

02; 04; 07

© 1991

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ
НА ПРОСТРАНСТВЕННУЮ СТРУКТУРУ ИЗЛУЧЕНИЯ
НА ПЕРЕХОДАХ ИОНОВ РАЗНОЙ КРАТНОСТИ
ИОНИЗАЦИИ В ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЕУ.Ш. Бегимкулов, Б.А. Брюнеткин,
В.М. Дякин, Г.А. Колдашов,
А.Ю. Репин, Е.Л. Ступицкий,
А.Я. Фаенов

Ранее мы сообщали о наблюдении эффекта разделения ионов разной кратности ионизации при взаимодействии потоков лазерной плазмы [1, 2]. В настоящей работе представлены результаты экспериментов, в которых плазменные потоки сталкивались друг с другом либо с преградой при наличии внешнего магнитного поля с индукцией $B \sim 0.1$ Тл. Заметим, что проблема взаимодействия высокоскоростных плазменных потоков в магнитном поле в настоящее время мало исследована, хотя и представляет значительный интерес как для ряда прикладных задач, так и фундаментальных исследований.

В проведенных экспериментах лазерная плазма (ЛП) создавалась на поверхности массивной мишени из Ве при фокусировке в вакууме ($P < 10^{-3}$ Тор) излучения рубинового лазера с энергией до 8 Дж в импульсе длительностью 8 нс. Магнитное поле с индукцией B до 0.1 Тл создавалось в объеме ~ 6 дм³ с помощью соленоида. Длительность импульса поля составляла ~ 20 мс, так что во временном масштабе наблюдаемых явлений (~ 100 нс) поле можно было считать постоянным. Исследовалось свечение как одиночного факела, так и взаимодействие двух сгустков ЛП. Для создания двух сгустков ЛП пучок рубинового лазера делился клиновидной пластиной на две части (рис. 1, а) и при фокусировке пучков на мишени возникали одновременно два плазменных факела, причем расстояние между ними можно было менять. Исходя из ранее полученных результатов [1], нами было выбрано расстояние в 4 мм. В случае одного факела лазерной плазмы исследовалось его взаимодействие с твердотельным препятствием в виде двух стеклянных стенок, параллельных друг другу и перпендикулярных мишени (рис. 1, б). Стенками являлись стеклянные пластины толщиной 1 мм, расстояние между ними 1 см; факел ЛП расположен посередине между стенками. Излучение плазмы регистрировалось в направлении, перпендикулярном магнитному полю интегрально по времени и видимому диапазону спектра с пространственным разрешением 0.1 мм, а также были получены спектрогелиограммы излучения ионов разной кратности с помощью спектрографа [1, 2].

Рассмотрим сначала интегральные по видимому диапазону спектра картины свечения (рис. 2). При налете плазменного потока на

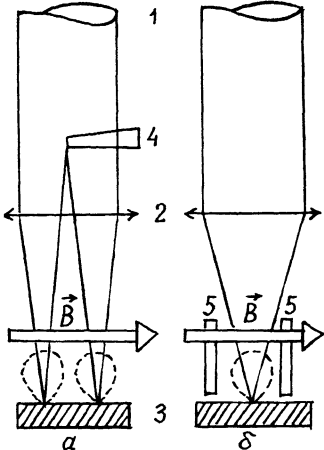


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 - лазерный луч, 2 - фокусирующий объектив, 3 - мишень из Be, 4 - клин, 5 - стеклянные пластины.

твердую стенку (рис. 2, а, б) около нее образуется ударно-сжатая зона, в которой происходит интенсивное высвечивание на переходах ионов лазерной плазмы [3]. В отсутствие магнитного поля пристеночная зона свечения тонкая по размерам и слабая по интенсивности. При наложении магнитного поля происходит размытие тонкой структуры свечения около стенок при одновременном увеличении

интенсивности излучения. Резко увеличивается интенсивность излучения во всей области пространства между стенками и незначительно растет размер области излучения факела ЛП. Исходя из соотношений на скачке уплотнения [4], легко оценить угол его наклона к поверхности стенки в зависимости от угла падения потока плазмы и его числа Маха M . В наших экспериментах вблизи стенки $M \approx 17 \dots 20$ угол падения меняется, так как источник плазмы точечный, соответственно несколько изгибается форма скачка (рис. 3, а). Если принять некоторое среднее значение для угла падения потока $\theta \approx 30^\circ$, то угол наклона скачка получается равным примерно $\approx 14^\circ$. Как видно из рис. 2, а, б, в эксперименте наблюдаются близкие значения. При взаимодействии потоков плазмы от двух лазерных факелов появляется струеобразное свечение между факелами, интенсивность которого быстро растет с увеличением энергии лазера и зависит также от расстояния между факелами и расстояния до мишени [1, 2], рис. 2, в. В магнитном поле интенсивность излучения зоны взаимодействия намного выше (рис. 2, г), увеличиваются ее размеры. Размер светящихся фокальных образований также увеличивается в магнитном поле, но не намного.

