

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Е. Т. Протасевич, Холодная неравновесная плазма и ослабление токовой нейтрализации сильноточного электронного пучка, *ТВТ*, 2001, том 39, выпуск 6, 997–999

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением
<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.14.90

23 марта 2025 г., 00:29:15



**КРАТКИЕ
СООБЩЕНИЯ**

УДК 537.56

**ХОЛОДНАЯ НЕРАВНОВЕСНАЯ ПЛАЗМА
И ОСЛАБЛЕНИЕ ТОКОВОЙ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ
СИЛЬНОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА**

© 2001 г. Е. Т. Протасевич

Томский политехнический университет

Поступило в редакцию 03.04.2001 г.

Известно, что сильноточные релятивистские электронные пучки (СРЭП) нашли широкое применение в различных физических экспериментах и прикладных разработках из-за уникальной возможности запастись в импульсе пучка высокие энергии. Однако в большинстве приложений эффективность использования СРЭП зависит от условий распространения пучка. Токковая нейтрализация СРЭП и остаточное магнитное поле обратного плазменного тока I_p являются основными препятствиями для прохождения пучка [1].

В [2] предполагается, что более низкая проводимость холодной неравновесной плазмы, образующейся при ионизации влажного воздуха [3], обеспечивает снятие токовой нейтрализации СРЭП и усиливает его фокусировку при токах ниже альфвеновского. Это явление легко объясняется с помощью следующих соотношений.

Диффузионная длина Z_d , на которой существует встречный плазменный ток, определяется эффективной частотой столкновений $\nu_{эф}$ и температурой электронов T_e

$$Z_d = \left(\frac{v_b}{\nu_{эф}} \right) \left(\frac{r_b \omega_p}{c} \right)^2, \quad (1)$$

где v_b и r_b – соответственно скорость электронов и радиус инжектируемого пучка; c – скорость света; ω_p – плазменная частота.

Время затухания плазменного тока τ_p и проводимость плазмы σ связаны между собой соотношением

$$\tau = \frac{r_b}{c^2} \sigma, \quad (2)$$

где

$$\sigma = \omega_p / 4\pi \nu_{эф}.$$

В области низких давлений эффективная частота столкновений электронов (с нейтралами для давлений 100–760 Тор или с ионами для более

низких давлений) определяется преимущественно температурой электронов T_e [4]

$$\nu_{эф} = \nu_{ei} = 0.28 \times 10^{-5} \frac{n_e}{T_e^{3/2}} \Lambda, \quad (3)$$

где $\Lambda = 13-15$ – кулоновский логарифм.

Из (1)–(3) видно, что образование холодной неравновесной плазмы (когда $T_e \rightarrow T_{e \min}$) приводит к снижению ее проводимости и увеличению эффективной частоты столкновений электронов, что вызывает уменьшение диффузионной длины Z_d и длительности (времени затухания) плазменного тока τ_p .

Целью настоящего сообщения является анализ некоторых экспериментальных результатов, подтверждающих перспективность использования водяных паров для повышения эффективности распространения СРЭП.

Подробное описание эксперимента приведено в [5]. Производилась инжекция электронного пучка ($\epsilon \sim 1$ МэВ, $I \sim 20$ кА, $\tau \sim 50$ нс) ускорителя “ТОНУС” в металлические трубы дрейфа, имеющие диаметр 9.2×10^{-2} м и длину 0.4, 1.0 или 2.0 м. При этом давление воздуха в трубе дрейфа составляло $p = 20$ Тор, т.е. превышало давление насыщенных паров воды ($p_{H_2O} = 17.8$ Тор). Параметр N/p (здесь N – концентрация молекул воды, p – полное давление в трубе дрейфа) изменялся в пределах $2 \times 10^{15} - 2.5 \times 10^{16}$ см⁻³/Тор. Такой выбор пределов изменения этого параметра обусловлен необходимостью максимального охлаждения электронов и выполнением условия образования холодной неравновесной плазмы, которое может быть записано в следующем виде [3, 6]:

$$0.66 \times 10^{16} < N/p < 3.22 \times 10^{16} \text{ [см}^{-3} \text{ Тор}^{-1}]. \quad (4)$$

Проводимость плазмы определялась по результатам измерений тока в цепи конденсатор – столб плазменно-пучкового разряда, который формировался между двумя пластинками из алюминиевой фольги, расположенными нормально к пучку

