

СОВЕЩАНИЯ И КОНФЕРЕНЦИИ

53(048)

**НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОТДЕЛЕНИЯ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ
И АСТРОНОМИИ АКАДЕМИИ НАУК СССР**

(29—30 июня 1977 г.)

29 и 30 июня 1977 г. в конференц-зале Физического института имени 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:

1. Н. В. Карлов. Лазерное разделение изотопов.
 2. В. В. Смирнов. Когерентная спектроскопия комбинационного рассеяния света газами.
 3. В. В. Коробкин, Б. М. Степанов, С. Д. Фанченко, М. Я. Щелев. Пико-фемтосекундная электронно-оптическая фотография.
 4. А. А. Коломенский. Коллективные методы ускорения частиц.
 5. Я. Б. Файнберг, Н. А. Хижняк. Плазменные методы ускорения.
 6. В. П. Саранцев. Ускорение ионов в электронных кольцах.
- Ниже публикуется краткое содержание пяти из прочитанных докладов.

Т621.378+621.039.3(048)

Н. В. Карлов. Лазерное разделение изотопов. Высокая спектральная яркость лазерного излучения делает возможным селективное протекание процессов фотоионизации, фотодиссоциации, фотохимических процессов и т. п. Резонансное воздействие лазерного излучения на вещество может быть применено для разделения изотопов. Применение лазеров делает метод разделения изотопов с помощью оптического излучения достаточно универсальным и, в принципе, производительным. В основе всех методов лазерного разделения изотопов лежит уникальное свойство лазерного излучения воздействовать только на желаемые изотопы в их природной смеси, а не на всю смесь в целом, как это характерно для всех остальных методов разделения изотопов. Общим для всех методов лазерного разделения изотопов является селективное возбуждение желаемой изотопической компоненты лазерным излучением и пространственный отбор возбужденных изотопов. При этом физические или химические процессы второго этапа должны идти с минимальной потерей селективности.

Так как квантовый выход селективного фотопроцесса не может превышать единицу, то очевидно, что производительности процесса в 1 г-моль выделяемого вещества в минуту соответствует мощность излучения не менее 10^{22} квантов лазерного света в секунду.

Ответ на вопрос о том, какие лазерные кванты необходимы, дает анализ методов лазерного разделения изотопов. К настоящему времени сформировались три метода лазерного разделения изотопов — селективная фотоионизация атомов, многоступенчатая селективная диссоциация многоатомных молекул инфракрасным излучением и селективные гетерогенные процессы.

Двухступенчатая селективная фотоионизация атомов является наиболее общим методом лазерного разделения изотопов. Она может быть применена для извлечения любого изотопа любого элемента периодической таблицы Менделеева при условии, что можно создать необходимую плотность атомных паров. Эта методика была успешно реализована при разделении изотопов всех элементов группы редких земель, имеющих стабильные изотопы. Для получения плотного атомного пара использовано бестигельное испарение электронным пучком. Двухчастотное селективное воздействие оказалось мощным средством спектроскопических исследований, дающим, в частности,

возможность точно регистрировать спектры сверхтонкой структуры нечетных изотопов и сечения резонансной передачи энергии возбуждения в парах тяжелых металлов.

При многоступенчатой селективной фотодиссоциации молекул излучением инфракрасных лазеров используются колебательные уровни многоатомных молекул. Элементарный акт диссоциации вызывается поглощением молекулой большого количества квантов инфракрасного лазерного излучения, резонансного для колебательных переходов молекулы. В этом процессе существенную роль играет наличие у многоатомных достаточного симметричных молекул квазиконтинуума высших колебательных состояний, обладающего зонной структурой.

Экспериментально показано наличие квазиконтинуума и установлена важная роль его зонной структуры, приводящей к эффекту красного смещения — резкому снижению порога диссоциации и увеличению ее скорости при отстройке частоты излучения лазера, проходящего квазиконтинуум, в сторону низких частот по отношению к резонансной частоте.

Селективная ионизация атомов и диссоциация молекул — принципиально новые методы разделения изотопов. Вместе с тем резонансное лазерное воздействие может ускорять молекулярно-кинетические процессы разделения изотопов, протекающие в существенно гетерофазных условиях. Осуществлено разделение изотопов бора в лазерной хроматографической колонке, в лазерной фильтрационной ячейке и при лазерном резонансном испарении.

Энергетически современная квантовая электроника готова к решению задач лазерного разделения изотопов. Вместе с тем эти задачи выдвигают достаточно жесткие требования к лазерным системам. Из них основными являются требования высокого к. п. д., перестройки, монохроматичности, стабильности, высокой средней мощности, большого ресурса работы и высокой надежности.

ЛИТЕРАТУРА

- Н. В. Карлов, А. М. Прохоров, УФН 118, 583 (1976).
 В. С. Летохов, С. Б. Мур, Квант. электрон. 3, 248, 485 (1976).
 Н. Г. Басов, Э. М. Беленков, В. А. Исаков, Е. П. Марки Н, А. Н. Ораевский, УФН 121, 427 (1977).
 Н. В. Карлов, А. М. Прохоров, УФН 123, 57 (1977).

