

СОВЕЩАНИЯ И КОНФЕРЕНЦИИ

53(048)

**НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОТДЕЛЕНИЯ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ
И АСТРОНОМИИ И ОТДЕЛЕНИЯ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
АКАДЕМИИ НАУК СССР
(24 — 25 декабря 1980 г.)**

24 и 25 декабря 1980 г. в Физическом институте им. П. Н. Лебедева АН СССР состоялась совместная Научная сессия Отделения общей физики и астрономии и Отделения ядерной физики АН СССР. На сессии были заслушаны доклады:

24 декабря

(заседание, посвященное 100-летию со дня рождения академика Н. Д. Папалекси)

1. В. В. Мигулин, Н. Д. Папалекси (к столетию со дня рождения).
2. В. К. Абалакин, Ю. Л. Кокурин. Оптическая локация Луны.
3. Л. А. Кулевский. Параметрический генератор инфракрасного излучения.
4. А. Е. Саломонович, Н. Д. Папалекси и советская радиоастрономия.

25 декабря

5. Г. И. Димов. Получение интенсивных пучков отрицательных ионов и ускоренных атомов водорода.

6. В. А. Кузьмин. Нейтронные осцилляции (по итогам поездки в ЦЕРН). Доклады, прочитанные на заседании 24 декабря 1980 г., посвященном 100-летию со дня рождения академика Н. Д. Папалекси, публикуются выше, в разделе «Из истории физики», краткое содержание доклада Г. И. Димова публикуется далее.

539.188(048)

Г. И. Димов. Получение интенсивных пучков отрицательных ионов и ускоренных атомов водорода. В последние десятилетия в ускорителях заряженных частиц и в исследованиях по термоядерному синтезу все более широкое применение получает перезарядный метод воздействия на движение потоков ускоренных частиц, основанный на целенаправленном изменении их зарядовых состояний (умножение энергии частиц в электростатических ускорителях, инжекция протонов в кольцевые ускорители, вывод частиц из циклических ускорителей, разводка пучков высоких энергий; накопление, поддержание, нагрев и диагностика высокотемпературной плазмы)¹. Перезарядный метод приносит в эти области науки и техники принципиально новые возможности, связанные с тем, что перезарядка частиц снимает ограничения на их движение, устанавливаемые классическими теоремами Пуанкаре и Лиувилля.

Для реализации перезарядных процессов в протонных ускорителях и термоядерных установках необходимы пучки отрицательных ионов и ускоренных атомов изотопов водорода соответствующей интенсивности.

Один из основных методов получения пучков отрицательных ионов — перезарядный метод, заключающийся в двойной перезарядке положительных ионов относительно небольшой энергии в отрицательные, начал развиваться с 1956 г. В 1961 г. интенсивность полученных пучков этих ионов не превышала 200 мкА.

Используя специально разработанный многоапертурный сильноточный источник положительных ионов, нам удалось значительно увеличить интенсивность пучков отрицательных ионов, получаемых перезарядным методом. Этот ионный источник^{2,3} отличался от известных к тому времени источников способом получения плазмы и много-

целевой системой вытягивания положительных ионов из плазмы. Многощелевая система вытягивания позволила получить пучок протонов с током до 3 А при энергии 13 кэВ (эмиссионный диаметр пучка 2,2 см). Достигнутый приведенный первеанс протонного пучка в 87 мкА·В^{-3/2} соответствовал повышению тока протонов по сравнению с током обычного одноапертурного ионного источника на два порядка. Незначительное количество примесей в ионном пучке (содержание протонов в пучке достигает 95%, примеси тяжелых элементов не превышают 1%), низкая эмиссионная температура плазмы (0,25 эВ), хорошая однородность плазмы на эмиссионной поверхности и стабилизация этой поверхности сеткой обеспечили относительно высокое качество пучка при большой интенсивности.

