

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРНО-ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОГО ИСТОЧНИКА ПЛАЗМЫ

А.Н.Чумаков, А.В.Балашенко, Н.А.Босак,  
В.И.Архипенко, С.М.Згировский

*Институт молекулярной и атомной физики Национальной академии наук  
Беларуси, проспект Ф.Скорины 70, 220072 Минск, Беларусь*

**Аннотация.** Экспериментально обосновано применение для спектрального анализа лазерно-электроразрядного источника плазмы с комбинированным возбуждением спектров при лазерном воздействии на материалы и инъекции лазерной плазмы в область тлеющего разряда в гелии атмосферного давления.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Лазерная плазма находит широкое применение в качестве источника света для спектрального анализа. Основанный на этом метод имеет ряд достоинств: высокую локальность отбора пробы, устранение влияния третьих компонентов на результаты анализа, простоту и применимость метода к широкому классу веществ. Однако предел обнаружения для такого прямого лазерного спектрального анализа находится на уровне  $10^{-2}$ %. Он может быть улучшен до  $10^{-3}$ – $10^{-5}$ % за счет перехода к пониженному давлению, пространственно-временной селекции излучения лазерного факела и специального выбора режима лазерного воздействия (Сухов, 1990; Мицько, Чумаков и др., 1990; Розанцев и др., 1993; Kagawa et al., 1998). Более радикальный подход состоит в создании комбинированных лазерно-электроразрядных источников света для спектрального анализа. В последнее время для анализа ряда металлов в водных растворах их солей находят применение самостоятельные тлеющие разряды атмосферного давления в потоке гелия (Архипенко и др., 1994, Архипенко и др., 1997). В настоящей работе исследуются излучательные характеристики комбинированного источника плазмы на основе тлеющего разряда атмосферного давления в гелии с инъекцией лазерной плазмы.

### 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Комбинированный лазерно-электроразрядный источник плазмы был создан на основе установки с самостоятельным тлеющим разрядом атмосферного давления в потоке гелия (Архипенко и др., 1994). Тлеющий разряд, возбуждался в герметичной камере с кварцевыми окнами между двумя электродами: закругленным вольфрамовым анодом (диаметр – 6 мм, радиус закругления – 3 мм) и плоским катодом, выполненном из меди (диаметр – 30 мм, толщина 8 мм). Межелектродный промежуток был равен 4 мм. Рабочий газ - гелий – проходил через разрядную камеру и свободно выпускался в атмосферу. Расход газа составлял ~ 2

л/мин, концентрация примесей в потоке гелия не превышала 0.01%. Разряд поддерживался постоянным током  $\sim 1$ А (рис. 1). Во время горения разряда катод облучался Nd:YAG лазером в многоимпульсном режиме. Излучение лазера фокусировалось на поверхность катода с помощью линзы с фокусным расстоянием  $f = 120$  мм. Угол между оптическими осями лазера и монохроматора составлял примерно  $40^\circ$ . Излучение разряда регистрировалось управляемым от ЭВМ монохроматором с ПЗС-линейкой и ФЭУ-170.

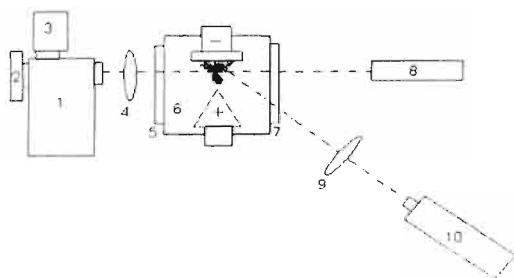


Рис. 1. Схема установки для получения комбинированного разряда: 1-монохроматор, 2-ПЗС-линейка, 3-ФЭУ, 4,9-линзы, 5,7-окна разрядной камеры, 6-разрядная камера, 8-He-Ne лазер, 10- YAG:Nd-лазер.