535.375.5(048)

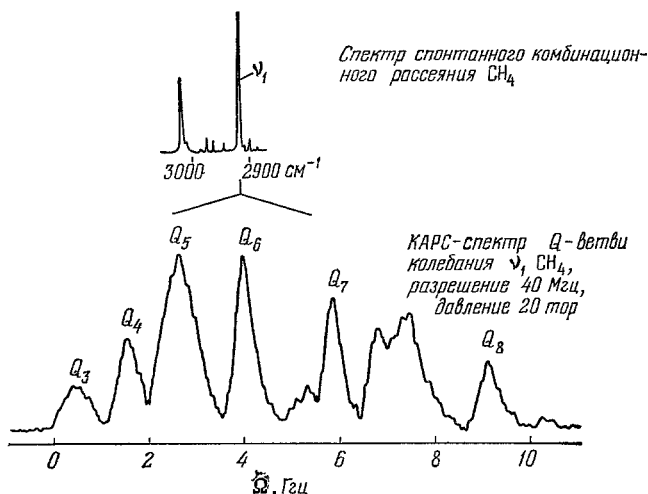
В. В. Смирнов. Когерентная спектроскопия комбинационного рассеяния света в газах. В последние несколько лет благодаря прогрессу в области перестраиваемых когерентных источников света получили развитие метод когерентной спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) света. В основе этого метода лежит процесс смещения световых волн в средах, обладающих кубичной нелинейной восприимчивостью $\chi^{(3)}$, возможность которого экспериментально была впервые продемонстрирована в работе¹. В таком процессе в пространственно-когерентных полях двух интенсивных лазеров с частотами ω_1 и $\omega_2 = \omega_1 - \Omega$, где Ω — частота исследуемого комбинационно-активного перехода, происходит бигармоническое возбуждение колебаний среды. Бигармоническая «накачка» позволяет, во-первых, получить большие числа заполнения возбуждаемых состояний и, во-вторых, сфазировать колебания среды по объему взаимодействия. Интенсивность рассеянного такой средой излучения накачки значительно превосходит интенсивность спонтанного рассеяния, но вместе с тем конкуренция линий не возникает, так как порог вынужденного КР (ВКР) не достигается. Перестраивая частоту одного из лазеров и изменяя тем самым разность $\omega_1 - \omega_2$, можно последовательно возбудить и исследовать ряд комбинационно-активных колебаний. Экспериментально регистрируется сигнал когерентного антистоксова рассеяния света (КАРС). Другой важной особенностью является то, что рассеянное излучение сосредоточено в дифракционный угол, т. е. лазероподобно, в отличие от случая спонтанного КР, где индикатриса рассеяния изотропна. Для повышения эффективности рассеяния наряду с законом сохранения энергии должен быть выполнен закон сохранения импульса:

$$2\omega_1 - \omega_2 = \omega_a, \quad 2\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2 = \mathbf{k}_a.$$

При коллинеарном распространении эффективное взаимодействие происходит на длине когерентности, т. е. длине фазового рассогласования, определяемой дисперсией среды ($\Delta k L_{\text{кор}} \approx \pi$). Характерные длины когерентности в жидкостях и твердых телах составляют единицы и доли миллиметра, а в газах при нормальной плотности сотни миллиметров. Простой расчет показывает, что данный метод при использовании лазеров даже со сравнительно низким уровнем выходной мощности (~ 1 ватт) позволяет повысить яркость рассеянного излучения по крайней мере в 10^9 раз.

Вышеперечисленные особенности КАРС делают этот метод идеальным при регистрации комбинационно-активных спектров в сильно люминесцирующих средах (какими, например, являются биологические объекты), при исследованиях плазмы, разрядов, в задачах фотохимии. В целом ряде исследований была продемонстрирована возможность применения данного метода для спектроскопии КР в твердых телах ^{2,3}, жидкостях ^{4,5} и газах ⁶⁻¹⁰.

В докладе приводятся в основном результаты, демонстрирующие возможности КАРС спектроскопии колебательно-вращательных переходов в газах. Так, например,



в работах ⁶⁻⁸ определялись вращательная и колебательная температуры в газовых разрядах и пламенах, а также топография интересующего фрагмента в газовых пламенах с пространственным разрешением ~ 20 мкм.

Одной из принципиальных проблем в спектроскопии КР является проблема повышения спектрального разрешения. При регистрации спонтанного КР на уникальных лабораторных установках с экспозициями в несколько десятков часов удается получить разрешение не лучше $0,1 \text{ см}^{-1}$. В методе КАРС разрешение определяется шириной линии генерации лазеров. Применение одночастотных непрерывных лазеров позволило авторам работ ^{9,10} получить рекордное для КР разрешение 40 МГц ($\sim 0,001 \text{ см}^{-1}$) и полностью разрешить спектры Q -ветвей ряда молекулярных колебаний (см. рисунок).

