



ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

4

А.В.Бурдаков, В.С.Койдан, В.В.Поступаев

**НАГРЕВ АНОДНОЙ ФОЛЬГИ
ПРИ ЭФФЕКТИВНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ
РЭП С ПЛАЗМОЙ**

ПРЕПРИНТ 85-5



НОВОСИБИРСК

А.В.Бурдаков, В.С.Койдан, В.В.Поступаев

НАГРЕВ АНОДНОЙ ФОЛЬГИ ПРИ ЭФФЕКТИВНОМ
ВЗАИМОДЕЙСТВИИ РЭП С ПЛАЗМОЙ

А Н Н О Т А Ц И Я

Приводятся результаты экспериментов по определению температуры анодной фольги, сквозь которую РЭП (1 МэВ, 20 кА, 50 нс) инжектируется в плазму с плотностью $\sim 10^{15}$ см⁻³. Нагрев поверхности фольги происходит в результате поглощения горячих плазменных электронов, образовавшихся при коллективном пучково-плазменном взаимодействии. Эти электроны попадают на поверхность фольги после ухода из ловушки. Измерение "яркостной" температуры поверхности фольги производилось по ее тепловому излучению в ВУФ-диапазоне с помощью вакуумных фотодиодов. Установлено, что поверхность фольги может нагреваться до температуры 2+3 эВ. Определена скорость разлета материала фольги, которая может достигать $2 \cdot 10^6$ см/с. По результатам этих измерений делается оценка энергозапаса и характерной энергии горячих электронов плазмы. Измерена зависимость температуры анодной фольги от ее толщины (от начального углового разброса РЭП). Показано, что с увеличением углового разброса пучка поток нагретых электронов на фольгу уменьшается.

1. В недавних экспериментах на установке ИНАР [1] было показано, что функция распределения электронов плазмы, нагреваемой мощным РЭП, является сильно неравновесной. Нагретые электроны плазмы были зарегистрированы в диапазоне энергий 1 эВ + 100 кэВ. Согласно калориметрическим измерениям пучок с начальным энергозапасом 500 Дж оставляет в плазме 150 ± 50 Дж энергии [2], значительная доля которой может содержаться в электронах с энергией ~ 1 кэВ. Нагретые электроны плазмы уходят в основном на торцы установки. Естественным приемником горячей плазмы служат фольги, расположенные по концам пробкотрона. Одна из них является анодом ускорителя, сквозь нее РЭП инжектируется в плазму. В результате поглощения электронов плазмы происходит нагрев анодной фольги, что первоначально было обнаружено по ее разрушению [2]. Простые оценки температуры фольги показывают, что в условиях наших экспериментов нагрев поверхности алюминиевой анодной фольги до температур в несколько эВ возможен лишь при условии, что энергия, запасенная в плазме, будет выделяться в тонком (~ 1 мкм) поверхностном слое за времена ~ 100 нс (при этом плотность потока энергии на фольгу должна быть порядка 10^8 Вт/см²). Таким условиям удовлетворяет поток плазменных электронов с энергиями 1 + 5 кэВ. Электроны, имеющие существенно большую энергию, поглощаются во всей толщине анодной фольги (9 мкм), при этом удельное энерговыделение мало, и, соответственно, температура фольги невысока. С другой стороны, поток электронов с малыми энергиями (≤ 100 эВ) сравнительно невелик, что связано с большими временами вылета таких электронов из ловушки (~ 10 мкс для плотности плазмы $\sim 10^{15}$ см⁻³, при которой уход этих электронов носит столкновительный характер). Следует заметить, что существенного нагрева анодной фольги непосредственно пучком не происходит, и это специально проверялось экспериментально [2].

Измерение температуры поверхности анодной фольги, нагреваемой плазмой, вытекающей из пробкотрона, позволяет определить величину потока энергии на эту фольгу¹⁾. Изменение температуры во времени характеризует динамику ухода электронов

¹⁾ Подобные процессы нагрева поверхности мишени рассматривались ранее в работах по взаимодействию корпускулярного и лазерного излучения с веществом (см., например, [3-8]).

