

АБСОЛЮТНАЯ КАЛИБРОВКА ВАКУУМНОГО МОНОХРОМАТОРА
В ДИАПАЗОНЕ 15-160 НМ В ПУЧКЕ СИНХРОТРОННОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ

Ю. М. Александров, Е. Ф. Гишпиус, В. Н. Колесников,
Н. В. Дунин, В. Н. Махов, Т. И. Сырейщикова,
И. С. Шпигель, М. Н. Якименко

УДК 535.247

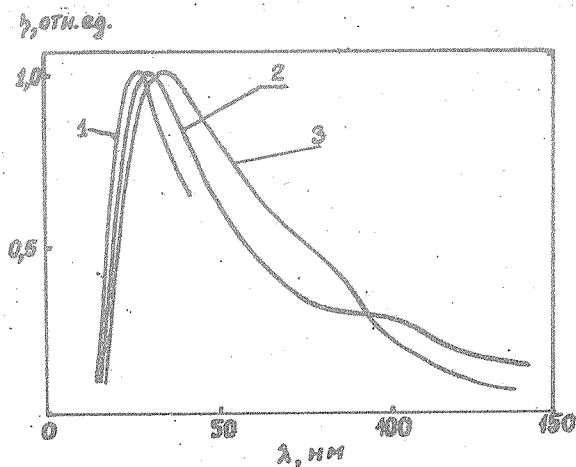
Осуществлена абсолютная калибровка спектральной чувствительности монохроматора ЛНТ-30 с голографической решеткой на синхротроне ФИАН С-60. Калибровка показала высокую эффективность монохроматора во всем рабочем диапазоне и его пригодность для измерения интенсивностей линий основных примесей в плазме стелларатора Л-2.

Для изучения процессов переноса в замкнутых магнитных ловушках горячей плазмы необходима информация об ионном составе примесей, их абсолютной концентрации, распределении в пространстве и поведении во времени. Помимо этого, эти данные позволяют найти такие важные характеристики плазмы, как локальный эффективный заряд ионов и радиационные потери энергии. Предварительные исследования спектров излучения плазмы стелларатора Л-2 /1/ показали, что основными примесями являются углерод и кислород /2/. Кратность ионизации атомов этих примесей нарастает до максимальной в центральной зоне плазмы. Отмечено также присутствие ионов железа. Наиболее интенсивные линии всех этих ионов, по которым ведутся измерения, лежат в области спектра короче 150 нм. Поэтому для детального исследования примесей в плазме стелларатора Л-2 была создана измерительная система на базе вакуумного монохроматора ЛНТ-30 фирмы Кобен-Ивон.

В этом монохроматоре применена оптическая схема с углом падения 71° и сканированием длин волн простым поворотом решет-

ки, аналогичная схеме Сейя-Намиока, а его конструкция допускает вертикальное расположение плоскости дисперсии. Такое расположение монохроматора позволяет улучшить пространственное разрешение при многоордových измерениях интенсивностей излучения плазмы стелларатора. Используемая тороидальная голографическая решетка с платиновым покрытием обеспечивает рабочий диапазон от 15 нм до 160 нм. По паспортным данным монохроматор имеет нулевой астигматизм и исправлен на кому; относительное отверстие 1:10; пропускание монохроматора в области 30 нм превышает 10%. На рис. 1 показан типовой относительный ход эффективности монохроматора ЛНТ-30. В качестве приемников излучения мы применяли ВЭУ-2 или экраны с осажденным солицилатом натрия и ФЭУ-84.

Задачей работы являлась калибровка абсолютной спектральной чувствительности измерительной системы во всем рабочем интервале.



Р и с. 1. Относительная спектральная чувствительность измерительной системы. 1 — типовая эффективность монохроматора ЛНТ-30; 2 — чувствительность системы с экраном, покрытым солицилатом натрия, и ФЭУ-84 в качестве приемника излучения; 3 — чувствительность системы с ВЭУ-2

Обычно применяемый при абсолютной калибровке метод пар линий /3/ обладает рядом недостатков, главными из которых являются сравнительно редкое и неравномерное расположение в ВУФ области, подходящих для калибровки линий, трудность сопряжения поля зрения монохроматоров вакуумного и видимого диапазонов, а также, как правило, сравнительно низкая точность, с которой известны вероятности переходов.

Этих трудностей можно избежать при использовании синхротронного излучения (СИ), интенсивность которого легко рассчитывается, если известны число электронов на орбите, их энергия и напряженность магнитного поля.

Калибровка проведена на ускорителе ФИАН С-60, являющемся источником СИ в широком спектральном диапазоне /4/. Максимальная энергия электронов в ускорителе — 577 МэВ. Радиус кривизны орбиты — 2 м. Монохроматор помещался на расстоянии 9 м от излучающей точки орбиты электронов и был расположен так, что щели монохроматора (с размерами 0,5х6 мм) и штрихи решетки были ориентированы горизонтально, а положение входной щели соответствовало максимуму углового распределения интенсивности СИ. Сигнал с ФЭУ-84 или ВЭУ-2 подавался на регистрирующую систему, аналогичную используемой в другом эксперименте /5/, и измерялся аналого-цифровым преобразователем с точностью лучше 1%. В каждом цикле ускорителя производилось измерение в одной точке спектра в момент времени, соответствующий плато магнитного поля, то есть максимальной энергии ускорителя. Одновременно с помощью измерителя циркулирующего тока (точность измерений составляет около 1%) измерялось число электронов на орбите. Между циклами происходили сдвиг к другой точке спектра и вывод на печать величины сигнала с ФЭУ или ВЭУ, нормированной на число электронов на орбите. Интервалы между точками спектра составляли 0,5 нм.

