

УДК 537.525.1 : 546.293

ИНТЕНСИВНОСТЬ НЕПРЕРЫВНОГО СПЕКТРА ПОГЛОЩЕНИЯ (ИЗЛУЧЕНИЯ) ПЛАЗМЫ АРГОНА ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ

Гаврилов В. Е., Гаврилова Т. В., Федорова Т. Н.

Описана методика диагностирования и приведены результаты измерений спектрального показателя непрерывного поглощения аргоновой плазмы в диапазоне длин волн 400—800 нм при температуре 17 000 К и концентрации электронов $3 \cdot 10^{17}$ — $5 \cdot 10^{18}$ см⁻³. Показано, что при низкой концентрации электронов в плазме измеренные значения показателя поглощения совпадают с расчетными, а при высокой оказываются меньше расчетных в полтора-два раза. Этот результат связывается в работе с уменьшением сечения непрерывного поглощения атомов аргона, происходящим под влиянием усиливающегося при повышении плотности плазмы межчастичного взаимодействия.

Непрерывный спектр излучения (поглощения) аргоновой плазмы в ближнем инфракрасном, видимом и ближнем ультрафиолетовом диапазонах длин волн экспериментально изучался ранее авторами многих работ [1-6]. Однако в большинстве своем эти работы были посвящены исследованию спектра излучения плазмы при относительно низкой концентрации электронов, составлявшей 10^{16} — 10^{18} см⁻³ (давлении, равном 10^5 — 10^6 Па). В условиях такой (слабо-неидеальной) плазмы межчастичное взаимодействие незначительно, и излучение довольно правильно описывается с помощью существующей теории [7, 8]. Многочисленные приложения и, в частности, использование аргоновой плазмы в качестве высокоинтенсивного источника света требуют надежных сведений об ее спектральной излучательной способности при концентрации электронов свыше 10^{18} см⁻³. В литературе подобного рода экспериментальные сведения представлены единичными работами. Расчет же излучения плазмы высокой плотности связан, как известно [9, 10], с принципиальными и пока что непреодолимыми трудностями, вызываемыми сложностью учета влияния неидеальности на спектры атомов и ионов. В настоящей работе предпринята попытка восполнить указанный пробел и проведено экспериментальное исследование интенсивности непрерывного спектра поглощения (излучения) аргоновой плазмы в зависимости от электронной концентрации, изменяющейся при заданной температуре в широких пределах.

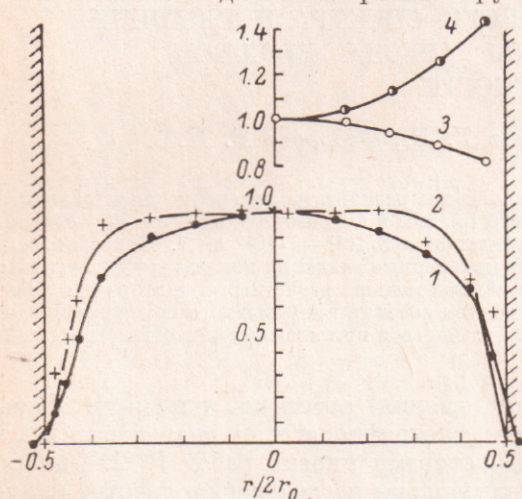
Методика эксперимента

Исследуемая плазма создавалась нами с помощью импульсного разряда, ограниченного стенками замкнутой кварцевой трубки. Внутренний диаметр трубки был равен 7 мм, а длина ее — 120 мм. Длительность импульса разрядного тока составляла примерно 300 мкс. Начальное давление аргона в трубке варьировалось в процессе эксперимента от 3.3 до 92 кПа. Электрический режим разряда подбирался таким образом, чтобы максимальная за время следования импульса температура плазмы оставалась неизменной и равной 17 000 К. Температура плазмы, находившейся, согласно оценкам, в ЛТР-состоянии для всего диапазона изменения плотности, определялась из уравнения переноса излучения по значениям спектральной плотности яркости b_λ и спектральной поглощательной способности $(1 - e^{-\tau_\lambda})$, измерившимся в направлении диаметра

трубки. Яркость получалась сравнением с интенсивностью эталонного источника света ЭВ-45, а поглощательная способность — просвечиванием кратковременным импульсом вспомогательного источника с яркостной температурой 20 000 К. Излучение заданной длины волны λ выделялось монохроматором ДМР-4 и регистрировалось фотоэлектрическим способом. Погрешность определения температуры, оцениваемая с учетом результатов, получавшихся для нескольких длин волн, не превосходила 5 %.

