

04;10;12

©1993 г.

## ПАРАМЕТРЫ ПЛАЗМЫ ВОДОРОДНО-ЦЕЗИЕВОГО РАЗРЯДА ПЛАНОТРОННОГО ИСТОЧНИКА ИОНОВ Н<sup>-</sup>

*В.В.Анциферов, В.В.Бескорвайный*

Исследована плазма сильноточного тлеющего водородно-цезиевого разряда планотронного источника ионов Н<sup>-</sup> с помощью спектроскопических методов. Определен элементный и зарядовый состав плазмы. С высокой точностью измерена температура атомов водорода и сделана оценка концентрации электронов в плазме. Исследована динамика отдельных спектральных линий водорода, цезия и молибдена (материала электродов) при различных параметрах разряда. Прослежено изменение плотностей атомарного водорода, атомарного и ионизованного цезия и молибдена в течение разрядного импульса. Измерена энергия излучения плазмы разряда в диапазоне спектра 400–800 нм.

В настоящей работе приводятся экспериментальные результаты спектроскопических исследований плазмы разряда планотронного источника ионов Н<sup>-</sup>, предварительно опубликованные нами в [1].

### 1. Экспериментальное устройство

Схема применявшегося планотрона [2] приведена на рис. 1,а. Массивный катод, изготовленный из особо чистого молибдена, располагался внутри анодной камеры, сделанной также из молибдена. В нижней крышке анодной камеры было сделано диагностическое окно с размерами 0.6×15 мм для вывода излучения плазмы на диагностическую аппаратуру. Обращенная к диагностическому окну поверхность катода имела форму вогнутого цилиндрического желоба с радиусом кривизны 7 мм для геометрической фокусировки частиц, образуемых на вогнутой поверхности стрелкой, обеспечивало осцилляцию электронов в зоне между противоположными сторонами катодного желоба и их дрейф вдоль желоба в скрещенных  $E \times B$  полях. Для замыкания дрейфа электронов вокруг катода на его торцах и в верхней части катода были сделаны боковые выступы, ограничивающие уход электронов на катод.

Сильноточный тлеющий разряд поджигался при импульсном напуске очищенного водорода через отверстие в анодной камере. Цезий подавался в разряд из внешнего нагреваемого контейнера, содержащего цезированный пирографит. Основные параметры газоразрядной камеры планотрона были следующими: напряжение разряда 100–600 В, ток

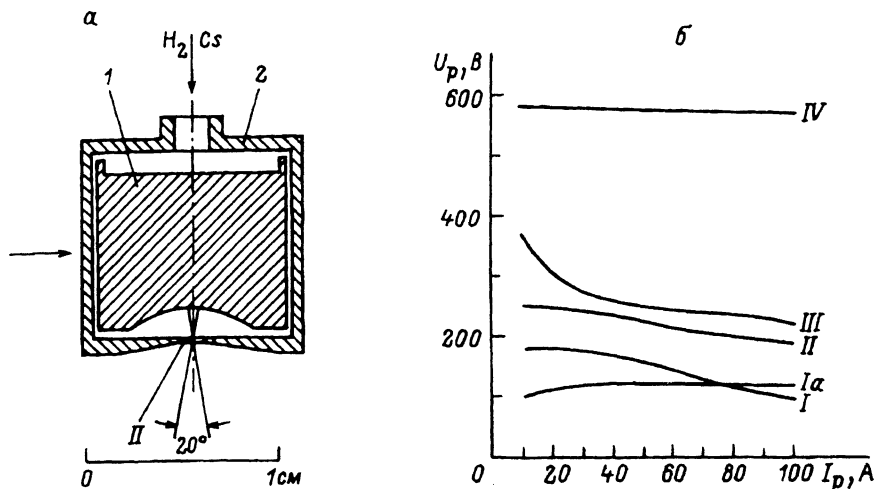


Рис. 1.  
 а — схема газоразрядной камеры планотронного источника ионов  $\text{H}^-$ : 1 — катод, 2 — анод;  
 б — вольт-амперные характеристики различных режимов сильноточного тлеющего разряда  
 поверхностно-плазменных источников ионов  $\text{H}^-$ .

