

РЕГИСТРАЦИЯ ЛИНЕЙЧАТЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ СПЕКТРОВ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ В ОБЛАСТИ $1 \div 10 \text{ \AA}$ С ПОМОЩЬЮ ПЗС

А.Н. Киркин, Р.Г. Мирзоян, П.Я. Пироговский, А.П. Шевелько

С помощью линейного ПЗС и спектрографа с плоским кристаллом получены линейчатые спектры Mg-, Ti-, Fe- и Ge-плазмы в окрестности резонансных линий He-подобных ионов. В коротковолновой области ($1 \div 3 \text{ \AA}$) были зарегистрированы сигналы, не наблюдавшиеся в случае рентгеновской фотопленки.

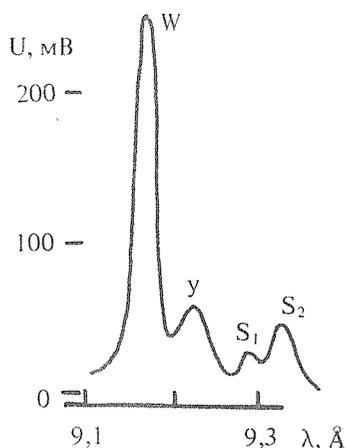
Важной задачей современной спектроскопии является исследование линейчатых рентгеновских спектров многозарядных ионов. Она связана с диагностикой лабораторной высокотемпературной плазмы и изучением астрофизической плазмы, в частности, рентгеновских спектров Солнца [1]. В настоящее время линейчатые рентгеновские спектры регистрируются, как правило, на рентгеновскую фотопленку. При этом процесс регистрации, обработки фотопленки и самих спектров является трудоемким и занимает продолжительное время. Перспективными детекторами для регистрации линейчатых рентгеновских спектров являются приборы с зарядовой связью (ПЗС), обладающие хорошей чувствительностью в области $1 \div 10 \text{ \AA}$ [2]. Они позволяют значительно упростить процессы регистрации и обработки спектров и автоматизировать их. В работе [3] продемонстрировано успешное использование ПЗС в диагностике лазерной плазмы по линейчатому и непрерывному рентгеновским спектрам. В частности, зарегистрированы спектры He- и Li-подобных ионов Mg-плазмы ($\lambda \cong 9,2 \text{ \AA}$), создаваемой импульсами Nd:YAG лазера длительностью 40 пс. В настоящей работе ПЗС использовались для регистрации линейчатых спектров в более жесткой области до $\cong 1 \text{ \AA}$ и проводилось сравнение двух способов регистрации спектров — с помощью ПЗС и на рентгеновскую фотопленку.

В качестве источника рентгеновского излучения бралась лазерная плазма, создаваемая импульсом лазера на неодимовом стекле длительностью 2 нс. Лазерный пучок фокусировался на расположенные в вакуумной камере мишени из Mg, Ti, Fe и Ge. Размер фокального пятна на мишени равнялся $\cong 30 \text{ мкм}$. Энергия лазерного импульса достигала 10 Дж. Для регистрации линейчатых спектров применялся спектрограф с плоскими кристаллами из кислого фталата калия (КАР) или графита. Спектры регистрировались на линейный ПЗС типа А-1047 [3] или рентгеновскую фотопленку УФ-ВР [4], расположенные на одинаковом расстоянии от мишени.

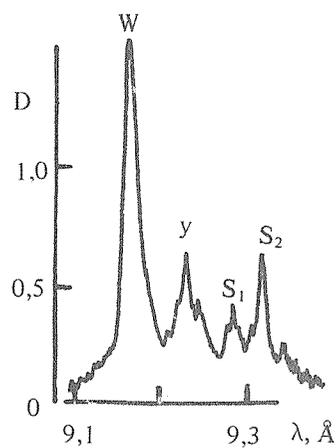
ПЗС типа А-1047 представляет собой одномерный детектор, имеющий два регистра по 1024 элемента; размер области, занимаемой фоторегистрами, равен $24 \times 0,01 \text{ мм}$; чувствительными элементами являются фотодиоды. Для работы в рентгеновском диапазоне с ПЗС снималось защитное окно и диафрагма, закрывающая сдвиговой регистр. Перед детектором устанавливался лавсановый фильтр толщиной 5 мкм с напыленным слоем Al 0,2 мкм. Управление осуществлялось схемой [5], позволявшей выводить информацию на ЭВМ или осциллограф. В настоящей работе спектры выводились на осциллограф С1-99, синхронизованный с блоком управления ПЗС с помощью схемы [3]. ПЗС при работе не охлаждался, тактовая частота равнялась 100 кГц.

