

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ АБСОЛЮТНЫХ НАСЕЛЕННОСТЕЙ
УРОВНЕЙ He и He⁺ В ПЛАЗМЕ ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА

М. А. Мазинг, В. А. Слемзин

При исследовании состояния равновесия в плазме большой интерес представляет анализ населенностей уровней атомов и ионов и их зависимости от параметров плазмы. Если плотность заряженных частиц достаточно велика, так что заселение и распад уровней обусловлены столкновительными процессами, наиболее важна зависимость населенностей уровней от плотности электронов N_e .

В настоящей работе получены абсолютные населенности уровней HeI и HeII в импульсном разряде в чистом He при давлении 3–12 тор и исследована их зависимость от N_e в интервале $2 + 7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ при электронной температуре $kT_e \approx 3 \text{ эв}$. Абсолютные населенности определены путем сравнения интенсивностей линий I_λ с интенсивностью рекомбинационно-тормозного спектра плазмы в их окрестности $\Delta I_c(\lambda)$. Непрерывный спектр, который излучается одновременно с линиями из одного объема и регистрируется в том же спектральном интервале, играет роль внутреннего стандарта излучения, поскольку его интенсивность может быть надежно рассчитана по независимо измеренным N_e и kT_e . При этом устраняются многие трудности, обычно возникающие при калибровке с помощью независимых эталонных источников типа ленточной вольфрамовой лампы, в том числе отпадает необходимость в самой процедуре калибровки.

Пользуясь известными выражениями для I_λ и $\Delta I_c(\lambda) / I_c$, нетрудно получить соотношение, которое позволяет определять населенность верхнего уровня данной линии (на единицу статистического веса) по непосредственно измеренному отношению интенсивности линии к интенсивности участка непрерывного спектра:

$$n_k = \frac{N_k}{\epsilon_k} = B \frac{N_c^2}{(kT_e)^{3/2}} \frac{\epsilon_\lambda}{\epsilon_k A_{km}} \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \frac{I_\lambda}{\Delta I_c(\lambda)}. \quad (1)$$

Здесь ϵ_k - статистический вес уровня, A_{km} - вероятность перехода, соответствующего линии λ , $\Delta\lambda$ - выделяемый участок не-

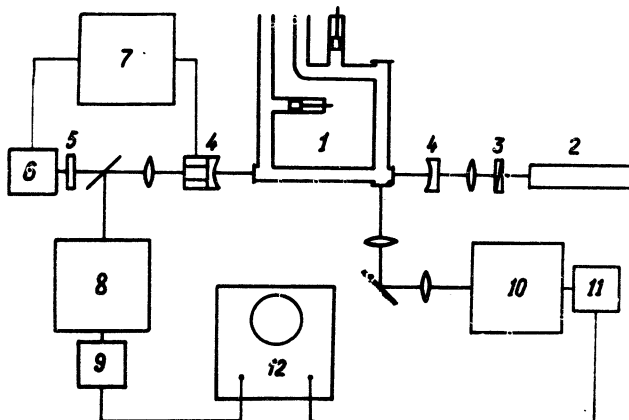


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 - разрядная трубка, 2 - лазер, 3 - пластинка $\lambda/4$, 4 - зеркала интерферометра, 5 - фильтр, 6 и 9 - ФЭУ интерферометра, 7 - схема стабилизации, 8 - монохроматор УМ-2, 10 - монохроматор ДМР-4, 11 - фотоприемник.

прерывного спектра (с центром в λ), B - постоянная, выражаемая через атомные константы. Расчетный коэффициент излучения непрерывного спектра ϵ_λ в данном случае представляет собой сумму коэффициентов свободно-свободных ϵ_λ^{ff} и свободно-связанных ϵ_λ^{fb} переходов электронов в поле ионов He^+ :

$$\epsilon_\lambda = \frac{kT_e}{kT_e} \epsilon_\lambda^{ff} + \epsilon_\lambda^{fb}. \quad (2)$$

Величины ϵ_λ^{ff} и ϵ_λ^{fb} для исследуемой области спектра 469-2200 нм были рассчитаны по квазиклассическим формулам с гаунтовским фактором $/I/$.

