

- [4] Weiner A.M., Heritage J.P., Hawkins R.J. et al. // Phys. Rev. Lett. 1988. V. 61. N 23. P. 2445-2448.
- [5] Kivshar Yu.S. // J. Phys. A. 1989. V. 22. N 2. P. 337-339.
- [6] Gredeskul S.A., Kivshar Yu.S. Phys. Rev. Lett. 1989. V. 62. N 8. P. 977.
- [7] Груднин А.Б., Дианов Е.М., Прохоров А.М., Хайдаров Д.В. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. Вып. 11. С. 1010-1014.
- [8] Теория солитонов: метод обратной задачи. / Под ред. С.П. Новикова. М.: Наука. 1980 г. 320 с.
- [9] Лифшиц И.М., Гредескул С.А., Пастур Л.А. Введение в теорию неупорядоченных систем. М.: Наука. 1982. 360 с.
- [10] Гредескул С.А., Фрейлихер В.Д. // Изв. вузов. Радиофизика. 1989. Т. 33. № 10.

Физико-технический институт  
низких температур АН УССР,  
Харьков

Поступило в Редакцию  
1 ноября 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 6

26 марта 1990 г.

04; 10; 12

© 1990

## ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК ЭЛЕГАЗА НА ТРАНСПОРТИРОВКУ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА И ДИНАМИКУ ИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ В АРГОНЕ

Ю.Ф. Бондарь, А.А. Гоманько,  
Г.П. Мхеидзе, А.А. Савин,  
А. Яновский

Использование сильноточных релятивистских электронных пучков как источников накачки мощных эксимерных лазеров ставит перед исследователями ряд проблем, связанных с транспортировкой РЭП в смеси инертного газа с небольшим количеством фторосодержащего агента. В настоящей работе исследуется вопрос о влиянии добавок на токопрохождение сильноточного электронного пучка в аргоне и динамику плазменных токов, индуцированных РЭП.

Пучок электронов с параметрами:  $\mathcal{E} \simeq 1.4$  МэВ,  $I_0 \simeq 8$  кА,  $\tau \simeq 80$  нс,  $j \simeq 0.3$  кА/см<sup>2</sup>, инжектировался в камеру дрейфа длиной  $L = 55$  см и диаметром 15 см, наполненную аргоном или смесью аргона с элегазом при давлении  $p = 750$  тор [1]. При

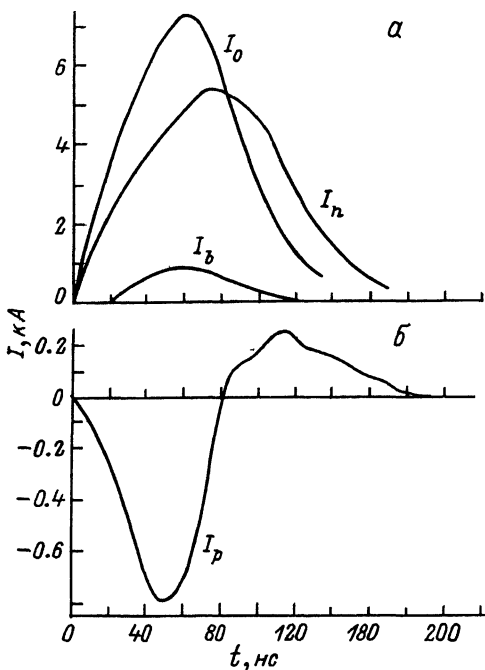


Рис. 1. а - импульсы тока пучка  $I_0$  и полного тока  $I_n$ ,  $L = 0$ ,  $I_b$  - ток пучка,  $L = 55$  см. б - плазменный ток  $I_p$ ,  $L = 15$  см.  $\rho = 750$  Тор,  $Ar + 0.025\% SF_6$ .

