

ПРОХОЖДЕНИЕ УСКОРЕННЫХ ЧАСТИЦ И КВАНТОВ ЧЕРЕЗ СРЕДУ ПО КАНАЛУ ПОНИЖЕННОЙ ПЛОТНОСТИ, СОЗДАННОМУ ЛУЧОМ ЛАЗЕРА

Г. А. Аскаръян, Н. М. Тарасова

Показано экспериментально и теоретически, что ионизация и нагрев среды в луче лазера может создать канал пониженной плотности, по которому пройдут ускоренные частицы (заряды, кванты, макроны) и пучки без сильного рассеяния и без сильной диссипации энергии. Оценены необходимые погонные энерговыделения для образования такого канала, его время формирования и время существования, которое, как оказалось, может превышать сотни микросекунд. Рассмотрены различные способы создания энерговыделения: пробойный, факельный, светодетонационный и др. – в луче или прочерк движущегося фокуса при самофокусировке в газе или плотной среде или при фокусировке линзой с переменным фокусным расстоянием.

Прохождение заряженных частиц и пучков через среды сопровождается сильным рассеянием (угол многократного рассеяния $\theta_s \approx (21/\mathcal{E}_{\text{Мэв}}) \times \sqrt{L/L_{\text{рад}}}$) и потерями энергии на возбуждение и ионизацию среды

$(d\mathcal{E}/dx)_{\text{ион}} \approx (M\epsilon v/c)/\beta^2$, что значительно ухудшает их направленное распространение. Например, в случае нерелятивистских частиц пробег $L_{\text{max}} \approx 10^{-6} \mathcal{E}_{\text{кэв}}^2/\rho$, где $\mathcal{E}_{\text{кэв}}$ – энергия электронов в кэв и ρ – плотность среды. Для мощных пучков добавляется кулоновское растекание. Для макрочастиц давление сопротивления движению со скоростью u равно $p \approx \rho u^2$. Для квантов поглощение зависит от плотности.

В данной работе показано, что ионизация и нагрев среды в луче лазера может создать в среде канал пониженной плотности, по которому ускоренные частицы и кванты пройдут гораздо дальше, чем по невозмущенной среде.

1. При сильной, быстрой ионизации среды в столбе начального радиуса r_0 давление повышается на величину $p \approx n\epsilon_0 \approx 16 \div 50 \text{ атм}$ при $\epsilon_0 \approx 1 + 3 \text{ эв}$ и $n \approx 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и при выравнивании давления, в столбе радиуса $r_1 \approx r_0 (p_e/p_0)^{1/2}$ плотность будет понижена в $(r_1/r_0)^2 \approx (p_e/p_0)^{1/2} \gamma \approx 10 \div 20$ раз для $\gamma = 1, 2$ для воздуха. В этом случае после образования электроны до рекомбинации и прилипания передают тепловую энергию ионам и атомам газа, что передоверяет им роль в повышении давления. Для этого режима образования канала необходимы погонные энергозатраты $q_1 \approx \pi r_0^2 n_e l = \text{дж/см}$ для $r_0 \approx 0,1 \text{ см}$, при $n_e \approx 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и энергии, приходящейся на образование пары ионов $l \approx 30 \text{ эв}$.

Например, при остаточной температуре в канале $\epsilon_1 \approx 1 \text{ эв}$ при выравнивании давления плотность частиц $n \approx P_0 / \epsilon_1 \approx 3 \cdot 10^{-2} n_{\text{норм}}$.

Газодинамические процессы при и после энерговыделения описываются в интересующем нас случае теорией так называемого линейного взрыва. В этом случае радиус ударной волны $r_y(t) \sim (q_1/\rho_0)^{1/4} t^{1/2}$, причем для малых расстояний до оси, плотность среды $\rho(r) \approx \rho_y(r/r_{y(t)})^{2/(\gamma-1)}$.

Когда ударная волна ослабляется, т.е. при $r_y \sim r_{кр} \sim (q_1/\rho_0)^{1/4}$ через время $t \sim r_{кр}/c_s$ такое распределение плотности сохраняется, так как "температурный след" от энерговыделения живет достаточно долго, пока теплопроводность и излучение не охладят нагретый столб среды.

