

ФИЗИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РАДИАЦИОННОГО МЕТОДА УСКОРЕНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ СГУСТКОВ

И.Р. Геккер

Приводятся расчетные и экспериментальные значения усиленного ВЧ поля в плотной и разреженной плазме. Обсуждаются возможности осуществления радиационного метода ускорения плазменных сгустков и ускорителей на биениях волн.

Идея радиационного ускорения плазмы была высказана В.И. Векслером в связи с поисками новых методов ускорения заряженных частиц /1/. Для достижения эффективного ускорения требовалось, чтобы давление электромагнитной волны осуществлялось синфазно на все частицы малого "полупрозрачного" для волны сгустка плазмы (когерентное ускорение); $a/\lambda_0 \ll 1$, $n/n_c \ll 1$ (a — радиус сгустка, λ_0 — длина волны, n — концентрация плазмы, $n_c = m_e \omega_0^2 / 4\pi e^2$). В этом случае сила, ускоряющая частицу, оказывалась пропорциональной числу всех частиц в сгустке N . При $n/n_c \gg 1$ могло происходить полное отражение от сгустка волны, распространяющейся в волноводе. При $P_0 = 1$ МВт, $\lambda_0 = 10$ см, $a = 2$ см, $N = 10^{13}$ ($n = n_c = 10^{11}$ см $^{-3}$) для водородного плазменного сгустка ожидался темп ускорения ~ 100 эВ/см, а при $P_0 = 100$ МВт до 10 кэВ/см.

Первые эксперименты ФИАН, выполненные в СВЧ диапазоне на установках "РАМУС" ($P_0 = 1$ МВт, $\lambda_0 = 10$ см, $\phi = 14$ см, $\tau_0 = 8$ мкс), показали ускорение части ионов плазмы до энергий в десятки кэВ при отсутствии заметного ускорения плазменных сгустков как целого из-за их быстрого разрушения в сильных СВЧ полях /2-4/. Недостаточность существовавшего теоретического описания сгустков как проводящих капель была отмечена в /5/ с указанием на возможность перемешивания слоев плазмы, связанного с появлением под действием волны взаимопроникающих потоков частиц и возбуждением плазменных неустойчивостей. Дальнейшие эксперименты выявили ряд новых нелинейных явлений: аномальное поглощение, ускорение частиц, распад и просветление плотной плазмы, нетепловое излучение и др. /6/, что способствовало созданию основ нелинейной электродинамики плазмы. Рассмотрим перспективы радиационного ускорения плазменных сгустков в свете современных данных.

Распад плазмы в СВЧ полях при приближении концентрации плазмы к критическому значению ($n/n_c = 1$) /2-4, 6/ является принципиальным препятствием к осуществлению радиационного ускорения плазменных сгустков. Из измерений энергии ускоренных электронов /7/ получены значения усиленного поля в плазме E_p/E_0 , где E_0 — поле в вакууме (рис. 1). Видно, что в области $n/n_c < 1$ поле возрастает как $E_p/E_0 = (1 - n/n_c)^{-1}$; максимальные значения при $n/n_c = 1$ ограничиваются из-за нелинейных явлений и соответствуют $E_p/E_0 = (L/r_E)^{1/2}$, где L — характерная длина неоднородности плазмы, $r_E = eE_0/m_e\omega_0^2$ — амплитуда осцилляции электронов в СВЧ поле. Максимальное значение E_p/E_0 (при $n/n_c = 1$) соответствует 2,8 (рис. 1), что близко к расчетной величине 3,1, которая пропорциональна $r_E^{-1/2}$.

При осуществлении радиационного ускорения в волноводах малые сгустки имеют обычно плавные границы с изменением концентрации от $n/n_c < 1$ до $n/n_c \geq 1$. Всегда на том или ином участке поверхности сгустка имеются компоненты поля, нормальные к самой границе ($\vec{E} \cdot \vec{v}_n$), и поэтому неизбежно усиление поля внутри сгустка E_p по сравнению с вакуумным полем E_0 . Внутреннее поле противодействует ускоряющему (рис. 2). Поэтому ускорение частиц происходит как напротив, так и согласно действию падающей волны, вызывая быстрый распад плазменного сгустка. С уменьшением n/n_c относительное усиление поля падает (при $n/n_c = 0,3$ имеем $E_p/E_0 = 1,3$). Однако уменьшение n/n_c приводит к снижению числа частиц в сгустке N и падению темпа когерентного ускорения. Для осуществления реального ускорения плазмы необходимо, чтобы ее давление nkT_e было меньше давления волны $E_0^2/4\pi$ или, что то же при $n \sim n_e$, $v_E/v_{Te} > 1$, где $v_E = eE_0/m_e\omega_0$ и $v_{Te} = (kT_e/m_e)^{1/2}$.