помощи секционированных вакуумных приемников измерялись токи пучка  $I_b(r, t)$  в конце камеры ( $L = 55$  см) или на расстоянии  $L = 15$  см. Также регистрировался плазменный ток  $I_p(r, t)$  на расстоянии  $L = 15$  см секционированным коллектором плазменных электронов [2]. При инжекции в чистый аргон тока  $I_0 = 7.5$  кА, ток  $I_b$ , достигающий приемника электронов пучка в конце камеры составлял  $I_b \approx 1$  кА. Добавка  $SF_6$  в количествах, меньших 0.03 %, не изменяла величину регистрируемого приемником тока.

На рис. 1,а изображены импульсы тока пучка  $I_0$  и полного тока в начале камеры, а также тока пучка  $I_b$ , зарегистрированного в конце камеры, наполненной смесью аргона с 0.025 %  $SF_6$  при общем давлении  $\rho = 750$  Тор. На рис. 1,б изображен импульс плазменного тока  $I_p$ , зарегистрированный в той же смеси на расстоянии  $L = 15$  см.

В экспериментах было обнаружено, что добавки  $SF_6$  к чистому аргону в количествах 0.05–1 % значительно улучшают токопроводимость РЭП. На рис. 2 приведена зависимость тока пучка  $I_b$

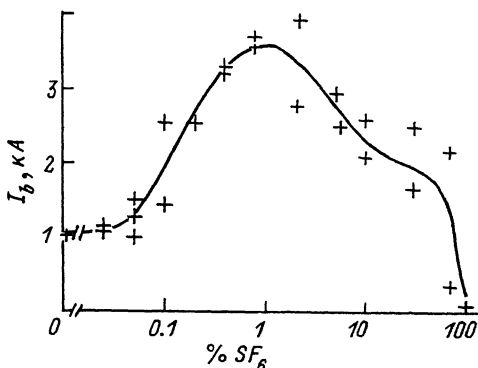


Рис. 2. Зависимость тока пучка  $I_B$ ,  $L = 55$  см, от содержания элегаза в смеси с аргоном.  $p = 750$  Тор.

в конце камеры в зависимости от количества  $SF_6$  в смеси с аргоном. Ток  $I_B$  увеличивается от 1 кА в чистом аргоне до 4 кА в смеси 1 %  $SF_6$  с аргоном при общем давлении  $p = 750$  Тор. При добавлении более 2 %  $SF_6$  ток пучка, регистрируемый в конце камеры, падает вплоть до нуля при полной замене аргона элегазом.

На рис. 3 изображены зависимости амплитуды плазменного тока ( $L = 15$  см) от содержания  $SF_6$  в смеси. Отрицательные значения соответствуют амплитуде плазменного тока, текущего навстречу электронному пучку  $I_p^r$  (так называемый обратный ток), а положительные — плазменному току, направленному по пучку  $I_p^d$  (см. рис. 1,б). При добавлении  $SF_6$  плазменный ток уменьшается и при наличии 5 %  $SF_6$  практически исчезал. Следует заметить, что на рис. 3 приведена амплитуда лишь регулярной составляющей плазменного тока, подобной импульсу, изображенному на рис. 1,б. При добавлении более 5 %  $SF_6$  мы наблюдали осциллирующий плазменный ток на фоне отсутствия регулярной составляющей.

Уменьшение плазменного тока при добавлении  $SF_6$  к аргону является следствием процессов прилипания электронов к молекулам  $SF_6$ . Как показывают расчеты, проведенные для конкретных условий данного эксперимента, температура пучковой плазмы чистого аргона составляет  $T_e \approx 0.3$  эВ [3]. Основным механизмом убыли электронов в такой плазме служит диссоциативная рекомбинация молекулярных ионов аргона, скорость которой составляет в наших условиях  $k_p = 2 \cdot 10^{-7} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$  [4]. Используя расчетное значение концентрации молекулярных ионов аргона  $10^{15} \text{ см}^{-3}$  [3] и скорость прилипания электронов к молекулам элегаза  $k_{np} \approx 1.5 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$  [5], можно убедиться, что при добавлении  $SF_6$  к аргону в количествах более 0.1 % прилипание становится доминирующим механизмом исчезновения плазменных электронов.

