

Исход

21

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
СО АН СССР

В.И.Давыденко, Н.Г.Хавин

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ФОРМИРОВАНИЯ ПУЧКОВ
ИОНОВ H^- В ПОВЕРХНОСТНО-
ПЛАЗМЕННЫХ ИСТОЧНИКАХ**

ПРЕПРИНТ ИЯФ 79 - 27

Новосибирск

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ПУЧКОВ
ИОНОВ H^+ В ПОВЕРХНОСТНО-ПЛАЗМЕННЫХ ИСТОЧНИКАХ

В.И. Давиденко, Н.Г. Хавин

А Н Н О Т А Ц И Я

Численными методами исследовалось формирование пучков ионов H^+ в поверхностно-плазменных источниках. Установлено, что изменения геометрии системы формирования слабо влияют на величину эмиттанса полученного пучка, а неоднородность эмиссионной плотности тока и резонансная перезарядка в ускоряющем промежутке значительно её увеличивают. Показано, что основные искажения поперечного фазового объема пучок получает на самом начальном этапе формирования.

I. В связи с реальной возможностью использования поверхностно-плазменных источников H^+ в ускорительной технике [1,2,3] появился ряд экспериментальных работ по исследованию ионно-оптических характеристик пучков, генерируемых такими источниками [4,5,6]. В настоящей работе проводилось численное моделирование электростатического формирования ионного пучка в поверхностно-плазменном источнике. Кроме сравнения с экспериментом, цель работы состояла в выяснении влияния геометрии электродов, неоднородности эмиссионной плотности тока H^+ и перезарядки в вытягивающем промежутке на ионно-оптические характеристики пучка.

2. Оптика источника является целевой с отношением длины щели к ширине $L/D = 20 \div 30$. Поэтому в пренебрежении краевыми эффектами можно ограничиться двумерной постановкой задачи. Для расчетов использовался комплекс программ решения задач электростатики КСИ-БЭСМ [7]. Решалась самосогласованная с учетом пространственного заряда задача о движении частиц в электрическом поле вытягивающего промежутка. Положение границы плазмы определялось итерационным способом. В результате интегрирования вдоль всей границы нормальная производная потенциала обращалась в нуль. В силу симметрии просчитывалась только одна половина системы формирования. Поток частиц H^+ , стартующих с границы плазмы, разбивался на 16 трубок тока. Начальная нормальная к границе скорость частиц соответствовала энергии $\sim 0,4$ эВ, тангенциальная скорость принималась равной нулю. Влияние сопутствующих электронов в расчетах не учитывалась. Время счета одного варианта системы формирования составляло ~ 10 минут.

3. Первой была просчитана система формирования ионного пучка, используемая в работе [4]. В этой системе, как показано на рис. I, фокусирующая плоскость электрода с эмиссионной щелью образует с плоскостью симметрии пирсовский угол. На стыке фокусирующей плоскости с эмиссионной щелью имеется скругление, возникающее за счет погрешностей технологической обработки и распыления материала электрода. Задача просчитывалась для следующих, близких к эксперименту, параметров: вытягивающее напряжение $U = 20$ кВ, эмиссионная плотность тока $j = 3A/cm^2$

и однородна поперек щели, расстояние от эмиссионной щели до вытягивающего электрода $L = 1,75$ мм. Как видно из рис.1, где представлены результаты счета, граница плазмы при таких условиях является вогнутой и находится внутри эмиссионной щели, пучок к выходу сильно сжимается и без потерь проходит вытягивающий электрод

На рис.2 приведены фазовые диаграммы данного пучка на границе плазмы и в выходном сечении. Формирование пучка происходит таким образом, что фазовая диаграмма, вначале упорядоченная, к выходу сильно запутывается, и в результате пучок на выходе из системы формирования имеет конечную величину эмиттанса. величиной эмиттанса будем считать площадь эллипса, охватывающего фазовую диаграмму, деленную на π . В обозначениях рис.2. $E_x = \Delta X \cdot \Delta \alpha_x \approx 0,14$ см.мрад. Соответствующая величина нормализованного эмиттанса $E_{nx} = \beta E_x \approx 0,9 \cdot 10^{-3}$ см.мрад, где $\beta = \sqrt{\frac{2eU}{mc^2}}$. Отсюда можно оценить приведенный к полуширине эмиссионной щели d разброс энергии поперечного движения $\Delta W = \frac{E_{nx}^2}{d^2} \cdot \frac{mc^2}{2} \approx 0,6$ эВ. Ясно, что существование начальной поперечной температуры пучка, сравнимой с этой энергией, приведет к замазыванию сложной структуры фазовой диаграммы пучка на выходе из системы формирования.