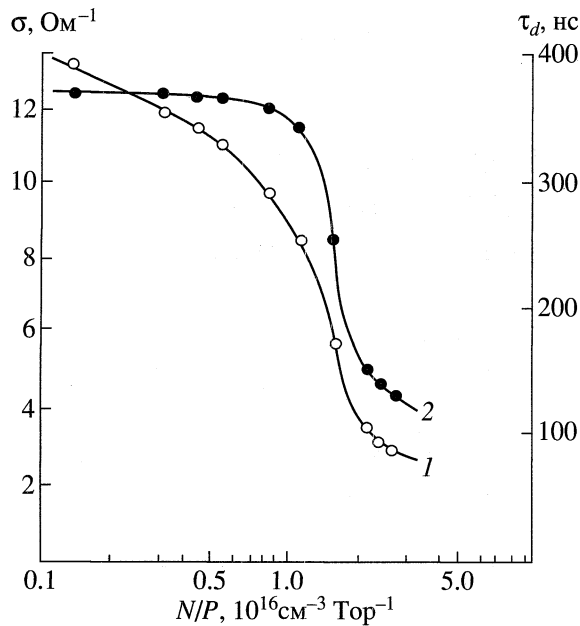


Рис. 1. Зависимость проводимости плазмы σ (кривая 1) и длительности плазменного тока (кривая 2) от отношения концентрации молекул N к полному давлению в трубе дрейфа p для смеси ($\text{H}_2\text{O} + \text{воздух}$).

электронов и соединенными с обкладками конденсатора [5]. Результаты измерений представлены на рис. 1. Из них следует, что при выполнении левой части неравенства (4) происходит заметное снижение проводимости плазмы, в результате чего наблюдается уменьшение длительности плазменного тока и сокращение диффузионной длины (см. соотношения (1) и (2)). Объяснить причины снижения σ вследствие образования в разряде комплексных отрицательных ионов, в частности молекулярных ионов O_2^- за счет протекания трехчастичной реакции прилипания электронов к молекулам кислорода, не удастся, поскольку экспериментально показано [3, 6], что при выполнении условия (4) в разряде сохраняется электронная компонента. Другими словами, формирование холодной неравновесной плазмы плазменно-пучкового разряда приводит к снятию токовой нейтрализации пучка и ограничения на его распространение по трассе, содержащей пары воды.

Рассмотрим, как изменяется длительность тока пучка в зависимости от концентрации паров воды на выходе трубы дрейфа. Из [7] известно, что в сухом воздухе при $p > 5$ Торр через трубу дрейфа проходит только передняя часть СРЭП, а задняя – рассеивается в результате появления градиента магнитного поля полного тока. Это обстоятельство приводит к потерям электронов на стенках трубы дрейфа и вызывает укорочение импульса тока со стороны заднего фронта пучка (срыв тока пучка), как показано на рис. 2а. Однако при увеличении концентрации паров воды в

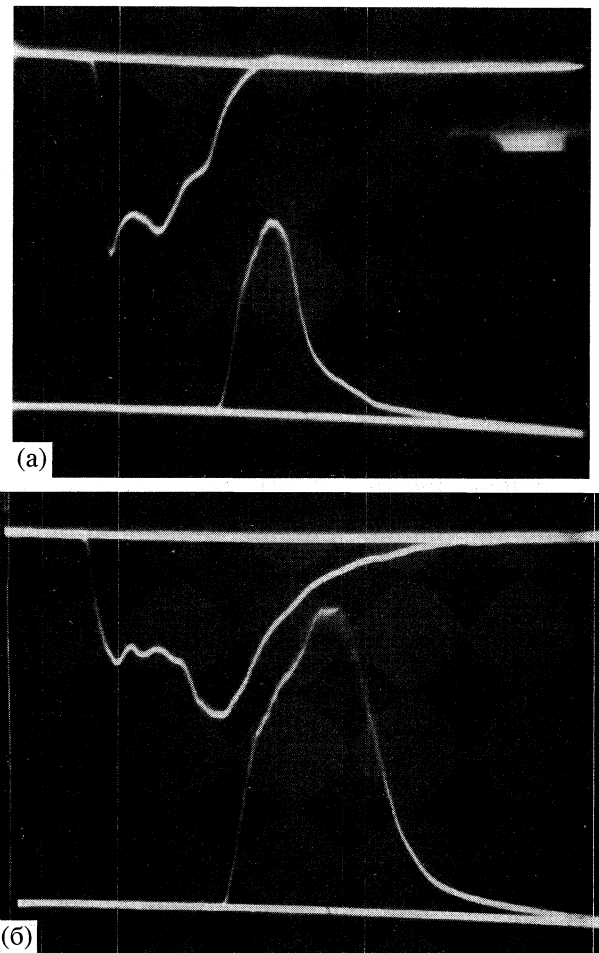


Рис. 2. Характерные осциллограммы импульсов полного тока (верхние осциллограммы) и тока пучка (нижние осциллограммы), полученные при давлении ~ 20 Торр: а – для сухого воздуха; б – для водяного пара, близкого к насыщению.

воздухе этот эффект заметно ослабляется. Обратимся к рис. 2б, из которого видно, что в случае влажного воздуха длительность тока на выходе трубы дрейфа практически не претерпевает никаких изменений при $p > p_{\text{опт}}$ (здесь $p_{\text{опт}}$ – оптимальное давление остаточного газа, при котором наиболее полно осуществляется нейтрализация собственных полей пучка; по условиям эксперимента $p_{\text{опт}} \sim 1$ Торр) и составляет 50 нс, в то время как в случае сухого воздуха τ уменьшается до 30 нс (рис. 2а). Следовательно, во влажном воздухе появляется возможность предотвращения срыва тока пучка при его распространении в нейтральном газе и тем самым повышается устойчивость прохождения СРЭП.

