

**ПРИМЕНЕНИЕ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОГО ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННОГО
РАЗРЯДА ДЛЯ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ В ПЫЛЕВЫЕ ЧАСТИЦЫ**
**THE USE OF AUTO-OSCILLATING BEAM-PLASMA DISCHARGE FOR ION
IMPLANTAING IN THE DUST PARTICLES**

О.А. Коваль, И.В. Визгалов.

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия,
helgakoval@gmail.com;*

The use of high voltage auto-oscillatory pulse, generated in the collector circuit of the beam-plasma system PR-2, to control the surface potential of the dust particles, and hence the energy of ion implantation is discussed in this paper. A distinctive feature of the proposed method is the use only of a relatively low voltage and DC power sources. The evolution of the plasma-surface charge exchange instability in the collector chain is accompanied by pulsed injection of high energy electrons. Due to their spatial and temporal compression it is possible to charge dust particles very rapidly. So, we try to transform the collector plate high-voltage pulses into the potential pulses of macro particles.

Изучение свойств пылевой плазмы представляет большой научный и практический интерес [1]. В обычных газовых разрядах пылевые частицы приобретают не очень высокий плавающий потенциал, определяемый плотностью и компонентным составом заряженных частиц, их энергетическими распределениями, температурой и проводящими и эмиссионными свойствами поверхности, её геометрией. Потенциал порядка 10В для пылевых частиц микронного размера соответствует заряду около $10^4 e$. Так в эксперименте [2] наблюдался заряд до 10^6 электронов на частице с радиусом 120μм. Получению значительно более высоких зарядов и потенциалов пылевых частиц уделяется повышенное внимание, поскольку это открывает перспективы проведения иммерсионной ионной имплантации в пылевые частицы для получения дисперсных композитных материалов с новыми уникальными свойствами.

В большинстве работ сверхвысокую зарядку макрочастиц пытаются осуществить за счет применения дополнительной высоковольтной электронной пушки с ускоряющим напряжением в десятки кВ. В работах [3,4] при энергии первичного электронного пучка $W_b=25$ кэВ, $I_b=1$ мА диаметр электронного пучка в области инжекции частиц пыли составлял $2r_b=0.3$ см. В экспериментах использованы частицы Al_2O_3 с типичным диаметром от 100 до 200 мкм. Заряд определялся по траекториям движения частиц. По оценкам приобретенный заряд пылевой частицы около 100 мкм в

диаметре после поглощения электронов пучка соответствует заряду 2×10^5 зарядов электрона на микрон, что превосходит результаты предыдущих экспериментов. Но потенциал поверхности частицы остается почти на два порядка меньше максимально возможного при заданной энергии пучка.

Проблемы получения высокого потенциала пылевой частицы связаны с быстрым разлётом частиц из области взаимодействия с пучком, с разрядкой за счет роста ионного тока и вторичной электронной эмиссии с холодной поверхности и термоэмиссионного тока при повышении температуры макрочастиц. Подробнее механизмы зарядки, ограничение максимального заряда пылевой частицы и условия прочности рассматриваются в работах [5,6,7]. В частности, из них следует вывод о необходимости увеличения плотности быстрых электронов по отношению к плотности плазмы для увеличения потенциала поверхности. Переход к импульсным электронным пучкам мог бы быть эффективным способом быстрого и программируемого увеличения мгновенного заряда пылевых частиц.

В докладе обсуждается возможность дополнительной импульсной высоковольтной зарядки пылевых частиц, вводимых в сильнонеравновесную плазму стационарного пучково-плазменного разряда (ППР) с помощью холодноэмиссионного коллектора-антикатада, работающего в режиме генерации электромагнитных автоколебаний. В работах [8-9] показано, что при развитии вторично-эмиссионной неустойчивости в цепи коллекторной пластины ППР могут развиваться очень высоковольтные и короткие импульсы, на один-два порядка превышающие, постоянное напряжение на пушке и коллекторе. При этом отрицательно смещенная коллекторная пластина становится импульсным эмиттером вторичных электронов, ускоряемых в дебаевском слое объемного заряда навстречу первичному пучку, обеспечивая дополнительную зарядку макрочастиц. Возможности дополнительной зарядки пылевых частиц анализировались для экспериментальной пучково-плазменной установки ПР-2. Ее схема представлена на рис. 1. Она представляет собой открытую адиабатическую ловушку [8] с пробочным отношением 1.55.

Ранее в экспериментах на установке ПР-2 было показано, что при определенных условиях коллекторная цепь становится генератором релаксационных высоковольтных импульсов. Форма и амплитуда импульсов сильно зависит от параметров разряда, постоянного смещения и величины индуктивности цепи. На рис.2 показана форма импульса, полученного при постоянном смещении на коллекторе всего 100 В. Изменяя параметры ППР и коллекторной цепи, можно получить значительно более быстрые

фронты вплоть до наносекундного диапазона. При этом уменьшается амплитуда импульсов, но увеличивается частота следования.