Для более детального исследования динамических и кинетических процессов, происходящих в плазме при наших экспериментальных условиях, требуются специальные исследования в линиях ионов разной кратности. С этой целью нами были получены спектрогелиограммы свечения плазмы, зарегистрированные при снятой входной щели спектрографа. На рис. 3 показана пространственная структура свечения ионов Be разной кратности при взаимодействии двух стужков ЛП. Как видно из представленных результатов, во всех линиях интенсивность излучения в магнитном поле увеличивается, но изменение свечения для ионов разной кратности различно. Для нейтралов бериллия интенсивность возрастает только вблизи фокальных областей, а в области взаимодействия стужков заметного роста интенсивности Be I ($\lambda = 2650 \text{ \AA}$) не наблюдается и в магнитном поле. Существенный вклад в увеличение излучения струи в магнитном поле

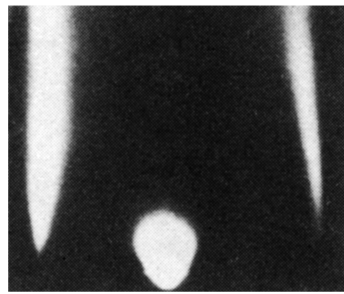
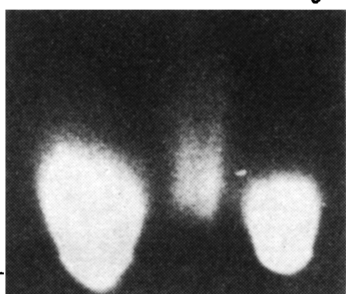
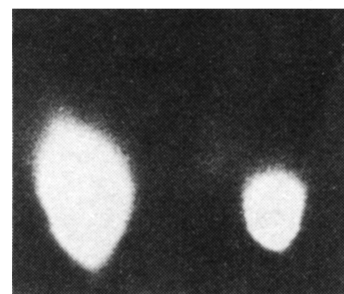
$B = 0$ α $B = 0.1 \text{ Тл}$ δ  β $-M \quad M-$ ϵ  $-M$ $M-$

Рис. 2. Интегральные по времени и видимому диапазону спектра картины свечения. а, б – соответствуют рис. 1, а; в, г – рис.1, б.

вносят ионы Be II и Be III , причем поскольку ионы Be II наиболее представлены и вид струи в их свечении наиболее выражен, они же определяют и вид фотографий.

Отметим, что в магнитном поле мы смогли наблюдать излучение линий, которые в отсутствии поля не регистрировались при тех же потоках лазерного излучения. На расстояниях 1... 2 мм от мишени было зарегистрировано излучение иона $\text{Be III } 4p - 5d$ длиной волны 424.9 нм и водородоподобного иона $\text{Be I } \gamma$ с $\lambda = 253$ нм (переход $4f - 5g$), то есть, хотя на фотографиях не видно заметного изменения формы факела, дополнительный разогрев, связанный с действием магнитного поля, существует.

Для качественной интерпретации наблюдаемых эффектов можно предложить следующий механизм. В магнитном поле напряженностью $H = 1000$ Гс ларморовский радиус ионов Be II составляет $R_{Li} = mv/c e H \approx 10$ см. Характерный радиус торможения плазмы в предположении полного вытеснения магнитного поля $R_T = (6Q/H)^{1/3} \approx 5$ см, где для условий нашего эксперимента кинетическая энергия плазмы $Q \approx 2$ Дж, средняя скорость ионов $v = 10^7$ см/с. Таким образом, наблюдаемые в эксперименте размеры зоны свечения и взаимодействия $l \ll R_{Li}, R_T$, то есть динамика разлета и взаимодействия сгустков ЛП в присутствии магнитного поля остается