ЛИТЕРАТУРА

1. P. D. Maker, R. W. Terhune, Phys. Rev. A136, 801 (1965).
2. С. А. Ахманов, В. Г. Дмитриев, А. И. Ковригин, Н. И. Коротеев, В. Г. Тункин, А. И. Холодных, Письма ЖЭТФ 15, 600 (1972).
3. J. J. Wynne, Phys. Rev. Lett. 29, 650 (1972).
4. R. L. Begley, A. B. Harvey, R. L. Byer, Appl. Phys. Lett. 25, 387 (1974).
5. С. А. Ахманов, Н. И. Коротеев, ЖЭТФ 67, 1306 (1974).
6. P. R. Regnier, J. P. E. Taran, Appl. Phys. Lett. 23, 240 (1973).
7. F. Moysa, S. A. J. Druet, J. P. E. Taran, Optics Comm. 13, 169 (1975).
8. J. W. Nibler, J. R. McDonald, A. B. Harvey, in: 5th Conference of Raman Scattering, Freiburg, 1976.
9. В. В. Крунетский, Л. А. Кувлевский, В. А. Мисин, А. М. Прохоров, А. Д. Савельев, В. В. Смирнов, Optics Comm. 20, 389; 21, 225 (1977).
10. М. Р. Алиев, Д. Н. Козлов, В. В. Смирнов, Письма ЖЭТФ 26, 31 (1977).

539.1.074.6(048)

В. В. Коробкин, Б. М. Степанов, С. Д. Фанченко, М. Я. Щелев. Пико-фемтосекундная электронно-оптическая фотография. В работах Завойского и Фанченко ^{1,2} был обоснован принцип электронно-оптической хронографии с временным разрешением 10 псек (10^{-11} сек) — 10 фсек (10^{-14} сек). Осно-

вывываясь на этом принципе, Бутслов создал серию многокамерных времяанализирующих ЭОП типа ПИМ — УМИ³ с разверткой изображения электрическим полем во времяанализирующей камере и столь большим усилением яркости в последующих камерах, что оказалось возможной фотографическая регистрация каждого электрона, испущенного входным фотокатодом. С помощью таких ЭОП было впервые сфотографировано развитие во времени свечения миниатюрных искр с полной длительностью 200—300 *псек* при фронте разгорания 10 *псек*⁴. С появлением лазеров техника высокоскоростной электронно-оптической хронографии была успешно внедрена в практику повседневных исследований в области квантовой электроники и нелинейной оптики Коробкиным и Щелевым⁵. Благодаря этому были решены многие физические задачи, не поддававшиеся изучению известными ранее способами: обнаружено движение фокальных точек при самофокусировке мощного лазерного излучения в жидкостях⁶, продвижение фронта ионизации путем последовательных пробоев в лазерной искре⁷; исследована динамика лазеров, работающих в режиме самосинхронизации мод⁸. В ходе этих экспериментов был разработан метод⁹ измерения временного разрешения ЭОП, основанный на принципе регистрации биений между двумя модами в излучении лазера.

В 1968 г. под руководством Б. М. Степанова была впервые создана серийная камера ФЭР-2 с временным разрешением 20 *псек*¹⁰. Он возглавил затем работы по созданию ЭОП с временным разрешением 100 *фсек* ÷ 1000 *фсек*. Большую помощь в постановке и развитии этих работ оказал А. М. Прохоров.

Применение времяанализирующих ЭОП нового поколения с временным разрешением 500 *фсек* — 700 *фсек* — пикохрона¹¹ с резонансной СВЧ разверткой изображения и трехэлектродной линзой с повышенной напряженностью электрического поля у фотокатода и УМИ-93М¹² с широкополосной отклоняющей системой и ускоряющей сеткой у фотокатода — оказалось весьма плодотворным в изучении пикосекундной структуры излучения неодимовых лазеров с самосинхронизацией мод¹³⁻¹⁵. Калибровка временного разрешения УМИ-93М по методу биений мод дала величину 700 *фсек*¹⁶.

Новый мощный толчок развитию электронно-оптических методов регистрации дали эксперименты по лазерному управляемому термоядерному синтезу в пикосекундном временном диапазоне. Для этих опытов был разработан рентгеновский ЭОП УМИ-93СР¹⁷, с помощью которого удалось раздельно зарегистрировать два последовательных импульса рентгеновского излучения высокотемпературной лазерной плазмы с интервалом времени 66 *псек*.

Наряду с дальнейшим совершенствованием самих электронно-оптических методов и аппаратуры предпринимаются первые шаги в области цифровой обработки зарегистрированных на ЭОП изображений с целью повышения качества регистрируемых изображений и автоматизации процесса измерений¹⁸.