сировалось на поверхность катода с помощью линзы с фокусным расстоянием  $f = 120$  мм. Угол между оптическими осями лазера и монохроматора составлял примерно  $40^\circ$ . Излучение разряда регистрировалось управляемым от ЭВМ монохроматором с ПЗС-линейкой и ФЭУ-170.

повторения ( $n$  числом) импульсов излучения достигался режим эффективного эрозионного плазмообразования (Минько, Чумаков и др., 1990), обеспечивавший интенсивное поступление материала катода в плазму тлеющего разряда.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Излучательные характеристики комбинированного лазерно-электроразрядного источника плазмы исследовались в различных областях тлеющего разряда: в области катодного свечения, Фарадеевом пространстве и положительном столбе. В частности, была зарегистрирована интенсивность свечения спектральной линии меди  $\text{Cu I } 324.8$  нм (медный катод) в различных условиях. При этом плазма возбуждалась тремя способами: только лазером, только тлеющим разрядом и разрядом совместно с лазером. Выяснено, что указанная линия имеет наибольшую интенсивность в положительном столбе при совместном возбуждении лазером и тлеющим разрядом. Ее интенсивность была примерно в  $\sim 10$  раз больше, чем в случае возбуждения только тлеющим разрядом. Однако в катодной области интенсивность этой линии при совместном возбуждении была только в 2 раза больше (рис. 2), а в области Фарадеева пространства была ниже предела регистрации. Разряд оставался устойчивым при работе лазера с частотой повторения до 6 Гц.

Исследовалась также зависимость интенсивности свечения комбинированного источника (в линии  $\text{Cu I } 324.7$  нм) от плотности мощности лазерного

излучения (ЛИ). Интенсивность линии Cu I 324,7 нм регистрировалась с помощью

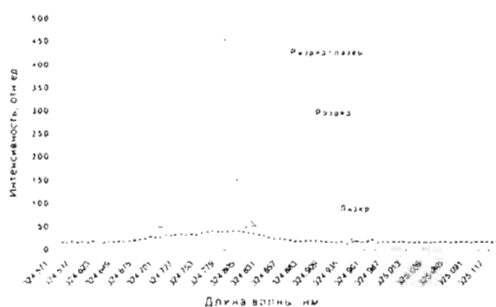
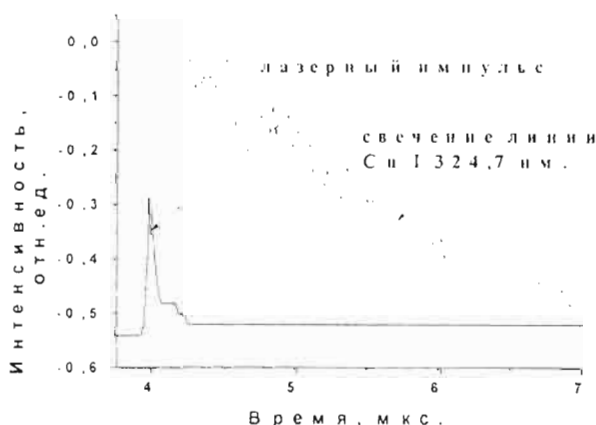


Рис. 2. Интенсивность свечения линии Cu I 324,8 нм в катодной области при разных способах возбуждения

ФЭУ-170 и цифрового осциллографа С9-27, подключенного к ЭВМ. Плотность мощности ЛИ изменялась калиброванными светофильтрами. Результаты показали, что оптимальная плотность мощности лазерного излучения  $q$  находится в диапазоне  $5 \times 10^7 \leq q \leq 8 \times 10^7$  Вт/см<sup>2</sup>.