разряда 10–150 А, длительность импульса 850 и 35 мкс, частота следования импульсов 1–10 Гц, магнитное поле 0.5–1.5 кГс, температура катода 400–800° С, температура анода 200–400° С, площадь катода 5 см<sup>2</sup>, плотность молекул водорода до 10<sup>16</sup> см<sup>-3</sup>, плотность цезия до 10<sup>13</sup> см<sup>-3</sup>.

Наблюдалось несколько устойчивых режимов работы водородно-цезиевого разряда, отличающихся напряжением разряда и видом вольт-амперной характеристики (рис. 1, б). Режим IV осуществлялся в чисто водородном разряде без цезия на обезгаженных предварительно тренировкой электродах. Водородно-цезиевые режимы I–III отличались количеством накопленного на электродах цезия и определялись температурой электродов и скоростью подачи цезия в разряд.

## 2. Диагностическая аппаратура

Применялись четыре схемы оптической регистрации [1]. Излучение плазмы разряда через диагностическое окно в анодной камере и кварцевое стекло в стенке вакуумного объема выводилось наружу и с помощью конденсора фокусировались на входные окна приборов регистрирующей системы. Спектрограммы излучения плазмы в диапазоне 230–900 нм регистрировались с помощью спектрографа СТЭ-1, из которых определялся элементный и зарядовый состав плазмы. Измерение интенсивностей излучения отдельных спектральных линий водорода, цезия и молибдена производилось при использовании монохроматора МДР-2 и фотоэлектронных умножителей, калибровка которых осуществлялась вольфрамовой лампой СИ 8-200у. Прослеживалось изменение интенсивностей линий на фронтах и в течение разрядного импульса измерялись абсолютная и относительная интенсивности различных спектральных линий.

Температура атомов водорода в разряде определялась по интерферограммам спектра излучения  $\text{H}_\alpha$ -линии, которые регистрировались при использовании интерферометра Фабри–Перо. Плотность электронов в

плазме оценивалась из интерферограмм спектра излучения  $H_{\beta}$ -линии. Применение интерференционных фильтров с повышенным коэффициентом пропускания (до 80%) и диэлектрических зеркал с малым поглощением позволило существенно увеличить эффективность регистрации и получать интерферограммы спектральных линий за один импульс разряда. Энергия излучения плазмы в области спектра 400–800 нм измерялась с помощью термопарного баллометра РТН-30 С.

### 3. Экспериментальные результаты и обсуждение

3.1. Спектр и энергия излучения плазмы разряда. Энергия излучения плазмы в 4л ср в области спектра 400–800 нм за один разрядный импульс длительностью 0.85 мс при мощности разряда 10 кВт составила 3.2 мДж.

Кроме спектральных линий основных компонентов плазмы (водорода и цезия) в диапазоне спектра 230–900 нм обнаруживалось большое количество линий молибдена, распыляемого с катода, и линий примесного кислорода [1]. Были идентифицированы спектральные линии атомарного водорода бальмеровской серии ( $H_{\alpha}$ ,  $H_{\beta}$ ,  $H_{\gamma}$ ,  $H_{\delta}$ ), линии атомов цезия CsI, однозарядных ионов цезия CsII (300–650 нм), двухзарядных ионов цезия CsIII (250–290 нм), а также линии атомов MoI и однозарядных ионов молибдена MoII. При больших токах разряда были зарегистрированы переходы с высоковозбужденных уровней (с  $n$  до 15) атомов цезия. В излучении плазмы разряда наблюдались также линейчатые спектры молекул водорода:  $\alpha$ -система Фулхера (580–620 нм) и электронно-вращательные переходы  $I^1P_g \rightarrow B^1\Sigma_g^+$ ,  $G\Sigma_g^+ \rightarrow B^1\Sigma_u^+$  в диапазоне 420–490 нм.

3.2. Интенсивности излучения спектральных линий компонентов плазмы разряда. Осциллограммы интенсивностей излучения спектральных линий водорода, цезия и молибдена для газоразрядного режима I приведены на рис. 2,а, а для режима III — на рис. 2,б. При исследовании общего характера зависимостей интенсивностей линий от времени флуктуации шумы излучения обрезались RC-фильтром (рис. 2), а при исследовании шумов разряда использовалась более широкополосная система регистрации.