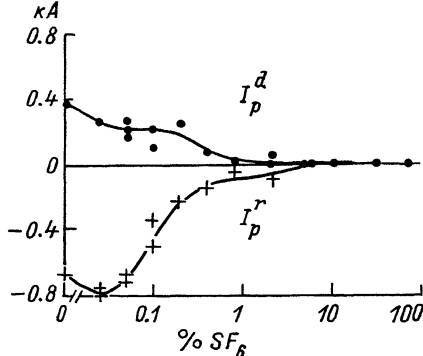


Рис. 3. Зависимость амплитуды плазменного тока от содержания элегаза в смеси с аргоном.  $\rho = 750 \text{ Тор}$ :  $I_p^d$  - амплитуда плазменного тока, текущего по направлению пучка,  $I_p^r$  - амплитуда „обратного“ плазменного тока.

Ниже предлагается несколько возможных причин, объясняющих улучшение токопрохождения РЭП в аргоне при добавлении элегаза.

Уменьшение плазменного тока, а, следовательно, и степени компенсации тока пучка может являться одной из возможных причин наблюдаемого эффекта. Радиальные распределения пучка в конце камеры показывают наличие фокусировки. Характерный размер пучка ( $0.5 I_b \max$ ) составлял 5.5 см при 0.05 % SF<sub>6</sub> и уменьшался до 4 см при 0.4 % SF<sub>6</sub>.

Также из радиальных распределений  $I_b(r, t)$  в конце камеры следует, что при инъекции в аргон пучок подвержен крупномасштабной неустойчивости. В чистом аргоне, а также при добавлении 0.025 % и 0.05 % элегаза регистрировались пространственные колебания с амплитудой, близкой к радиусу пучка и периодом равным длительности РЭП. При добавлении SF<sub>6</sub> в количестве 0.4 % пучок стабилизируется. Стабилизация крупномасштабной неустойчивости РЭП, вызванная значительным уменьшением плазменных токов, является еще одной возможной причиной увеличения токопрохождения РЭП в аргоне добавлении SF<sub>6</sub>.

Оценки фокусировки РЭП в собственном магнитном поле при изменении степени токовой компенсации от  $f_m = 10$  % в чистом аргоне до полного отсутствия компенсации при разбавлении аргона 5 % SF<sub>6</sub>, равно как и стабилизация крупномасштабной неустойчивости не позволяют с уверенностью идентифицировать эти факторы как единственную причину наблюдаемого эффекта увеличения токопрохождения.

Другой возможной причиной наблюдаемых зависимостей может служить развитие микронеустойчивости при инъекции пучка в чистый аргон и подавление ее при добавлении элегаза. При температуре электронов плазмы  $T_e \approx 0.3$  эВ сечение упругих столкновений электронов с атомами аргона имеет минимальное значение

$\delta_{min} \approx 1.5 \cdot 10^{17}$  см<sup>2</sup>, обусловленное эффектом Рамзауэра [6]. При соответствующей частоте столкновений  $\nu_{en} \approx 1.5 \cdot 10^{10}$  с<sup>-1</sup> выполняется условие эффективной передачи энергии пучка плазменным колебаниям в ходе пучково-плазменной неустойчивости с инкрементом  $\delta_{p-b}$ :

$$\nu_{en} \leq \delta_{p-b} \approx 9 \cdot 10^3 (n_b^2 \cdot n_e)^{1/6}. \quad (1)$$

Добавление  $SF_6$  к аргону приводит к разогреву плазменных электронов, вследствие преимущественного прилипания медленных электронов с температурой  $T_e \leq 0.2$  эВ. Оценку для прилипательного нагрева электронов плазмы можно провести в соответствии с работой [7]:

$$\left( \frac{\partial \bar{\epsilon}_e}{\partial t} \right)_{np} = \frac{2}{3} \bar{\epsilon}_e^2 \frac{d \langle Nk_{np}(\epsilon) \rangle}{d \bar{\epsilon}}, \quad (2)$$

где  $\bar{\epsilon}_e = 3 T_e / 2$  средняя энергия плазменных электронов,  $N$  — плотность электроотрицательных молекул.