С помощью трубок, имевших квадратное сечение в центральной части, находилось радиальное распределение температуры разряда. Из данных, приведенных на рис. 1, видно, что оно в условиях проводившегося эксперимента было достаточно однородным, причем степень однородности повышалась с ростом начального давления аргона в трубке. Отметим, что пространственное разрешение оптической схемы экспериментальной установки составляло при снятии температурного профиля 0.1×0.1 мм².

Концентрации компонент ионизационного состава плазмы определялись тремя независимыми методами. Первый из них основывался на измерениях



Концентрации компонент ионизационного состава плазмы определялись тремя независимыми методами. Первый из них основывался на измерениях

Рис. 1. Типичный вид наблюдавшихся в эксперименте распределений относительных величин яркости (1), оптической толщины (2), температуры (3) и плотности плазмы (4) по сечению прямоугольной трубки ($2r_0$ — расстояние между стенками трубки).

абсолютных интенсивностей спектральных линий ArI 696.5 нм и ArII 480.6 нм, силы осцилляторов которых хорошо известны¹ [11]. В зависимости от степени прозрачности плазмы, которая всякий раз перед измерениями тщательно контролировалась, указанные линии использовались соответственно либо в излучении, либо в поглощении. В основе второго метода лежали измерения полуширины контура поглощения спектральной линии водорода H_α , добавлявшегося в небольшом количестве (≤ 1 %) к аргону. По измеренной полуширине контура поглощения данной линии находилась концентрация электронов [12], а затем пересчетом с помощью формулы Саха — ионизационный состав плазмы в целом. Основу третьего метода составляли экспериментальные данные о распределении температуры по сечению электроразрядной трубки. Ионизационный состав также вычислялся по формуле Саха, но только в качестве известной величины принималась здесь плотность тяжелых частиц аргона, определявшаяся из установленного распределения температуры и неизменности общей массы газа в трубке. Погрешность определения концентраций отдельных составляющих компонентов плазмы не превышала 20 %. Полученные указанными методами в зависимости от начального давления аргона концентрации атомов и электронов (ионов) плазмы при $T=17\ 000$ К приведены на рис. 2. Необходимо отметить, что посторонних примесей в плазме разряда в момент времени, соответствующий максимуму световой вспышки (момент времени производимых измерений), мы не наблюдали. Линия ArI 696.5 нм вследствие относительного ослабления (рис. 2, штриховая линия) занижала при высокой плотности газа искомую концентрацию атомов и потому в этих условиях не использовалась. Из-за невозможности осуществить просветку при высокой плотности не использовалась также линия H_α . Ионизационный состав плазмы определялся здесь по измерявшейся интенсивности линии ArII 480.6 нм и по распределению темпера-

¹ Брались средние значения от полученных в ряде работ, приведенных в [11].

туры вдоль радиуса электроразрядной трубки (принимавшемуся идентичным распределению в трубке с квадратным сечением).

