

~1 МэВ, токи ~10⁵—10⁶ А). При длительности импульса ~10⁻⁷ с полная энергия в таких пучках >10⁶ Дж, что вполне достаточно для инициирования термоядерной вспышки в дейтерий-тритиевых мишенях миллиметрового диаметра. Инерциальный УТС с использованием интенсивных ионных пучков считается одним из наиболее перспективных и интенсивно развивается.

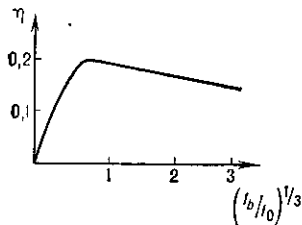
Релятивистская П. э. Мощные мегавольтные электронные пучки открыли новые перспективы перед П. э., связанные с релятивизмом электронов. Развитию релятивистской П. э. способствовало теоретич. доказательство увеличения с ростом γ эффективности η плазменно-пучкового взаимодействия

$$\eta \sim (n_b/2n_p)^{1/3} \gamma, \quad (6)$$

несмотря на уменьшение линейного инкремента $\text{Im}\omega \sim \gamma^{-1}$. Эл.-магн. колебания и волны в плазме обладают самыми разнообразными фазовыми скоростями. В плазме существуют колебания, фазовая скорость к-рых намного меньше скорости света и даже тепловой скорости частиц; к их числу относятся ленгмюровские колебания, ионно-звуковые и альфеновские волны и др. Такие волны легко возбуждаются нерелятивистскими пучками заряд. частиц. Но, обладая малыми фазовыми скоростями, такие волны заперты в плазме, не излучаются, а со временем диссипируют, поглощаясь частицами плазмы. Именно поэтому возбуждение медленных волн в плазме нерелятивистскими пучками заряд. частиц служит эффективным каналом для пучкового нагрева плазмы.

С др. стороны, в плазме существуют и быстрые эл.-магн. волны, фазовая скорость к-рых $\omega/k \approx u \gtrsim c$. Особенно много таких эл.-магн. волн в плазме, находящейся в сильном внеш. магн. поле (см. *Волны в плазме*). Очевидно, что возбуждение быстрых волн в плазме возможно лишь интенсивными релятивистскими электронными пучками. Поэтому с появлением мощных источников релятивистских электронных пучков стала бурно развиваться релятивистская плазменная СВЧ-электроника.

Релятивистские скорости и большие токи изменяют характер взаимодействия сильноточных релятивистских электронных пучков с плазмой. Тот факт, что при $\gamma^2 \gg 1$ даже значит. потери энергии электронов не нарушают условие черенковского резонанса, проявляется в увеличении кпд генерации эл.-магн. излучения (6). Эта оценка справедлива, пока $\eta \lesssim 0,1-0,2$. При больших токах пучка величину η удаётся определить только численно. В оптимальных условиях, когда геометрии пучка и плазмы совпадают, значения η весьма высоки и медленно спадают с ростом тока пучка (рис.).



Зависимость кпд генерации η электромагнитного излучения в плазменном генераторе с релятивистским пучком от тока пучка I_b .

Значения η от поверхности плазмы не превышают 2,5%). Частота генерируемого излучения в случае $\gamma^2 \gg 1$ даётся ф-лой

$$\text{Re}\omega \approx \sqrt{\omega_p^2 - k_{\perp}^2 u^2 \gamma^2}. \quad (7)$$

Здесь k_{\perp} — поперечное волновое число возбуждаемой пучком плазменной эл.-магн. волны. В случае возбуж-

дения аксиально-симметричных мод колебаний в плазме с трубчатой геометрией, совпадающей с геометрией пучка ($r_b = r_p$, $\Delta = \Delta_p$), имеем

$$k_{1n}^2 = \begin{cases} \frac{1}{r_p \Delta} \cdot \frac{1}{\ln(R/r_b)}, & n = 0; \\ \frac{2n}{r_p \Delta}, & n \neq 0. \end{cases} \quad (8)$$

Из ф-л (7) и (8) следуют весьма важные выводы. При условии

$$k_{11}^2 u^2 \gamma^2 > \omega_p^2 > k_{10}^2 u^2 \gamma^2 \quad (9)$$

в системе будет возбуждаться одна единственная осн. мода колебаний, частота к-рой растёт с увеличением плотности плазмы; т. е. частота, в отличие от вакуумной электроники, не жёстко связана с размерами резонатора, а может меняться в широком диапазоне. Для указанных выше параметров плазмы и пучка $\omega_{\text{макс}} \approx 2,5 \cdot 10^{11}$ с⁻¹ (что соответствует длине волны $\lambda \approx 8$ мм) при $n_{\text{рмакс}} \approx 5 \cdot 10^{13}$ см⁻³. Поскольку фазовая скорость возбуждаемой волны близка к скорости света, поле волны сильно непотенциально, причём энергия поля составляет 20% от энергии пучка. А это означает, что напряжённость поля достигает величины $E_{\text{макс}} = 3 \cdot 10^6$ В/см; такое поле может обеспечить ускорение заряд. частиц в плазме до энергии 300 МэВ на длине 100 см, что безусловно является ещё одним преимуществом сильноточной релятивистской П. э.

Такое высокоэфф. возбуждение эл.-магн. излучения, так же как и эфф. ускорение заряд. частиц волнами в плазме, возможно только в условиях однододового возбуждения, т. е. в условиях (9). Если же плотность плазмы очень велика, так что выполняется неравенство $\omega_p^2 > k_{1n}^2 u^2 \gamma^2$ для большого числа мод колебаний, то в плазме происходит возбуждение многододового излучения, к-рое быстро поглощается электронами плазмы и приводит к их разогреву. Кпд преобразования энергии пучка в энергию многододового излучения при этом остаётся прежним (6), что позволяет дать оценку разогрева электронов плазмы сильноточным релятивистским электронным пучком:

$$T_e \approx \eta \frac{n_b}{n_p} m c^2 (\gamma - 1). \quad (10)$$

Для приведённых выше параметров пучка при $n_p \approx 10^{15}$ см⁻³ имеем $T_e \approx 500$ эВ ($5 \cdot 10^6$ К), что свидетельствует о возможности нагрева плазмы сильноточными пучками электронов до высоких термоядерных температур и инициирования термоядерных реакций.

Сильноточные релятивистские электронные пучки имеют ещё одно преимущество. Они могут инициировать плазменно-пучковый разряд и создавать плазму высокой плотности в разл. плазмохим. реакторах. Обладая большой энергией в целом, релятивистские электронные пучки способны обеспечить большой выход в одном импульсе и высокую ср. мощность при использовании пучков импульсно-периодич. режимов. А высокая энергия электронов обуславливает хорошую однородность плазмохим. реакторов даже при очень больших давлениях газа в них, намного превышающих атмосферное. Именно благодаря таким преимуществам на плазменно-пучковом разряде с использованием сильноточных релятивистских электронных пучков реализованы *химические лазеры* на водородо-фтористых смесях, дающие когерентное излучение на длине волны $\lambda \approx 3$ мкм с энергией до неск. кДж в импульсе длительностью $\tau \lesssim 100$ нс и обладающие кпд по отношению к энерговкладу пучка в газ до 700%. Созданы эксимерные плазменные лазеры на смесях Ag + Fr + Kr субмикронного диапазона длин волн с энергией до 1 кДж в импульсе длительностью $\tau \approx 40$ нс и кпд до 10%.