Дальнейшие расчеты показывают, что при замене пирсовского угла между фокусирующей плоскостью и плоскостью симметрии прямым, граница плазмы становится более вогнутой и отодвигается внутрь щели, пучок на выходе имеет вдвое большую ширину, однако величина эмиттанса с точностью до 10% не меняется. Если же при этих условиях снизить вытягивающее напряжение до 15 кВ, то граница плазмы становится менее вогнутой, её центр приближается к выходу на 0,02 мм, ширина пучка на выходе увеличивается вдвое, но величина нормализованного эмиттанса по-прежнему остается неизменной.

4. Для выяснения влияния неоднородности эмиссионной плотности тока был выбран вариант, в котором фокусирующая плоскость образует с плоскостью симметрии прямой угол и вытягивающее напряжение $U = 20$ кВ. При замене однородной поперек щели эмиссионной плотности тока $j_0 = 3$ А/см² плотностью, спадающей к краям щели по параболическому закону $j(x) = \frac{3}{2} j_0 (1 - \frac{x^2}{d^2})$, где

x - расстояние от плоскости симметрии, d - полуширина щели, множитель $3/2$ обеспечивает сохранение полного тока на единицу длины щели; граница плазмы становится вогнутой лишь вблизи края, фазовая диаграмма изгибается (рис.3), а величина эмиттанса возрастает в 2,5 раза.

5. Если в каждом из просчитанных вариантов интересоваться зависимостью нормализованного эмиттанса от расстояния до границы плазмы, то оказывается, что уже при удалении порядка полуширины щели величины нормализованного эмиттанса на выходе и в данном сечении совпадают. Этот факт свидетельствует о том, что основные искажения поперечного фазового объема пучок получает на самом начальном этапе формирования. В случае идеального пирсовского электрода, однородной эмиссионной плотности тока и рассчитанному по закону "трех вторых" вытягивающему напряжению $U = 15$ кВ, граница плазмы становится плоской, искажение фазового объема на начальном этапе незначительно, а нормализованный эмиттанс на выходе имеет величину $\sim 0,3 \cdot 10^{-3}$ см.мрад. Такая величина эмиттанса обусловлена действием поперечных полей на выходе и счетными погрешностями. Соответствующий разброс энергии поперечного движения $\sim 0,06$ эВ, что уже сравнимо с комнатной температурой. Поскольку отверстие для пучка в вытягивающем электроде является рассеивающей электростатической линзой, то любая частица пучка имеет упорядоченную расходимость $\frac{2}{3} \frac{x}{L}$, где x - расстояние до центра пучка, L - длина вытягивающего промежутка.

Можно одновременно увеличивать вытягивающее напряжение и длину зазора так, чтобы электрическое поле вблизи границы плазмы менялось незначительно. При этом не должна меняться и величина нормализованного эмиттанса на выходе, поскольку она обусловлена искажениями на самом начальном этапе формирования. Нами просчитывался вариант увеличения вытягивающего зазора с $L_1 = 1,75$ мм до $L_2 = 3$ мм и напряжения с 20 до 35 кВ. При этом, действительно, величина нормализованного эмиттанса на выходе не менялась. Как и ожидалось, упорядоченная расходимость уменьшилась в L_1/L_2 раз.

6. Моделирование перезарядки $H^+ + H \rightarrow H + H^+$ в ускоряющем промежутке на вытекающем из щели водорода проводилось в вариан-

те с следующими параметрами: фокусирующая плоскость образует с плоскостью симметрии прямой угол, вытягивающее напряжение 20 кВ, вытягивающий зазор 1,75 мм, эмиссионная плотность тока однородна поперек щели и равна 3 А/см^2 . Моделирование проводилось посредством расчета траектории 170 частиц H^+ , образовавшихся в вытягивающем промежутке. Пространственная плотность точек образования таких частиц выбиралась пропорциональной произведению локальных значений плотности тока основного пучка, плотности газа и сечения перезарядки. Считалось, что плотность газа в промежутке пропорциональна угловому раствору, в который из данной точки видна эмиссионная щель. В расчетах принято, что общий ток образовавшихся в ускоряющем промежутке частиц составлял малую долю от полного тока. Результаты расчета эмиттансов приведены на рис. 4. Видно, что эмиттанс образовавшихся в ускоряющем промежутке частиц имеет значительно большую, чем для основного пучка, величину. Причем возрастание эмиттанса связано как с увеличением углового разброса так и разброса по координатам.