Водород. Спектральные линии атомарного водорода  $H_{\alpha}$  и  $H_{\beta}$  были наиболее яркими в исследованном диапазоне спектра излучения плазмы разряда. В режиме I с пониженной плотностью водорода в газоразрядной камере (ГРК) плотность атомарного водорода в разряде была пропорциональна току разряда в интервале 10–50 А и чувствительна к подаче в разряд молекулярного водорода. Начальный выброс интенсивности бальмеровских линий при больших токах разряда свидетельствует об относительно высоком вкладе атомарного водорода, десорбируемого с поверхности электродов ГРК.

В режимах II–IV, несмотря на повышенное напряжение разряда и более высокую плотность водорода в ГРК, интенсивности излучения бальмеровских линий имели примерно те же значения, что и при соответствующих токах разряда режима I, и повторяли форму тока разряда (рис. 2,б).

Зависимости яркостей излучения линий водорода от тока разряда (рис. 3,а) снимались за короткий промежуток времени при переходе от больших токов разряда к малым так, чтобы тепловой режим электродов не успевал измениться (отсчет интенсивности проводился на “плато” в

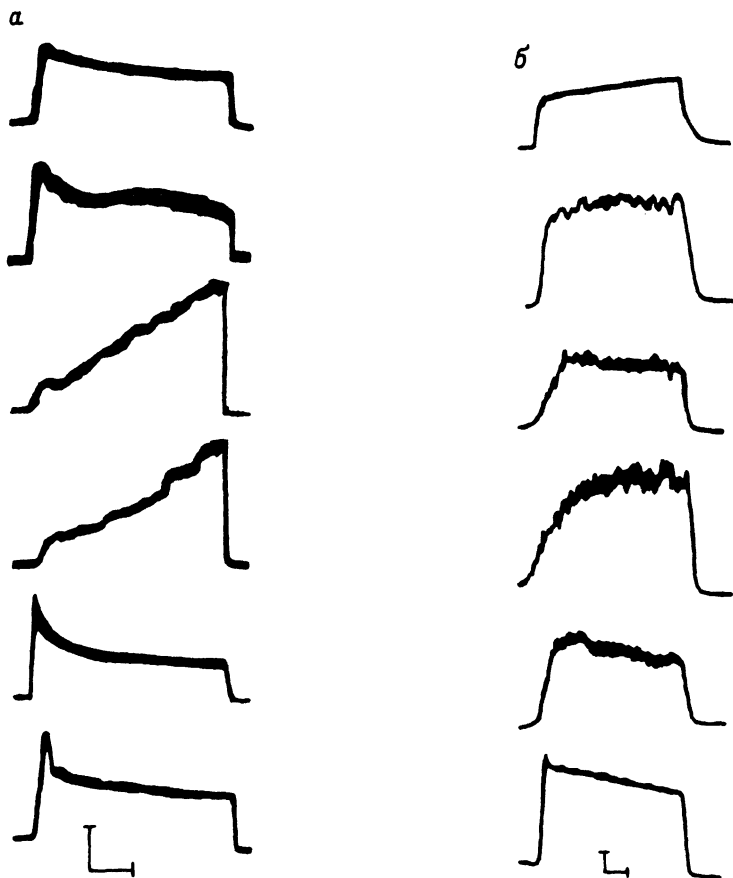


Рис. 2. Осциллограммы интенсивностей излучения спектральных линий  $H\alpha$ , CsI (455.5 нм), CsII (460.4 нм), MoI (553.3 нм), тока  $I_p$  и напряжения  $U_p$  разряда в режимах I (а) и III (б). Цена деления по горизонтали: 200 (а) и 5 мкс (б); по вертикали: 50 А ( $I_p$ ), 0.5 В ( $H\alpha$ ), 10 мВ (CsI и MoI), 50 мВ (CsII) и 100 В ( $U_p$ ).

средней части импульса и пересчитывался с учетом спектральной чувствительности фотоумножителя). При малых токах разряда яркости излучения водородных линий возрастали пропорционально току разряда. Замедление скорости роста яркостей бальмеровских линий и насыщение яркостей излучения линий молекулярного водорода при больших токах разряда обусловлены вытеснением водорода из зоны разряда, примыкающей к диагностическому окну, в боковые зазоры ГРК [3].