На рис. 1 и 2 представлены спектры Mg-плазмы в области $\lambda \cong 9,2 \text{ \AA}$, зарегистрированные с помощью ПЗС и фотопленки при энергии лазерного импульса $E_p = 8 \text{ Дж}$. Использовался спектрограф с кристаллом КАР. На обоих спектрах отчетливо видны резонансная w и интеркомбинационная u линии He-подобного иона, а также две группы сателлитов q, r, a, d и k, j (обозначены S_1 и S_2 на рисунках). При расстоянии от плазмы до ПЗС 120 мм амплитуда резонансной линии равнялась 250 мВ. Относительные амплитуды спектральных линий, определенные двумя различными способами, хорошо согласуются между собой. В данной спектральной области амплитуда сигнала с ПЗС 10 мВ соответствует почернению $D = 0,1$ на фотопленке УФ-ВР. Это согласуется с результатами [3].

Для сравнения чувствительности ПЗС и фотопленки в более жесткой области спектра был использован кристалл графита, имеющий большой интегральный коэффициент отражения. Спектральное разрешение в этом случае было хуже, чем с кристаллом КАР, но давало возможность регистрировать слабые



Р и с. 1. Спектр Mg-плазмы, зарегистрированный с помощью ПЗС.



Р и с. 2. Денситограмма спектра Mg-плазмы, зарегистрированного на фотопленку (D – почернение).

спектральные линии вблизи 1 Å. Был получен спектр Ti-плазмы в окрестности резонансной линии He-подобных ионов ($\cong 2,6 \text{ \AA}$). При расстоянии от плазмы до ПЗС 80 мм и $E_p = 8 \text{ Дж}$ амплитуда сигнала с ПЗС в случае Ti-плазмы достигала 400 мВ. При уменьшении E_p до 1,3 Дж она снижалась до 30 мВ. При таком значении E_p сигнал на фотопленке УФ-ВР не наблюдался.

В случае спектрографа с плоским кристаллом графита с помощью ПЗС удалось также зарегистрировать сигналы, соответствующие линейчатому излучению Fe- и Ge-плазмы в окрестности резонансных линий He-подобных ионов ($\lambda \cong 1,9 \text{ \AA}$ для Fe и $\cong 1,2 \text{ \AA}$ для Ge). При $E_p = 10 \text{ Дж}$ амплитуды сигналов достигали 160 мВ (Fe) и 40 мВ (Ge). Сигналы на фотопленке УФ-ВР в этих случаях не были видны даже при максимальной энергии E_p .

Минимальная величина сигнала, наблюдавшегося в настоящей работе, составляла около 10 мВ. Такая амплитуда электрического сигнала с ПЗС соответствует примерно десяти поглощенным на одну ячейку рентгеновским квантам в области 1 Å и ~ 50 квантам в области 10 Å /6/.

Из полученных результатов следует, что в коротковолновой области исследованного диапазона ($\lambda \cong 1 \div 3 \text{ \AA}$) ПЗС по чувствительности обладают преимуществом перед рентгеновской фотопленкой. Следует заметить, что чувствительность использовавшегося ПЗС вблизи $\lambda = 10 \text{ \AA}$, по-видимому, ослаблена из-за наличия на нем защитного слоя SiO_2 конечной толщины. При смещении в более жесткую область поглощение этого слоя уменьшается. Подчеркнем, что ПЗС позволяют также существенно ускорить процессы регистрации и обработки спектров.

При использовавшихся в работе экспозициях деградация ПЗС в течение года не наблюдалась.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пресняков Л. П. УФН, **119**, 49 (1976).
2. Корж В. И., Кусков В. Е., Стенин В. Я. ПТЭ, № 3, 7 (1982).
3. Блаженков В. В. и др. Письма в ЖТФ, **10**, 1165 (1984).
4. Мазинг М. А. и др. ПТЭ, № 5, 188 (1981).
5. Блаженков В. В., Леонтович А. М., Чузо А. Н. Препринт ФИАН № 6, М., 1981.
6. Fedotov M. G. et al. Nucl. Instrum. and Meth., **208**, 427 (1983).

Поступила в редакцию 20 октября 1985 г.