7. Выше указывалось, что неоднородность эмиссионной плотности тока поперек щели и перезарядка в ускоряющем промежутке увеличивают эмиттанс пучка. Из ранее приведенных соображений ясно, что неоднородность эмиссионной плотности тока вдоль щели также приведет к увеличению общего эмиттанса. Дело в том, что в разных участках щели величины эмиттансов, может быть, и не сильно различаются, но расположение эллипсов на фазовой плоскости разное. При учете всех участков щели общий эмиттанс возрастает в основном за счет различного расположения эллипсов. Такая неоднородность увеличивает эмиттанс и вдоль щели. Граница плазмы вдоль щели становится профилированной, что приводит к появлению соответствующего разброса скоростей.

8. Полученные результаты не противоречат имеющимся экспериментальным данным. При визуальных наблюдениях пучка по свечению водорода обнаружено уменьшение поперечного размера в районе вытягивающего электрода (ср. рис. 1), причем ширина пучка зависела от тока и вытягивающего напряжения. Измеренное в эксперименте [4] минимальное значение эмиттанса на расстоянии 20-30 см от источника имеет величину в 3-4 раза большую, чем расчетная без учета перезарядки. Это отличие может быть объяснено

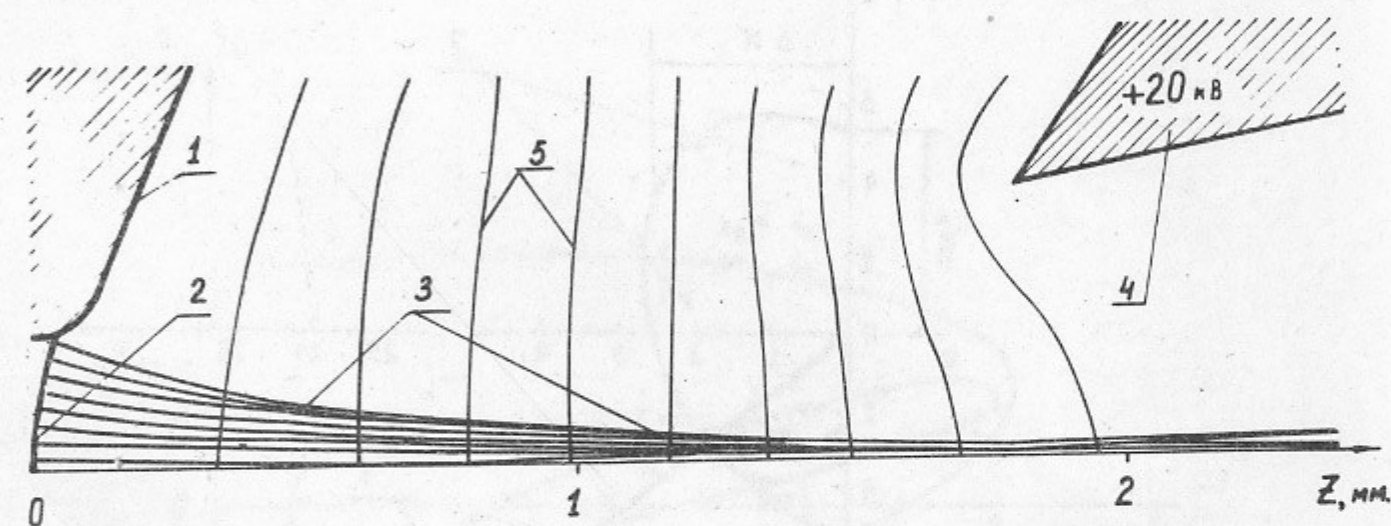


Рис. 1. Результаты численного счета системы формирования пучка ионов H^+ , использованной в работе [4]. 1 - фокусирующая плоскость электрода с эмиссионной щелью, 2 - граница плазмы, 3 - траектория частиц H^+ (показаны через одну), 4 - вытягивающий электрод, 5 - эквипотенциали (показаны через 2 кВ).