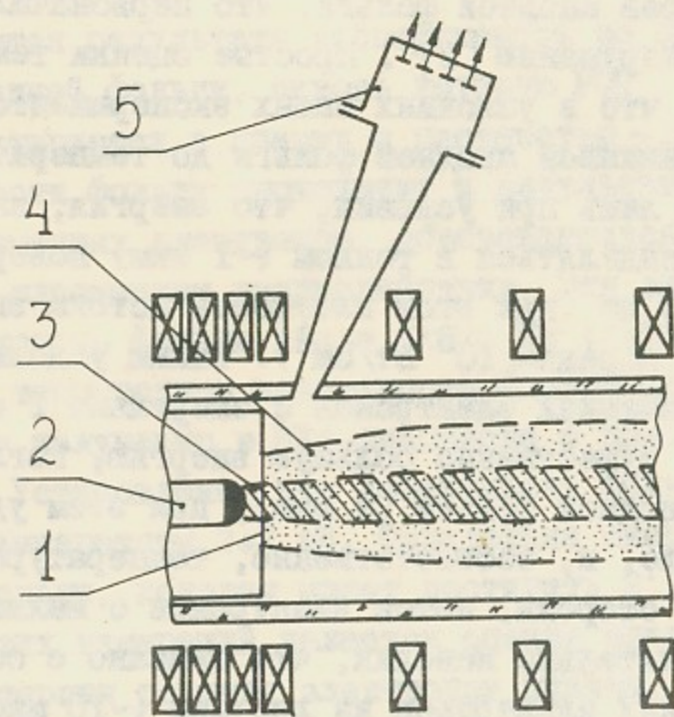


Рис. I. Схема эксперимента:

1 - анодная фольга; 2 - катод; 3 - РЭП;
4 - плазма; 5 - детектор ультрафиолетового
излучения - вакуумный фотодиод (ВФД).

плазмы из ловушки. Из измерений временного хода температуры возможна оценка характерной энергии горячих электронов плазмы.

2. Схема эксперимента приведена на рис. I. Пучок релятивистских электронов (1 МэВ, 20 кА, 50 нс) инжектируется в плазму длиной 240 см, находящуюся в пробкотроне с магнитным полем 25 кЭ в однородной части и 42 кЭ в пробках. Плотность плазмы составляла $1,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Плазма, нагреваемая РЭП, контактирует с анодной фольгой ускорителя. Температура анодной фольги определялась по ее тепловому излучению в ультрафиолетовом диапазоне, которое регистрировалось с помощью вакуумного фотодиода (ВФД). Таким способом фактически измерялась "яркостная" температура. Вакуумные фотодиоды ранее уже применялись в ряде экспериментов, в частности, для определения температуры анодной фольги, нагреваемой непосредственно электронами сфокусированного релятивистского пучка [8]. В наших экспериментах использовались два типа детекторов. В одном из них четыре фотокатода диаметром 8 мм каждый были расположены по окружности и регистрировали излучение с одной и той же площади фольги. Часть каналов закрывалась фильтрами. В другом детекторе фотокатоды прямоугольной формы с размерами $5 \times 10 \text{ мм}^2$ были расположены в один ряд. Этот детектор работал как камера-обскура.

