

04;07;12

## КАЛИБРОВКА ПРОПУСКАЮЩЕЙ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ И ИССЛЕДОВАНИЕ С ЕЕ ПОМОЩЬЮ РЕНТГЕНОВСКИХ СПЕКТРОВ ИОНОВ МЕДИ В РАЗРЯДЕ СИЛЬНОТОЧНОГО z-ПИНЧА

© В.В.Гаврилов, Б.Н.Миросов

Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований,  
142092 Троицк, Россия  
(Поступило в Редакцию 8 июня 1995 г.)

Сообщается о результатах калибровки пропускающей дифракционной решетки линейчатым излучением меди на длине волны  $\lambda \simeq 12$  и  $52 \text{ \AA}$ , возбуждаемым в разряде малоиндуктивной вакуумной искры при токе  $I \simeq 200 \text{ кА}$ . Выявлено пять порядков дифракции и установлено количественное соотношение между ними. Показано существование "запрещенного" третьего порядка. Установлено, что значительная доля излучения сосредоточена в линиях CuII ( $\lambda \sim 2000\text{--}3000 \text{ \AA}$ ), CuXI–CuXVI ( $40\text{--}70 \text{ \AA}$ ) и некоторых линиях CuXVII–CuXIX ( $\lambda \sim 43\text{--}53 \text{ \AA}$ ), а также NeCu ( $\lambda \sim 12 \text{ \AA}$ ). Сформулированы проблемы, возникающие при проведении спектральных измерений при отсутствии оптических фильтров, а также при интерпретации результатов, полученных после взаимодействия оптического излучения с пропускающей решеткой после его отражения от многослойного рентгеновского зеркала. Сопоставляются результаты спектральных измерений, полученных при исследовании рентгеновской эмиссии плазмы меди, возбуждаемой в разряде малоиндуктивной вакуумной искры и облучении мишеней лазерным излучением.

### Введение

Пропускающие дифракционные решетки находят все большее распространение при проведении спектральных измерений на источниках излучения различного типа. Хорошая обзорность при умеренном спектральном разрешении и простота юстировки делают этот прибор незаменимым при исследованиях спектральных характеристик высокотемпературных плазменных источников многозарядных ионов со сложным ионизационным составом. Одним из основных факторов, определяющих точность измерений, а также делающих задачу по восстановлению спектра источника корректной, является учет вклада интенсивностей разных порядков дифракции  $\eta_m/\eta_1$ . Известно, что отношение  $\eta_m/\eta_1$  в свою очередь определяется отношением ширины зазора между проводочками к периоду решетки ( $\delta/d$ ). Обычно соотношение  $\delta/d$  делают

равным  $1/2$  или  $1/3$ . При этом в первом случае становятся равными нулю интенсивности излучения 2-го, 4-го и т. д. порядков, во втором — 3-го, 6-го и т. д. [1]. В ряде случаев в экспериментах, использующих пропускающие решетки различных изготовителей, наблюдаются “запрещенные” теорией порядки дифракции, обусловленные, по всей видимости, идеальностью изготовления решеток. Это приводит к необходимости калибровки каждой решетки отдельно.

## Постановка задачи

Задача состояла в калибровке решетки монохроматическим излучением. В этом случае исключается возможность переналожения разных порядков дифракции на различных длинах волн. Для решения поставленной задачи необходимо было выполнить несколько условий: а) выделить из общего спектра необходимые группы линий и произвести их идентификацию; б) выявить максимальное количество порядков дифракции, определить их номер, а также соотношения  $\eta_m/\eta_1$ .

## Экспериментальная установка

Эксперименты проводились на сильноточном  $z$ -пинче типа “малоиндуктивная вакуумная искра” при токе разряда  $I \simeq 200$  кА и времени нарастания тока  $\tau \simeq 1.25$  мкс [2]. Энергия в конденсаторной батарее составляла  $w_C \simeq 1.5$ – $2.0$  кДж. Плазмообразующим веществом служил материал анода, изготовленного из меди.