Пико-фемтосекундная электронно-оптическая фотография, принципы которой были сформулированы в СССР и воплощены в серии отечественных приборов, получила распространение в ряде стран мира (Англия, США, Канада, Франция) и занимает все большее место в физических исследованиях. Она открыла уникальные возможности для проведения исследований в квантовой электронике, физике плазмы, в биофизике и уже позволила оставить целый ряд интересных физических опытов. Диапазон 1 — 100 *псек* освоен теперь вполне уверенно, близок к освоению диапазон 100 *фсек* ÷ 1000 *фсек*. Есть все основания надеяться, что стоящие на этом пути проблемы будут разрешены и в конце концов удастся реализовать предельное временное разрешение ЭОП порядка 10 *фсек*.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. К. Завойский, С. Д. Фанченко, ДАН СССР 106, 218 (1956); Appl. Optics 4, 1155 (1956); ДАН СССР 226, 78 (1976).
2. С. Д. Фанченко, ПТЭ 1, 5 (1961).
3. М. М. Бутслов. Успехи науч. fotogr. 6, 76 (1959).
4. Е. К. Завойский, С. Д. Фанченко, ДАН СССР 100, 661 (1955).
5. В. В. Коробкин, М. Я. Щелев, в кн. Труды VIII Международного конгресса по высокоскоростной фотографии, Стокгольм, 1968, с. 36.
6. В. В. Коробкин, А. М. Прохоров, Р. В. Серов, М. Я. Щелев, Письма ЖЭТФ 11, 153 (1970).
7. В. В. Коробкин, С. Л. Мандельштам, П. П. Пашинин, А. В. Прохиндеев, А. М. Прохоров, Н. К. Суходрев, М. Я. Щелев, ЖЭТФ 53, 116 (1967).
8. А. А. Малютин, М. Я. Щелев, Письма ЖЭТФ 9, 445 (1969); SMPTE 79, 35 (1970).
9. В. В. Коробкин, А. А. Малютин, М. Я. Щелев, J. Photogr. Sci. 17 (5), 179 (1969); ЖТФ 16, 216 (1971).
10. Н. Г. Басов, Ю. А. Дрожжин, В. В. Никитин, А. С. Семенов, Б. М. Степанов, В. Я. Яковлев, цит. в⁵ сборник, с. 33.

11. М. М. Бутслов, С. Д. Фанченко, Р. В. Чикин, в кн. Труды X Международного конгресса по высокоскоростной фотографии, Париж, 1972, с. 137; ПТЭ, № 5, 202 (1973).
12. Г. И. Брюхневич, Н. С. Воробьев, В. В. Коробкин, А. М. Прохоров, Б. М. Степанов, М. Я. Щелев, в кн. Труды XII Международного конгресса по высокоскоростной фотографии, Торонто, 1976, с. 17.
13. Н. Г. Басов, М. М. Бутслов, П. Г. Крюков, Ю. А. Матвеев, Е. А. Смирнова, С. Д. Фанченко, С. В. Чекалин, Р. В. Чикин, ЖЭТФ 55, 907 (1973).
14. Е. М. Гордеев, П. Г. Крюков, Ю. А. Матвеев, Б. М. Степанов, С. Д. Фанченко, С. В. Чекалин, А. В. Шарков, Квант. электрон. 2, 205 (1975).
15. В. А. Бабенко, М. А. Кудинова, В. И. Малышев, А. М. Прохоров, А. А. Сычев, А. И. Толмачев, М. Я. Щелев, Письма ЖЭТФ 25, 366 (1977).
16. Г. И. Брюхневич, Н. С. Воробьев, В. В. Коробкин, А. М. Прохоров, Б. М. Степанов, М. Я. Щелев, Письма ЖЭТФ 2, 1009 (1976).
17. Г. И. Брюхневич, Ю. С. Касьянов, В. В. Коробкин, А. М. Прохоров, Б. М. Степанов, В. К. Чевокин, М. Я. Щелев, в кн. Труды XI Международного конгресса по высокоскоростной фотографии, Лондон, 1974, с. 554.
18. В. Н. Платонов, А. М. Прохоров, Ю. П. Пытьев, А. Г. Свешников, М. Я. Щелев, в кн. Труды XII Международного конгресса по высокоскоростной фотографии, Торонто, 1976, доклад ЕС-5.

621.384.6(048)

А. А. Коломенский. Коллективные методы ускорения частиц. За последние годы в лаборатории проблем новых ускорителей ФИАН были предложены и исследованы теоретически и экспериментально различные методы коллективного ускорения ионов и электронов на основе применения сильноточных релятивистских электронных пучков (СРЭП). Среди этих методов можно указать следующие:

1. Ускорение ионов при поперечном и продольном сканировании СРЭП или его фокуса¹.
2. Ускорение частиц полями, возбуждаемыми при прохождении СРЭП через резонаторные и волноводные структуры, в частности, метод автоускорения электронов^{2,3}, а также ускорение ионов⁴.
3. Ускорение ионов коллективными полями замкнутого СРЭП при его вращении как целого (гиротронный ускоритель⁵).
4. Ускорение ионов при пропускании СРЭП через газ низкого давления, а также в вакууме при облучении твердых мишеней⁶.

Базой для экспериментов служили разработанные и созданные в лаборатории импульсные сильноточные генераторы электронов «Импульс-1» и «Импульс-2» на энергию электронов 0,5—1,0 Мэв, ток ~30 ка, длительность импульса 30—50 нсек.