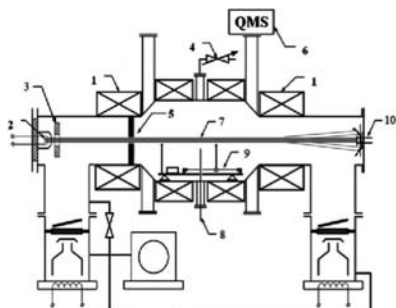


Рис. 1. Принципиальная схема установки ПР-2: 1- магнитные катушки, 2-катод, 3-анод, 4-система газонапуска, 5-диафрагма, 6-квадрупольный масс-спектрометр, 7-плазменный шнур, 8-одиночный зонд Ленгмюра, 9-система автоматического позиционирования, 10-коллектор-антикатод.

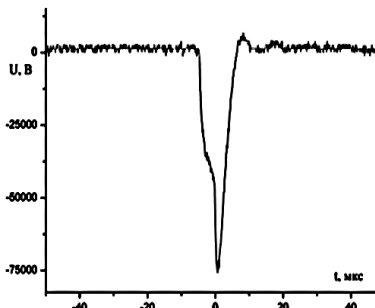


Рис. 2. Пример высоковольтного импульса, формируемого в автоколебательном режиме на установке ПР-2

Поскольку плотность эмиссионного тока с коллекторной пластины ограничена, увеличение плотности быстрых электронов в области инжекции пылевых частиц может быть достигнуто за счет магнитной компрессии эмитируемых потоков. При этом эффективная магнитная компрессия предполагает инжекцию быстрых электронов вдоль магнитного поля. Так как ускорение вторично-эмиссионных электронов происходит в очень тонком двойном слое, следует применять вогнутую форму эмиссионной поверхности, нормальную к магнитному полю. Скорость зарядки пылевых частиц может быть значительно увеличена, если дополнительно к магнитной компрессии достигается и временное группирование эмитируемых пластиной электронов. Для группирования благоприятна укручивающаяся форма высоковольтного импульса, обязанная уменьшению емкости дебаевского слоя с ростом напряжения.

Для трансформации потенциала коллектора в потенциал пылевых частиц проанализированы два предельных случая. Первый соответствует режиму, когда в области компрессии объемный заряд быстрых электронов относительно мал и не влияет на локальный потенциал плазмы. Происходит зарядка отдельных пылевых

частиц относительно плазмы, которая остается под потенциалом, близким к потенциалу "земли". Каждая пылевая частица ускоряет ионы из окружающей плазмы. Второй соответствует образованию в области компрессии высоковольтного виртуального катода. В этом случае имплантация происходит за счет ускорения ионов на границе виртуального катода, общей для большого количества пылевых частиц.

Изучался процесс транспортировки пучка через магнитную пробку методами численного моделирования в среде Comsol multiphysics для поиска возможности увеличения плотности быстрого компонента электронного пучка, эмитируемого коллектором, с помощью магнитной и баллистической компрессии [11,12]. В случае плоской коллекторной пластины наблюдалось прохождение в область магнитной пробки только приосевых электронов и отражение периферийных. Разработана программа определения профиля эмиссионной поверхности, ортогональной к магнитным силовым линиям при заданной конфигурации магнитного поля. Моделирование эмиссии электронов с расчетной вогнутой поверхности показало значительное улучшение прохождения краевых электронов. Расчеты показывают, что для обеспечения компрессии исходного пучка порядка 10^3 необходимо уменьшать ларморовский радиус и, соответственно, увеличивать магнитное поле до величины порядка 1Т. Разработан соответствующий коллекторный узел и рассчитана сверхпроводящая магнитная система.

1. Филиппов А. В., Васильев М. Н., Гавриков А. В., Паль А.Ф., Петров Щ.Ф., Старостин А.Н., Фортов В.,Е.//Письма в ЖЭТФ(2007)Т.86.№1.с.16-21
2. B. Walch, M. Horányi, and S. Robertson, Phys. Rev. Lett. 75, 838 (1995).
3. L. M. Vasilyak, M. N. Vasiliev, S. P. Vetchinin, D. N. Polyakov, and V. E. Fortov, Sov. Phys. JETP 96,440 (2003).
4. A. V. Gavrikov, V. E. Fortov, O. F. Petrov, N. A. Vorona, and M. N. Vasiliev, AIP Conf. Proc. 1041, 337 (2008).
5. В.Е. Фортов, А.Г. Храпак, С.Х.Храпак, В.И. Молотков, О.Ф. Петров //УФН(2004)Е.174.№5
6. Морфилл Г.Е., Цытович В.Н., Томас Х.//Физ.плазмы.29.3.2003
7. Thomas H.//Phis.Rev.Lett.73.652.1994
8. Акел М., Визгалов И.В., Курнаев В.А.//Инженерная физика. 2002. No 3 с. 49.
9. Акел М., Визгалов И.В., Курнаев В.А.//Материалы международной конференции "ВИП-2003", Т2, сс. 296-299.
10. Визгалов И.В., Гуторов К.М., Курнаев В.А.//Прикладная физика, 2011.№6 сс.87-91
11. В.Т. Астрелин, И.В. Кандауров, В .М. Свешников// Успехи прикладной физики.2013.т.1,№5 сс580-584
12. В.Г. Абдулманов, Н.С. Диканский// Письма в ЭЧАЯ 2010. Т7. №7(163) С.869-873