Таким образом, в результате распространения СРЭП по трассе, содержащей пары воды, повышается плотность энергии пучка за счет снижения проводимости плазмы, наблюдается ослабление токовой нейтрализации СРЭП и происходит

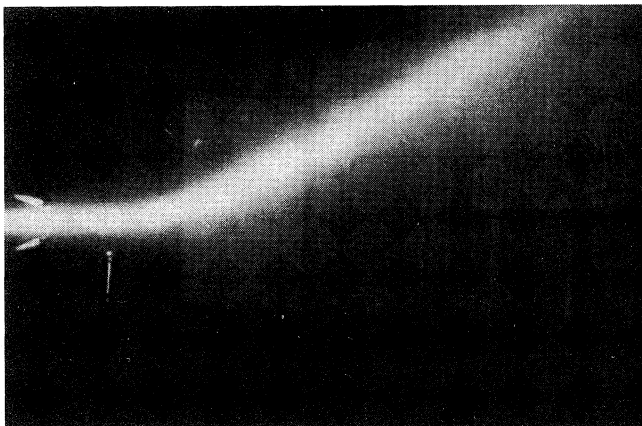


Рис. 3. Фотография, демонстрирующая возможность захвата СРЭП ($I = 20$ кА, $\varepsilon \sim 1$ МэВ, $\tau = 50$ нс) струей водяного пара при нормальном атмосферном давлении. Угол α близок к своему критическому значению.

более быстрый спад во времени поперечного магнитного поля.

Вопросы захвата СРЭП струей водяного пара при нормальном атмосферном давлении достаточно подробно рассмотрены в работах автора [8, 9]. Отметим лишь, что между направлением инъекции пучка и направлением подачи струи водяного пара существует такое критическое значение угла α , что при угле α , большем критического, захвата пучка не происходит. На практике этот критический угол составляет приблизительно 27° . Захват СРЭП струей пара показан на рис. 3.

Ослабление токовой нейтрализации пучка за счет образования холодной неравновесной плазмы может быть с успехом использовано для очистки от сажи и ржавчины с помощью СРЭП металлических труб при одновременном воздействии на них струей водяного пара, а также для обработки пучком других трудно доступных мест или изделий. Кроме этого, существуют и другие более экзотические предложения для использования энергии СРЭП, в частности, описанные в [10].

УДК 621.375.826

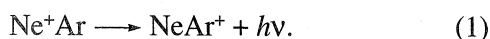
О ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ЛАЗЕРА НА ПЕРЕХОДАХ МОЛЕКУЛЫ (NeH)⁺

© 2001 г. Б. И. Гринченко

Москва

Поступило в редакцию 27.04.2001 г.

В работе [1] предложено использовать в качестве лазерных переходы типа



Автор выражает благодарность В.П. Григорьеву за обсуждение вопросов, связанных с явлением токовой нейтрализации пучка, Г.Е. Ремневу за предоставленную возможность провести эксперименты на ускорителе “ТОНУС” и Ю.П. Сурикову за помощь в реализации экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Диденко А.Н., Григорьев В.П., Усов Ю.П. Мощные электронные пучки и их применение. М.: Атомиздат, 1977. 270 с.
2. Grigoryev V.P., Patashev A.G., Protasevich E.T. The Large-Scale Resistive Instabilities Investigation of the High-Current Electron Beam in Air, Argon and Helium // Beams-88. 1988. V. 2. P. 989.
3. Протасевич Е.Т. Холодная неравновесная плазма газового разряда // ТВТ. 1989. Т. 27. № 6. С. 1206.
4. Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М.: Наука, 1965. 683 с.
5. Протасевич Е.Т., Сметанин В.И., Суриков Ю.П. Взаимодействие СЭП с увлажненной средой // Томск. 1988. 6с. – Деп. В ВИНИТИ 9.02.88. № 1077-В 88.
6. Protasevich E.T. Cold Non-Equilibrium Plasma. Generation. Properties. Appl. Cambridge: Cambridge Intern. Sci. Publ. 1999. 204 p.
7. Котляревский Г.И., Усов Ю.П. Регулировка длительности импульса тока сильноточных релятивистских электронных пучков // ЖТФ. 1977. Т. 47. № 9. С. 1981.
8. Protasevich E.T. Natural Electromagnetic Background and Long-Lived Glowing Phenomena in the Atmosphere. Tomsk: Tomsk Polytechnic Publ., 1995. 70 p.
9. Протасевич Е.Т. Холодная неравновесная плазма: генерация, свойства, области применения. Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 1997. 312 с.
10. Протасевич Е.Т., Протасевич А.Е. О возможности распространения сильноточного электронного пучка вдоль кильватерного следа корабля // Энергетика: экология, надежность, безопасность. Томск: 2000. С. 233.

Однако из-за невысокой энергии связи молекул типа Ne^+Ar (десять доли эВ) и отсутствия эффективных каналов образования этих ионов в реаль-