Из-за ряда серьезных трудностей энергия электронов в современных импульсных сильноточных ускорителях ограничивается, как правило, значениями порядка мегавольт-электрон-вольт. Работы по развитию метода автоускорения электронов имеют своей целью поднять эту энергию до десятков мегавольт и более при весьма значительном импульсном токе ~10 ка. Эта задача должна решаться за счет перераспределения энергии частиц в сильноточном пучке под действием коллективных полей, возникающих при его взаимодействии со специальными электродинамическими структурами. При этом определенная доля частиц может быть ускорена полем, генерируемым самим пучком, до энергий, намного превышающих начальное значение. В наших экспериментах со сплошным и трубчатым пучком³, проходящим через диафрагмированный волновод (рис. 1), было показано, что спектр электронов, имевших первоначально максимальную энергию $E \sim 0,5$ Мэв, существенно смещается в сторону больших энергий. При этом примерно 10% электронов удваивает энергию по сравнению с E , а 2% — утраивают (рис. 2). Если же принять во внимание форму первоначального импульса напряжения, то получается, что электроны, находившиеся на заднем фронте импульса, увеличивают свою энергию в 4—6 раз. Процесс автоускорения сопровождается испусканием интенсивного СВЧ излучения, полная измеренная мощность которого составляла 0,4—0,5 Вт, что соответствует около 20% мощности пучка на входе в волновод. СВЧ излучение представляет самостоятельный интерес, а также используется для диагностики происходящих явлений.

Эти и другие результаты показывают, что с помощью механизма автоускорения действительно можно в достаточно широких пределах изменять спектр, импульсную мощность, максимальную энергию электронов. Повышение эффективности этого меха-

низма определяется дальнейшей работой по оптимизации формы первоначального импульса пучка и конфигурации резонаторной структуры.

Отметим, что, как показывает теория, пропуская интенсивный трубчатый пучок через гладкий волновод, можно добиться эффективного ускорения достаточно плотного ионного сгустка, за счет механизма типа обращенного эффекта Вавилова — Черенкова⁴. Однако этот вывод нуждается еще в экспериментальной проверке.

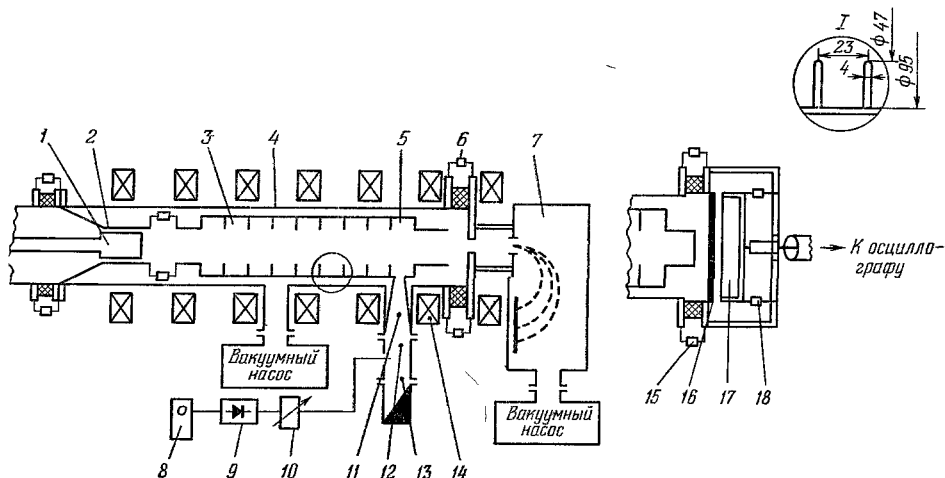


Рис. 1. Схема эксперимента по автоускорению сильноточного электронного пучка. 1 — катод, 2 — анод, 3 — волновод, 4 — вакуумная камера, 5 — трансформатор типа волны, 6 — шунт, 7 — магнитный анализатор, 8 — осциллограф, 9 — калиброванный детектор, 10 — калиброванный аттенюатор, 11 — вывод СВЧ мощности, 12 — калиброванный ответвитель, 13 — нагрузка, 14 — катушка соленоида, 15 — шунт полного тока, 16 — фольга, 17 — цилиндр Фарадея, 18 — шунт цилиндра Фарадея.

Серия наших экспериментальных и теоретических работ посвящена коллективному ускорению ионов из газа, через который пропускается СРЭП, параметры последнего на входе в дрейфовую камеру имели значения: 0,6—0,8 Мэв 15—20 ка, 40—

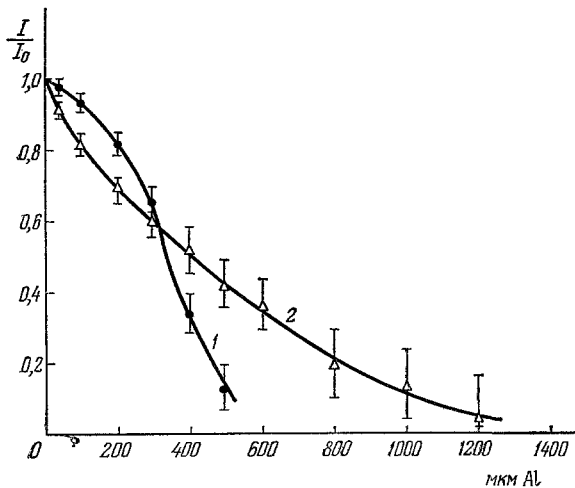


Рис. 2. Кривые поглощения электронного сильноточного пучка.