Измерения были проведены с тремя различными экранами и двумя экземплярами ВЭУ.

Было отмечено, что освещаемая СИ часть поверхности решетки очень быстро повреждается (темнеет) /6/, при этом за суммарное время экспозиции около 3 часов при стандартном режиме работы ускорителя сигнал падает вдвое. Однако чрезвычайно важно, что

снижение абсолютной величины сигнала не сопровождается изменением относительного хода его по спектру. Относительные распределения сигналов по спектру в диапазоне 15–160 нм, полученные с разными экранами и в разное время, хорошо согласуются между собой. Аналогичный результат был получен и при работе с ВЭУ. Найденные по этим данным относительные распределения спектральной чувствительности нашей измерительной системы (при использовании экранов и ВЭУ в качестве приемников излучения) приведены на рис. 1. Различие между ними определяется эффективным квантовым выходом фотокатода ВЭУ.

Поскольку поврежденная поверхность решетки составляет лишь 1% ее рабочей площади, то можно считать, что проведенная калибровка характеризует эффективность системы при работе с полностью заполненной апертурой монохроматора. При этом, разумеется, пренебрегается ошибкой из-за непостоянства эффективности решетки по ее поверхности. В /3/, однако, отмечено, что голографические решетки обладают хорошей однородностью эффективности и поэтому эта ошибка невелика.

Абсолютная спектральная чувствительность измерительной системы, т.е. отношение между величиной сигнала на выходе приемника, часто выражаемой в числе электронов, и числом падающих на дифракционную решетку фотонов, рассчитывается с учетом геометрии и условий измерений. Точный теоретический расчет потока фотонов СИ на решетку не представляет трудностей /7/. Известно, что колебания электронов на орбите приводят к заметной погрешности при вычислении потока для коротких длин волн СИ (так, для $\lambda = 10$ нм она составляет около 10%). Однако одновременное с калибровкой монохроматора измерение формы электронного сгустка с помощью системы контроля параметров ускоренного сгустка помогает свести эту погрешность к минимуму /8/.

Используемая в ЛНТ-30 голографическая решетка обладает, как указано в /9/, лучшей концентрацией света в первом порядке, чем нарезная, что сводит к минимуму погрешность в калибровке из-за наложения порядков.

Следует отметить, что СИ является поляризованным, тогда как монохроматор предполагается использовать для работы с неполяризованным излучением плазмы стелларатора. Поляризационные свойства нарезных решеток (в видимой области) исследовались

в /Ю/, где было показано, что в первом порядке спектра коэффициент отражения решетки очень слабо зависит от поляризации излучения. Поэтому можно считать, что результатами проведенной калибровки можно пользоваться и при работе с неполяризованным излучением.

При вычислении абсолютной спектральной чувствительности использовались численные данные, соответствующие начальным измерениям, т.е. измерениям с еще неповрежденной поверхностью решетки. Было получено, что максимумы кривых на рис. 1 соответствуют абсолютной спектральной чувствительности $(1,5 \pm 0,3) \cdot 10^3$ эл/фотон для экрана и ФЭУ-84 при рабочем напряжении 2,25 кВ и $(1,3 \pm 0,3) \cdot 10^2$ эл/фотон для ВЭУ-2 при рабочем напряжении 3,5 кВ. Последняя цифра увеличивается приблизительно в 20 раз при переходе к рабочему напряжению 5,0 кВ.

Вычисления величины ожидаемого сигнала при работе на стеллараторе Л-2 с учетом геометрических факторов и сравнение с полученными значениями абсолютной чувствительности показывают, что система вполне пригодна для исследования примесей в плазме стелларатора Л-2.

Поступила в редакцию
2 декабря 1980 г.

Л и т е р а т у р а

1. Э. Д. Андрикина, М. С. Бережецкий и др., Препринт ФИАН № 154, М., 1977 г.
2. Е. Ф. Гишциус, Н. В. Дунин, В. М. Тийт, Материалы Всесоюзного семинара по физике вакуумного излучения (ВУФ-78), с. 19. Изд. ЛГУ, Ленинград, 1978 г.
3. А. Н. Зайдель, Е. Я. Шрейдер, Вакуумная спектроскопия и ее применения. "Наука", М., 1976 г.
4. В. М. Мороз, В. А. Петухов, М. Н. Якименко, Труды III Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т. I, стр. 31. Изд. "Наука", М., 1973 г.
5. Ю. М. Александров, В. Н. Колобанов, В. Н. Махов, Р. Ф. Федорчук, М. Н. Якименко, Препринт ФИАН № 164, М., 1979 г.

6. W. Gudat, G. Kunz, Synchrotron Radiation, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New-York, 1979, p. 80.
7. Ю. М. Александров, М. И. Благоев, В. Н. Махов, В. А. Мурашова, Г. С. Пашенко, Т. И. Сырейщикова, Р. В. Федорчук, Р. Г. Хазизов, Л. Е. Шубин, М. Н. Якименко, Препринт ФИАН № 138, М., 1975 г.
8. В. Н. Махов, Г. С. Пашенко, М. Н. Якименко, Краткие сообщения по физике ФИАН № 5, 15 (1977).
9. Diffraction gratings ruled and holographic. Handbook Jobin Yvon, 1979.
10. H. R. Sanchez, M. C. Simon, J. M. Simon, J. Opt. Soc. Amer., 66, 1055 (1976).