Оценки показывают, что для создания канала пониженной плотности достаточны погонные энерговыделения $q_1 \approx 0,1 \div 1$ дж/см при радиусах $r_0 \approx 0,1$ см, при этом канал формируется за время порядка $t_{\phi} \approx r_0/c_s \sim$ мксек устанавливается за время $t_{уст} \approx r_{кр}/c_{s_0} \approx 10$ мксек, а живет в течение времени $t_{ж} \gg t_{уст}$ из-за малого отвода энергии.

Энерговыделение может быть обеспечено пробойным, светодетонационным, факельным или иным энерговыделением света, а также многофотонной или простой фотоионизацией. В настоящее время получены световые искры длиной до десятков метров.

2. Был поставлен эксперимент по исследованию прохождения пучка ускоренных частиц через среду с каналом пониженной плотности, созданному лазерным пробоем.

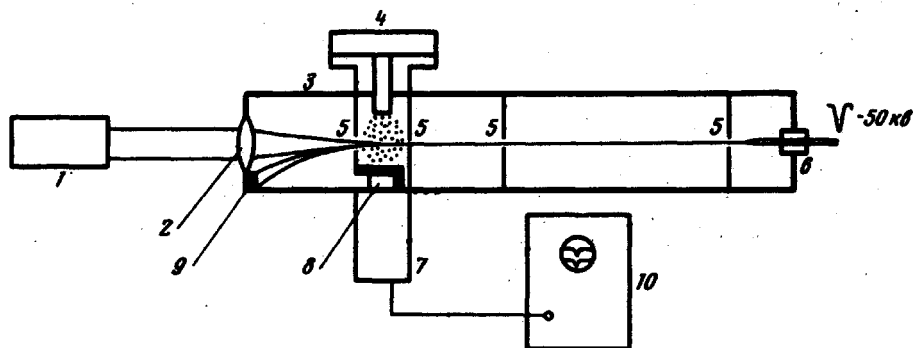


Рис. 1

Схема эксперимента дана на рис. 1. Луч неодимового лазера 1 с модулированной добротностью (длительность импульса 30 нсек, энергия до 3 дж) фокусировался линзой 2 с фокусным расстоянием 8 см внутрь вакуумной камеры 3, в которую быстродействующий клапан 4 напускал за ~ 100 мксек облачко газа в область камеры вблизи фокуса линзы.

По оси камеры через диафрагмы 5 пропускался импульсный электронный луч от ускорителя с острым катодом 6, на который подавался короткий импульс напряжения (-50 кВ) длительностью до 100 нсек от пятикаскадного генератора Маркса, запускаемого от лазера. Ближайшая к острию диафрагма, расположенная на расстоянии 10 мм от острия служила анодом.

Соосность электронного и лазерного лучей подбиралась с использованием обычных методов визуализации (люминофор, юстирующее излучение и т. д.) при вакууме в камере. Регистрация прошедшего электронного луча осуществлялась по рентгеновскому излучению от свинцовой мишени 9, на которую попадали электроны, отклоняемые поперечным магнитным полем. Рентгеновское излучение регистрировалось с помощью сцинтиллятора 8 из РОРОР'а и фотоумножителя 7 типа ФЭУ-30, от которого импульс поступал на осциллограф 10 (двухлучевой осциллограф с памятью С8-2). Сцинтиллятор покрыт глухим защитным экраном с амбразурой, допускающей кванты только со стороны мишени 9. Амбразура покрыта слоем-фильтром, пропускающим кванты с энергией ≥ 30 кэВ. Давление газа в облачке, выпускаемом клапаном было близко к атмосферному. Давление газа над клапаном составляло $8 + 12$ атм.

Для оценки эффективности работы электронной пушки и степени прохождения электронного пучка через облачко газа вместо линзы ставился цилиндр Фарадея, измеряющий прошедший заряд, или люминофор. Давление газа и размеры облачка были подобраны так, чтобы газ вызывал полное перекрытие (рассеяние) электронного пучка. Длина световой искры была близка к толщине облачка в месте пересечения ее пучком.

