм, соответственно.

Прибор обладает большой светосилой и достаточно высокой разрешающей способностью.

Для измерения энергии лазерного излучения в импульсе применялся измеритель средней мощности и энергии лазерного излучения ИМО-2Н. Пределы измерения энергии: 0,01 - 10,0 Дж.

Регистрация амплитудных и временных параметров импульсных сигналов осуществлялась осциллографом универсальным запоминающим С8-13.

Для регистрации интегральных пространственно-временных характеристик факелов эрозионной плазмы применялся зеркальный фотоаппарат «Зенит-Е» [12].

### Результаты и их обсуждение

Управление параметрами плазмохимического процесса и ответной реакции образцов может осуществляться двумя путями:

-либо изменением энергии лазерного излучения  $E_u$ ,

-либо изменением длительности импульса  $\tau_u$ .

Во втором случае, применение модуляции добротности лазерного излучения с наносекундной длительностью импульсов, когда  $\tau_{исн} \gg \tau_u$ , при  $q_u = 10^8 \div 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>, позволяет перейти к плазмохимическому процессу испарения с практически полной атомизацией (вплоть до однократной ионизации) вещества [3].

На рисунках 1, 2 и 3 представлены значения диаметра  $d_k$ , глубины  $l_k$  и формы кратера  $K_\phi$  (где,  $K_\phi = \frac{d}{l}$ ), объема зон поражения  $V_k$  и количества эродированного вещества  $m_s$ , полученные при острой фокусировке лазерного излучения на поверхность минерала пирита в зависимости от длительности импульса  $\tau_u$  при энергии  $E_u = 1,0$  Дж.

В общем случае толщина проплавленного слоя материала, то есть глубина кратера выброса и количество эрозии вещества пропорциональны величине  $\sqrt{\tau_u}$ .

При энергии излучения 1,0 Дж и длительности импульса 30 нс в результате одного воздействия на поверхности мишени образуется кратер с неровностями на дне, высота которых не превышала 20% средней толщины снимаемого слоя.

Характерная глубина кратера, образующегося на поверхности различных материалов при облучении их в указанном режиме, составляет  $\approx 10^{-4} \div 10^{-5}$  см.

Именно на такую величину происходит проникновение электромагнитного излучения и в металлы, и в диэлектрики.

При плотности потока излучения  $q_u > 10^9$  Вт/см<sup>2</sup> масса выброшенного материала мишени составляет доли и единицы микрограммов.

Отсутствие энтропийной составляющей, то есть фазы жидкого расплава в продуктах лазерной эрозии, приводит к уменьшению влияния химического состава, текстурных особенностей и физических свойств матрицы на результат ответной реакции образцов при энергетическом воздействии лазерного излучения.

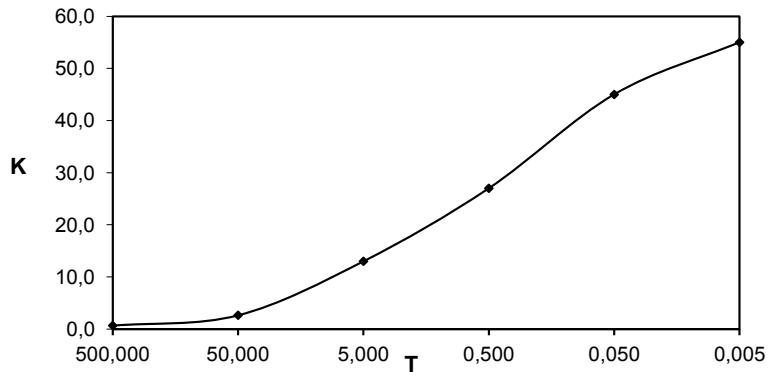
Принципиальной особенностью динамики формирования и развития лазерного эрозионного плазменного факела в атмосфере воздуха является импульсный характер этого процесса.

В любой точке плазменного факела плотность частиц (ионов, электронов и нейтральных атомов), их термодинамическое состояние и скорость направленного движения есть функция времени.

Характер движения плазменного факела изучали методом следограмм [3,12,13]. Методика исследования динамики формирования и движения газо-плазменного факела сводилась к следующему (Рис. 4): на определенном расстоянии ( $h$ ) от поверхности образца устанавливают тонкое покровное стекло, на котором оседают (конденсируются) продукты одиночной лазерной эрозии.

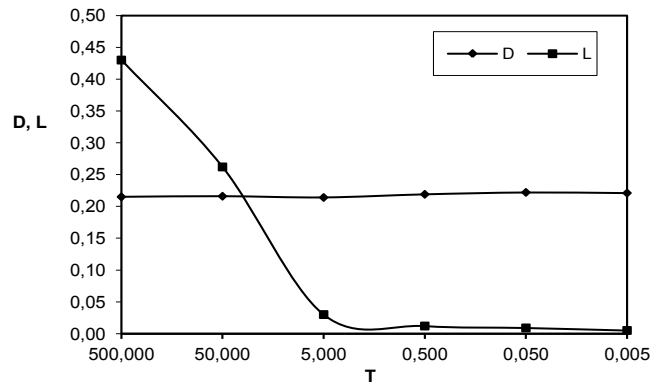
Проводят серию экспериментов, устанавливая новое покровное стекло на расстоянии  $h_n$ , отличном от  $h$  на величину  $\Delta h = h_n - h$ .