Плотность тока фотоэлектронов в детекторе определяется следующим соотношением:

$$j = S \cdot \int f(E_\gamma, T) \cdot \varepsilon(E_\gamma) \cdot \exp[-\mu(E_\gamma) d_\phi] \cdot dE_\gamma \cdot \frac{1}{4\pi R^2},$$

где $f(E_\gamma, T)$ - спектральная плотность мощности излучения нагретой фольги, $\varepsilon(E_\gamma)$ - спектральная чувствительность фотокатода, $\mu(E_\gamma)$ - линейный коэффициент ослабления фильтра толщиной d_ϕ , S - площадь фольги, R - расстояние от фольги до детектора. Функция $f(E_\gamma, T)$ предполагалась планковской. Величина $\varepsilon(E_\gamma)$ бралась из работ [9-11]. Пропускание нитроцеллюлозных фильтров ($\exp[-\mu(E_\gamma) d_\phi]$) было измерено с помощью синхротронного излучения накопителя ВЭШ-2М в диапазоне длин волн $300+2200 \text{ \AA}$ [12].

3. Первая часть экспериментов была проведена при плотности тока РЭП 5 кА/см^2 (диаметр пучка 2 см) и толщине алюминиевой анодной фольги 9 мкм. На рис. 2 показаны осциллограммы сигналов с двух каналов детектора. Один из каналов был открыт,

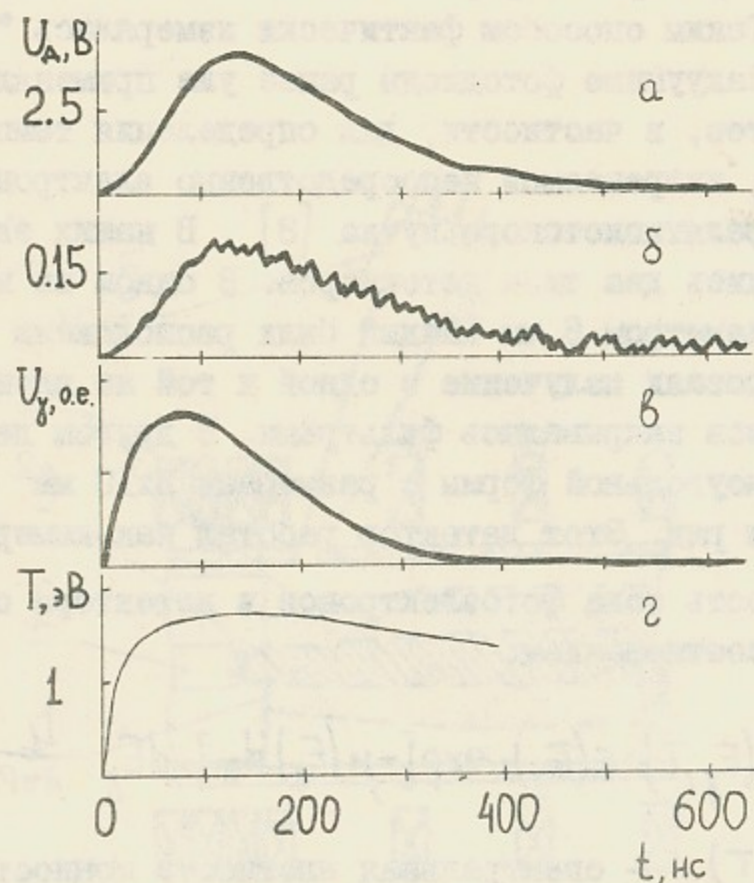


Рис.2. Типичные осциллограммы:

а - сигнал открытого ВФД; б - сигнал ВФД с фильтром 500 Å нитроцеллюлозы; в - сигнал детектора мягкого рентгеновского излучения (энергия отсечки фильтра 2,2 кэВ); г - рассчитанная по току ВФД зависимость температуры поверхности фольги от времени.

другой закрыт фильтром из нитроцеллюлозы. Здесь же приведен сигнал детектора мягкого рентгеновского излучения, который характеризует поток электронов с энергией $E > 2$ кэВ, а также температура фольги, определенная по току ВФД. Видно, что сигнал ВФД (и температура) нарастают примерно за 140 нс, а затем медленно спадают. Поведение температуры во времени указывает на то, что нагрев фольги обусловлен электронами, имеющими энергии несколько кэВ. Действительно, время вылета из ловушки "конусных" электронов с характерной энергией 1 кэВ составляет 100 ± 200 нс, что совпадает с продолжительностью рентгеновского сигнала и с временем нарастания температуры анодной фольги. Максимальная температура фольги составляет $1,7 \pm 0,2$ эВ.