Пучок ионов Н⁻ получался перезарядкой протонов на водороде в перезарядной трубке, устанавливаемой непосредственно за щелевой вытягивающей системой. При этом была достигнута хорошая компенсация пространственного заряда ионов. К 1968 г. был получен пучок ионов Н⁻ с током до 15 мА⁴, что в 3 раза превышало абсолютные результаты по получению отрицательных ионов, полученные в других лабораториях. К 1973 г., впервые применив в источниках для перезарядки положительных ионов в отрицательные пароструйную натриевую мишень, были получены хорошо сформированные пучки ионов Н⁻ с током 76 мА, ионов D⁻ с током 104 мА, ионов He⁻ с током до 12,5 мА⁶. Одновременно при перезарядке на водороде ток пучка ионов Н⁻ был доведен до 54 мА³. На базе выполненных экспериментов был разработан перезарядный источник ионов Н⁻ для ускорителя Ван де Граафа, который был использован в качестве перезарядного инжектора ионов Н⁻ в накопительное кольцо. В 1973 г. от перезарядного инжектора был получен импульсный пучок ионов Н⁻ с энергией 1 МэВ и током 20 мА длительностью 200 мксек⁶.

В других лабораториях перезарядные источники продолжают развиваться, при этом наилучшие результаты в последнее время достигнуты по опробованной нами схеме (многощелевая система вытягивания ионов с перезарядкой в парах натрия). Получены пучки ионов Н⁻ и D⁻ с токами 1,4 и 2,2 А в ИАЭ им. И. В. Курчатова и в Ливерморе соответственно^{7,8}.

В 1965 г. Эйлерсом был разработан пеннинговский плазменный источник ионов Н⁻ с током в 5 мА, в котором отрицательные ионы образуются в газоразрядной плазме за счет диссоциации молекул и молекулярных ионов при столкновениях с электронами⁹. Перейдя от пеннинговской к газоразрядной камере в виде плоского магнетрона (планотрона), нам удалось повысить ток ионов Н⁻ из плазменного источника до 22 мА¹⁰.

Близость катода к эмиссионному отверстию в планотроне позволила, как это выяснилось позже, обнаружить повышение выхода ионов Н⁻ при добавлении к водороду паров цезия (от 5 до 20 мА)¹¹. Одновременно нами был достигнут высокий коэффициент вторичной эмиссии ионов Н⁻ с цезированной поверхности вольфрама при бомбардировке ее ионами в атмосфере водорода¹². Это обстоятельство, увеличение выхода ионов Н⁻ с уменьшением толщины слоя плазмы между катодом и эмиссионным отверстием, уменьшение выхода ионов Н⁻ с увеличением плотности водорода и насыщение этого выхода с увеличением плотности плазмы позволили предположить, что интенсивные потоки ионов Н⁻ из плазмы обусловлены эмиссией в разряд этих ионов с поверхности катода. Основанная на этой версии оптимизация геометрии и режима разряда привела в начале 1972 г. к получению пучков ионов Н⁻ с током 200 мА¹³. Исследования энергетических спектров получаемых ионов Н⁻ и ряд других экспериментов^{14,15}, а также расчеты выхода ионов Н⁻ с поверхности^{16,17}, позволили однозначно установить следующий поверхностно-плазменный механизм образования интенсивных потоков ионов Н⁻ из водородной плазмы с примесью цезия^{18,19}.

Электроды в газоразрядной плазме бомбардируются быстрыми ионами и атомами, образующимися в результате ионизации газа, ускорения ионов в электрических полях, диссоциации молекулярных ионов и перезарядки частиц. В результате отражения быстрых частиц и распыления ими водорода, сорбирующегося на электродах, возникает поток водородных частиц с поверхности электродов со значительными скоростями. За счет обмена электронами между электродом и удаляющимися частицами часть удаляющихся атомов захватывает электроны на уровне электронного средства и уходит за поверхностный барьер в виде свободных отрицательных ионов. При достаточно малой толщине плазмы над электродом выходящие с его поверхности отрицательные ионы могут без больших потерь проходить через слой плазмы к системе вытягивания. Наиболее благоприятна эмиссия отрицательных ионов с катода: больше плотность бомбардирующих ионов и атомов, удаляющиеся от поверхности отрицательные ионы ускоряются в прикатодном падении потенциала. Сорбция цезия обеспечивает понижение работы выхода поверхности электродов. Однако в условиях газового разряда не представляется возможным понизить работу выхода ниже 1,5 эВ, что все еще значительно выше энергии электронного средства атомов водорода. Неожиданно большой (~1) выход ионов Н⁻ с поверхности в этих условиях объясняется дальним действием сил изображения электронов и высокой скоростью (~10 эВ) большинства отраженных и распыленных водородных частиц.