Сравнивая покровные стекла с осажденными продуктами и зная расстояния  $h_n$ , можно построить картину формирования и движения плазменного сгустка в пространстве.



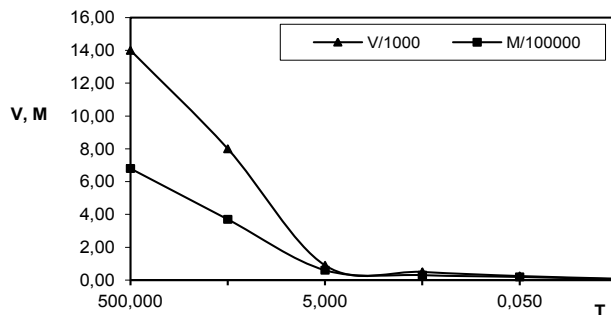
$$d_k = D \text{ (мм)}, \ell_k = L \text{ (мм)}, \tau_u = \tau \cdot 10^{-5} \text{ с}, E_u = 1,0 \text{ Дж}$$

Рис. 1 – Зависимость диаметра и глубины кратера лазерной эрозии пирита от длительности импульса излучения



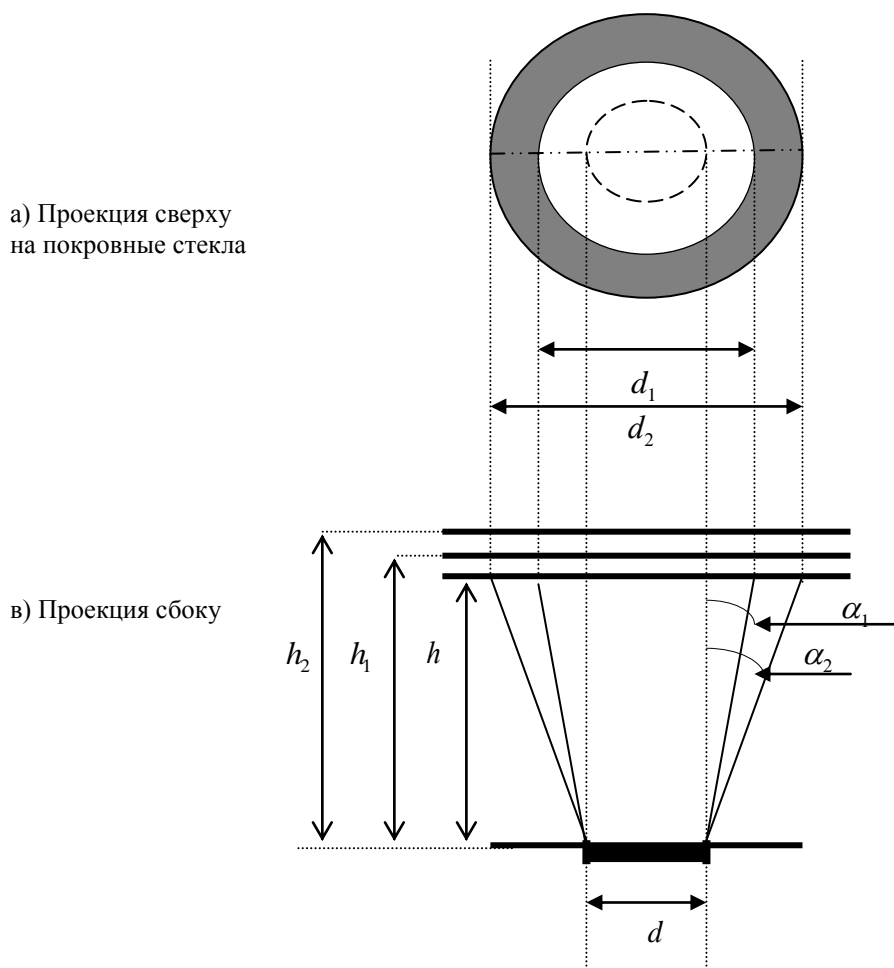
$$K_\phi = K, \tau_u = \tau \cdot 10^{-5} \text{ сек}, E_u = 1,0 \text{ Дж}$$

Рис. 2 – Зависимость коэффициента формы кратера лазерной эрозии пирита от длительности импульса излучения



$$m_s = M \cdot 10^{-5} \text{ (г)}, V_k = V \cdot 10^{-3} \text{ (мм}^3\text{)}, \tau_u = \tau \cdot 10^{-5} \text{ сек}, E_u = 1,0 \text{ Дж}$$

Рис. 3 – Зависимость массы эродируемого вещества и объема кратера лазерной эрозии пирита от длительности импульса излучения