Цезий. Интенсивности и динамика излучения линий атомов и ионов цезия существенно зависели от подачи цезия в ГРК и теплового режима электродов. В режиме I интенсивности линий цезия нарастали к концу разрядного импульса (рис. 2, а). Большая длительность передних фронтов импульсов излучения обусловлена дополнительным выделением цезия в разряд за счет бомбардировки электродов, коэффициент распыления которого в режиме I понижен вследствие возрастания коэффициента вторичной ионно-электронной эмиссии. Импульсный перегрев поверхности разрядом и выделение цезия с более холодных, нерабочих участков

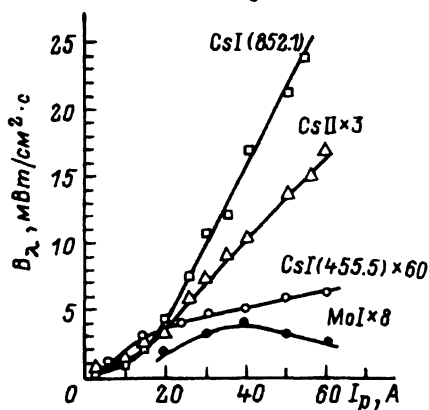
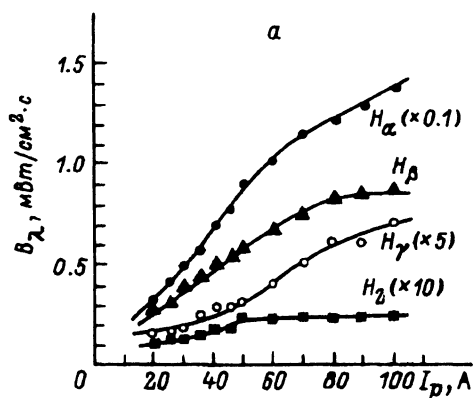


Рис. 3. Зависимости яркостей В-излучения спектральных линий  $H_{\alpha}$ ,  $H_{\beta}$ ,  $H_{\gamma}$ ,  $H_{\delta}$  (458.3 нм) (а) и линий CsI (852.1 и 455.5 нм), CsII (460.4 нм) и MoI (533.3 нм) (б) от тока разряда  $I_p$  в режиме I.

междуэлектродного зазора приводят к возрастанию равновесной плотности и накоплению цезия в разряде.

В режимах II–III с более горячими электродами исходная плотность цезия в объеме ГРК имеет повышенную величину, тогда как концентрация цезия на электродах мала. При повышенном напряжении разряда коэффициент распыления цезия возрастает, что приводит к более быстрому выходу интенсивности излучения линий цезия на относительно высокий стационарный уровень (рис. 2,б).

Зависимости яркостей излучения линий цезия от тока разряда для режима I приведены на рис. 3,б (отсчет производился по максимуму интенсивности в конце импульса). При малых токах разряда возрастание плотности электронов и цезия в объеме разряда обуславливает квадратичное увеличение амплитуды яркости излучения цезия. Уменьшение скорости роста яркостей линий цезия при больших токах разряда связано с возрастанием скорости ионизации цезия и уменьшением его плотности (“выгоранием”) в межэлектродном зазоре [4]. Относительно большая величина интенсивности линии Cs I (852.1 нм) обусловлена тем, что, несмотря на высокую степень ионизации цезия в разряде, заметную часть времени своего движения в объеме ГРК цезиевая частица проводит в виде атома. Ион цезия электрическим полем разряда быстро переносится на катод, однако после поверхностной рекомбинации и десорбции атом цезия возвращается в плазму разряда с небольшой скоростью.

Молибден. В режиме I молибден выбивается из электродов преимущественно в начале газоразрядного импульса (рис. 2,а) и его плотность в разряде пропорциональна его току. Уменьшение распыления молибдена и выход его интенсивности на стационарный уровень через  $\sim 200$  мкс после начала импульса объясняются повышением степени покрытия катода цезием вплоть до динамически равновесного значения, определяемого током ионов цезия на катод и его коэффициентом распыления. В режимах II–IV при более низкой плотности цезия на электродах интенсивности линий молибдена возрастали (рис. 2,б).