Из оценки (2) следует, что добавление  $SF_6$  к аргону в количествах более 0.1 % может увеличить среднюю температуру плазменных электронов до 1 эВ. При этом частота столкновений повышается до значений, достаточных для нарушения условия (1).

Уменьшение тока, регистрируемого приемником в конце камеры, при добавлении значительных количеств  $SF_6$  ( $> 10$  %) связано с возрастанием энергетических потерь электронов пучка. Оценки энергетического баланса пучка, показывают, что при увеличении количества  $SF_6$  с 10 % до 50 %, ток в конце камеры падает в 1.4 раза. Начиная с количеств  $SF_6 > 50$  %, заметную роль начинает играть многократное рассеяние электронов пучка. Кроме того, в элегазе возможен и другой механизм диссипации пучка, связанный с торможением электронов в электростатическом поле нескомпенсированного заряда малоподвижных отрицательных ионов элегаза [8].

Как было показано выше, при увеличении концентрации  $SF_6$  в аргоне амплитуда индуцированных токов, регистрируемая радиальными коллекторами плазменного тока уменьшается (см. рис. 3), и в то же время коллекторы показывают наличие осцилляцией плазменного тока с характерной частотой  $120 \text{ МГц} \pm 20 \text{ МГц}$ . Малоаметные осцилляции проявляются, начиная с концентрации  $SF_6$  около 2–5 % на фоне регулярного плазменного тока, а при 50–100 %  $SF_6$  амплитуда осцилляций превышает в 2–3 раза максимальные значения плазменного тока, зарегистрированного в чистом аргоне. В настоящее время нами проводятся эксперименты для выяснения физических причин подобного явления.

- [1] Bondar Yu.F., Gomonko A.A., Mkhaidze G.P. et al. // Proc. 7th Int. Conf. High Power Particle Beams, Karlsruhe, W.G. 1988. P. 939.
- [2] Бондарь Ю.Ф., Гоманько А.А., Мхеидзе Г.П. и др. // Приборы и техника эксперимента. 1987. № 6. С. 139.
- [3] Гочелашвили К.С., Климов В.И., Прохоров А.М. // Физика плазмы. 1989. Т. 15. № 12. С. 1515.
- [4] Елецкий Л.В., Смирнов Б.М. Физические процессы в газовых лазерах. М.: Энергоатомиздат, 1985.
- [5] Helps A.V., Van Brunt R.J.H. J. Appl. Phys. 1988. V. 64. N 9. P. 4269.
- [6] Мак-Даниель И. Процессы столкновений в ионизованных газах. - М.: Мир, 1967.
- [7] Бычков В.А., Елецкий А.В., Ушаговский В.А. // Физика плазмы, 1988. Т. 14. № 12. С. 1497.
- [8] Башурин В.П., Великанов В.П., Довчий А.Я. и др. // ДАН СССР. 1986. Т. 283. № 3. С. 614.

Институт общей физики  
АН СССР, Москва

Поступило в Редакцию  
28 декабря 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 6

26 марта 1990 г.

12

© 1990

## О ПРЕДЕЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЯХ ГЕТТЕРИРОВАНИЯ В КВАЗИЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ

А.В. Гришанов, В.Л. Ласка

Одним из основных требований, предъявляемых к антикоррозионным, сверхпроводящим, жаропрочным покрытиям, является чистота, т.е. отсутствие в составе посторонних элементов. При этом концентрация загрязнений не должна превышать десятых, а в ряде случаев сотых долей атомного процента, что обуславливает необходимость использования вакуумных методов нанесения. Наилучшие результаты достигаются на сверхвысоковакуумном технологическом оборудовании, однако его дефицитность и низкая производительность ограничивают возможности широкого применения.