$d$  - диаметр кратера;  $d_1$  - внутренний диаметр осажденной газовой фазы;  
 $d_2$  - внешний диаметр осажденной газовой фазы;  $h$ ,  $h_1$ ,  $h_2$  - расстояние от поверхности мишени до стекла;  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  - плоский угол раскрытия факела выброса

Рис. 4 – Расчет углов раскрытия факела лазерной эрозионной плазмы

В режиме модулированной добротности с уменьшением длительности воздействия лазерного излучения на образец уменьшается масса эродируемого вещества, причем удельный вес паровой фазы плазменного сгустка в продуктах выброса возрастает обратно пропорционально величине  $\tau_u$ . При одиночных наносекундных импульсах  $\tau_u = 30$  нс, когда

$$K_\phi = \frac{d}{\ell} \gg 1,$$

основную долю эрозии вещества составляет паровая фаза. На рисунке 5 для сравнения приведены фотографии светящихся плазменных факелов в атмосфере воздуха для различных мишеней (Bi, Be, Zr, Ta).

Видно, что плазменные образования имеют хаотическое строение, причем форма,

размеры и структура эрозионных факелов зависят от особенностей облучаемого образца.

Для различных минералов также наблюдаются самые разнообразные факелы: из пирита, халькопирита, арсенопирита и магнетита вещество выбрасывается в виде струи; факелы галенита и сфалерита имеют шарообразную форму; в факеле титаномагнетита наблюдается множество треков. Первичный акт поглощения энергии происходит в электронной системе, и поэтому сначала возникает сильное различие между электронной температурой  $T_e$  и температурой решетки  $T_p$ . Процесс передачи энергии в решетке включает в себя целый ряд этапов релаксации, финальной стадией которых является образование на поверхности образца плотной ионизированной плазмы.

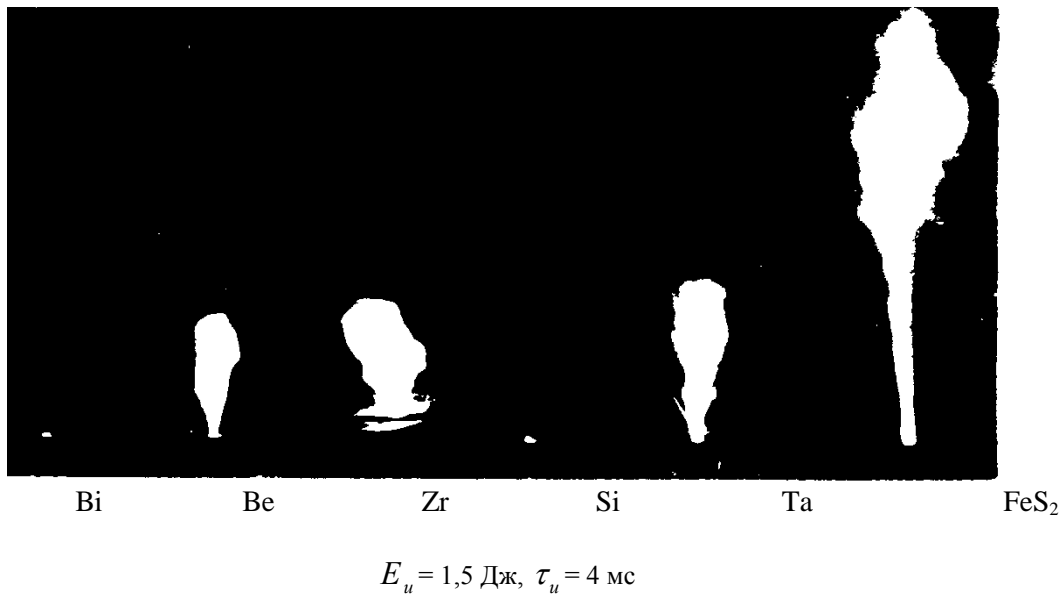
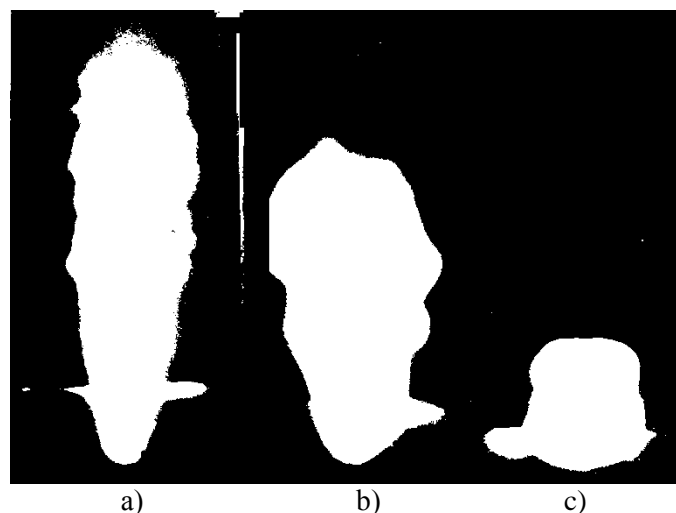