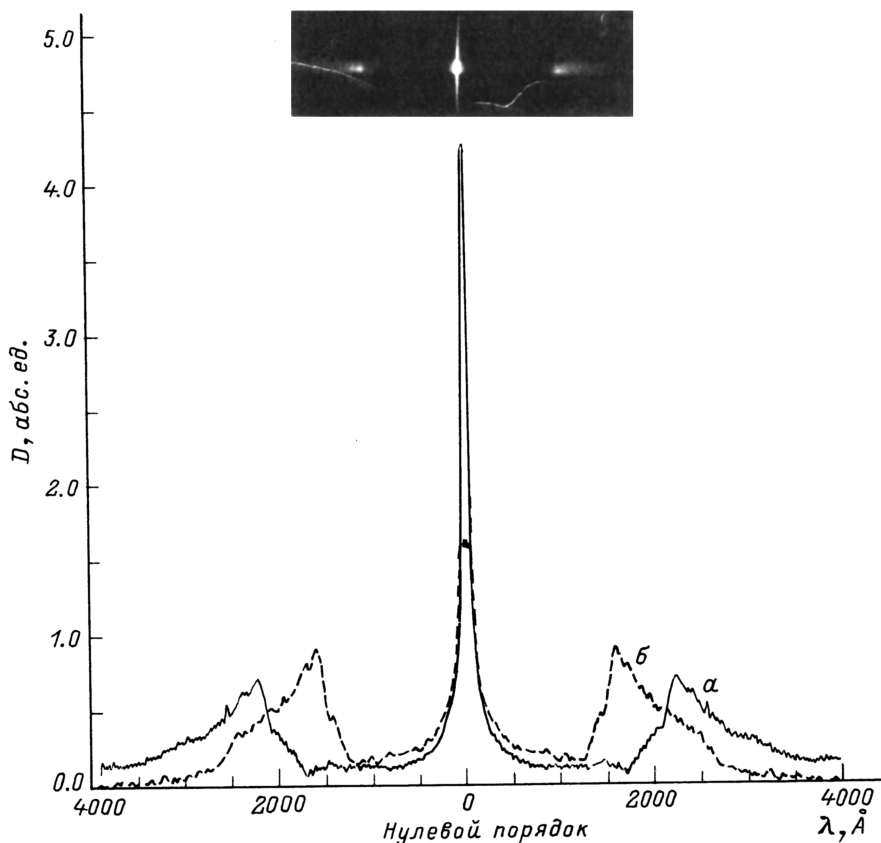
## Описание эксперимента

Источником мягкого рентгеновского излучения служили микроплазменные образования (микропинчи), сформированные в разряде  $z$ -пинча в процессе сильного сжатия и нагрева плазмы [3]. В многозарядовой плазме основным источником радиационных потерь является линейчатое излучение ионов.

Выделение интересующих спектральных линий осуществлялось двумя независимыми способами: в первом случае — с помощью фильтров, во втором — с помощью вакуумного спектрографа [4]. В этом случае в качестве диспергирующего элемента использовалось многослойное рентгеновское зеркало на основе пары  $w$ - $c$  с периодом слоев  $44 \text{ \AA}$ . Регистрация спектров излучения осуществлялась на калиброванную фотопленку УФ-ШС. Для увеличения спектрального разрешения прибора вдоль оси  $z$ , совпадающей с направлением протекания тока, на расстоянии 80 мм от источника излучения устанавливалась щель шириной 100 мкм. Расстояние от щели до решетки в варианте с фильтром составляло  $a = 600$  мм, а от решетки до фотопленки  $b = 240$  мм, в варианте со спектрографом  $a = 290$  мм,  $b = 190$  мм. При этом в первом случае разрешение составляло  $\Delta\lambda \simeq 7.5$ , во втором —  $12 \text{ \AA}$ . Ось дисперсии решетки располагалась перпендикулярно оси щели. Количество экспозиций, необходимых для достижения высокого уровня контраста за фильтрами, составляло  $n \sim 30$ – $50$  без спектрографа и  $n \sim 250$ – $300$  со спектрографом.