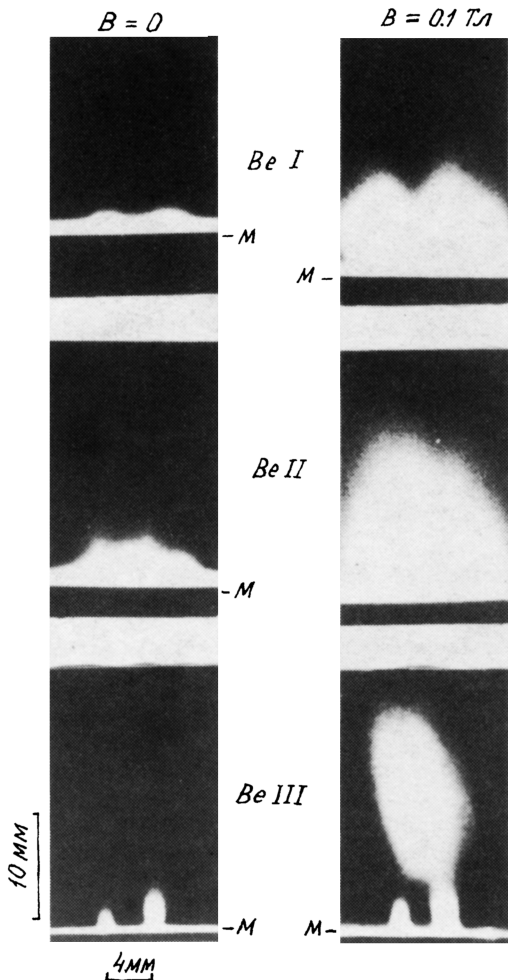


Рис. 3. Спектрогелиограммы свечения на переходах ионов Be I–III в отсутствие и при наличии магнитного поля.

в целом такой же, как и без магнитного поля. Вместе с тем магнитное поле приводит к возникновению токов в движущейся плазме и, следовательно, к дополнительному джоулеву разогреву. Наличие относительной скорости движения между частицами взаимопроникающих плазменных потоков способствует развитию целого класса пучковых неустойчивостей, в том числе в магнитном поле могут развиваться нижнегибридная дрейфовая и ионно-циклотронная неустойчивости [5, 6]. Развитие неустойчивостей увеличивает скорость перехода кинетической энергии плазмы в тепло, причем этот механизм может работать и тогда, когда столкновения частиц несуществ-

венны. Так как энергия поступает прежде всего в электроны, а именно они определяют возбуждение тяжелых частиц и их свечение, то эффект увеличения интенсивности свечения в магнитном поле проявляется как на ионах, так и на нейтральных атомах бериллия.

Оценим разогрев плазмы в результате протекания диамагнитных токов:

$$\frac{3/2 K \Delta T n}{\tau} \approx \frac{j^2}{\sigma},$$

где $j = \sigma v H / c$ – плотность диамагнитных токов; $\sigma = 10^{13} T_e^{3/2}$ – проводимость плазмы, T_e – эВ; $K = 1.6 \cdot 10^{-12}$ эрг/эВ – постоянная Больцмана; n – средняя концентрация ионов в плазме; τ – характерное время взаимодействия плазмы с полем. Для $H = 10^3$ Гс, $v = 10^7$ см/с, $T_e = 1$ эВ, $n \approx 10^{16}$ см⁻³; $\tau \approx 10^{-7}$ с, получаем $\Delta T \approx 5$ эВ, то есть разогрев плазмы достаточен для того, чтобы резко возросла ее светимость.

Таким образом, в настоящей работе экспериментально наблюдались особенности свечения области взаимодействия высокоскоростных потоков лазерной плазмы во внешнем магнитном поле $B \sim \sim 0.1$ Тл. Показано, что при наличии поля изменение пространственной локализации свечения на переходах ионов разной кратности зависит от заряда иона. Возможно качественное объяснение наблюдаемых явлений может быть связано с разогревом плазмы в результате протекания диамагнитных токов. Дальнейшие эксперименты и теоретический анализ дадут возможность уточнить механизм передачи кинетической энергии плазмы в тепло с учетом действия магнитного поля и развития микронеустойчивостей.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Б р ю н е т к и н Б.А., Б е г и м к у л о в У.Ш., Д я к и н В.М. и др. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 18. С. 50-53.
- [2] Б р ю н е т к и н Б.А., Б е г и м к у л о в У.Ш., Д я к и н В.М. и др. Сб. научных трудов ВНИИФТРИ „Методы исследования спектральных и релаксационных характеристик атомов и ионов“, М., 1990. С. 62-68.
- [3] Б о й к о В.А., Б р ю н е т к и н Б.А., Б у н к и н Ф.В. и др. // Физика плазмы. 1984. Т. 10. С. 999.
- [4] Л и п м а н Г.В., Р о ш к о А. Элементы газовой динамики. М.: ИЛ, 1960. С. 107-109.
- [5] М и х а й л о в с к и й А.Б. Теория плазменных неустойчивостей. М.: Атомиздат, 1975.
- [6] S e r g o A.G., N i c o l s o n C.W. // Phys. Fluids. 1976. V. 19. N 1. P. 126-133.

Поступило в Редакцию
20 июля 1991 г.