Рис. 5 – Эрозионные факелы твердых материалов

Из-за большого градиента давления вещество взрывообразно выбрасывается с облученной поверхности, и происходит газодинамическое расширение плазменного сгустка в атмосфере воздуха [4,5]. Отсутствие энтропийной составляющей в плазменных факелах, полученных при облучении мишени наносекундными импульсами, благоприятствует формированию более упорядоченных плазмообразований. В этих условиях пространственно-временные и спектральные характеристики

факелов эрозионной плазмы воспроизводятся в несколько раз лучше по сравнению с параметрами факелов, полученных при воздействии на эти же мишени миллисекундных импульсов.

На рисунке 6 представлены фотографии профилей эрозионных плазменных факелов, образующихся при воздействии на минерал пирита одиночных миллисекундных, микросекундных и наносекундных лазерных импульсов.



- a) свободная генерация излучения,  $\tau_u = 4$  мс;
- b) пассивная модуляция добротности,  $\tau_u = 0,05$  мс;
- c) электрооптическая модуляция,  $\tau_u = 30$  нс.

Рис. 6 – Профиль факела выброса вещества

Хорошо заметно (Рис. 5,6), что плазмохимический процесс испарения вещества в воздушной среде позволяет получать более упорядоченные газопламенные образования (Рис. 6,с).

Анализ экспериментальных данных, полученных методом следограмм при воздействии коротких (наносекундных) импульсов лазерного излучения на минералы и металлы при атмосферном давлении, позволили составить газодинамическую картину разлета (Рис. 7) образующегося газо-плазменного сгустка.

Взрывообразный характер переброса плазменного фронта в воздух наблюдается и при наносекундных, и при микросекундных лазерных импульсах, несмотря на большое различие давления и температуры плазмы.

На рисунке 7 представлены характерные зоны эрозионного плазменного факела при облучении твердых мишеней наносекундными лазерными импульсами с различной плотностью потоков световой энергии.

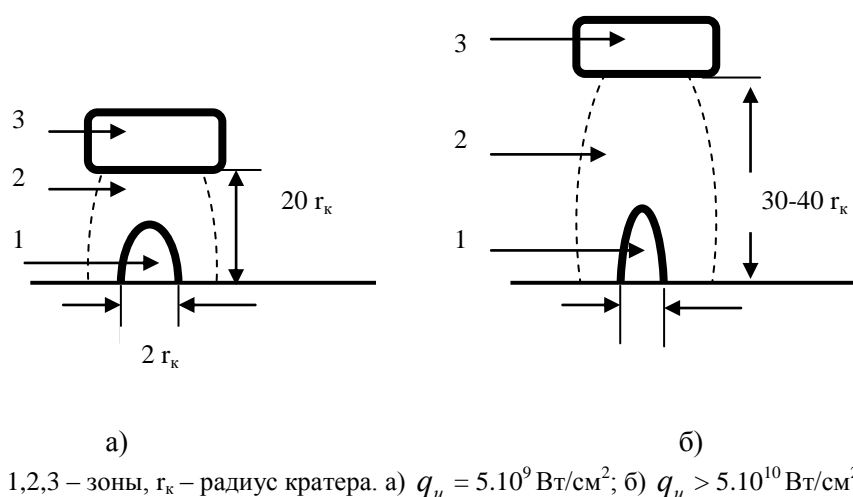


Рис. 7 – Характерные зоны в разлетающейся эрозионной плазме

Как показали результаты оптико-спектральных исследований, на различных расстояниях от поверхности мишеней (минералов, металлов), при плотности потока лазерного излучения в диапазоне  $10^3 \div 10^{10}$  Вт/см<sup>2</sup>, можно выделить три характерные зоны, различающиеся плотностью частиц, их температурой и характером газодинамического движения.

Характерный размер начального плазменного сгустка для наносекундных импульсов имеет вид полусферы и составляет порядок диаметра пятна облучения мишени. При увеличении плотности потока лазерного излучения  $q_u \geq 5 \cdot 10^9$  Вт/см<sup>2</sup> наблюдается взрывообразный переброс плазменного фронта в воздух.

Помимо  $q_u$ , другим важным фактором, влияющим на характер нагрева и ее газодинамического разлета, является соотношение между временем действия лазерного импульса  $\tau_u$  и временем газодинамического разлета плазмы  $\tau_p$ , которое определяется временем

жизни плазмы в области горячего ядра сгустка, то есть величиной  $r_o/c_3$ . Начальный размер плазменного сгустка -  $r_o \approx r_k$ , примерно равен радиусу кратера,  $c_3$  - скорость звука в плазме. При воздействии импульсов лазерного излучения наносекундной длительности на поверхность вещества реализуется режим газодинамического движения, когда  $\tau_u > \tau_p$ .