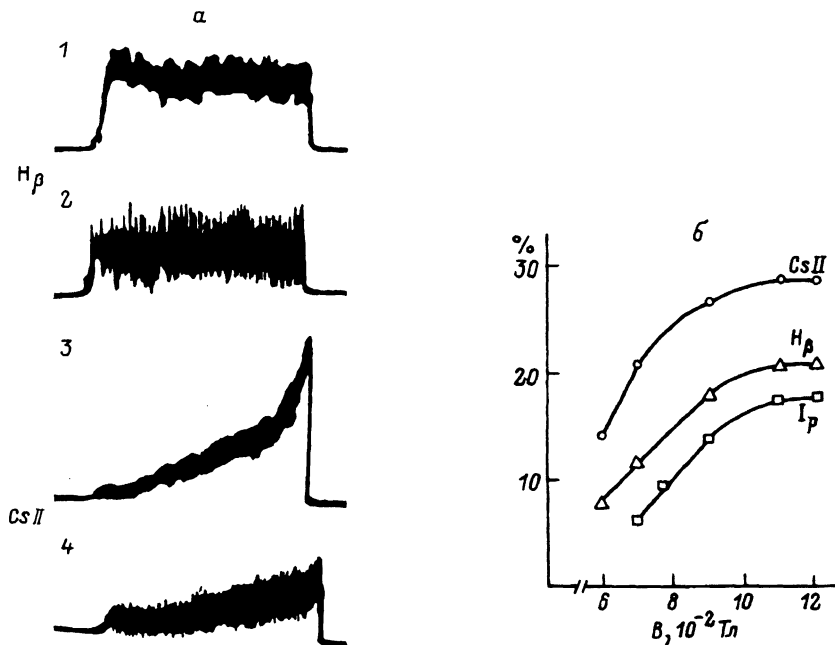


Рис. 4.

*a* — осциллограммы интенсивностей излучения спектральных линий  $H\beta$  (1,2) и  $CsII$  (3,4) в режиме *I*, снятые широкополосной системой регистрации.  $I_p = 100$  (1,3) и 30 А (2,4); *b* — зависимости относительного уровня низкочастотных колебаний и шумов излучения спектральных линий  $CsII$  (460.4 нм),  $H\beta$  и тока разряда  $I_p$  от внешнего магнитного поля  $B$ .

При малых токах разряда в режиме *I* стационарный уровень интенсивности излучения атомов молибдена благодаря росту плотности электронов в разряде возрастает (рис. 3,б). С увеличением тока разряда “блокировка” катода цезием становится более значительной и интенсивности излучения линий молибдена начинают падать с ростом тока разряда.

3.3. Флуктуации интенсивностей излучения спектральных линий. Флуктуации тока ионов цезия на катод приводят к локальным изменениям цезиевого покрытия и эмиссионной способности катода, что может являться причиной низкочастотных колебаний плотности электронов в разряде и наблюдавшихся флуктуаций интенсивностей излучения спектральных линий (рис. 4). С ростом тока разряда частота и уровень низкочастотных ( $< 10^6$  Гц) флуктуаций и шумов (НФШ) возрастали, однако относительный уровень НФШ, определяемый как отношение среднеквадратичного значения флуктуаций к среднему значению интенсивности, при увеличении тока разряда, как правило, уменьшался. При увеличении магнитного поля, а также при уменьшении подачи водорода и цезия в разряд уровень НФШ возрастал, при этом в режиме *I* уровень НФШ был значительно ниже, чем в режимах *II* и *III*.

Обнаружена четкая корреляция между колебаниями интенсивностей различных спектральных линий с колебаниями тока и напряжения в разряде источника, которые однозначно связаны с флуктуациями эмиттанса пучка ионов  $H^-$ , вытягиваемого из разряда. При токе разряда 100 А увеличение магнитного поля с 0.6 до 0.9 кГс приводило к росту величины эмиттанса пучка ионов  $H^-$  почти в 2 раза. Возрастание эмиттанса пучка

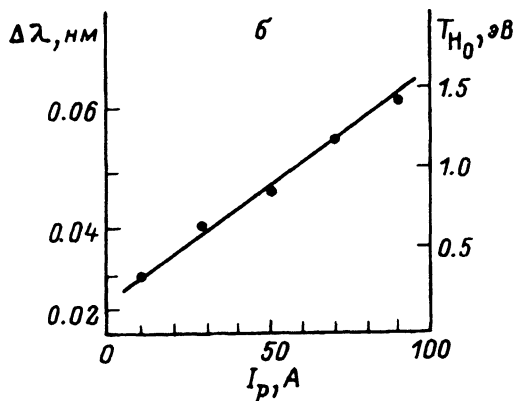
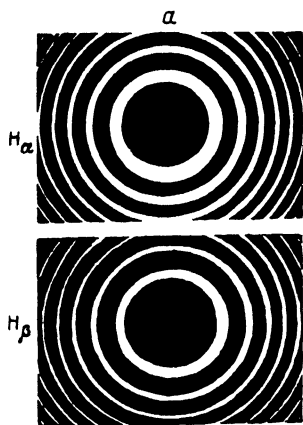