1 — при прохождении через трубу в волноводе, 2 — при прохождении через волновод длиной 80 см (эффект автоускорения).

Прохождение СРЭП через газ — сложный процесс, сопровождаемый рядом элементарных и коллективных эффектов. При определенных условиях в этом процессе формируется эффективная потенциальная яма, в которую на некоторое

50 нсек. Схема эксперимента показана на рис. 3. Даже при указанных сравнительно скромных параметрах электронного пучка удавалось получить ускоренные протоны и дейтроны, имеющие значительную энергию и интенсивность. Максимальный выход в импульсе равнялся $8 \cdot 10^{11}$ для дейтронов и 10^{12} для протонов и достигался при давлении $\sim 0,12$ тор. Основная часть ионов имела энергию ~ 2 Мэв, но максимальная энергия доходила до 4—8 Мэв. Эффективное ускоряющее поле составляло 0,1—0,3 Мв/см. В экспериментах с другими газами (гелием, азотом, аргоном, ксеноном) энергия ускоренных ионов была пропорциональна заряду, но интенсивность оказалась значительно меньше, чем для протонов, особенно для более тяжелых ионов (до 10^9 за импульс для аргона).

Прохождение СРЭП через газ — сложный процесс, сопровождаемый рядом элементарных и коллективных эффектов. При определенных условиях в этом процессе формируется эффективная потенциальная яма, в которую на некоторое

время оказываются захваченными ионы. Задача состоит в том, чтобы найти надежные способы управления скоростью этой ямы, чтобы ионы по возможности дольше перемещались в примерном синхронизме с ней. Это позволит перейти к ускорению протонов до энергий порядка десятков и сотен мегаэлектрон-вольт. В наших экспериментах, в частности, применялась специальная дрейфовая камера, состоящая из отдельных секций, длину которых и давление в них можно было независимо изменять. Было изучено также специфическое явление, названное нами «селективным ускорением»: например, из смеси водорода и дейтерия ускоряются преимущественно протоны,

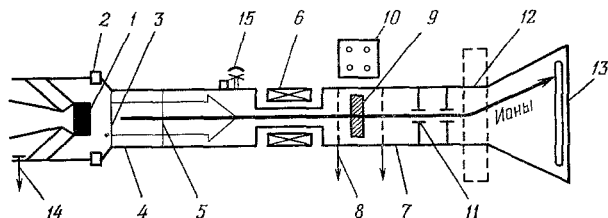


Рис. 3. Схема эксперимента по ускорению ионов из газа при пропускании сильноточного электронного пучка.

1 — плоский графитовый катод, 2 — шунт для регистрации тока, 3 — фольга — анод из титана (50 мкм), 4 — ускоряющая секция дрейфовой камеры, 5 — перегородка из алюминизированной майларовой фольги, 6 — магнит для отклонения электронов, 7 — диагностическая секция дрейфовой камеры, 8 — коллекторные сетки, 9 — мишень из графита, 10 — парафиновый блок с гейгеровскими счетчиками, 11 — коллиматоры, 12 — магнитный анализатор, 13 — рентгеновская пленка, 14 — емкостной датчик для измерения напряжения на диодном промежутке, 15 — система напуска газа и измерения давления.

даже если смесь почти полностью состоит из дейтерия. Эксперименты показали возможность управлять скоростью перемещения ямы и одновременно выяснили необходимость выполнения специальных требований к качеству СРЭП. Рассматриваются также более прямые методы управления, например, заданным сканированием СРЭП, пересекающим дрейфовую камеру.

Ускорение ионов было получено нами и при взаимодействии СРЭП с локализованными источниками (мишенями), расположенными на его пути (в газе или вакууме). В соответствующих экспериментах с твердыми водородсодержащими мишенями⁶ были достигнуты энергии и интенсивности протонов, сравнимые с теми, которые получались при взаимодействии СРЭП с газом.

Другой способ управления движением потенциальной ямы был предложен на основе применения «газовой ливзы», т. е. ограниченного слоя газа, через который проходит СРЭП¹. Ввиду ионизации газа вновь поступающие порции электронного пучка сжимаются все больше, а его фокус перемещается в вакууме в продольном направлении. Фокус образует потенциальную яму для ионов, и, выбирая параметры «ливзы» должным образом, можно достичь синхронизма между движением ямы и ионов.