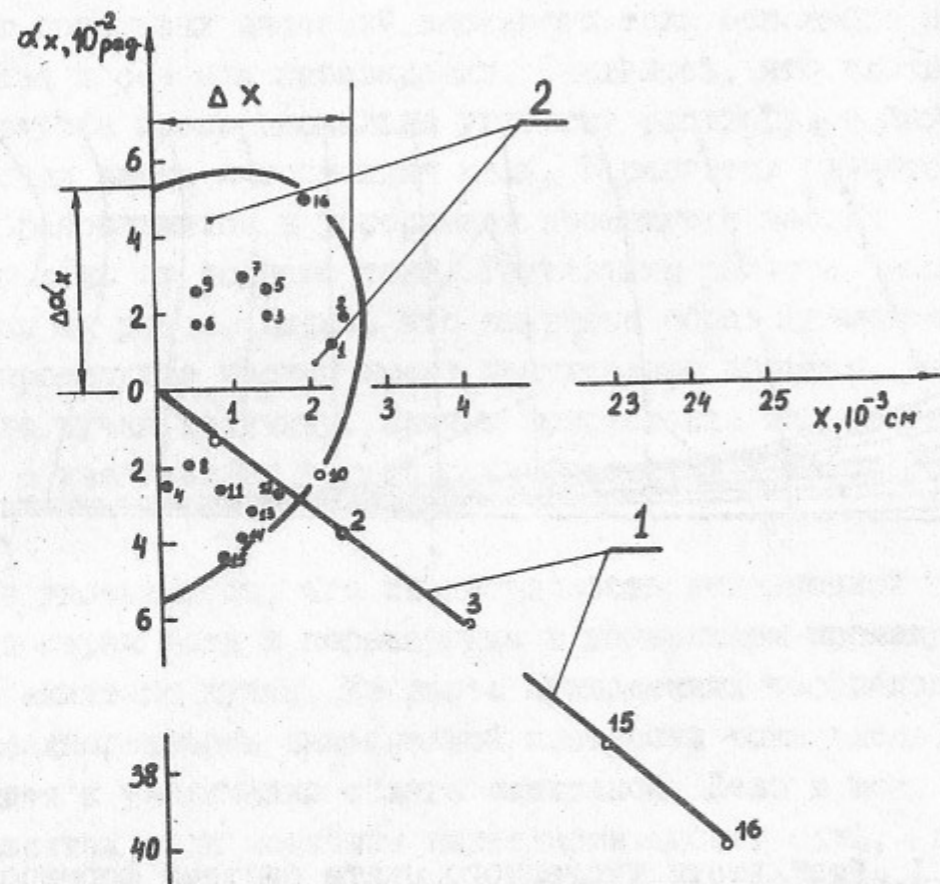


Рис.2. Фазовые диаграммы пучка, изображенного на рис.1. 1 - на границе плазмы, 2 - на выходе из системы формирования (в сечении $Z = 2,1$ мм).