На основании полученного значения температуры можно оценить поток энергии "горячих" электронов: $q = (0,5 \pm 2) \cdot 10^8$ Вт/см². Приведенная оценка делалась на основе результатов работ [3-8]. При площади нагреваемой области, равной сечению РЭП, вычисленный энергоспас в плазменных электронах с энергией 1 ± 5 кэВ, поглощающихся в анодной фольге, составляет $Q = (60 \pm 30)$ Дж.

4. Ранее на установке ИНАР было показано [13], что с уменьшением толщины анодной фольги (что эквивалентно уменьшению углового разброса РЭП) увеличивается эффективность взаимодействия пучка с плазмой. В настоящих экспериментах была сделана попытка выяснить вопрос об изменении характера распределения энергии в электронах плазмы при изменении эффективности взаимодействия РЭП с плазмой. Для этого изучалась динамика нагрева фольги в зависимости от ее толщины.

Проведенные измерения показали, что максимальная температура поверхности фольги, контактирующей с плазмой, падает с ростом толщины фольги (рис.3). Этот факт свидетельствует о том, что поток горячих электронов на фольгу уменьшается при увеличении начального углового разброса РЭП. Скорее всего, при этом уменьшается плотность нагретых электронов. Из осциллограмм сигналов ВФД (рис.4) видно, что максимум нагрева достигается быстрее в случае применения более толстых фольг. Так, при толщине алюминиевой фольги 9 мкм сигнал детектора достигает максимума через 120 ± 20 нс после начала инжекции РЭП, а при толщине 50 мкм - через 70 ± 10 нс. Такая зависимость может быть объяснена тем, что при увеличении толщины анодной фольги уменьшается длительность генерации горячих электронов плазмы. Воз-

