

ИЗМЕРЕНИЕ АБСОЛЮТНЫХ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ РЕНТГЕНОВСКОГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ С ПОМОЩЬЮ ПЛОСКИХ КРИСТАЛЛОВ

К. Гетц <sup>\*)</sup>, М. П. Калашников, Ю. А. Михайлов, М. Рабольд <sup>\*)</sup>,  
А. В. Роде, Г. В. Склизков, С. И. Федотов, Э. Ферстер <sup>\*)</sup>,  
П. Паумзайль <sup>\*)</sup>

УДК 621.039.66:537.531 + 621.039.64

В работе измерены кривые отражения идеальных плоских кристаллов кремния и кварца; разработана методика измерения абсолютного значения линейчатого рентгеновского излучения плазмы с помощью плоских кристаллов и определены параметры плотной лазерной плазмы по этой методике.

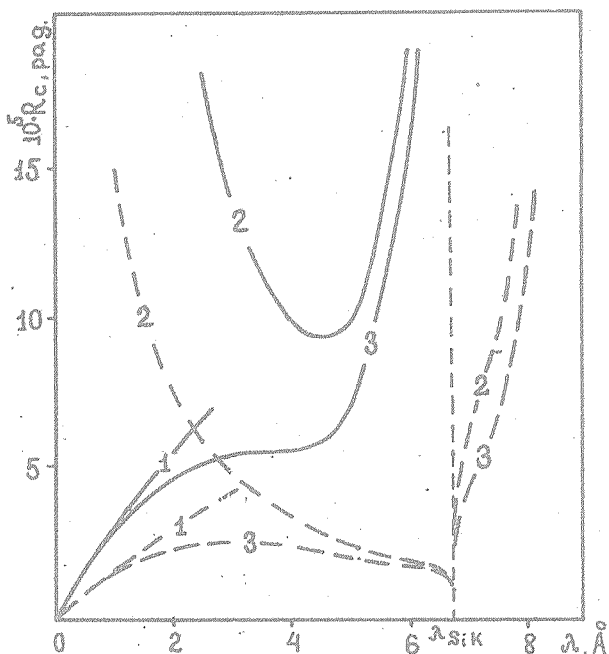
Измерение абсолютной величины рентгеновского излучения лазерной плазмы необходимо как для рассмотрения энергетического баланса поглощенной и излученной плазмой энергии, так и для измерения электронной плотности лазерной плазмы /1,2/. Число рентгеновских квантов в спектральной линии необходимо знать также при калибровке рентгеновских детекторов и при диагностике плазмы по самопоглощению спектральных линий или по комбинационному рассеянию рентгеновских квантов /3,4/.

Определение отражательных свойств кристаллов кремния и кварца

Кривая отражения получается, если на кристалл направить монохроматическое и коллимированное рентгеновское излучение и измерить отношение отраженного излучения к падающему. Для непосредственных измерений кривой отражения используется многокристальный дифрактометр, с помощью которого удается добиться хорошей монохроматичности и коллимации /5/.

<sup>\*)</sup> Иенский Университет им. Ф. Шиллера, ГДР.

На рис. I представлены рассчитанные по динамической теории рассеяния рентгеновских лучей интегральная отражательная способность для кремния ( $Si - 111$ ) и кварца ( $SiO_2 - 10\bar{1}0$ ). Различные



Р и с. I. Расчетная интегральная отражательная способность для рефлексов кремния ( $111$ ) (сплошные линии) и кварца ( $10\bar{1}0$ ) (пунктир) 1 - совершенный кристалл без поглощения (приближение Дарвина); 2 - мозаичный кристалл; 3 - совершенный кристалл с поглощением

кривые иллюстрируют различное соотношение величин поглощения и первичной экстинкции излучения <sup>\*)</sup>. На рис. I видно, что интегральная отражательная способность для малых длин волн близка к отражательной способности идеального кристалла без поглощения,

<sup>\*)</sup> Под первичной экстинкцией здесь понимается ослабление потока за счет дифракционного рассеяния на кристаллической решетке /6/.

а при больших длинах волн несовершенство кристалла слабо влияет на интегральную отражательную способность.

Для количественной оценки отражательной способности, исходя из интересующего нас спектрального диапазона, были выбраны монокристаллы кварца без дислокаций. Измерения проводились на двухкристалльных дифрактометрах в Университете им. Ф. Шиллера, г. Йена и в Университете им. К. Маркса, г. Лейпциг, в спектральном диапазоне  $0,7 + 5,4 \text{ \AA} / 7/$ .

Измеренная интегральная отражательная способность должна сравниваться с теоретическим значением, в которое введена поправка на поляризацию, так как на второй, контролируемый, кристалл двухкристалльного дифрактометра падает частично поляризованное излучение, отраженное от первого кристалла.

В пределах ошибки измерений, которая меньше 10%, значения интегральной отражательной способности и полуширины кривой отражения для двукратного отражения совпадают со значениями, рассчитанными по динамической теории для однократного отражения совершенных кристаллов /8/. По этой причине измеренные параметры на двухкристалльном дифрактометре можно использовать для однократного отражения на совершенном кристалле.