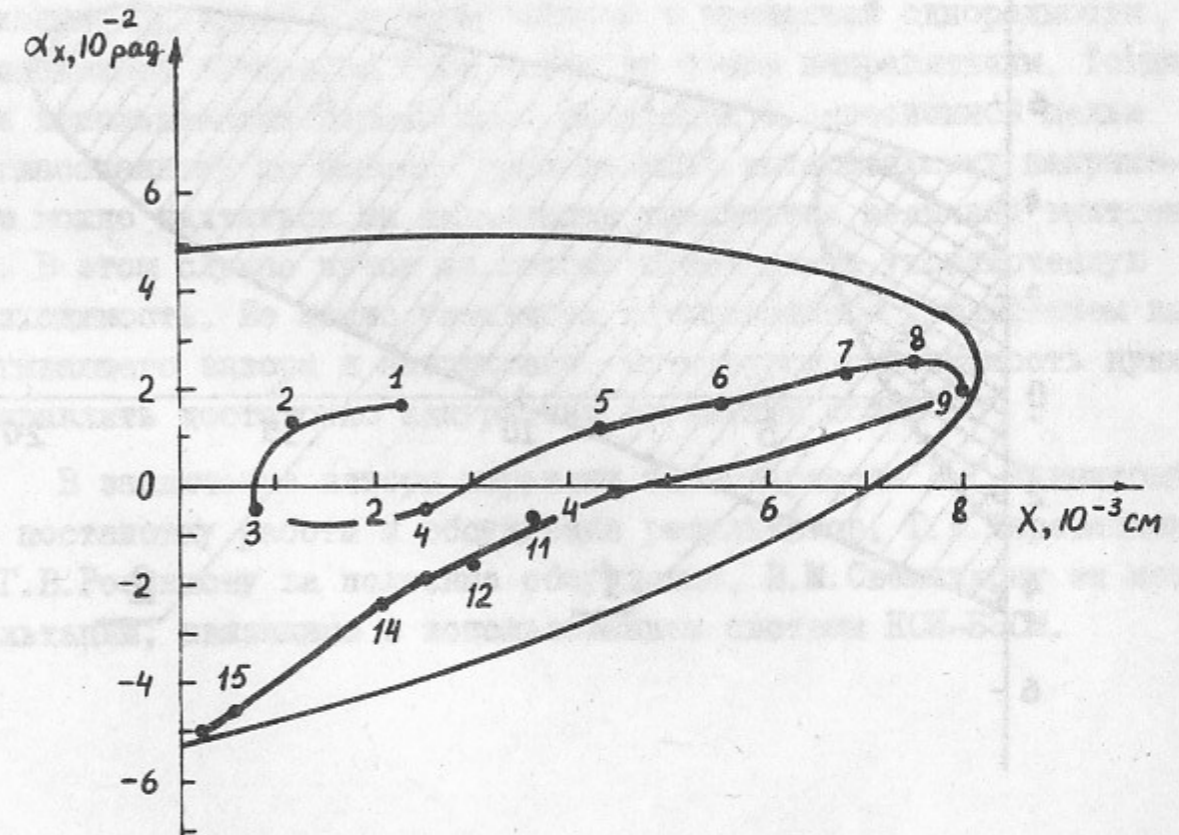


Рис.3. Фазовая диаграмма пучка на выходе из системы формирования в случае неоднородной эмиссионной плотности тока.