## Экспериментальные результаты

Измерения производились интегрально во времени, поэтому на фотопленке при отсутствии спектральной фильтрации были зарегистрированы спектры практически всех ионов в разряде. На рис. 1 представлена спектрограмма оптического излучения, полученная после прохождения излучения через дифракционную решетку, и та же спектрограмма при предварительном отражении излучения от многослойного рентгеновского зеркала при углах скольжения  $2-36.2^\circ$ . Наличие максимума излучения в диапазоне  $\lambda \sim 2000-3000 \text{ \AA}$ , а также наличие коротковолновой границы на длине волны  $\lambda \sim 1700 \text{ \AA}$ , соответствующей потенциалу ионизации  $\text{CuII}$ , свидетельствуют о доминировании в длинноволновой области спектра излучения однократно ионизованных ионов меди [5]. Временные измерения, выполненные с помощью полупроводниковых детекторов, показали, что оптическое излучение присутствует в течение всего времени протекания тока и интенсивность



**Рис. 1.** Спектрограммы и фотография спектра оптического излучения  $\text{CuII}$ , полученные после отражения излучения от многослойного рентгеновского зеркала на основе  $w-c$  с  $2d = 88 \text{ \AA}$  при углах скольжения  $2-36.2$  (а),  $72.6^\circ$  (б). При увеличении угла, начиная с некоторого значения, наблюдается смещение распределения  $D(\lambda)$ . ( $D(\lambda)$  — почернение фотопленки, однозначно связанное с интенсивностью излучения  $I(\lambda)$ ).

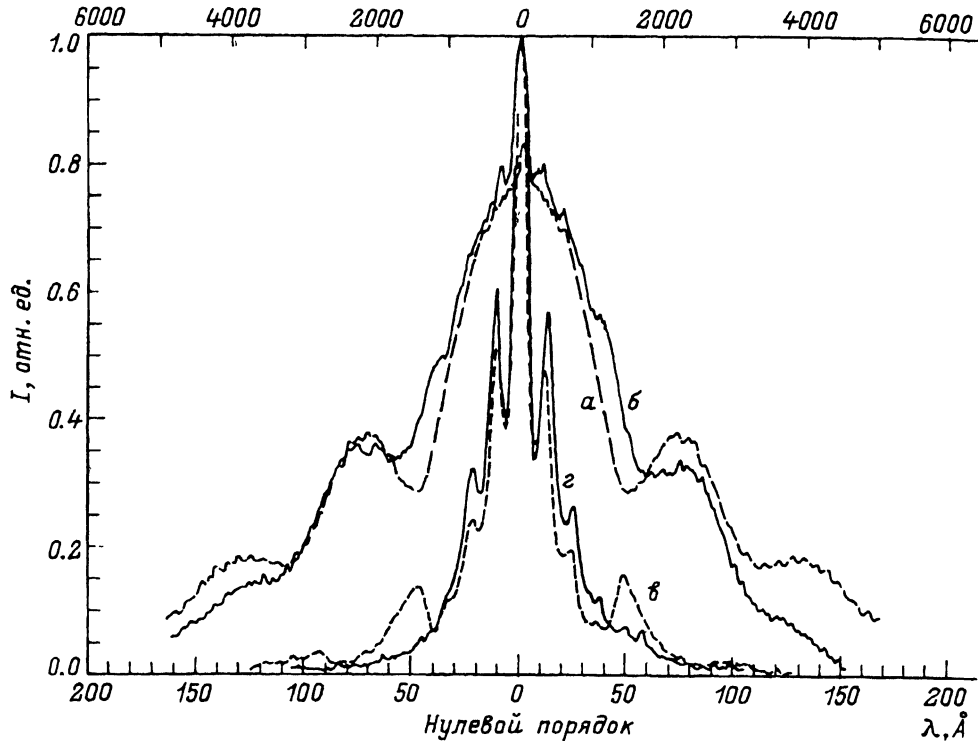


Рис. 2. Обзорные спектрограммы, полученные с помощью пропускающей дифракционной решетки за различными фильтрами.

*a* — оптически прозрачный лавсан 10 мкм; *б* — фильтр отсутствует; *в* — алюминий 0.1 мкм, напыленный на лавсан 4 мкм; *г* — алюминий 1 мкм. Для *a, б* — верхняя шкала длин волн (дифракция оптического излучения ионов  $\text{Cu}^{II}$  непосредственно на щели решетки).