Лазерная плазма покидает горячую область, сильно поглощающую лазерное излучение, за время  $\tau_p$ , много меньше длительности воздействующего на мишень импульса. Действительно, так как при модулированной добротности скорость движения плазмы у поверхности облучаемой мишени  $v = 10^7$  см/с, а типичные значения начального радиуса  $r_o = 10^{-2}$  см, то характерное время разлета оказывается равным  $\tau_p = r_o/v = 10^{-9}$  с, в то время как  $\tau_u = 3 \cdot 10^{-8}$  с, то есть выполняется неравенство:  $\tau_p < \tau_u$ .

После того, как плазма покидает область  $r < r_0$  (Зона 1), дальнейшее ее движение определяется условиями среды, в которой она распространяется. Плазменный выброс с поверхности мишени в воздушную среду происходит из-за градиента давления (Зона 2) и поэтому характеризуется большей скоростью в направлении, перпендикулярном к облучаемой поверхности, чем в направлении, параллельном к ней. Таким образом, для объяснения динамики процесса развития плазменных эрозионных факелов в атмосфере воздуха при воздействии лазерного излучения на массивные мишени в первом приближении можно использовать квазиодномерную модель расширения плазмы с градиентом плотности.

Энергия лазерного импульса, поглощенная за время воздействия, переходит в кинетическую энергию направленного движения частиц при адиабатическом расширении плазмы в результате градиента давления. Для наносекундных импульсов при плотности потока излучения  $q_u \approx 10^9 \div 10^{10}$  Вт/см<sup>2</sup> скорость расширения достигает асимптотического значения за время, приблизительно равное половине длительности лазерного импульса и при расстояниях от места образования плазмы порядка  $10r_0$ .

После достижения максимального значения скорости выброса, плазменный сгусток резко тормозится вследствие взаимодействия с воздушной средой, чем объясняется появление вторичной зоны интенсивного свечения факела. В этой зоне происходит перестройка газодинамического движения плазменного образования (Зона 3).

Значительный интерес для управления поведением движения газо-плазменного образования представляет экспериментально установленная, методом следограмм, возможность формирования его в виде тороидального вихревого кольца (Рис. 6, с), которое движется в воздушной среде по законам квазиупругого тела. На покровных стеклах хорошо заметен след факела в виде кольца (Рис. 4). Скорость генерального поступательного движения кольцевого вихря меньше скорости движения плазменной струи, характерной для воздействия на мишень миллисекундных лазерных импульсов (Рис. 6, а).

При воздействии на мишень серии наносекундных импульсов характеристики эрозионных плазменных факелов зависят от частоты повторения импульсов. Режим облучения ми-

шени с частотой следования наносекундных импульсов  $\sim 2$  Гц обеспечивает хорошую воспроизводимость динамических и спектральных характеристик плазменных факелов.

Оптимальным значением плотности потока лазерного излучения, обеспечивающим устойчивый характер газодинамического движения факела в атмосфере воздуха, является величина  $q_u \approx 10^{10}$  Вт/см<sup>2</sup>. При этом режиме облучения мишени отмечается наилучшая воспроизводимость спектральных характеристик.

Математическое описание динамики упорядоченного движения газо-плазменных образований может быть произведено по аналогии с моделями вихревых колец, создаваемых с помощью импульсных генераторов вихрей. Одной из наиболее простых динамических моделей для объяснения особенностей формирования и поведения когерентного газо-плазменного образования может служить способ получения и развития движения дымовых колец в газовой среде.

Вопрос получения устойчивых газо-плазменных образований в воздушной среде при воздействии одиночных импульсов лазерного излучения на мишень к настоящему времени мало изучен.

На всех этапах своего существования лазерная эрозионная плазма является электро-нейтральной. Кулоновские силы, связывая разноименные заряды, обеспечивают устойчивый коллективный характер движения газо-плазменного образования, т.е. в плазменном факеле сохраняется приблизительно равенство концентрации электронов и ионов. И, таким образом, можно считать, что плазменный механизм испарения вещества импульсами лазерного излучения наносекундной длительности обеспечивает условия электрической декомпенсации колебаний плотности заряженных частиц эрозионной плазмы, что является необходимым условием для устойчивого движения плазмы в воздушной среде.

Спектральным составом излучения лазерной эрозионной плазмы на всех трех этапах ее развития в воздушной среде можно эффективно управлять, задавая начальную температуру плазменного сгустка:

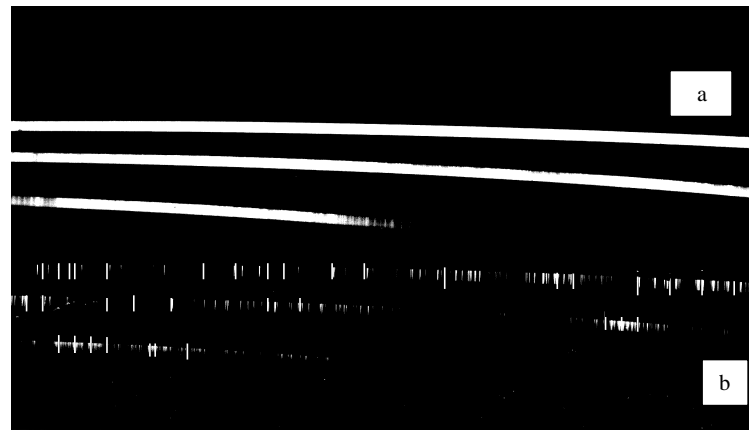
- при высоких температурах плазмы велика роль тормозного излучения;
- при понижении температуры возрастает роль рекомбинационного излучения.

