



64
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
им. Г.И. Будкера СО РАН

В.В. Анциферов, Г.И. Смирнов, Г.Г. Телегин

ИНЖЕКЦИЯ И ЛАЗЕРНОЕ УСКОРЕНИЕ
ИОНОВ НА ОСНОВЕ РЕЗОНАНСНОЙ
ПОВЕРХНОСТНОЙ ФОТОИОНИЗАЦИИ

ИЯФ 93-110



НОВОСИБИРСК

Инжекция и лазерное ускорение ионов на основе резонансной поверхностной фотоионизации

В.В. Анциферов, Г.И. Смирнов, Г.Г. Телегин

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
630090, Новосибирск, Россия

АННАТАЦИЯ

Предложен метод инжекции и коллективного ускорения ионных пучков на основе использования лазерной фотоионизации газа путем резонансного возбуждения его атомов вблизи поверхности стенок ускорительной камеры. Рассмотренная схема лазерного ускорителя позволяет получать положительные ионы с околосветовыми скоростями.

Injection and Lasers Collective Acceleration of the Ion Beams Based on the Resonant Photoionization

V.V. Antsiferov, G.I. Smirnov, G.G. Telegin

Budker Institute of Nuclear Physics,
630090, Novosibirsk, Russia

ABSTRACT

The collective effects have been investigated of the injection and acceleration of the ion beams due to the resonant surface photoionization. The considered scheme of the laser accelerator allows to obtain positive ions with relativistic velocities.

1. Принципы использования коллективных электрических и магнитных полей, порождаемых интенсивными релятивистскими пучками электронов, для фокусировки и ускорения положительных ионов были сформулированы в работах [1, 2]. Достаточно сильное лазерное излучение является весьма эффективным средством управления процессами коллективной стабилизации и ускорения ионных пучков (см., например, [3-6]). Главная особенность всех предложенных и реализованных ранее способов коллективного ускорения ионов состоит в использовании интенсивных релятивистских электронных пучков, а поэтому также и мощных электронных ускорителей. В настоящей работе рассматриваются нелинейные эффекты формирования и коллективного ускорения ионных пучков на основе резонансной поверхностной фотоионизации.

2. Известны способы ускорения ионов под воздействием коллективных электрических и магнитных полей, порождаемых интенсивным релятивистским электронным пучком [1, 2]. Положительные ионы захватываются и ускоряются полями виртуального катода, формируемого на участке инжекции сильноточного электронного пучка в ионизованный газ. Однако эффективность такого устройства для коллективного ускорения ионов недостаточна вследствие того, что ускорение происходит в окрестности виртуального катода неконтролируемым образом.

В коллективном ионном ускорителе, описанном в работе [3], для управления процессами формирования виртуального катода и ускорения ионов используется лазерное излучение. Лазерная плазма создается временной последовательностью взаимодействия лазерного луча с полиэтиленовой мишенью на боковой стенке цилиндрической вакуумной камеры,

вдоль оси которой распространяется релятивистский пучок электронов. Ионная компонента лазерной плазмы притягивается от стенок камеры к релятивистскому электронному пучку, нейтрализуя его отрицательный пространственный заряд, в результате чего образуется виртуальный катод с потенциальной ямой для положительных ионов, которые необходимо ускорить. Эти ионы вводятся в область виртуального катода различными способами (например, посредством инжектора ионов или в виде локализованного сгустка нейтральных частиц, ионизируемых тем же релятивистским электронным пучком). Передвижение виртуального катода вдоль оси ускорительной камеры с целью ускорения захваченных ионов, управляемое лазерным излучением, осуществляется с помощью комбинации боковых окон, частично или полностью отражающих зеркал. К недостаткам указанного устройства следует отнести ограниченный срок службы мишени и связанную с этим необходимость ее частой замены, а также появление в ускоряемом пучке ионов примесей, содержащихся в мишени, что неприемлемо при проведении прецизионных ядерно-физических экспериментов.