Спектральный показатель поглощения плазмы при оптической толщине, большей 0.1, определялся просвечиванием и находился из выражения

$$k_\lambda = \frac{1}{d} \ln \frac{I_{\lambda_0}}{I_\lambda},$$

где d — внутренний диаметр трубки, а I_{λ_0} и I_λ — спектральные интенсивности просвечивающего излучения, прошедшего через трубку до начала разряда и в момент достижения максимальной интенсивности свечения плазмы. При ма-

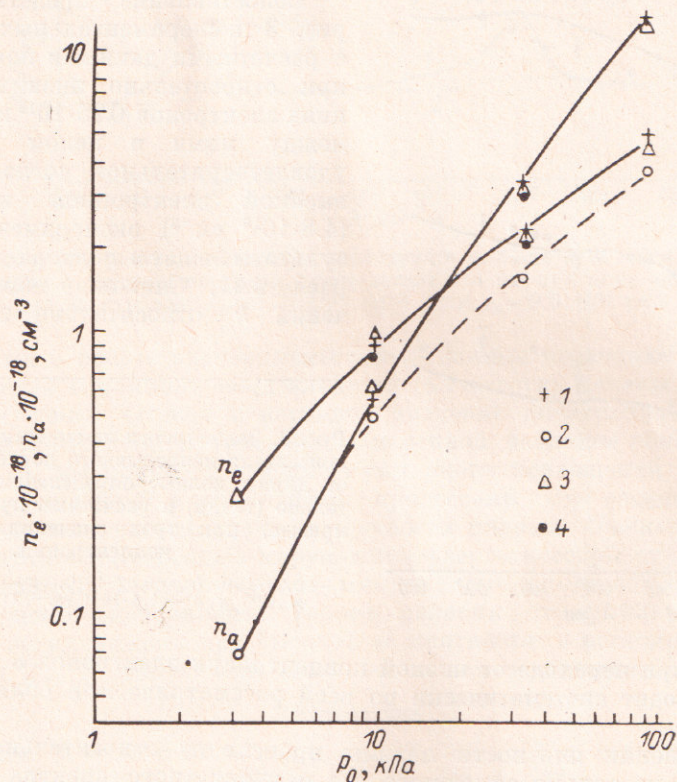


Рис. 2. Величины концентраций электронов n_e и атомов n_a плазмы, полученные в зависимости от начального давления аргона P_0 следующими независимыми способами: по распределению температуры в объеме разрядной трубки (1), измеренной интенсивности спектральной линии AgI 696.5 нм (2), линии AgI 480.6 нм (3) и полуширине контура поглощения линии H_α (4).

лой оптической толщине (низкой плотности газа) он получался в результате пересчета по измеренным значениям b_λ и T . В ультрафиолетовой области спектра при разрядах с высокой плотностью газа имело место явление обратимой непрозрачности кварца, которое учитывалось методом, подробно описанным в [13, 14]. Измерения проводились в участках спектра, наиболее свободных от спектральных линий. Спектральный интервал $\Delta\lambda$, выделявшийся монохроматором, для всех длин волн, в которых велись измерения, не превосходил 1 нм. Погрешность определения k_λ , оцениваемая на основании результатов многократного повторения отдельных измерений, составляла 10–20 %.

На рис. 3 приведены измеренные значения спектрального показателя непрерывного поглощения аргоновой плазмы в сравнении с рассчитанными по приближенной формуле Бибермана—Нормана [7] при трех различных концентрациях электронов. Граничная частота в интегральной части формулы $\nu_g = \nu_g^0 - \Delta\nu$ составляла 2, 1.6 и $0.6 \cdot 10^{14}$ с⁻¹ соответственно. Вычисление проводилось с учетом дебаевского снижения потенциала ионизации, а также слияния верхних энергетических уровней атомов (по формуле Инглиса—Теллера). Фотоионизационное поглощение с атомных уровней $4p$ и $3d$ при вычислении k_λ учитывалось индивидуально. Эффективные сечения поглощения для этих уровней брались из [8], величины сечений фотопоглощения в припороговых областях спектра находились посредством их экстраполяции.