излучения меняется подобно  $i(t)$ . В результате за несколько периодов колебания тока в разрядном контуре высвечивается значительная доля энергии оптического излучения.

Отметим особенность, наблюдаемую при использовании в качестве монохроматора многослойного рентгеновского зеркала. При падении на зеркало оптического излучения под углами скольжения  $2-36.2^\circ$ , прошедшего затем через пропускающую решетку, местоположение максимума распределения интенсивности  $I(\lambda)$ , однозначно связанного с чернением пленки  $D(\lambda)$ , остается неизменным (рис. 1, *a*). Начиная с некоторого угла распределение  $D(\lambda)$  сдвигается по шкале длин волн в коротковолновую область и при угле  $72.6^\circ$  достигает значения, показанного на рис. 1, *б*. Объяснение этого результата выходит за рамки данной работы.

Покажем, к каким результатам приводит взаимодействие оптического излучения с дифракционной решеткой в диапазоне малых углов дифракции, т. е. области дифракции рентгеновского излучения. На рис. 2, *a* представлена спектрограмма, полученная после прохождения излучения через дифракционную решетку и лавсановый фильтр толщиной 10 мкм. Фильтр пропускает оптическое излучение и практически полностью подавляет рентгеновское с  $\lambda > 10 \text{ \AA}$ . Оценки пока-

зали, при такой спектрограмма может наблюдаться при дифракции оптического излучения непосредственно на щели дифракционной решетки.

При отсутствии фильтра получается спектрограмма, показанная на рис. 2,б. Обращает на себя внимание наличие такого же широкого контура, на котором присутствуют слабые особенности, обусловленные наличием в спектре рентгеновского излучения. Спектрограммы, полученные за различными фильтрами отсекающими оптическое излучение, представлены на рис. 2,в,г. Фильтр на рис. 2,в выделяет излучение преимущественно в спектральных диапазонах  $0 < \lambda < 15 \text{ \AA}$ ,  $44 < \lambda < 70 \text{ \AA}$ ; фильтр на рис. 2,г — в диапазоне  $7 < \lambda < 15 \text{ \AA}$ . Поскольку плазма микропинча в момент предельного сжатия достигает высокой стадии ионизации (вплоть до гелиеподобных ионов), то на фотопленке фиксируются спектры всех ионов более низких кратностей ионизации. На рис. 2,в, г можно видеть, что в первом случае наблюдается излучение ионов NeCu ( $\lambda \sim 12 \text{ \AA}$ ) и CuXI–XVI ( $\lambda \sim 44\text{--}70 \text{ \AA}$ ), а также, следуя [6], CuXVII–CuXIX (CuXVII:  $3s^2 3p, d\text{--}3s^2 4d, f$ ; CuXVIII:  $3p^2 P) 3d\text{--}3p^2 P) 4f, 3p^2\text{--}3s 4f, 3s 3p\text{--}3s 4d$ , CuXIX:  $3d\text{--}4p$ ), во втором — только NeCu. Остальные особенности на спектрограммах принадлежат излучению в высших порядках дифракции.

### Калибровка пропускающей решетки

Результаты калибровки пропускающей решетки за различными фильтрами представлены на рис. 3. Статистическая обработка спектрограмм для различных длин волн дала следующие отношения интенсивностей: для  $\lambda \sim 12 \text{ \AA}$   $I_2/I_1 = 0.244$ ,  $I_3/I_1 = 0.087$ ,  $I_4/I_1 = 0.04$ ,  $I_5/I_1 = 0.035$ ; для  $\lambda \sim 50 \text{ \AA}$   $I_2/I_1 = 0.25$ . Для сравнения приведем теоретические значения отношений  $\eta_m/\eta_1$ , которые, следуя [1], составляют 0.25, 0, 0.062 и 0.04 соответственно. Эти отношения наиболее близко соответствуют решетке с  $\delta/d = 1/3$ .