Рис. 5.  
 а — интерферограммы излучения спектральных линий  $H_\alpha$  и  $H_\beta$  при токе разряда 100 А;  
 б — зависимости ширины  $\Delta\lambda$  контура излучения  $H_\alpha$ -линии и температуры атомов водорода  $T_{H_0}$  от тока разряда  $I_p$ .

может быть также связано с неоднородностью магнитного поля источника и наличием объемного разряда в пучке.

3.4. Температура атомов водорода в разряде. Температура атомов водорода в разряде определялась по доплеровскому уширению  $H_\alpha$ -линии, типичная интерферограмма спектра которой, полученная за один разрядный импульс, приведена на рис. 5,а. При микрофотометрировании интерферограмм спектра  $H_\alpha$ -линии тонкой структуры ее не было обнаружено. Температура атомов водорода линейно увеличивалась с ростом тока разряда (рис. 5,б). Тонкую структуру  $H_\alpha$ -линии можно не учитывать, если преобладающим процессом возбуждения атомов водорода является диссоциация молекул водорода электронным ударом, когда около 70% энергии излучается на переходе  $3^2D_{5/2} \rightarrow 2^2P_{3/2}$  [5]. В импульсном плавотронном разряде заметная часть атомов водорода образуется в результате десорбции с поверхности электродов, что может приводить к уширению контура  $H_\alpha$ -линии.

3.5. Плотность и температура электронов в плазме разряда. Плотность электронов в плазме разряда оценивалась по штарковскому уширению  $H_\beta$ -линии, одна из интерферограмм спектра которой показана на рис. 5,а. Плотность электронов линейно зависела от тока разряда, и при токе 100 А она составляла  $\sim 4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ .

Температура электронов в разряде находилась из соотношения интенсивностей бальмеровских линий в приближении локального термодинамического равновесия и максвелловского распределения электронов по энергиям. Рассчитанное по методике [6] ее значение составило  $\sim 0.4$  эВ.

Аномально низкое значение температуры электронов определялось при сравнении интенсивностей различных цезиевых линий, а также по распределению интенсивностей в спектре рекомбинационного континуума на уровень  $5d$  (550–590 нм) [7]. “Цезиевая” температура электронов составила  $\sim 0.1$  эВ и очень слабо зависела от плотности цезия.

Аномально низкие значения температуры электронов свидетельствуют об ограниченной применимости модели ЛТР в условиях сильноточ-

ного тлеющего разряда с неравновесным характером процессов на поверхности электродов. Наряду с низкоэнергетичной группой максвеллизированных электронов необходимо учитывать роль группы быстрых первичных электронов.

### Список литературы

- [1] Анциферов В.В., Бескоровайный В.В., Бельченко Ю.И. и др. Препринт ИЯФ СО АН СССР. № 88-116. Новосибирск, 1988. 21 с.
- [2] Бельченко Ю.И., Димов Г.И., Дудников В.Г. // ЖТФ. 1975. Т. 14. Вып. 1. С. 68-72.
- [3] Аполонский А.И., Бельченко Ю.И., Димов Г.И., Дудников В.Г. // Письма ЖТФ. 1980. Т. 6. Вып. 1. С. 86-91.
- [4] Бельченко Ю.И., Давыденко В.И., Деревянкин Г.Е. и др. // Письма ЖТФ. 1977. Т. 3. Вып. 9. С. 693-697.
- [5] Полякова Г.Н., Ранюк А.И., Ерко В.Ф. // ЖЭТФ. 1977. Т. 73. Вып. 6. С. 2131-2141.
- [6] Keller R., Smith H.V. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1985. Vol. Ns-32. N 5. P. 1736-1740.
- [7] Термоэмиссионные преобразователи и низкотемпературная плазма // Под ред. Б.Я.Мойжеса, Г.Е.Пикуса. М.: Наука, 1973. 480 с.

Сухумский физико-технический  
институт

Поступило в Редакцию  
18 марта 1992 г.  
В окончательной редакции  
17 августа 1992 г.