Сопоставление представленных на рис. 3 экспериментальных результатов с расчетными данными показывает, что при относительно низких концентрациях электронов ($0.25 \cdot 10^{18}$ и $0.9 \cdot 10^{18}$ см⁻³) между ними в целом имеет место удовлетворительное согласие,² а при высокой электронной концентрации ($4.8 \cdot 10^{18}$ см⁻³) экспериментальные результаты лежат в полтора-два раза ниже расчетных. Снижение измеренных значений k_λ относительно вычисленных,

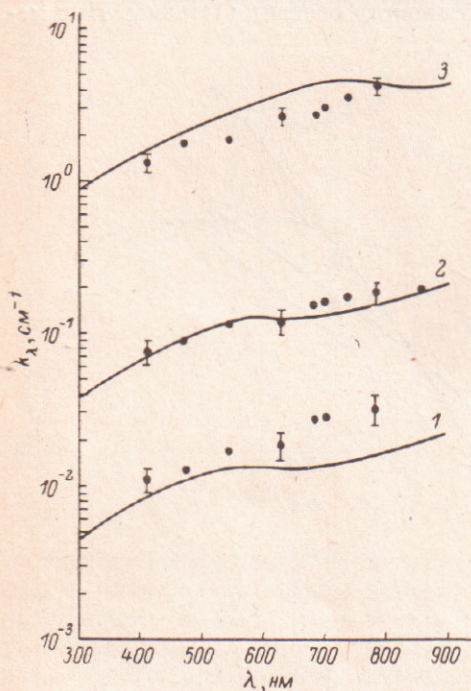


Рис. 3. Зависимости изменения спектрального показателя непрерывного поглощения плазмы от длины волны, определенные экспериментально (точки) и расчетным путем (сплошные кривые) при трех значениях электронной концентрации.

1 — $0.25 \cdot 10^{18}$ ($n_a = 0.07 \cdot 10^{18}$), 2 — $0.9 \cdot 10^{18}$, (0.55×10^{18}) и 3 — $4.8 \cdot 10^{18}$ см⁻³ ($13 \cdot 10^{18}$ см⁻³).

наблюдаемое при переходе от низкой концентрации электронов в плазме к высокой, происходит систематически во всей рассматриваемой области ее изменения.

При повышении плотности плазмы происходит относительное снижение интенсивности не только сплошного, но и дискретного спектра поглощения. Примером тому служит отмечавшееся ослабление линии AgI 696.5 нм, соответствующей переходу с довольно глубоко лежащего уровня (энергия связи $\Delta E \approx 2.5$ эВ). Для более высоковозбужденных линий этой серии AgI 415.8 и 420 нм ($\Delta E \approx 1.25$ эВ) ослабление начинается при существенно меньших значениях концентрации электронов, а при $n_e \approx 10^{18}$ см⁻³ эти линии полностью исчезают (рис. 4). С повышением плотности плазмы наблюдалось сильное относительное ослабление также и ионных спектральных линий. Исследованию дискретного спектра излучения плотной плазмы мы предполагаем посвятить отдельную публикацию.

Экспериментальные результаты настоящей работы (касающиеся непрерывного спектра), приведенные к безразмерной величине фактора Бибермана—Нормана ξ_λ , при концентрациях электронов $0.25 \cdot 10^{18}$ и $0.9 \cdot 10^{18}$ см⁻³ согласуются с данными [1-4], в которых параметры состояния плазмы определялись, по нашему мнению, достаточно надежно. Но только в отличие от [1-4] опреде-

² Расхождение экспериментальных и расчетных данных в красной области спектра при $n_e \leq 10^{18}$ см⁻³, по-видимому, связано с занижением величины сдвига границы фотоионизации $h\Delta\nu$, определяемой формулой Инглиса—Теллера [8].

ляемый нами фактор ξ_λ имеет тенденцию не увеличиваться [1] и не оставаться постоянным [4] при повышении электронной концентрации, а уменьшаться в соответствии с данными, изображенными на рис. 3. Результаты данной работы, отвечающие электронной концентрации $4.8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, совпадают в спектральных точках 530 и 900 нм с результатами [5], где достигнуты близкие значения параметров.³ Подтверждая в принципе экспериментальные данные [6], свидетельствующие о появлении в плотной аргоновой плазме эффекта ее относительного просветления, наши результаты показывают, что этот эффект возникает при концентрации электронов, гораздо меньшей, чем установлено в [6]. Они хорошо дополняют результаты экспериментальных исследований, проводившихся нами ранее с ксеноном [13], воздухом [14] и водородом [15].