Появление неконтролируемых примесей в ионном пучке исключается при его ускорении способом [4]. В этом случае ионная компонента плазмы, необходимая для нейтрализации пространственного заряда релятивистского пучка электронов, образуется путем лазерной фотоионизации рабочего газа, заполняющего ускорительную камеру. Главный недостаток данного устройства обусловлен использованием схемы двухступенчатой фотоионизации, для реализации которой необходимы лазеры двух типов: один лазер возбуждает атомы рабочего газа на резонансные энергетические уровни, а излучение другого ионизует возбужденные атомы. Поскольку эффективность фотоионизации низка и, к тому же для нее требуется кванты большой энергии, то второй лазер должен обладать довольно большой мощностью и сравнительно короткой длиной волны излучения. Однако существующие мощные коротковолновые лазеры работают в режиме одиночных импульсов излучения и, следовательно, неприменимы для создания компактного коллективного ускорителя ионов с высокой частотой повторения импульсов ионных пучков. Эффективность ускорения ионов указанным устройством снижена также вследствие того, что при ионизации рабочего газа в электронном пучке появляется некоторое количество медленных электронов со случайным распределением скоростей.

Целью предлагаемых новых методов ускорения ионов является повышение эффективности, упрощение конструкции ускорителя, уменьшение его размеров и увеличение частоты следования импульсов коллективного

ускорителя ионов. Поставленная цель достигается тем, что в коллективном лазерном ускорителе ионов на основе использования интенсивного релятивистского электронного пучка рабочий газ ионизуется путем резонансного возбуждения его атомов вблизи внутренней поверхности стенок ускорительной камеры. Если возбужденное резонансным излучением состояние атома соответствует области разрешенной полосы металла выше уровня Ферми, то основным механизмом фотоионизации является безактивационная перезарядка между атомом и металлом. Дискретное возбужденное состояние атома, расположенного в непосредственной близости от металлической поверхности, уподобляется автоионизационному уровню на фоне континуума, образуемого квазинепрерывным спектром нормальных металлов [7, 8] (рис. 1).

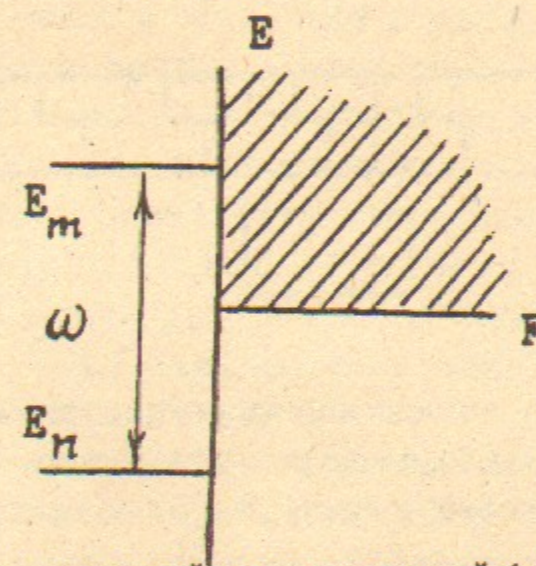


Рис. 1. Схема резонансной поверхностной фотоионизации: $E_{m,n}$ – энергетические уровни атома; F – уровень Ферми металла, ω – частота резонансного излучения ($\omega = \omega_{mn} = E_n/h$).

Способ использования резонансной поверхностной фотоионизации для получения ионов был впервые реализован в работах [7, 9].

В предлагаемом устройстве для ускорения ионов проявляются новые технические свойства резонансной поверхностной фотоионизации, состоящие в том, что при ее использовании в управляемом лазерном коллективном ионном ускорителе положительные ионы, образуемые при лазерном возбуждении атомов рабочего газа вблизи поверхности ускорительной камеры, притягиваются под действием кулоновских сил интенсивным релятивистским электронным пучком и нейтрализуют его отрицательный пространственный заряд, создавая тем самым виртуальный катод. Инжектируемые (например, с помощью специального инжектора, как в [3, 4]) в область виртуального катода ионы ускоряются при передвижении

виртуального катода вместе с лазерным полем вдоль камеры. В итоге формируется высокоэффективный режим коллективного ускорения.

Функциональная схема предлагаемого устройства для коллективного ускорения положительных ионов представлена на рис. 2. Устройство содержит источник интенсивного релятивистского электронного пучка 1, который состыкован с наполненной рабочим газом секционной ускорительной камеры 2, имеющей вдоль боковой стенки ряд окон для пропускания излучения, пристроенных к ним полупроводниковых лазеров 3, и электронный блок синхронизации лазеров 4.