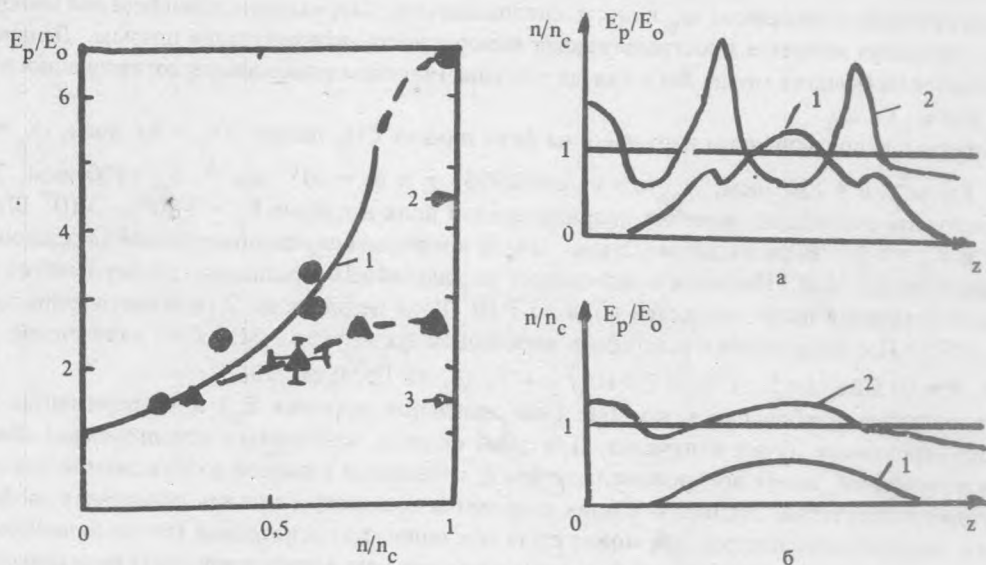


Рис. 1. Зависимости E_p/E_0 от n/n_c . Эксперимент: при $v_E/v_{Te} = 1$ (●); $v_E/v_{Te} = 10$ (▲); расчет: 1 — по формуле $E_p/E_0 = (1 - n/n_c)^{-1}$; 2 и 3 — по формуле $E_p/E_0 = (L/r_E)^{1/2}$.

Рис. 2. Зависимости n/n_c (1) и E_p/E_0 (2) от z для $n_{max}/n_c > 1$ (а) и $n_{max}/n_c < 1$ (б).

В соответствии с расчетами, проведенными для кинетической параметрической неустойчивости разреженной плазмы ($n/n_c < 1$) /8/, пороги ее развития при $n/n_c = 0,3$ составляют $v_{E0}/v_{Te} \approx 2-3$, существенно снижаясь при увеличении n/n_c . Поскольку для ускорения необходимо, чтобы $v_E/v_{Te} \gg 1$, то пороговые значения заведомо превышены. Еще одно ограничение на амплитуду ускоряющего поля связано с требованием совместного ускорения электронной и ионной компонент плазменного сгустка, поскольку поле волны действует непосредственно на электроны, а ионы ускоряются полем, возникающим при смещении электронов /9/. Когда амплитуда колебаний электрона сравнивается с характерным размером сгустка плазмы ($r_E/a \gtrsim 1$), нарушается адиабатичность движения электронов и происходит их выброс из сгустка с осцилляторными скоростями. В случае плазменного резонанса ($n/n_c = 1$) выброс электронов происходит и при меньших полях волны.

Таким образом, устойчивого ускорения можно ожидать только для сгустков сильно разреженной плазмы ($n/n_c \ll 1$), например, при создании ускорителя на двух бегущих волнах (например, E_{01} -типа в круглом волноводе), образующих ускоряющую абсолютную квазипотенциальную СВЧ яму в соответствии с предложением М.А. Миллера /10/. Обнадеживающим фактом является осуществление без потерь транспортировки потока плазмы на длину 100 см в круглом волноводе на волне H_{01} -типа ($\lambda_0 = 15$ см, $P_0 = 5$ МВт, $\phi = 20$ см, $\tau_0 = 40$ мкс, $\Phi_{e0} = 65$ эВ) /6/. В соответствии с оценками /6/ при $\lambda_0 = 10$ см, $P_0 = 40$ МВт, $\phi = 14$ см, $q_0 = 3 \cdot 10^9$ Вт/см², $l = 100$ м и плавном изменении частоты одной из волн в пределах 15%, можно ожидать ускорения протонов до 20 МэВ с импульсным током в десятки ампер и энергетическим разбросом $\sim 10^{-4}$. Однако при этом остается проблема устойчивости плазменных сгустков при длительном ускорении.