Результаты калибровки решетки монохроматическим излучением представлены на рис. 4. Соотношения интенсивностей  $\eta_m/\eta_1$  для различных длин волн составили для  $\lambda = 11.7 \text{ \AA}$   $I_2/I_1 = 0.44$ ,  $I_3/I_1 = 0.18$ ,  $I_4/I_1 = 0.1$ ,  $I_5/I_1$  — на уровне шумов пленки; для  $\lambda = 52 \text{ \AA}$   $I_3/I_2 = 0.32$ ,  $I_4/I_2 = 0.22$ ,  $I_5/I_2 = 0.17$ . Можно видеть, что во всех трех случаях присутствует “запрещенный” третий порядок дифракции. Обращает на себя внимание и тот факт, что значения отношения  $\eta_m/\eta_1$ , измеренные в монохроматическом излучении на длине волны  $\lambda = 11.7 \text{ \AA}$ , завышены в 1.8–2.5 раза по сравнению со значениями, измеренными за фильтрами без использования монохроматора. Поскольку монохроматизация излучения значительно уменьшает светосилу прибора, то в данном эксперименте не удалось достигнуть высокого уровня почернений фотопленки и тем самым обеспечить необходимую точность измерений из-за недостаточно высокой точности калибровки последней в области малых почернений. Это предположение подтверждается и тем фактом, что относительная погрешность растет с уменьшением интенсивности. При измерениях на длине волны  $\lambda = 52 \text{ \AA}$  не удалось разрешить первый порядок дифракции из-за перекрытия его излучения оптическим

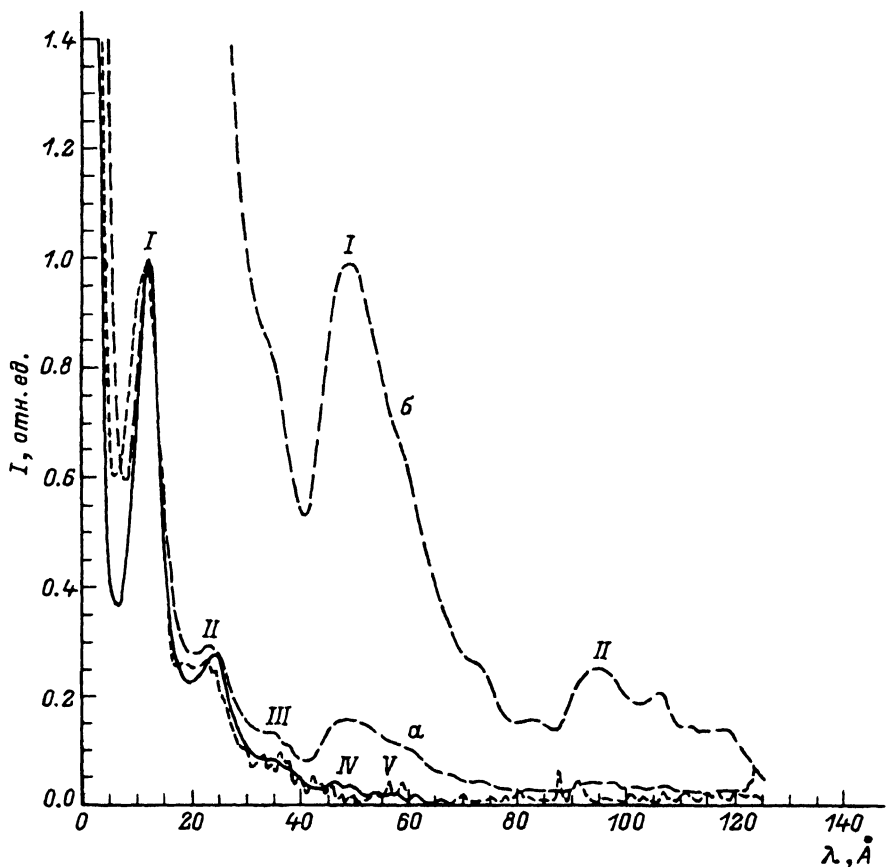


Рис. 3. Распределение интенсивности излучения в различных порядках дифракции (I-V), измеренное за различными фильтрами.