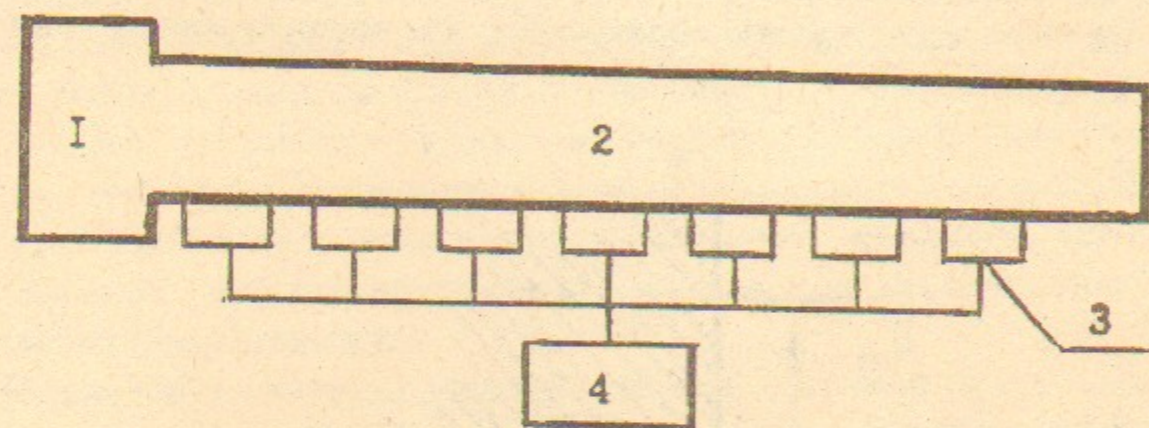


Рис. 2. Схема лазерного коллективного ускорителя ионов: 1 - источник интенсивного релятивистского электронного пучка, 2 - ускорительная камера, 3 - полупроводниковые лазеры, 4 - блок синхронизации.

Устройство действует следующим образом. Источником 1 интенсивный релятивистский электронный пучок направляют в камеру 2 с рабочим газом. Через определенный промежуток времени срабатывает ближайший к источнику 1 лазер: его излучение проходит через боковое окно камеры в поперечном направлении и возбуждает атомы рабочего газа. Возбужденные атомы ионизируются на внутренней поверхности камеры, металл, которого выбран так, что его работа выхода превышает энергию ионизации возбужденных атомов. В результате этого процесса образуется локализованное облако ионов, которое притягивается к интенсивному релятивистскому электронному пучку и образует виртуальный катод. В область виртуального катода инжектируются ионы, которые требуется ускорить. Движение виртуального катода вдоль камеры 2 поддерживается путем последовательного включения через выбранные интервалы времени других лазеров функционально и конструктивно подобных первому. Последовательность и моменты включения лазеров определяются их пространственным размещением и скоростью перемещения фронта

падения потенциала в области виртуального катода. Варьируя временные интервалы последовательного включения лазеров, можно ускорить захваченные ионы до околосветовых скоростей.

Конкретная реализация предложенного метода ускорения ионов может быть осуществлена, в частности, при заполнении камеры рабочим газом из атомов цезия, пары которого использовались ранее в коллективном ионном ускорителе [3] также в качестве рабочего газа. Хорошо освоенные в настоящее время промышленностью полупроводниковые лазеры возбуждают с высокой эффективностью атомы цезия на уровень $6^2P_{3/2}^0$, энергия ионизации с которого равна 2,44 эВ. Если материал внутренней поверхности боковых стенок ускорительной камеры имеет работу выхода, величина которой превышает 2,5 эВ, то возбужденные атомы цезия ионизируются вблизи стенок с единичной вероятностью. Таким материалом является, к примеру, магний имеющий работу выхода 3.66 эВ.

Укажем конкретный режим реализации предложенного коллективного ускорителя ионов. Характерная длина ускорительной камеры, используемой в подобных ускорителях [3, 4] от источника интенсивного релятивистского электронного пучка 1 до лазера на ее противоположном конце составляет $l = 40$ см. В этой камере 2 на расстоянии $\Delta l = 5$ см от источника электронного пучка 1 размещается первый лазер, а остальные 7 на таких же расстояниях друг от друга.