Динамика временного высвечивания спектров при комбинированном возбуждении исследовалась путем синхронной регистрации интенсивности серии лазерных импульсов и спектральной линии Cu I 324,8 нм с помощью фотодиода ФД-10Г и ФЭУ-170 соответственно, которые были подключены к двухлучевому цифровому осциллографу С9-27. Интенсивность свечения линии Cu I 324,7 нм в режиме комбинированного возбуждения лазером и тлеющим разрядом была зарегистрирована в области катодного свечения, Фарадеева пространства и положительного столба. Наибольшая интенсивность свечения исследуемой линии была зарегистрирована в области положительного столба. Здесь максимум интенсивности спектральной линии запаздывает по времени на 0,5

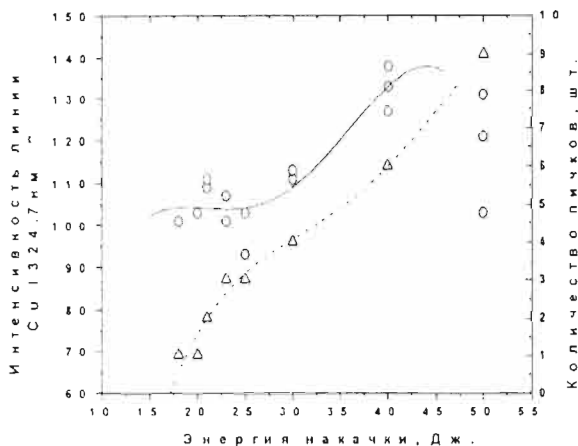
Рис. 3. Динамика высвечивания лазерного импульса и линии Cu I 324,7 нм. Область положительного столба.



мкс относительно максимума лазерного импульса (см. рис. 3), тогда как в области катодного свечения оба максимума совпадают по времени. При этом длительность высвечивания линии на порядок превышает длительность импульса ЛИ. Замечено, что интенсивность свечения исследуемой линии зависит не только от интенсивности ЛИ, но и от количества и периода следования импульсов в серии.

ности ЛИ, но и от количества и периода следования импульсов в серии.

Рис. 4. Зависимость интенсивности линии Cu I 324,8нм от энергии накачки и количества лазерных импульсов.



В связи с этим была исследована зависимость интенсивности излучения комбинированного источника от количества лазерных импульсов в серии. Количество лазерных импульсов регулировалось изменением уровня накачки лазера и плотности пассивного затвора из LiF, установленного внутри лазерного

резонатора. С более плотным затвором была исследована зависимость интенсивности линии от энергии накачки лазера при количестве импульсов в серии от 1 до 9 (см. Рис.4), с менее плотным – при количестве импульсов в серии до 27. В случае применения плотного затвора был обнаружен максимум интенсивности свечения комбинированного источника плазмы при 6-8 импульсах в серии. Аналогичный максимум был найден и в случае с менее плотным затвором.

Таким образом, в работе показано, что использование комбинированного возбуждения спектров самостоятельного тлеющего разряда в гелии атмосферного давления при многоимпульсном лазерном воздействии на материалы с инъекцией лазерной плазмы в область разряда обеспечивает многократное увеличение интенсивности спектров инжектируемого материала и имеет большие перспективы применения для лазерного эмиссионного спектрального анализа.

#### Литература

Архипенко В.И., Згировский С.М., Симончик Л.В. и др.: 1994, *Журнал прикладной спектроскопии* **61**, 335.  
 Архипенко В.И., Згировский С.М., Капаник А.К. и др.: 1997, *Журнал прикладной спектроскопии* **64**, 711.  
 Kagawa K., Kurniawan H.: 1998, *Laser induced shock wave plasma spectroscopy// Trends in Applied spectroscopy* **2**.  
 Минько Л.Я., Чумаков А.Н., Босак Н.А.: 1990, *Квантовая электроника* **17**, № 11, 1484.  
 Розанцев В.А., Широканов А.Д., Янковский А.А.: 1993, *Журнал прикладной спектроскопии* **59**, 431.  
 Сухов Л.Т.: 1990, *Лазерный спектральный анализ (физические принципы)*. - Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 143с.