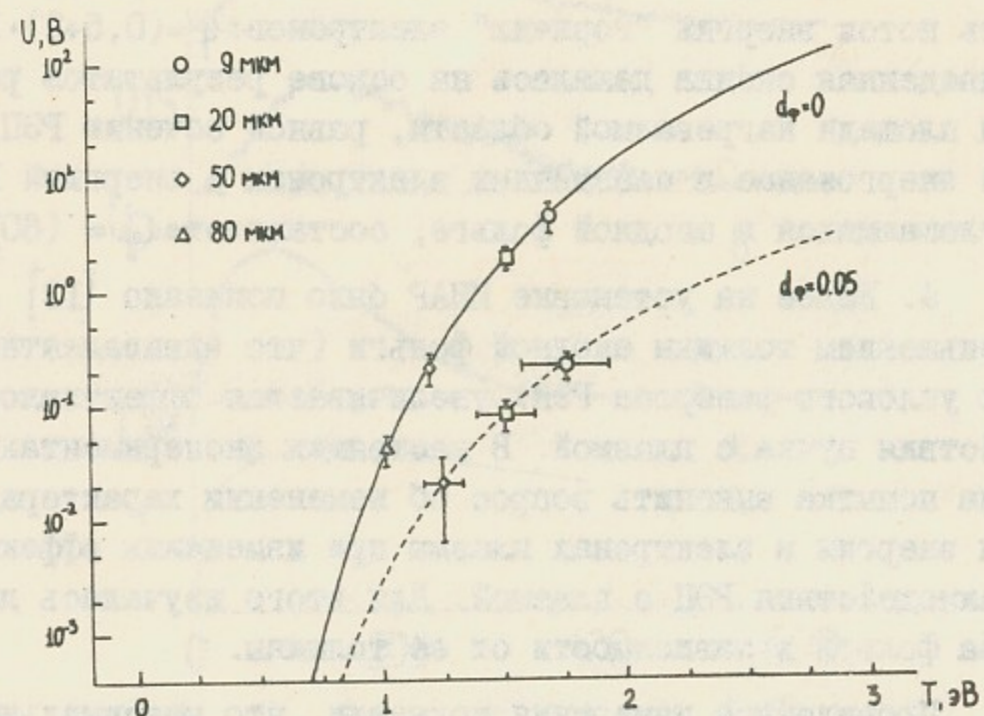


Рис.3. Зависимость величины сигнала ВФД от температуры анодной фольги. Линии - расчет для открытого ВФД и ВФД с фильтром из нитроцеллюлозы толщиной d_ϕ (мкм). Точки - амплитуды сигналов ВФД для различных толщин алюминиевой анодной фольги.

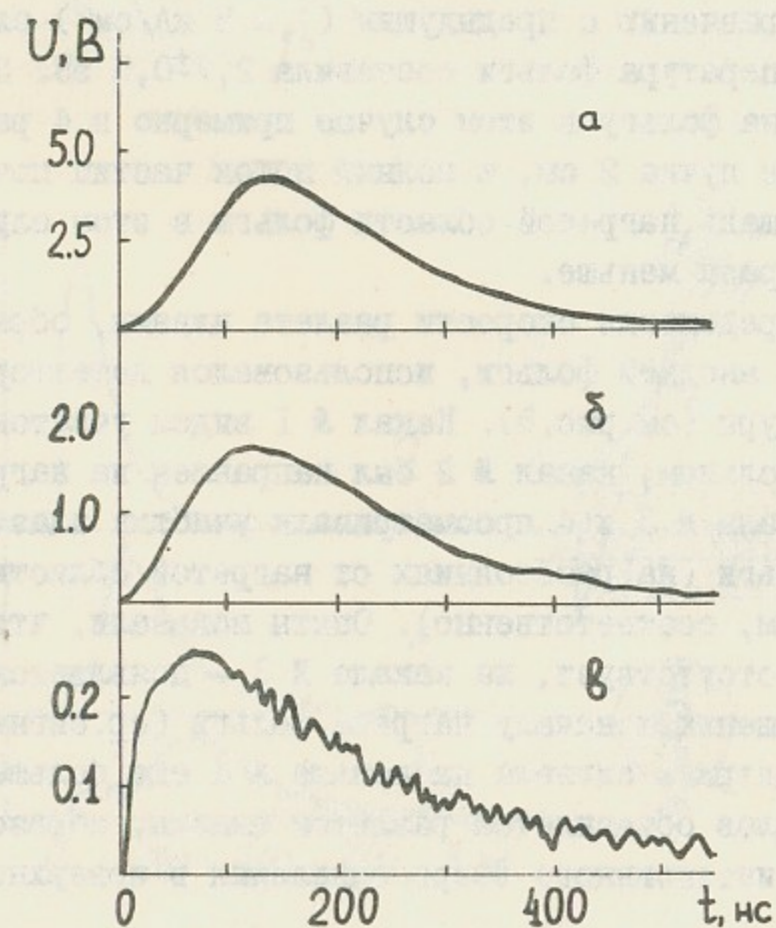


Рис.4. Осциллограммы сигналов ВФД для разных толщин алюминиевой анодной фольги: а - 9 мкм, б - 20 мкм, в - 50 мкм.

можно также, что с ростом углового разброса РЭП увеличивается характерная энергия горячих электронов, в то время как их количество уменьшается.

5. Следующая серия экспериментов была проведена в другом, более интенсивном режиме. Диаметр пучка был уменьшен до 1,2 см, соответственно плотность тока пучка возросла до 10 кА/см². Условия в плазменной части остались без изменений. В этом случае следовало ожидать возрастания плотности потока электронов и роста температуры фольги. Анализ показал, что, действительно, плотность потока излучения с поверхности увеличилась в 7+15 раз по сравнению с предыдущим ($j_b \approx 5$ кА/см²) случаем. Максимальная температура фольги составила $2,7 \pm 0,5$ эВ. Плотность потока энергии на фольгу в этом случае примерно в 4 раза выше, чем при диаметре пучка 2 см, а полный поток частиц почти одинаков, так как площадь нагретой области фольги в этом случае приблизительно в 3 раза меньше.