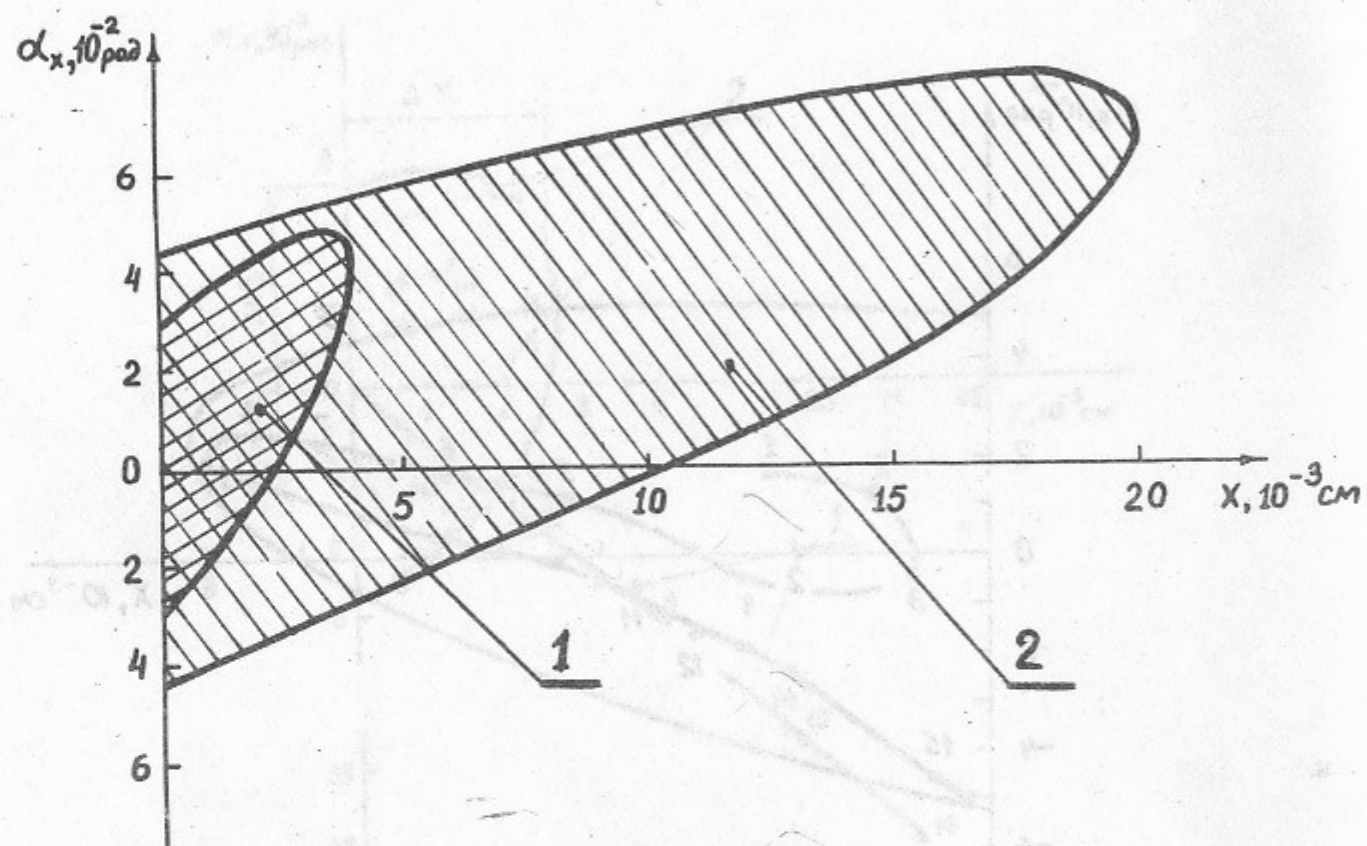


Рис. 4. Эмиттансы основного пучка-I и частиц H^+ , образовавшихся за счет резонансной перезарядки в ускоряющем промежутке - 2.

как процессами в системе формирования: влиянием начальной температуры ионов, неоднородностью плотности тока, перезарядкой, неточностью юстировки; так и процессами, связанными с транспортировкой пучка. К сожалению, отсутствие экспериментальных данных об эмиттансе пучка непосредственно на выходе источника не позволяет провести более детального сравнения.

9. На основании проведенных расчетов можно предложить следующую возможность уменьшения величины эмиттанса источника. Необходимо добиться пространственной и временной однородности эмиссионной плотности тока ионов по обоим направлениям. Тогда при использовании пирсовского электрода с эмиссионной щелью и согласованному по закону "трех вторых" вытягивающему напряжению можно надеяться на дальнейшее уменьшение величины эмиттанса. В этом случае пучок на выходе будет иметь упорядоченную расходимость. Ее можно уменьшить согласованным увеличением вытягивающего зазора и напряжения. Оставшаяся расходимость нужно исправлять достаточно аккуратным магнитным полем [5].

В заключение авторы выражают благодарность В.Г.Дудникову за постановку работы и обсуждение результатов, Г.Е.Деревянкину и Г.В.Рослякову за полезные обсуждения, В.М.Свешникову за консультации, связанные с использованием системы КСИ-БЭСМ.

Л и т е р а т у р а

1. Г.И.Димов, В.Г.Дудников. Физика плазмы, 4, 692 (1978).
2. CERN Courier, 18, 4, 122 (1978).
3. G.I.Dimov, G.E.Derevjankin and V.G.Dudnikov, IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-24, 3, 1545 (1977).
4. Г.Е.Деревянкин, В.Г.Дудников, В.С.Кленов. ИТФ, 48, 404 (1978).
5. P.Allison, Proc. Simp. Brookhaven, 119 (1977).
6. C.W.Schmidt and C.D.Curtis, Proc. Simp. Brookhaven, 123 (1977).
7. В.П.Ильин. Численные методы решения задач электрооптики. Новосибирск, "Наука", 1974.

Работа поступила - 10 апреля 1979 г.

Ответственный за выпуск - С.Г.ПОПОВ

Подписано к печати 23.IV-1979 г. МН 02776

Усл. 0,5 печ.л., 0,4 учетно-изд.л.

Тираж 200 экз. Бесплатно

Заказ № 27.

Отпечатано на ротапринте ИЯФ СО АН СССР