Дискретное излучение играет основную роль при не очень высоких температурах ( $\sim$

$n \cdot 10^4 \text{ K}$ ) в слабо (однократно) ионизированной плазме. Если же плазма полностью ионизирована, с отрывом всех электронов от каждого атома, то дискретные линии вообще исчезают.

На рисунке 8 представлена фотография спектра лазерной эрозионной плазмы, полу-

ченного при двух различных режимах генерации излучения. Видно, что применение режима модулированной добротности позволяет получать спектры лучшего качества, на них присутствуют дискретные линии, и отсутствует сплошной фон (Рис. 8, б).



а - миллисекундный импульс; б - наносекундный импульс

Рис. 8 – Спектры эмиссии эрозионной плазмы при 80-кратном облучении пирита

Осуществляя пространственную селекцию при детектировании спектра на различных расстояниях от поверхности мишени и сравнивая с результатами метода следограмм, удается выбрать аналитическую зону и оптимизировать условия регистрации эмиссионных сигналов (по спектральному составу излучения).

Особенностью наблюдаемых спектров при детектировании аналитических сигналов из области горячего ядра плазмы является отсутствие линий атомов и ионов (Рис. 8, а). В области ультрафиолетовой и видимой части спектра в основном отмечается сильный непрерывный фон рекомбинационного и тормозного характера излучения.

Меняя плотность потока, удастся изменить ионный состав частиц плазмы и эффективно управлять процессом испускания. В диапазоне плотностей  $q_u = 10^8 \div 10^{11} \text{ Вт/см}^2$  в атмосфере воздуха начальную температуру плазменного сгустка можно варьировать от  $n \cdot 10^3$  до  $n \cdot 10^5 \text{ K}$ , при этом изменяется спектральный состав излучения и интенсивность спектральных линий возбужденных атомов и ионов (Рис. 8, б). Однако для области горячего

ядра в спектре преобладает непрерывное излучение многозарядных ионов и электронов.

При разлете газо-плазменного сгустка в воздушной среде происходит охлаждение самого плазменного факела. Скорость ионизации, которая зависит от температуры и времени по экспоненциальному закону, сильно замедляется. На этом этапе в плазме превалирует процесс рекомбинации ионов, происходящий по наиболее вероятной для плотности электронов  $> 10^{17} \text{ см}^{-3}$  схеме тройных столкновений:  $A^+ + 2e \leftrightarrow A + e$ .

При дальнейшем остывании плазмы, когда плотность заряженных частиц становится ниже  $10^{17} \text{ см}^{-3}$ , процессы рекомбинации, в которых участвуют три частицы, практически прекращаются. В этом случае возможна только излучательная рекомбинация по схеме:  $A^+ + e \leftrightarrow A + \gamma$ .

Результаты исследования состава излучения лазерной эрозионной плазмы свидетельствуют о том, что всем трем газодинамическим зонам формирования и движения газо-плазменного образования в атмосфере окружающей среды могут быть приписаны свои эффективные температуры, значения которых являются функциями плотности потока  $q_u$



излучения и расстояния  $r$  от поверхности облучаемой мишени, то есть  $T_n = f(q_u, r)$ .

Наилучшее качество линейчатых спектров, смещенных в область ультрафиолетовой части спектра излучения эрозионной плазмы, удастся получить при плотности потока  $q_u \approx 10^{10}$  Вт/см<sup>2</sup> и расстоянии от поверхности образца  $r$ , равном  $20r_0$ , но не более  $40r_0$  (Рис. 7). При указанных расстояниях, плазма, расширяясь в воздушной среде, успевает остыть до температуры, при которой линейчатое излучение возбужденных атомов и ионов малой кратности ионизации образует один из основных (главных) каналов утечки энергии из плазмы. Результаты селекционного детектирования излучения плазменных факелов на различных высотах позволяют сделать вывод, что на расстояниях  $r \leq r_0$ , т.е. в области горячего ядра плазмы, преобладает тормозное и рекомбинационное непрерывное излучение, принадлежащее к рентгеновской, ультрафиолетовой и видимой областям спектра, при этом дискретные линии атомов и ионов малой степени ионизации практически отсутствуют. На расстояниях  $r_0 < r < 20r_0$ , соответствующих зоне газодинамического расширения плазменного сгустка, отмечаются линии ионов различной кратности ионизации на фоне непрерывного рекомбинационного свечения факела.