Наиболее важные результаты проведенных исследований состоят в получении на практике значительных коллективных полей порядка долей M_e/cm и в удовлетворительном согласии экспериментальных и теоретических данных по разным методам. Это дает основание для разработки специализированных установок, основанных на принципах коллективного ускорения.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Коломенский, И. И. Логачев, ЖТФ 46, 50 (1976); А. В. Агафонов, А. А. Коломенский, И. И. Логачев, Письма ЖЭТФ 22, 478 (1975); Физ. плазмы 2, 953 (1976).
2. Л. Н. Казанский, А. В. Киселев, А. Н. Лебедев, АЭ 30, 27 (1971). В. Г. Гапанович, А. А. Коломенский, А. Н. Лебедев, в кн. Труды II Международной конференции теории плазмы (Киев, 1974), Киев, «Наукова думка», 1976, с 183; в кн. Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям, Москва, 1974, т. 1; М., «Наука», 1975, с. 100.
3. А. А. Коломенский, Е. Г. Крестелев, Г. О. Месхи, Б. Н. Яблоков, Письма ЖЭТФ 1, 968 (1975); в кн. Труды II Симпозиума по коллективным методам ускорения, ОИЯИ, Дубна, 1976, с. 160.
4. А. Н. Лебедев, К. Н. Пазин, АЭ 41, 244 (1976).
5. А. А. Коломенский, Кр. сообщ. физ. (ФИАН СССР), № 8, 67 (1972); в кн. Труды I Симпозиума по коллективным методам ускорения, ОИЯИ, Дубна, 1972, с. 115.

6. А. А. Коломенский, В. М. Лихачев, И. В. Синильщикова, О. А. Смит, ЖЭТФ 68, 51 (1975); В. Н. Иванов, А. А. Коломенский, В. М. Лихачев, И. В. Синильщикова, О. А. Смит, цит. в³ сборник, с. 114.

621.384.6(048)

В. П. Саранцев. Ускорение ионов в электронных кольцах. Коллективный ускоритель тяжелых ионов ОИЯИ использует традиционную схему ускорения ионов в электронном кольце, предложенную в работах В. И. Векслера и сотрудников. Прототип ускорителя состоит из двух основных элементов: инжектора электронного пучка и компрессора — системы формирования и ускорения электронных колец.

Инжектором является линейный ускоритель СИЛУНД¹. Параметры электронного пучка, инжектируемого в камеру компрессора, следующие:

энергия электронов — 2—2,4 Мэв,
длительность импульса тока — 20 нсек,
разброс энергии электронов в импульсе тока — 1—3%,
диаметр пучка в точке инжекции — 40 мм,
эмиттанс пучка меньше 30 мрад/см,
максимальный ток инжекции — 600 а.

Основные эксперименты проводились при токах инжекции 300 а.

Компрессор или адиабатический генератор заряженных торондов (АДГЕЗАТОР) состоит из вакуумной камеры, магнитной системы, систем инжекции и коррекции траектории пучка. Вакуумная камера АДГЕЗАТОРА представляет собой выполненную

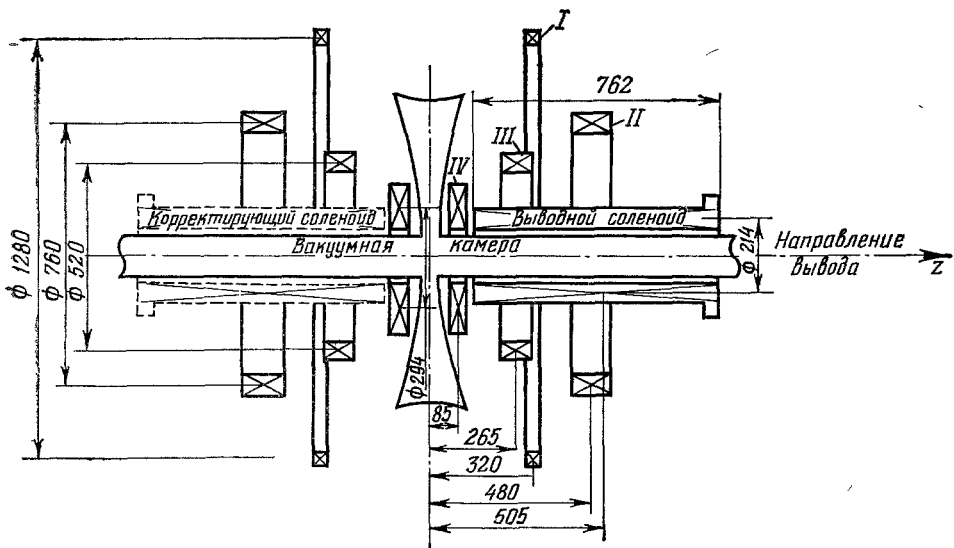


Рис. 1. Схема магнитной системы АДГЕЗАТОРА.

из нержавеющей стали толщиной 0,5 мм сварную конструкцию со сферическими боковыми стенками, сближающимися к оси системы. Стенки камеры способны выполнять роль элементов, уменьшающих азимутальную составляющую электрического поля пучка при возможном развитии азимутальной неустойчивости. Это позволяет повысить предельный устойчивый ток кольца².

В прототипе ускорителя использован магнитный способ сжатия и ускорения сформированных колец. Магнитная система АДГЕЗАТОРА (рис. 1) состоит из четырех пар катушек ступеней сжатия и выводного соленоида, питаемых импульсными токами. Существуют два основных режима работы магнитной системы: режим сжатия и режим вывода. В режиме сжатия АДГЕЗАТОР работает как кольцевой ускоритель с мягкой фокусировкой с невыполненным бетатронным условием³.