Измерение абсолютных интенсивностей линейчатого рентгеновского излучения из плазмы

Число фотонов  $N_{\Gamma}$ , излученных источником в интервале длин волн  $\lambda_{\min} + \lambda_{\max}$ , отраженных от плоского идеального кристалла и пришедших на фотопленку, может быть получено интегрированием спектральной линии

$$N_{\Gamma} = \frac{4\pi I^2}{R^2} \frac{\text{tg}\theta}{\lambda} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} I(\lambda) d\lambda.$$

Здесь  $l$  (расстояние от источника до пленки) и  $\text{tg}\theta/\lambda$  появляются из-за того, что интегрирование проводится по координате на фотопленке /7/.

Рассмотренная методика измерения абсолютных интенсивностей применена в экспериментах по нагреву плазмы на установке "Дельфин" /2/.

Излучение предварительных линейных каскадов усиления с энергиями 20-60 Дж, длительностью 2,5 нс и расходимостью  $\sim 10^{-4}$  рад фокусировалось на плоскую мишень из алюминия. Средняя плотность потока излучения  $\bar{q} \approx 10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup> обеспечивала значение электронной температуры плазмы 0,3-0,9 кэВ.

В табл. I представлены определенные из спектрограмм абсолютные интенсивности спектральных линий в квантах и мощность излучения в ваттах.

Таблица I

Спектральный переход	Абсолютная интенсивность, кванты	Мощность излучения, Вт
$2p^2 \ ^2P_{1/2,3/2} - 1s^2 \ ^2S_{1/2}$	$4,6 \cdot 10^{13}$	$4,9 \cdot 10^6$
$2p^2 \ ^1D_2 - 1s2p \ ^1P_1$	$4,1 \cdot 10^{12}$	$4,3 \cdot 10^5$
$1s^2 \ ^1S_0 - 1s2p \ ^1P_1$	$6,3 \cdot 10^{13}$	$6,3 \cdot 10^6$
$1s2p \ ^3P_1 - 1s^2 \ ^1S_0$	$3,7 \cdot 10^{13}$	$3,7 \cdot 10^6$
$1s2p^2 \ ^2D_{3/2,5/2} - 1s^2 2p \ ^2P_{1/2,3/2}$	$2,2 \cdot 10^{13}$	$2,6 \cdot 10^6$

Возможность применения результатов измерений абсолютных интенсивностей для определения параметров плазмы оценим, сравнивая значения электронной плотности, полученные с помощью данной методики и из других спектроскопических методик.

В табл. 2 приведены значения электронной плотности, полученные из отношения интенсивностей резонансной и интеркомбинационной линии He-подобного иона ( $N_e^\alpha$ ), а также значения электронной плотности, полученные из вычисления числа квантов в резонансной линии Al XII ( $N_e^{\text{He}}$ ) и в резонансной линии Al XIII ( $N_e^{\text{H}}$ ).

Таблица 2

Метод	$N_e^\alpha$	$N_e^{\text{He}}$	$N_e^{\text{H}}$
Электронная плотность, см <sup>-3</sup>	$2 \cdot 10^{20}$	$1,6 \cdot 10^{20}$	$1,8 \cdot 10^{20}$

Эти данные демонстрируют удовлетворительное совпадение результатов и эффективность предлагаемой методики определения параметров плазмы. Необходимо отметить, что уточнение метода оценки плотности может быть достигнуто в результате измерений абсолютных интенсивностей с временным и пространственным разрешением, которые позволили бы уточнить теоретическую картину рентгеновской эмиссии из плазмы.

Рассмотренный метод регистрации абсолютных интенсивностей рентгеновского излучения используется в исследованиях на установке "Дельфин", а соответствующая рентгеноспектральная аппаратура является частью диагностического комплекса.

Поступила в редакцию  
16 июня 1980 г.

## Л и т е р а т у р а

1. N. G. Basov et. al., *Laser Interaction and Related Plasma Phenomena*, vol. 4A, p. 479, Plenum press, New-York, 1977.
2. N. G. Basov et. al., *Laser Interaction and Related Plasma Phenomena*, vol. 4A, p. 15, Plenum press, New-York, 1977.
3. А. В. Виноградов, И. И. Собельман, Е. А. Юков, *Квантовая электроника*, 1, 268 (1974).
4. А. А. Кологривов и др., *Квантовая электроника*, 2, 2223 (1975).
5. E. Bubakova, Y. Drahokoupil, A. Fingerland, *Czech. J. Phys.*, B12, 764 (1962).
6. A. Burek, *Space Sci. Instrum.*, 2, 53 (1976).
7. К. Гетц и др., *Препринт ФИАН № 127*, 1979 г.
8. З. Г. Пинскер, *Динамическое рассеяние рентгеновских лучей в идеальных кристаллах*, "Наука", М., 1974 г.