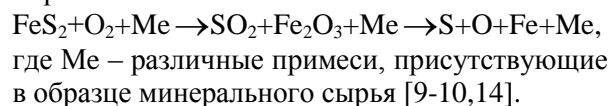
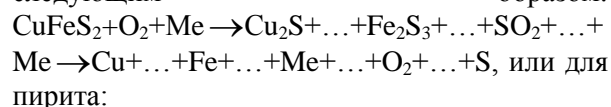
На расстояниях  $20r_0 < r < 40r_0$ , в зоне перестройки газодинамического движения плазменного облака наблюдаются спектральные линии в основном однократно ионизированных атомов, при этом непрерывный фон рекомбинационного и тормозного излучения очень слабый. Вполне вероятно, что тормозное излучение плазмы с температурой  $T_n = n \cdot 10^4$  К в основном принадлежит к инфракрасной и красной области спектра, и, таким образом, оно не влияет на интенсивность спектральных линий атомов и ионов, приходящихся на ультрафиолетовую область спектра. Для всех исследованных образцов минералов и металлов наиболее чувствительные линии элементов принадлежат однократно ионизированным и нейтральным атомам. Спектры по своему характеру напоминают искровые и хорошо воспроизводимы.

Результаты эксперимента на образцах чистых металлов, природных минералов и на эталонах, имитирующих минералы, свидетельствуют о том, что можно так оптимизировать

условия возбуждения спектра и регистрации аналитических сигналов, что изменение регистрируемой интенсивности спектральных линий  $I_x$  будет прямо пропорционально зависеть от числа излучающих эти линии частиц (атомов или ионов).

Процесс лазерного разрушения природных минералов, при наличии большого числа микро- примесей весьма сложен и многоступенчат. Изучение деструкции неорганических соединений является одним из важнейших методов исследования состава и строения этих материалов.

Поскольку процесс лазерного разрушения происходит в открытой системе при атмосферном давлении, то процесс, например для мономинерала халькопирита, может проходить следующим образом:



В реальной ситуации процесс намного сложнее. Реакция разрушения происходит до тех пор, пока молекула минерала не распадется полностью на нейтральные атомы и ионы.

Общие кинетические процессы элементарных реакций не зависят от того, какие именно частицы - молекулы, свободные радикалы, ионы или комплексы - принимают участие в элементарном акте химического превращения. Природа частиц определяет лишь величину константы скорости реакции [10, 14].

При воздействии лазерного импульса пиковой мощности характерен процесс, когда конечный продукт образуется из одной или нескольких молекул в газовой фазе в один элементарный акт. Следовательно, новые молекулы не образуются, а могут образовываться лишь ионы или свободные радикалы.

В тех случаях, когда эти процессы не связаны со значительной затратой энергии, они идут с очень большой скоростью.

В зависимости от природы реагирующих систем и условий их взаимодействия в элементарных актах реакций могут принимать участие атомы, молекулы или ионы. Вероятность простых (между молекулами) реакций очень мала, требуется высокая энергия активации (150-450 кДж/моль). Более вероятными являются реакции с участием заряженных частиц (ионов, электронов) или идущие через проме-

жуточное образование свободных радикалов. Энергия активации при ион-ион- или ион-молекула- взаимодействии очень мала ( $< 80$  кДж/моль). Свободные радикалы, к которым относятся и атомы, чрезвычайно реакционно-способны, а энергия активации радикальных реакций еще меньше, чем ионных ( $< 40$  кДж/моль) [14].

Еще одна особенность радикальных реакций – это возможность цепных процессов. Один первичный акт активации приводит к распаду (превращению) огромного числа молекул исходных веществ. Инициирование химических превращений происходит при воздействии лазерного излучения. Молекулы тем

или иным путем приобретают избыточную энергию, претерпевают деформацию (изменяются валентные углы, межатомные расстояния), распадаются на ионы и радикалы (атомы). В последнем случае реакция протекает по цепному характеру и часто сопровождается взрывом, т.е. протекает мгновенно, что влияет на длину цепей.

В таблице 1 для сравнения представлены основные параметры ответной реакции облучаемых образцов на воздействие одиночных импульсов лазерного излучения с энергией  $E_u = 1,0$  Дж для двух режимов установки "АРЗНИ-210".

Таблица 1 – Основные характеристики воздействия импульсов лазерного излучения на твердые материалы

Характерный параметр воздействия	Режим свободной генерации	Режим модулированной добротности
Характерная плотность излучения, Вт/см <sup>2</sup>	$10^6 \div 10^7$	$10^9 \div 10^{10}$
Характерное время испарения, атомизации и ионизации вещества, с	$0,5 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-8}$
Характерная масса продуктов эрозии, г	$10^{-5}$	$10^{-7}$
Воспроизводимость кратеров (стандартное относительное отклонение)	0,1	0,05
Воспроизводимость плазменных факелов	0,15	0,05
Температура испарения, К	$n \cdot 10^3$	$n \cdot 10^4$
Степень атомизации испаренного вещества	$10^{-2} \div 10^{-3}$	$1 \div 10^{-1}$
Степень ионизации испаренного вещества, ион/атом	$10^{-4}$	$10^{-1}$
Селективность испарения	есть	нет
Селективность атомизации	есть, сильная	нет
Селективность ионизации	есть, сильная	нет
Спектральное отношение, сигнал/шум	низкое	высокое

### Заключение

Изучена возможность управления параметрами плазмохимического процесса и ответной реакцией исследуемых образцов.