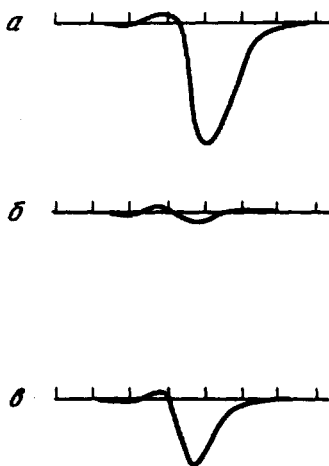


Рис. 2

Было обнаружено резкое увеличение прохождения электронного пучка через газ после создания лазерной искры. На рис. 2 дано: *а* – осциллограмма сигнала от электронного луча в вакууме без срабатывания клапана, *б* – исчезание сигнала при импульсном напуске, *в* – сигнал от электронного луча, прошедшего через канал световой искры от лазерного импульса, вспыхнувшего за 1 мксек до электронного пучка. Метки времени 0,1 мксек/деление. Угол рассеяния пучка уменьшился

не менее чем на порядок величины, а плотность уменьшилась в сотни раз. Было обнаружено хорошее прохождение электронов через канал даже через 200 мксек после образования искры, и в это время без искры электронный луч еще сильно перекрывался струей газа. Учитывая, что движение струи газа может только уменьшить время жизни канала, мы можем утверждать, что канал пропускает электроны в течение времени не меньше нескольких сотен микросекунд.

Отметим, что при прохождении очень мощных пучков направленность распространения несколько улучшается из-за самоиндукционного утяжеления электронов: с учетом индукционного подстегиивания продольная масса электрона $m_{эфф} \approx m_0 (1 + N_1 r_0 L_1)$, где N_1 – погонное число электронов, L_1 – погонная индуктивность и r_0 – классический радиус электрона. Однако, диссипация движения в среде все равно имеет место и она уменьшается при образовании канала. Отметим, что плазма канала может ослабить кулоновское растекание электронного пучка и вызвать обратный самоиндукционный ток. Укажем отличие проведенных экспериментов по зондированию канала ускоренными электронами от работ по пропусканию омического или пробойного тока через плазму лазерной искры, например, с целью замыкания разрядника, в которых существенна лишь проводимость возникшей плазмы, возмущающей внешнее электрическое поле или проводящий ток.

Большой интерес представляет образование канала лучем лазера в жидкости или плотном теле. В этом случае может быть получено уменьшение плотности среды в канале в тысячи раз, а размер сформированного канала может в десятки раз превосходить начальные поперечные размеры $r \approx r_0 \sqrt{\rho_{ж}/\rho_{пар}}$. Время жизни такого канала может достигать долей секунды.

Укажем, что прочерк энергии в деляющего воздействия может быть осуществлен также движущимся фокусом лазерного луча. Например, в случае самофокусировки движение фокуса определяется соотношением

Келли $L_{Келли}(t) \approx a / \sqrt{n_2(E - E_{пор})}$, а концентрация воздействия становится рекордной, поскольку размеры фокуса могут быть крайне малыми (порядка нескольких длин волн). Это приводит к очень малым необходимым затратам погонной энергии на образование тонкого канала $q_1 \approx \pi r^2 n_e I_{эфф} \approx 10^{-3} + 10^{-4} \text{ дж/см}$ ($n_e I_{ион} \approx n_a I_{испар}$).

Создание канала пониженной плотности может увеличить пробег и нейтральных частиц (нейтроны, макроны), а также ультрафиолетовых и рентгеновских квантов. Для макрочастиц пробег $L \approx M/s\rho$, где M/s – масса на единицу сечения частицы, т.е. уменьшение ρ увеличивает пробег и уменьшает потерю скорости частицы.

Очевидно, что вместо лазерного луча могут быть использованы для создания канала пониженной плотности в среде и лучи мм и СВЧ диапазона, но их направленная концентрация хуже, чем у световых лучей.