К 1973 г. поверхностно-плазменным методом был получен пучок ионов H^- с током до 300 мА при эмиссионной плотности до $3,7 \text{ А/см}^2$ ¹⁴. К 1974 г. ток ионов H^- был увеличен до $0,9 \text{ А}$ ²⁰, а в конце 1979 г. получен пучок ионов H^- с током 4 А ²¹. К 1977 г. был разработан поверхностно-плазменный источник для ускорителей, в частности, для строящейся в СССР мезонной фабрики^{22,23}. Его параметры: импульсная интенсивность пучка до 150 мА, длительность импульсов до 300 мксек, частота следования импульсов до 100 Гц, энергия ионов до 30 кэВ.

Поверхностно-плазменный метод позволяет получать отрицательные ионы не только водорода, но и многих других элементов. Имеется принципиальная возможность создания квазистационарных многоамперных поверхностно-плазменных источников с достаточно высокой газовой эффективностью для атомарных инжекторов термоядерных установок. Работы по созданию поверхностно-плазменных источников отрицательных ионов развиваются в ряде других лабораторий.

Поверхностно-плазменный метод позволяет получать интенсивные пучки атомов водорода с энергией порядка 100 эВ: отрицательные ионы, образующиеся на поверхности катода газоразрядной камеры, ускоряются в прикатодном падении потенциала и при прохождении умеренно толстого слоя плазмы и газа преобразуются в поток быстрых атомов. В 1979 г. по этой схеме был получен пучок атомов водорода с током $2,7 \text{ А}$ энергией 200 эВ и энергетическим разбросом $\pm 15\%$ ²⁴.

В 1973—1976 гг. в ряде лабораторий разработаны инжекторы атомов водорода нескольких типов с током в десятки ампер и энергией в десятки кэВ для термоядерных установок²⁵⁻²⁸. Эти инжекторы представляют собой плазменные источники положительных ионов с большой площадью эмиссии и многоапертурной системой вытягивания, в которых непосредственно после вытягивания и ускорения ионы перезаряжаются в атомы на выходящем из источников водороде. В настоящее время ток и энергия атомарных пучков из подобных инжекторов приближаются к 80 А и 120 кэВ соответственно.

Аналогичные атомарные инжекторы, отличающиеся высоким содержанием атомарных ионов в первичном пучке 95%, разрабатываются у нас в Новосибирске. В 1980 г. здесь получен пучок атомов водорода с энергией 25 кэВ и током 35 А. В 1974—1979 гг. разработаны диагностические атомарные инжекторы ДИНА-1, ДИНА-2 и ДИНА-3 на энергию до 25 кэВ и ток до 3,5 А, отличающиеся малыми энергетическим и угловым разбросами. С помощью инжектора ДИНА-1 на установке Т-4 ИАЭ имени И. В. Курчатова впервые измерены локальные параметры ионов высокотемпературной плазмы в токамаках. Инжектор ДИНА-3 установлен на токамаке Т-10.