Создание мощных СВЧ генераторов ($q_0 = 10^8 - 10^9$ Вт/см²) и лазеров ($q_0 = 10^{15}$ Вт/см²) открывает возможности для развития ускорителей на биениях /11, 12/, в которых ускорение частиц происходит в поле сильной плазменной волны. При этом следует учитывать рассмотренные выше особенности движения заряженных частиц в сильных электромагнитных полях. Для обеспечения длительного ускорения "на биениях" необходимо обеспечить равенство групповой скорости модулированного пакета электромагнитного излучения $v_g = c(1 - \Delta\omega^2/\omega_0^2)^{1/2}$, где $\Delta\omega = \omega_0 - \omega_1$ — разность частот двух мощных генераторов, фазовой скорости возбуждаемой плазменной волны $v_{ph} = \sqrt{3} v_{Te} (1 - \omega_p^2/\Delta\omega^2)^{-1/2}$ (ω_p — плазменная частота

та). При фиксированных значениях ω_0 и ω_1 , и, следовательно, $\Delta\omega$, важным условием для обеспечения эффективного ускорения является пространственная однородность концентрации плазмы. Дальнейший прогресс ускорителей на биениях может быть связан с осуществлением синхронного согласованного изменения $\Delta\omega$ (т.е. ω_0 или ω_1) и ω_p .

Эксперименты с использованием излучения на двух линиях CO_2 лазера ($\lambda_0 = 9,6$ мкм, $\lambda_1 = 10,6$ мкм, $q_0 = 2 \cdot 10^{13}$ Вт/см², $d = 120$ мкм, $v_{ph}/c = v_g/c = 0,995$, $n \approx n_c = 10^{17}$ см⁻³, $\lambda_p = 100$ мкм, $T_e \approx 30$ эВ) позволили получить рекордные значения напряженностей поля в плазме $E_p = 3 \cdot 10^6 - 3 \cdot 10^7$ В/см на длине 1,5 мм /13/ и $E_p = 6 \cdot 10^7$ В/см на длине 0,5 мм /14/. В последнем случае обнаружены ускоренные электроны с энергиями до 3,5 МэВ. Имеются предложения по дальнейшему развитию экспериментов в лазерном диапазоне для получения напряженностей поля до $7 \cdot 10^7$ В/см на длине до 2 см и достижения энергий в десятки МэВ /15/. Известен проект ускорения электронов до энергии 3 МэВ СВЧ излучением: $\lambda_0 = 2$ мм, $\lambda_1 = 2,2$ мм, $P = 10$ МВт, $l = 5$ см, $n_c = 2,3 \cdot 10^{12}$ см⁻³, $E_p = 6 \cdot 10^5$ В/см /15/.

Стремясь получить наибольшее ускорение (максимальные значения E_p) в экспериментах используют сильно сфокусированные пучки излучения. При этом область, занимаемая используемым для ускорения электронов излучением, имеет поперечные размеры d , сравнимые с длиной возбуждаемой плазменной волны λ_p . Поэтому в отсутствие магнитного поля становится возможной сильная поперечная расфокусировка ускоряемого электронного потока. Это может стать еще одним из препятствий (помимо необходимости создания протяженных участков однородной плазмы в продольном направлении, учета релятивистского изменения массы электронов и плазменных шумов, приводящих к расфазировке волны и электронов) на пути к осуществлению эффективного ускорения на биениях.

Автор благодарен А.А. Рухадзе за плодотворные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Векслер В. И. Атомная энергия, 2, 427 (1957); Отчет ФИАН Рф-207, 1951; Рф-167, 1954.
2. Векслер В. И. и др. Труды Межд. конф. по ускорителям (Дубна). М., Атомиздат, 1017 (1968); Атомная энергия, 18, 14 (1965); Труды ФИАН, 32, 60 (1966).
3. Suzuki Y., Ishizuka H., Miyamoto G. J. Phys. Soc. Japan, 19, 779 (1964).
4. Gekker I. R. et al. Proc. VII ICPIG, Beograd, 2, 445 (1965).
5. Гуревич А. В., Силин В. П. Ядерная физика, 2, 250 (1965).
6. Силин В. П. Параметрическое воздействие излучения большой мощности на плазму. М., Наука, 1973; Геккер И. Р. Взаимодействие сильных электромагнитных полей с плазмой. М., Атомиздат, 1978.
7. Геккер И. Р. Письма в ЖТФ, 11, 1520 (1985); Краткие сообщения по физике ФИАН, № 5, 43 (1986); Proc. ICPP, Kiev, 2, 328 (1987).
8. Андреев Н. Е. ЖТФ, 43, 850 (1973).
9. Иовнович М. Л. ЖТФ, 33, 1116 (1963).
10. Миллер М. А. ЖЭТФ, 36, 1909 (1959).
11. Данилкин И. С. и др. Труды ФИАН, 32, 112 (1966); Файнберг Я. Б. Физика плазмы, 13, 607 (1987).
12. Bingham R. Adv. Accel. Conc. Conf., Madison, 1986, AIP, № 4, 389 (1987).
13. Chen F. et al. Proc. VII ICPP, Kiev, 1987; Clayton C. E. et al. Phys. Rev. Lett., 54, 2343 (1985).
14. Lavigne P. et al. Phys. Fluids, 28, 409 (1985); Lavigne P., Ebrahim N. Bull. Am. Phys. Soc., 30, 928 (1985).
15. Formisano V. et al. Europhysics Lett., 3, 303 (1987).

Институт общей физики АН СССР

Поступила в редакцию 27 декабря 1988 г.