Сплошная линия — алюминий 1 мкм, пунктир — бериллий 25 мкм; а — алюминий 0.1 мкм, напыленный на лавсан 4 мкм; б — увеличенный по амплитуде фрагмент кривой а. На первых двух кривых доминирует излучение NeCu с  $\lambda \sim 12 \text{ \AA}$ , на кривой а дополнительно присутствует излучение ионов CuXI-CuXIX с  $\lambda \sim 44-70 \text{ \AA}$  (окно прозрачности углерода).

излучением, дифрагировавшим на щели решетке. Однако относительная погрешность при определении отношений  $\eta_m/\eta_2$  для различных  $m$  составила 10–30%. Это свидетельствует о том, что существует принципиальная возможность калибровки решеток монохроматическим излучением на данном источнике. При этом необходимо выполнить одно из нескольких независимых условий: а) проводить измерения с более тонкими фильтрами или в более длинноволновой области рентгеновского спектра; б) использовать приборы, нечувствительные к оптическому излучению; в) повысить точность калибровки фотопленки в области почернений  $D \sim 0.1-0.5$ . Однако эксперименты показали, что в нашем случае самым простым и дающим наибольшую точность является метод, основанный на выделении известных групп линий с помощью оптимального подбора фильтров.

В заключение сопоставим результаты спектральных, измерений, выполненные на малоиндуктивной вакуумной искре, с результатами,

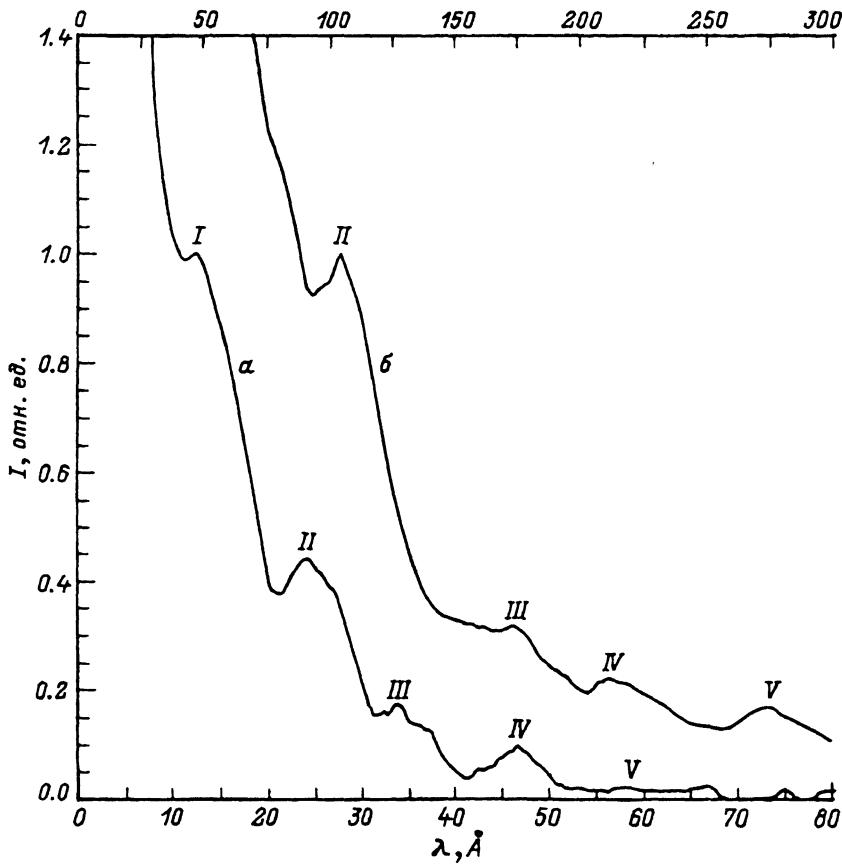


Рис. 4. Распределение интенсивности излучения в различных порядках дифракции (I–V), полученное с помощью монохроматического излучения на различных длинах волн.

$\lambda, \text{Å}$ : а — 11.7, фильтр — алюминий 1 мкм (нижняя шкала); б — 52, без фильтра (верхняя шкала).