Для определения скорости разлета плазмы, образующейся на поверхности анодной фольги, использовался детектор в режиме камеры-обскуры (см. рис.5). Канал № 1 видел участок вне пучка и был контрольным, канал № 2 был направлен на нагретую часть фольги, каналы № 3 и 4 просматривали участки плазмы вблизи анодной фольги (на расстояниях от нагретой области $(0,3 \pm 0,7)$ см и $(0,5 \pm 1)$ см, соответственно). Опыты показали, что на канале № 1 сигнал отсутствует, на канале № 3 - появляется с задержкой по отношению к началу нагрева фольги (ср. сигнал от канала № 2), задержка сигнала на канале № 4 еще больше. Такое поведение сигналов объясняется разлетом плазмы, образовавшейся в результате интенсивного энерговыделения в поверхностном слое фольги.

Оценка скорости разлета этой плазмы v_p делалась по времени запаздывания сигналов, она составляет $(2,2 \pm 0,5) \cdot 10^6$ см/с. С другой стороны, скорость разлета плазмы можно оценить по измеренной температуре фольги. Скорость ионного звука в такой плазме для температуры 3 эВ составляет $c_s \approx 0,5 \cdot 10^6$ см/с. Скорость разлета плазмы в пустоту может достигать $2+3 c_s$, то есть для нашего случая $v_p \approx (1,0 \pm 1,5) \cdot 10^6$ см/с, что согласуется с измеренным значением.

6. Таким образом, проведенные измерения позволяют заключить следующее. Температура поверхности анодной фольги, на которую поступает поток горячих электронов плазмы, достигает величины

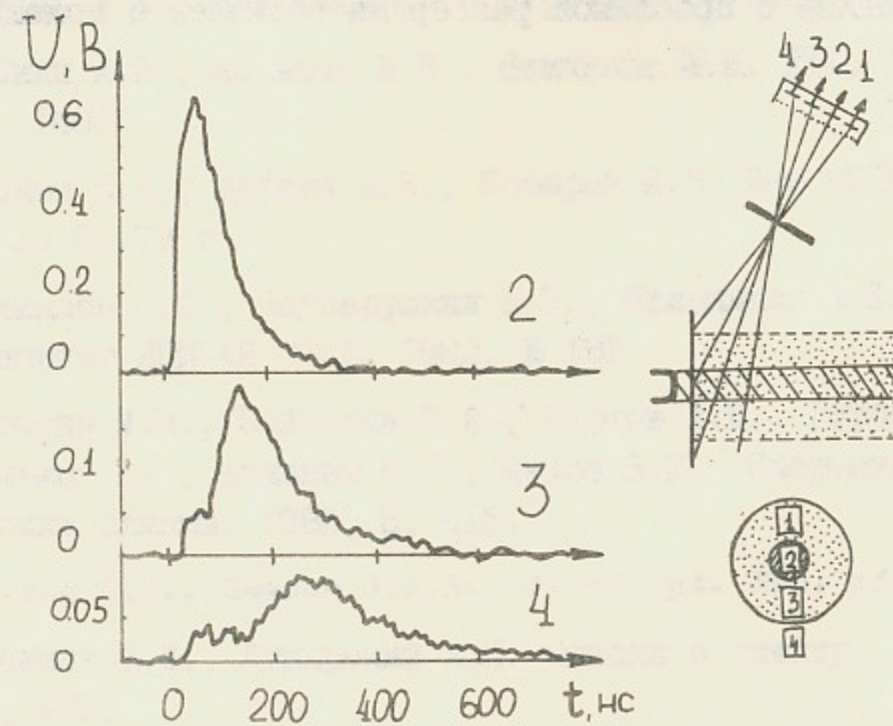


Рис.5. Схема измерений скорости разлета плазмы фольги и осциллограммы сигналов детектора в режиме камеры-обскуры. Диаметр РЭП 1,2 см. Цифры - номера каналов.