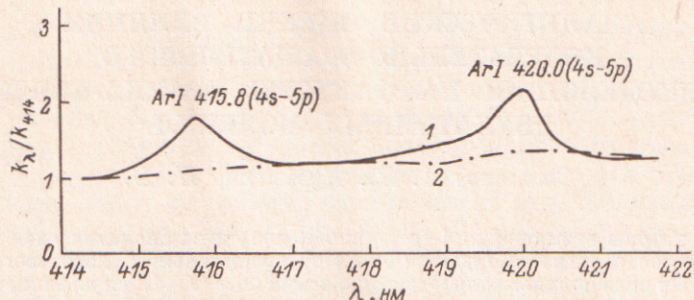


Рис. 4. Интенсивность реального спектра поглощения плазмы в области атомных линий аргона, отнесенная к интенсивности на длине волны 414 нм при двух значениях концентрации электронов: $n_e = 0.25 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (1) и $n_e = 0.9 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (2).

Полученные в работе экспериментальные данные позволяют сделать определенные выводы о влиянии неидеальности (плотности) плазмы на характеристики ее излучения. Относя измеренное значение спектрального показателя непрерывного поглощения k_λ (рис. 3) к измеренной величине концентрации атомов n_a (рис. 2), мы получаем сечение суммарного поглощения k_λ/n_a , обусловленного фотоионизацией и тормозными процессами. Это сечение не остается постоянным, а уменьшается с ростом плотности плазмы. Уменьшение его естественно связать с существенным нарушением энергетической структуры атомов внутриплазменными электрическими микрополями, которое и наблюдалось в условиях нашего эксперимента. Теория явления относительного просветления плазмы, возникающего при высокой ее плотности, в настоящее время разрабатывается [9, 10], однако еще далека от своего завершения.

Литература

- [1] Батенин В. М., Минаев П. В. — ТВТ, 1969, т. 7, с. 604; 1977, т. 15, с. 647.
- [2] Schulz-Gulde E. — Z. Phys., 1970, v. 230, p. 449.
- [3] Коньков А. А., Кулагин С. Т. — ТВТ, 1974, т. 12, с. 497.
- [4] Meiners D., Weiss C. O. — JQSRT, 1976, v. 16, p. 273.
- [5] Волков В. А., Титаров С. И., Ткаченко Б. К. — ТВТ, 1978, т. 16, с. 411.
- [6] Беспалов В. Е., Грязнов В. К., Фортвов В. Е. — ЖЭТФ, 1979, т. 76, с. 140.
- [7] Биберман Л. М., Норман Г. Э. — УФН, 1967, т. 91, с. 193.
- [8] Schlüter D. — Z. Phys., 1968, v. 210, p. 80.
- [9] Кобзев Г. А., Куриленков Ю. К., Норман Г. Э. — ТВТ, 1977, т. 15, с. 193; Кобзев Г. А., Куриленков Ю. К. — ТВТ, 1978, т. 16, с. 464.
- [10] Каклюгин А. С. — ТВТ, 1984, т. 22, с. 841; Каклюгин А. С., Норман Г. Э. — ТВТ, 1984, т. 22, с. 1041.
- [11] Houwelingen D., Kruihof A. A. — JQSRT, 1974, v. 11, p. 1235.
- [12] Грим Г. Уширение спектральных линий в плазме. М., 1978.
- [13] Гаврилов В. Е. — Автореф. канд. дис. Л., 1979; Опт. и спектр., 1985, т. 59, в. 6, с. 1012.
- [14] Андреев С. И., Гаврилова Т. В. — Опт. и спектр., 1980, т. 49, в. 3, с. 469.
- [15] Гаврилов В. Е., Гаврилова Т. В., Федорова Т. Н. — Опт. и спектр., 1985, т. 59, в. 3, с. 518.
- [16] Воробьев В. С. — ТВТ, 1978, т. 16, с. 464.

Поступило в Редакцию 4 марта 1986 г.

³ Приведенные в [5] расчетные значения k_λ , согласно нашей оценке, являются заниженными.