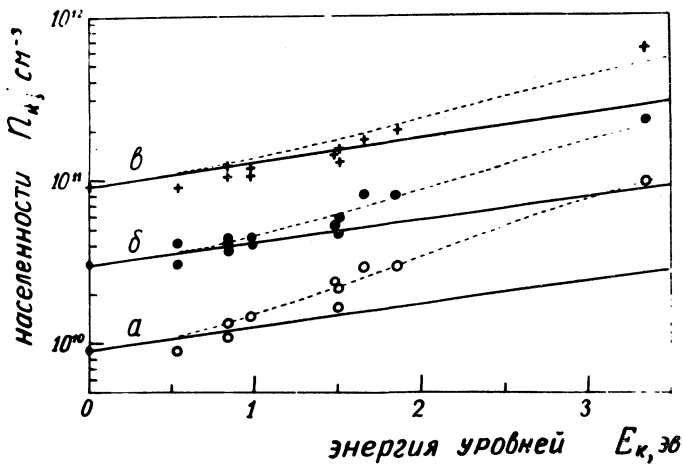
Схема экспериментальной установки изображена на рис. 1. Плазма образовывалась в результате разряда конденсатора емкостью

150 мкф, заряжаемого до напряжения 2 кв, в кварцевой трубке Г-образной формы (размеры сторон 100 и 150 мм, внутренний диаметр 10 мм), заполненной спектрально чистым гелием до давления 3, 6 и 12 тор. Плотность электронов, а также распределение ее по радиусу определялись лазерным интерферометром ($\lambda = 632,8 \text{ нм}$) /2/. Исследуемые участки непрерывного спектра вместе с линиями сканировались монохроматором ДМР-4 от импульса к импульсу по точкам с шагом порядка аппаратной ширины (23 - 150 Å). В качестве приемников излучения использовались: в области 469 - 1100 нм - ФЭУ-62, в области 1800 - 2200 нм - фоторезистор Ge-Au. Сигналы интерферометра и приемника излучения регистрировались на двухлучевом осциллографе СИ-17. Все измерения производились в квазистационарной части импульса тока в моменты достижения максимума интенсивности излучения (65 - 75 мксек в зависимости от давления газа при общей длительности импульса порядка 150 мксек). Электронная температура определялась по отношению интенсивностей линий 468,6 нм HeII и 471,3 нм HeI (при этом использовались результаты работы /3/), а также по отношению интенсивностей этих линий к интенсивности непрерывного спектра в их окрестности. С учетом неоднородности плазмы в пределах области $r \leq 2 \text{ мм}$, из которой регистрировалось излучение, точность определения N_e составила около 15%, точность значений kt_e - 0,1 эв.

В таблице I указаны параметры исследованных линий и соответствующих верхних уровней HeI и HeII. Экспериментальные величины населенностей уровней HeI n_k приведены на рис. 2 в виде функции от энергии уровней E_k , отсчитанной от границы ионизации. Значения N_e , соответствующие этим данным, при давлении 3, 6 и 12 тор были равны 2,4, 4,4 и $7,3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $kt_e = 3,1, 3,0$ и 2,9 эв. Вычисленный по этим значениям с помощью уравнений Саха и Больцмана ход равновесных по отношению к ионизационному континууму населенностей обозначен сплошными линиями. Погрешность в величинах экспериментальных населенностей не превышает обычной в подобных случаях величины в 35-40%.