Скорость электронов в интенсивном релятивистском пучке составляет $v = 0.8c$, где c — скорость света в вакууме. Следовательно, передний фронт электронного пучка, введенного в ускорительную камеру от источника 1, достигает ее противоположного конца за время $t_0 = l/v = 1.66 \cdot 10^{-9}$ с. Через интервал времени t_0 после ввода переднего фронта интенсивного релятивистского электронного пучка включается ближайший к источнику 1 лазер. Его излучение падает на участок стенки ускорительной камеры 2 и производит там ионизацию рабочего газа. Этап ускорения начинается после того, как положительные ионы, двигаясь от стенки камеры, достигают электронного пучка и нейтрализуют его. Темпы ускорения рабочих ионов будут определяться временными задержками между лазерными импульсами, равными $\Delta t = \Delta l/v$.

Предлагаемый ускоритель ионов имеет специфические особенности режимного характера, обеспечивает его высокую эффективность, причем ожидаемый положительный эффект от реализации данного предложения весьма существенно превышает суммарный эффект простого объединения известных технических решений [3,4,7]. Эти особенности обусловлены следующим. В устройствах для коллективного ускорения ионов [3,4] лазерное излучение создает квазинейтральную плазму, од-

нако только ее ионная компонента вызывает положительным образом проявляющийся в ускорении эффект нейтрализации пространственного заряда релятивистского электронного пучка, тогда как наличие электронной компоненты лазерной плазмы оказывает негативное воздействие на процесс ускорения. Медленные электроны лазерной плазмы со случайным распределением скоростей вызывают пространственное размывание виртуального катода и, следовательно, потенциальной ямы, уменьшая тем самым эффективность ускорения положительных ионов. Преимущество предлагаемого устройства для ускорения положительных ионов с использованием резонансной фотоионизации обусловлено тем, что в данной ситуации с релятивистским электронным пучком взаимодействуют только ионы, оторвавшиеся от стенок ускорительной камеры, а не квазинейтральная плазма. Электроны же остаются в поверхностном слое стенок камеры, заряжая его отрицательно, что лишь способствует улучшению стабилизации релятивистского электронного пучка в области виртуального катода. Такой режим достигим только при использовании эффекта резонансной поверхностной фотоионизации в комбинации с электронным пучком и является неотъемлемой специфической особенностью предлагаемого коллективного ускорителя ионов.

Предложенный метод коллективного ускорения положительных ионов обладает также рядом других преимуществ по сравнению с [4]. Получение ионов посредством резонансной поверхностной фотоионизации существенно повышает эффективность ускорения, поскольку процесс имеет практически единичную вероятность [8,10], а сечение процесса резонансного возбуждения очень велико: $10^{-12} \div 10^{-14} \text{ см}^2$ [11], в то время как сечение процесса фотоионизации возбужденных атомов рабочего газа, используемого в работе [4], составляет крайне малую величину порядка $10^{-17} \div 10^{-18} \text{ см}^2$ [11]. К тому же при реализации предложенного устройства просто отпадает необходимость использования процесса фотоионизации и, соответственно, использования мощного коротковолнового лазера, осуществляющего этот процесс, а также и сложной оптической системы для перемещения его луча вдоль ускорительной камеры синхронно с лучом другого лазера, возбуждающего атомы рабочего газа. Предложенный ускоритель позволяет также для возбуждения атомов рабочего газа использовать вместо лазера на красителе с оптической системой, перемещающей лазерный луч, комбинацию гораздо более экономически выгодных полупроводниковых лазеров с высоким к.п.д., к пространственным и спектральным характеристикам которых не предъявляется в данном случае жестких требований. Рубиновый лазер, который использовался в [4] для накачки лазера на красителе, имеет к.п.д. не более 0.18% [12],

а коэффициент преобразования его излучения красителем не превышает 25%, так что к.п.д. всей системы резонансного возбуждения рабочего газа составляет не более 0.05%.