2+3 эВ. По измеренной температуре можно оценить энергозапас и характерную энергию этих электронов. Наблюдаемый нагрев фольги обусловлен в основном электронами с энергией порядка 1 кэВ, а их энергозапас составляет (60_{-30}^{+60}) Дж. Показано, что с увеличением углового разброса РЭП (с уменьшением эффективности взаимодействия его с плазмой) поток горячих электронов плазмы, покидающих ловушку, уменьшается.

Расширяющаяся плазма материала фольги может влиять на процессы вылета электронов из ловушки. Через время ~ 1 мкс эта плазма занимает уже значительную (несколько сантиметров) часть магнитной пробки, что облегчает уход быстрых частиц из установки. Наблюдаемые явления могут представлять также определенный интерес в связи с проблемой разогрева оболочек с помощью РЭП.

ЛИТЕРАТУРА :

- I. Arzhannikov A.V., Burdakov A.V., Koidan V.S., Vyacheslavov L.N. *Physica Scripta*, 1982, T2/2, 303.
2. Arzhannikov A.V., Burdakov A.V., Burmasov V.S., Koidan V.S., Konyukhov V.V., Mekler K.I., Rogozin A.I., Vyacheslavov L.N. *Proc. 3rd Int. Topical Conf. on High Power Electron and Ion Beams Res. and Techn.*, Novosibirsk, 1979, v. I, 29.
3. Анисимов С.И., Имас Я.А., Романов Г.С., Ходько Ю.В. Действие излучения большой мощности на металлы. М., Наука, 1970.
4. Добкин А.В., Немчинов И.В. *Журн. ПМТФ*, 1981, № 3, 14.
5. Добкин А.В., Косарев И.Б., Немчинов И.В. *ЖТФ*, 1979, 49, 1405.
6. Буздин В.Л., Добкин А.В., Косарев И.Б. Деп.ВИНИТИ № 340-79 от 30.01.79 г.
7. Филиппов С.С., Четверушкин Б.Н., Шильников Е.В. Препринт ИПМ АН СССР, 1982, № 187.
8. Бабыкин М.В., Байгарин К.А., Бартов А.В., Горбулин Ю.М., Данько С.А., Калинин Ю.Г., Махов В.Н., Скорюпин В.А. *Физика плазмы*, 1982, 8, 415.
9. Cairns R.B., Samson J.A.R. *J. of Opt. Soc. of America*, 1966, 56, 1568.
10. Савинов Е.П., Лукирский А.П. *Оптика и спектр.*, 1966, 23, 303.
11. Burns E.J.T., Thurston J.F. *Appl. Spectr.*, 1977, 31, 317.
12. Makarov O.A., Sinyukov M.P., Gluskin E.S., Zakharov V.M. *Nucl. Instr. and Meth.*, 1983, 208, 419.
13. Аржанников А.В., Бурдаков А.В., Койдан В.С., Коныхов В.В., Меклер К.И., Рогозин А.И. *Письма в ЖТФ*, 1978, 27, 173.

А.В.Бурдаков, В.С.Койдан, В.В.Поступаев

НАГРЕВ АНОДНОЙ ФОЛЫГИ ПРИ ЭФФЕКТИВНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ
РЭП С ПЛАЗМОЙ

Препринт
№ 85- 5

Работа поступила - 17 мая 1984 г.

Ответственный за выпуск - С.Г.Попов

Подписано к печати 24.1-1985 г. МН 05030

Формат бумаги 60x90 1/16 Усл.1.0 печ.л., 0.9 учетно-изд.л.

Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 5.

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР, г.Новосибирск. 90