Выход атомов водорода при перезарядке из положительных ионов быстро падает с энергией и составляет $\sim 20\%$ при 100 кэВ на нуклон. При энергии свыше 50—100 кэВ/нуклон атомы водорода выгоднее получать конверсией из ускоренных отрицательных ионов. Нами была предложена и экспериментально исследована плазменная мишень, в которой достигнут коэффициент конверсии ионов H^- и D^- в атомы с энергией до 1 МэВ и выше в 84%³²⁻³⁴. Состояние разработок поверхностно-плазменных и перезарядных источников ионов H^- и D^- позволяет надеяться на создание мощных инжекторов атомов водорода высокой энергии для термоядерных установок в ближайшем будущем.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Димов Г. И., Дудник В. Г. — Физ. плазмы, 1978, т. 4, с. 692.
2. Димов Г. И., Кононенко Ю. Г., Савченко О. Я., Шамовский В. Г. — ЖТФ, 1968, т. 38, с. 997.
3. Димов Г. И., Росляков Г. В. — ПТЭ, 1974, № 1, с. 29.
4. Димов Г. И., Савченко О. Я. — ЖТФ, 1968, т. 38, с. 2002.
5. Димов Г. И., Росляков Г. В. — ПТЭ, 1974, № 3, с. 31.
6. Димов Г. И., Росляков Г. В. — ПТЭ, 1974, № 2, с. 33.
7. Semashko N. N., Kusnetsov V. V., Krylov A. I. — In: Proc. of Symposium on Production and Neutralization of Negative Hydrogen Ions and Beams. — Brookhaven. BNL-50727, — 1977. — P. 170.
8. Hooper E. B., Jr., Poulsen P. Preprint LLL UCRL-84962. — Livermore, 1980.
9. Ehlers K. W. — Nucl. Instrum. and Meth., 1965, v. 52, p. 309.
10. Бельченко Ю. И., Димов Г. И., Дудников В. Г. — ЖЭТФ, 1973, т. 43, с. 1720.
11. Дудников В. Г. Авторское свидетельство М. Кл. НОИ 3/40, № 411542 — Бюл. изобретений... 1974, № 2.
12. Бендер Е. Д., Димов Г. И., Кишиневский М. Е. В кн.: Труды I Всесоюзного семинара по вторичной ион-ионной эмиссии. — Харьков, 1975. — С. 119; ДЭП. ВИНТИ № 2783-75. — 1975.
13. Dimov G. I. Report at II Symposium on Ion Sources and Formation of Ion Beams. — Berkeley, 1974.

14. Бельченко Ю. И., Димов Г. И., Дудников В. Г., Иванов А. А.— ДАН СССР, 1973, т. 243, с. 1283.
15. Бельченко Ю. И., Димов Г. И., Дудников В. Г.— ЖТФ, 1973, т. 43, с. 1720.
16. Кишиневский М. Е.— ЖТФ, 1975, т. 45, с. 1281
17. Кишиневский М. Е.— ЖТФ, 1978, т. 48, с. 773.
18. Бельченко Ю. И., Димов Г. И., Дудников В. Г.— ЖТФ, 1975, т. 45, с. 68.
19. Bel'shenko Yu. I., Dimov G. I., Dudnikov V. G.— Цит. в 7 сб.— Р. 79.
20. Bel'shenko Yu. I., Dimov G. I., Dudnikov V. G.— Nucl. Fusion, 1974, v. 14, т. 113.
21. Бельченко Ю. И., Дудников В. Г. Препринт ИЯФ СО АН СССР 80-34, Новосибирск, 1980.
22. Дудников В. Г.— В кн.: Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Москва, 1974.— М.: Наука, 1975.— т. 1, с. 327.
23. Dimov G. I., Derevyankin G. Ye., Dudnikov V. G.— IEEE Trans. Nucl. Sci., 1977, v. NS-24, p. 1545.
24. Дудников В. Г., Фиксель Г. И.— Физ. плазмы, 1980, т. 6, вып. 6.
25. Ehlers K. W., Baker W. K., Berkner K. H., Cooper W. S., Kunkel W. B., Pyle R. V., Stearns J. W.— J. Vac. Sci. and Technol., 1973, v. 10, p. 922.
26. Semashko N. N., Pleshivtsev N. V., Kusnetsov V. V., Maximenko B. P., Malakhov N. P.— In: Proc. of II Symposium on Ion Sources and Formation of Ion Beams.— Berkeley, California, LBL-3399, 1974, Rept. VI-11.
27. Stirling W. L., Davis R. C., Morgan O. B., Schechter D. E., Stewart L. D., Wright R. E.— Ibid.— Rept. VI-10.
28. Furmelli M., Valckx F. P. G.— Nucl. Instrum. and Meth., 1976, v. 135, p. 203.
29. Димов Г. И., Росляков Г. В., Савкин В. Я.— ПТЭ, 1977, № 4, с. 29.
30. Росляков Г. В., Савкин В. Я.— ПТЭ, 1978, № 1, с. 148.
31. Давыденко В. И., Морозов И. И., Росляков Г. В. Препринт ИЯФ СО АН СССР 80-118, Новосибирск, 1980.
32. Dimov G. I., Roslyakov G. V.— Nucl. Fusion, 1975, v. 15, p. 551.
33. Димов Г. И., Иванов А. А., Росляков Г. В.— Физ. плазмы, 1980, т. 6, с. 933.
34. Иванов А. А., Росляков Г. В.— ЖТФ, 1980, т. 50, с. 2300.