Населенности возбужденных уровней HeI при всех значениях N_e превосходят соответствующие равновесные по отношению к континууму значения. Величина отклонения от равновесия растет с энергией E_k (т.е. с уменьшением главного квантового числа) и

λ , нм	Верхний уровень	E_k , эВ
HeI 438,8	5^1D	0,54
HeI 447,1	4^3D	0,85
HeI 492,1	4^1D	0,85
HeI 471,3	4^3S	0,99
HeI 501,6	3^1P	1,49
HeI 587,6	3^3D	1,51
HeI 667,8	3^1D	1,51
HeI 728,1	3^1S	1,66
HeI 706,5	3^3S	1,86
HeI 2058,2	2^1P	3,35
HeII 468,6	4	
HeII 1012,3	5	



Р и с. 2. Населенности уровней HeI. а - при давлении 3 тора, б - при давлении 6 тор, в - при давлении 12 тор.

падает с ростом N_e . В целом ход экспериментальных населенностей может быть описан выражением

$$n_k = n_k^{\text{равн}} \left(1 + \frac{A(E_k)}{N_e} \right). \quad (3)$$

Коэффициенты $A(E_k)$ монотонно возрастают с увеличением E_k , причем на границе ионизации $A(0) = 0$ (пунктирные кривые на рис. 2). Качественно подобная картина соответствует случаю, описанному в /4/ с помощью диффузионной модели заселения и наблюдавшимся ранее распределениям населенностей уровней атомов инертных газов и водорода в дуговом разряде /5-7/. В частности, в /5/ был сделан вывод о достижении равновесия возбужденных уровней атома гелия с континуумом в плазме с $N_e \sim 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Из полученных нами данных следует, что при таких плотностях в равновесии с континуумом находятся только уровни с главным квантовым числом $n \geq 3$. Полное термодинамическое равновесие, включающее уровни с $n = 2$, достигается, вероятно, при $N_e \geq 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Отметим, что полученная экспериментально зависимость населенностей от плотности электронов дает дополнительную информацию, которую можно использовать для оценки эффективной скорости рекомбинации /4/.

Таблица 2

P, тор	$N_e, 10^{16}$	n_4	n_4^B	n_5	n_5^B
3	2,1	$1,5 \cdot 10^8$	$9,5 \cdot 10^8$	$1,1 \cdot 10^8$	$6,4 \cdot 10^8$
6	4,0	$3,5 \cdot 10^8$	$1,0 \cdot 10^9$	$2,0 \cdot 10^8$	$6,7 \cdot 10^8$
12	6,8	$4,2 \cdot 10^8$	$9,2 \cdot 10^8$	$2,9 \cdot 10^8$	$6,1 \cdot 10^8$

В таблице 2 приведены населенности уровней $n = 4$ и 5 HeII, полученные, как и ранее, с помощью (I), и соответствующие значения N_e (электронная температура оставалась прежней). Здесь же даны равновесные по отношению к основному состоянию ионов HeII населенности n^B , вычисленные по уравнению Больцмана. Указанные уровни HeII в 2-6 раз недозаселены по отношению к основному состоянию, однако между собой находятся в равновесии, соответствующем электронной температуре. Подобное отклонение от равнове-

сия, по-видимому, можно объяснить влиянием резонансных оптических переходов в присутствии частичного самопоглощения резонансного излучения /3/.

Авторы приносят глубокую благодарность И. Л. Бейгману, Л. А. Вайнштейну и Л. П. Преснякову за обсуждение результатов.

Поступила в редакцию

12 февраля 1973 г.

Л и т е р а т у р а

1. Методы исследования плазмы (под ред. В. Лохте-Хольтгрёвена). Изд. "Мир", Москва, 1971., Гл. I.
2. В. В. Коробкин, А. А. Малютин, М. Я. Шелев. ПТЭ, 2, 223 (1967).
3. R. Mewe. Brit. J. Appl. Phys., 18, 107 (1967).
4. В. С. Воробьев. ЖЭТФ, 51, 327 (1966).
5. В. Н. Кслесников. Труды ФИАН, 30, 66 (1964).
6. В. Я. Александров, Д. Б. Гуревич, И. В. Подмошенский. Оптика и спектр., 26, 36 (1969).
7. C. C. Hwang. Journ. Quant. Sp. Rad. Tr., 12, 783 (1972).