Получены характеристики процесса формирования эрозионной плазмы при воздействии модулированного лазерного излучения на поверхность сложных природных соединений.

Показана газодинамическая картина разлета образующегося газо-плазменного факела и установлена возможность разработки нового плазмохимического метода исследования (на примере природного минерала пирита) по спектрам эмиссии лазерной эрозионной плазмы.

### Литература

1. Ошемков С.В., Петров А.А. // ЖПС. № 43. 1985.- С.359-376.
2. Каликов В.Н., Марков В.П., Сергеев В.Н. // ЖПС. № 4. 1983. - С.542-548.
3. Акназаров С. Х., Вазилло Е.Н., Голиков В.А. // Кн.: Современные методы анализа минерального сырья. Алма-Ата: КазИМС. 1987. - С. 47-56.
4. Аналитическая лазерная спектроскопия // Под ред. Н.М, Оменетто. М.: Мир. 1982. - 606 с.
5. Косовец Ю.Г., Ставров О.Д. Локальный спектральный лазерный анализ в геологии. М.: Недра. 1983.С 104.
6. Акназаров С.Х., Вазилло Е.Н., Голиков В.А.: А. с. 1283628 СССР// Кл. С 01 21/39.
7. Мансуров З.А., Акназаров С.Х.//Вестник КазГУ. Серия химическая. Алматы. №10 (2). 1998.- с. 92.

8. Акназаров С.Х., Головченко О.Ю. // Вестник КазГУ. Серия химическая. Алматы. №1 (18). 2000. - с.101

9. Акназаров С.Х., Мансуров З.А. Головченко О.Ю.// Вестник КазГУ. Серия химическая. Алматы. №1(18). 2000. - с.95.

10. Акназаров С.Х. //В кн.: Химия и химическая технология. Современные проблемы. АН ВШК РК. Алматы. 2000. -с.248.

11. Хохлов В.В. Атлас спектральных линий для дифракционного спектрографа СТЭ-1. М.: Недра. 1968. – С 127.

12. Методические основы исследования химического состава горных пород, руд и минералов. Под ред. Г.В. Остроумова.- М.: Недра, 1979.- 397 с.

13. Орлов А.Г. Методы расчета в количественном спектральном анализе. Л.: Недра. 1986. –С 223.

14. Денисов Е.Т., Саркисов О.М., Лихтенштейн Г.И. Химическая кинетика. М.: Химия. 2000. – С. 565

*Дата поступления 15 июля 2012 г.*

## FORMATION OF LASER EROSIIVE PLASMA ON THE SURFACE OF NATURAL MINERALS

**O.Yu. Golovchenko, S.Kh. Aknazarov**

Al-Farabi Kazakh National University,  
Institute of combustion problems, sestager@mail.ru  
172 Bogenbai batira str., Almaty, 050012, Kazakhstan

### Abstract

Process of formation of erosive plasma at influence of the modulated laser radiation on a surface of geochemical complex is experimentally investigated. Attempt to explain a gas - dynamic picture of scattering of a formed gas - plasma clot is done. Dependence of weight of erosion of substance, volume and the form of a crater of laser erosion from duration of a impulse of radiation is fixed. Advantage of management of plasma - by chemical process and the answer of samples to change of duration of a impulse is experimentally established.

## ТАБИҒИ МИНЕРАЛДАРДЫҢ БЕТТІК ҚАБАТЫНДА ЛАЗЕРЛІ ЭРОЗИОНДЫ ПЛАЗМАНЫҢ ТҮЗІЛУІ

**О.Ю. Головченко, С. Х. Акназаров**

аль-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, ҚР ҒБМ Жану проблемалары институты  
Қазақстан, Алматы, Бөгенбай батыр 172, sestager@mail.ru

### Аңдатпа

Күрделі геохимиялық қосылыстардың беттік қабатындағы модульдік лазер шағылуының әсері кезінде эрозиялық плазманың түзілу процесі тәжірибелік зерттелді. Газ-плазмалық қоймалжыңның түзілуіндегі газодинамикалық ұшу көрінісін түсіндіру жүргізіліп жатыр. Лазер эрозиясының кратер формасынан және көлемінен импульстің сәулелендіру ұзақтығы, эродирленетін заттың массалық байланысы көрсетілген. Импульстің ұзақтығын өзгерту арқылы процестің плазмохимиялық параметрлерін тиімді барқаруға болатындығы және үлгінің жауапты реакциясы тәжірибелік көрсетілді.