Полупроводниковый лазер, который используется в предлагаемом способе ускорения, имеет к.п.д. не менее 30%, т.е. на порядок выше. Таким образом, если использовать предложенную систему полупроводниковых лазеров только для резонансного возбуждения рабочего газа, оставляя неизменной дополнительную лазерную систему для фотоионизации возбужденных частиц, которая используется в работе [4], то даже в этом случае получается значительный выигрыш в к.п.д., уменьшаются габариты всей установки, упрощается конструкция и система управления лазерным лучом. Уже только одно это представляет существенное преимущество предлагаемого метода ускорения. И в то же время только благодаря использованию явления резонансной поверхностной фотоионизации [7,8] рабочего газа вблизи стенок ускорительной камеры полностью отпадает необходимость применения мощного коротковолнового лазера с системой синхронной развертки его луча для фотоионизации возбужденных атомов и, таким образом, создается суммарный эффект. Перечисленные конструктивные упрощения ведут к уменьшению размеров ионного ускорителя. Кроме того, вследствие способности полупроводниковых лазеров излучать с высокой частотой повторения импульсов ускоритель положительных ионов тоже приобретает реальную возможность работать в этом режиме, что имеет принципиальное значение для ряда важных приложений.

Следовательно, указанные преимущества предложенного устройства для ускорения ионов обуславливают повышение эффективности, упрощение конструкции, уменьшение размеров и увеличение частоты повторения импульсов коллективного ионного ускорителя, управляемого лазерным излучением.

3. Компактным вариантом коллективного лазерного ускорителя ионов, исключая необходимость применения релятивистских электронных пучков, может служить двухсекционная металлическая камера, заполненная рабочим газом и освещаемая в поперечном направлении через окно вдоль боковой стенки лазерным излучением. Начальный участок ускорительной камеры, длина которого определяется приблизительно диаметром лазерного луча, создается из такого материала, что резонансное возбуждение атомов рабочего газа у поверхности сопровождается ионизацией. Эффективность процесса резонансной поверхностной фотоионизации велика, когда работа выхода поверхности превышает энергию ионизации возбужденных атомов рабочего газа. Таким образом, начальная

секция камеры представляет собой инжектор положительных ионов.

Основная часть ускорительной камеры образована из материала с более низкой работой выхода, позволяющей возбужденным частицам вызывать эмиссию электронов с поверхности. Положительно заряженная поверхность данного участка и удаленное от нее электронное облако образуют потенциальную яму, захватывающую инжектируемые ионы. В этой ситуации фокусировка и коллективное ускорение ионов осуществляется путем ускоренного перемещения лазерного луча вдоль камеры. Дополнительное ускорение ионного пучка вызывается фронтальным падением потенциала на движущейся вдоль камеры границе светового поля, аналогичным создаваемому пучком релятивистских электронов [4].

Движение светового фронта может поддерживаться комбинацией синхронизованных лазеров, расположенных у боковых окон ускорительной камеры. Последовательность и моменты включения лазеров определяются их пространственным размещением и скоростью перемещения фронта падения потенциала. Варьируя временные интервалы последовательного включения лазеров, можно ускорить захваченные ионы до околосветовых скоростей. Экспериментальному воплощению данной схемы коллективного ускорения ионов сопутствует преодоление ныне существующих технологических пределов обычных ионных ускорителей. В частности, ее важным преимуществом является сравнительно скромные размеры ускорителя.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Г.И.Будкер*. Атомная энергия, т.1, 5 (1956) 9; Собр. трудов, М.: Наука, 1982, с.209.
2. *V.I.Veksler*. Proc. of the 6 Intern. Conf. on High Energy Accelerators, Cambridge, MA, 1967.
3. *P.G.O'Shea et al.*. Appl. Phys. Lett., 49 (1986) 1696.
4. *C.L.Olson et al.*. Phys. Rev. Lett., 56 (1986) 2260.
5. *A.Loeb, L.Friedland.*. Phys. Rev. A., 33 (1986) 1828.
6. *Г.И.Смирнов, Г.Г.Телегин*. Квант. электр., 14 (1987) 1903.
7. *Г.Ф.Мальшев, Г.Г.Телегин*. Журн. техн. физ. 56 (1986) 1195.
8. *Г.И.Смирнов, Г.Г.Телегин*. Препринт N 229, ИТФ СО АН СССР, 1990.
9. *B.Auschwitz, K.Lacmann*. Chen. Phys. Lett., 113 (1985) 230.
10. *А.В.Чаплик*. ЖЭТФ, 54 (1968) 332.
11. *В.М.Акулин, Н.В.Карлов*. Интенсивные резонансные взаимодействия в квантовой электронике. М.: Наука, 1987, с.186.
12. *Дж.Реди*. Промышленные применения лазеров, М.: Мир, 1981.