полученными на лазерной установке “Мишень” с помощью спектрографа на пропускающей дифракционной решетке. Установка “Мишень” имела следующие параметры: энергия излучения в импульсе длительностью  $\tau \sim 2$  нс составляла 100–200 дЖ,  $\lambda = 1.054$  мкм, плотность мощности излучения на поверхности мишени  $10^{13} - 10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup>. В качестве мишени использовались напыленные на лавсановую подложку медные слои с толщиной 0.025–0.8 мкм. Диаметр напыленного слоя варьировался от 0.3 до 3 мм (размер фокального пятна 0.25 мм). Можно видеть, что спектры излучения плазмы меди, возбуждаемой с помощью лазерного излучения и зарегистрированные без фильтра на фотопленку УФ-ШС [7], практически совпадают с показаниями на рис. 2, в. О существенно меньшей доле энергии, излучаемой лазерной плазмой в оптическом диапазоне на  $\lambda \sim 2000 \text{ Å}$ , можно судить по отсутствию на спектрограмме соответствующих линий, что связано с малым временем процесса и, как следствие, с малым временем пребывания ионов в состоянии с низкой энергией.

Исследования, проведенные с помощью пропускающей дифракционной решетки на малоиндуктивной вакуумной искре, показали, что значительная доля излучения сосредоточена в линиях CuII ( $\lambda \sim 2000-3000 \text{ \AA}$ ), CuXI-CuXVI ( $\lambda \simeq 40-70 \text{ \AA}$ ), а также NeCu ( $\lambda \sim 12 \text{ \AA}$ ).

В результате калибровки пропускающей решетки выявлено пять порядков дифракции и установлено количественное соотношение между ними. Показано существование "запрещенного" третьего порядка. Указывается на необходимость использования на данном плазменном источнике оптических фильтров при проведении интегральных во времени спектральных измерений в рентгеновском диапазоне. Показано, что результаты калибровки решетки, полученные в монохроматическом излучении за оптическим фильтром на длине волны  $\lambda = 11.7 \text{ \AA}$ , завышены в 1.8-2.5 раза по сравнению со значениями, измеренными за фильтрами без использования монохроматора. Причина расхождения состоит в недостаточно высокой точности калибровки фотопленок в области почернений  $D \sim 0.1-0.5$ . Ограниченная светосила прибора не позволила провести измерения с оптическим фильтром на длине волны  $\lambda = 52 \text{ \AA}$ , поэтому при измерениях не удалось разрешить первый порядок дифракции из-за перекрытия его излучения оптическим излучением, дифрагировавшим на щели решетки.

Показано, что спектры излучения плазмы меди, возбуждаемой с помощью лазерного излучения и зарегистрированные без фильтра, практически совпадают со спектрами плазмы микропинча в диапазоне  $\lambda \sim 12-70 \text{ \AA}$ .

Замечено, что начиная с некоторого угла распределение оптического излучения  $I(\lambda)$  начинает сдвигаться по шкале длин волн (линейно связанной с пространственной шкалой) в коротковолновую область и при угле  $72.6^\circ$  достигает вполне определенного значения.

Авторы благодарят С.В. Ильину за помощь в обработке и оформлении результатов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№ 93-0215547).

### Список литературы

- [1] Басов Н.Г., Захаренков Ю.А., Рупасов А.А. и др. Диагностика плотной плазмы. М.: Наука, 1989. 368 с.
- [2] Каргин И.А., Котельников Д.С., Миронов Б.Н. и др. // Физика плазмы. 1992. Т. 18. № 4. С. 514-516.
- [3] Аглицкий Е.В., Витрее В.В., Гулов А.В. и др. Спектроскопия многозарядных ионов в горячей плазме. М.: Наука, 1991. 206 с.
- [4] Дедова О.Л., Миронов Б.Н. // Физика плазмы. 1994. № 1. С. 95-97.
- [5] Стриганов А.Р., Светицкий Н.С. Таблицы спектральных линий нейтральных и ионизованных атомов. М.: Атомиздат, 1966. 899 с.
- [6] Khan M.A. // J. Opt. commun. 1978. Vol. 27. N 2. P. 242-246.
- [7] Болотин В.А., Гаврилов В.В., Гольцов А.Ю. и др. // ЖТФ. 1993. Т. 63. Вып. 10. С. 103-110.