В режиме вывода шунтированием одной из катушек IV ступени и включением соленоида магнитная яма, удерживающая кольцо, смещается от медианной плоскости и делается плоской в направлении вывода. Электронное кольцо движется вместе с ямой

и в момент полного снятия ямы начинает ускоряться в поле соленоида, линейно спадающем вдоль оси.

Эксперименты по захвату кольца на замкнутую орбиту показали, что эффективность захвата составляет 50—70%. Величина захваченного тока составляет 200—300 a ($(1-1,5) \cdot 10^{13}$ частиц). Время жизни сформированного кольца без существенных потерь сравнимо со временем работы I ступени, т. е. 5 мсек.

В результате устранения азимутальных неоднородностей магнитного поля и коррекции параметров магнитной системы удалось сформировать электронное кольцо с минимальным радиусом 3 см и поперечными полуразмерами $a_z \sim a_r \approx 1,5-2$ мм (рис. 2), что обеспечивает электрическое поле в кольце 50 Мв/м.

После оптимизации режима вывода электронное кольцо было выведено в патрубке камеры АДГЕЗАТОРа. Измеренный полуразмер кольца в z -направлении на участке вывода 2 см $\leq z \leq 6$ см составил 4—5 мм.

При прохождении кольцом области снятия магнитной ямы на 5—7 см от средней плоскости обнаружилось радиальное смещение кольца как целого. Максимальное смещение составило 15 мм. Дополнительные эксперименты показали, что наличие 0,1% первой гармоники поля IV ступени, возникающей из-за набегания витков в катушке при переходе от слоя к слою, способно вызвать дрейф кольца при прохождении целого резонанса $v_r = 1 \sigma$ области снятия ямы, где $n \rightarrow 0$. Меры по компенсации первой гармоники поля IV ступени (изменением взаимного азимутального расположения катушек ступени, внесением элементов коррекции поля) привели к тому, что величина смещения не превышала 1,5 мм. Однако при изменении режимов магнитной системы смещение появлялось вновь.

Как показывает анализ уравнений колебаний вблизи резонанса ⁴, максимальное смещение кольца при наличии первой гармоники определяется выражением

$$X_{\max} = R \frac{H_{1z}}{H_z} \sqrt{\frac{2\pi\omega_0}{\dot{v}}}$$

(R — радиус кольца, H_z — величина поля на орбите, H_{1z} — величина первой гармоники поля, ω_0 — частота вращения электрона, \dot{v}_r — скорость прохождения резонанса), откуда следует возможность уменьшения смещения кольца при увеличении скорости прохождения резонанса. Для проверки этого предположения в область снятия магнитной ямы вводилась система дополнительных витков с радиусом меньшим, чем радиус электронного кольца, способная создавать дополнительную магнитную яму с увеличенной скоростью снятия. Как показали эксперименты, применение такой системы существенно снижает влияние резонанса и уменьшает смещение до 1—2 мм.

После устранения смещения электронное кольцо было выведено до конца участка ускорения. Радиус электронного кольца в процессе ускорения изменялся от 3,7 до 4,5 см. Это дает основание полагать, что величина градиента поля соленоида близка к расчетной (70 в/см). Скорость электронного кольца в конце участка ускорения составляет $(0,45 \pm 0,05)$ с.

В процессе проведения экспериментов по ускорению электронных колец были предприняты попытки зарегистрировать ускоренные ионы азота по трекам, оставленным в пластиковых детекторах. Количество быстрых ионов (~ 30 Мэв) в кольце составляло величину, не превышающую 10^4 , что соответствует отсутствию самофокусировки в кольце.

Эти эксперименты показывают, что, в отличие от работы, выполненной в Беркли, при наличии близких проводящих стенок разрушения электронного кольца от перекompенсации не происходит. Вблизи режима ионной компенсации вследствие падения кулоновских сил удержания ионы уходят из сечения кольца, образуя ионное облако. Устойчивость же самого электронного кольца полностью сохраняется.

В настоящее время на ускорителе ведутся эксперименты, позволяющие определить эффективность самофокусировки электронно-ионного кольца при больших ионных загрузках.

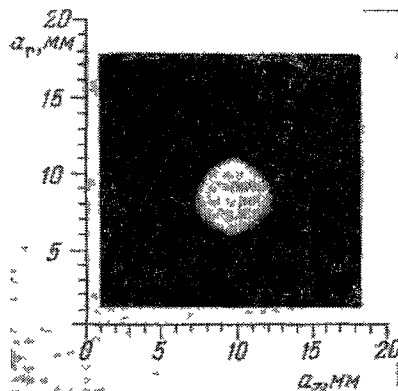


Рис. 2. Фотография сечения кольца электронов в синхротронном свете на радиусе 3 см.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. И. Безнощенко и др., в кн. Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, М., «Наука», 1975.
2. Л. С. Барабаш и др., Препринт ОИЯИ, Р9-7697, Дубна, 1974.
3. В. С. Александров и др., Препринт ОИЯИ Р9-9215, Дубна, 1975.
4. K. R. S u t h o p, in: Symposium on ERA, LBL, Berkeley, California, UCRL-18103 (1968), p. 304.
5. В. П. Саранцев, в кн. Труды II Международного симпозиума по коллективным методам ускорения, Дубна, 1977, с. 13.