

# Принципиальные возможности электростатической оптики для формирования ярких пучков $D^{\pm}$

Ю.В. Зуев

*НИИЭФА им. Д.В. Ефремова, Санкт-Петербург, Россия*

## Введение

При разработке ускорительной техники в последние годы основной акцент делается на ее прикладном назначении. Повышенное внимание уделяется эффективности использования систем питания, надежности и простоте конструкций, радиационной чистоте, габаритам. Значительное упрощение линейных резонансных ускорителей достигается за счет использования высокочастотной фокусировки (структуры RFQ, APF, RFD). Специфические особенности этих малогабаритных структур: существенно меньшие энергии инжекции и более жесткие требования к параметрам пучка (фазовая плотность не менее 1 А/см·мрад, определенная конфигурация фазового объема).

Для транспортировки пучка от источника и приведения его характеристик в соответствие требуемым, между источником и ускорителем размещаются различные оптические системы. Применение осесимметричной электростатической оптики позволяет совместить поперечное согласование с доускорением и транспортировкой. Линзы этого типа наиболее экономичны, просты в изготовлении. Они стабильны в работе и не имеют ограничений на длительность импульса, поскольку в них не происходит газовая нейтрализация заряда пучка. Однако последнее обстоятельство вынуждает использовать более сильные фокусирующие поля, что всегда сопряжено с более высоким уровнем aberrаций и проблемами электрической прочности. В случае пучков  $D^{\pm}$ , необходимых для высокоэффективного производства нейтронов, ситуация усугубляется большей плотностью пространственного заряда (протонный эквивалент тока  $I_p = \sqrt{A/Z} I_D$ ), в связи с чем особую значимость приобретает проблема минимизации фазовых искажений.

Рекомендации по снижению сферической основной aberrации чаще всего сводятся только к требованию малости размеров пучка относительно апертуры канала<sup>1</sup> [1]. Оптимизация формы электродов без учета полей пространственного заряда позволяет снижать aberrационные искажения не более чем на 30% [2]. Возможность практической компенсации aberrаций полем пучка долгое время не рассматривалась из-за отсутствия эффективных методов ее расчета. Напротив, сложилось устойчивое заблуждение о сугубо отрицательной роли кулоновских сил [3]. Принципиально важные результаты были получены сначала в [4], а затем в [5]. В частности, установлено, что при определенных условиях процессы, связанные с перераспределением тока пучка, носят колебательный характер. Амплитуда колебаний определяется избыточной энергией распределения частиц относительно равновесного, частота – жесткостью фокусировки и плотностью пучка [4]. Надлежащий выбор параметров системы позволяет управлять частотой и амплитудой таким образом, чтобы искажения пучка оставались обратимыми<sup>2</sup> и имели на выходе нужную фазу, например близкую к начальной, когда искажения малы [5]. Синтез систем, реализующих этот принцип, может быть проведен в рамках aberrационной модели интенсивного пучка [6].

Модификация модели и парааксиальное приближение для расчета поля, формируемого электродами, стали основой компьютерной программы, осуществляющей параметрический синтез с учетом технологических ограничений на форму электродов, электрическую прочность и т.п. [7]. С помощью этой программы были исследованы потенциальные возможности осесимметричной электростатической оптики по формированию яркого пучка  $D^{\pm}$ , необходимого для реализации проекта [8].

---

<sup>1</sup> Здесь очевидно предполагается использование электродов простой формы: цилиндров, тонких диафрагм. Хорошо известно, что одно и то же поле можно сформировать разными системами электродов, если их форма и потенциалы соответствуют разным его эквипотенциалам. С увеличением апертуры канала снижается чувствительность приосевого поля к форме полеобразующих поверхностей, но одновременно растут габариты системы, напряжение питания, вероятность пробоев.

<sup>2</sup> Если исключить образование многопоточковой структуры пучка (складок), обратимость колебаний плотности будет лимитирована лишь тепловой (бесстолкновительной) релаксацией [6], которая по сути может рассматриваться как проявление хроматической aberrации.

## 1. Цель и методика исследований

В ходе исследований требовалось определить потенциалы, форму и расположение электродов канала инжекции для ускоряющей секции с ПОКФ на частоте 433 МГц (рис.1). Форма электродов и система их питания по возможности наиболее простые. Предполагаемые фазовые характеристики пучка на выходе из источника: эмиттанс, размер поперечного сечения и регулярная расходимость близки к полученным в [9], ток 25 мА, энергия 15-20 кэВ. Поперечное фазовое распределение на выходе инжектора должно обеспечивать максимальное попадание частиц в расчетный эллипс,<sup>3</sup> соответствующий оптимальному захвату в режим ускорения при энергии инжекции 60 кэВ.

Оптические системы подобного назначения в своем большинстве состоят из одной или нескольких одиночных линз. Наиболее простое питание такой системы предполагает использование только двух значений потенциала, которые соответствуют энергии извлечения пучка из источника и энергии инжекции в ускоритель. С целью увеличения оптической силы линз и снижения вероятности пробоев использовались “ring” электроды. Их лицевые поверхности близки к естественной форме эквипотенциалей в окрестности седловых точек поля, поэтому электроды могут располагаться в непосредственной близости от пучка, не увеличивая его возмущения [2].

Оптимальная конструкция определялась методом сканирования пространства электрических и геометрических параметров системы. Для каждого набора параметров находилась соответствующая геометрия электродов и по методике, изложенной в [7], рассчитывалось распределение электрического потенциала на оптической оси. Далее решалась модифицированная система уравнений, моделирующая интенсивный пучок в абберрационном приближении. По интегралам абберрационных уравнений оценивалось качество системы. В результате перебора параметров отбирались такие их комбинации, при которых площадь в пересечении эмиттанса пучка с акцептансом ускорителя максимальна. Поиск прекращался после просмотра всех комбинаций варьируемых параметров<sup>4</sup>, допускаемых заданными ограничениями. В частности, ограничения накладывались на напряженность электрического поля  $\Delta U/d \leq 100 \text{ kV/cm}$ , где  $\Delta U$  – напряжение между электродами,  $d$  – межэлектродное расстояние. Наилучшие варианты оптики тестировались обычной программой анализа динамики с расчетом самосогласованного поля пучка методом крупных частиц<sup>5</sup>. Некоторые из этих вариантов представлены на рис. 2.

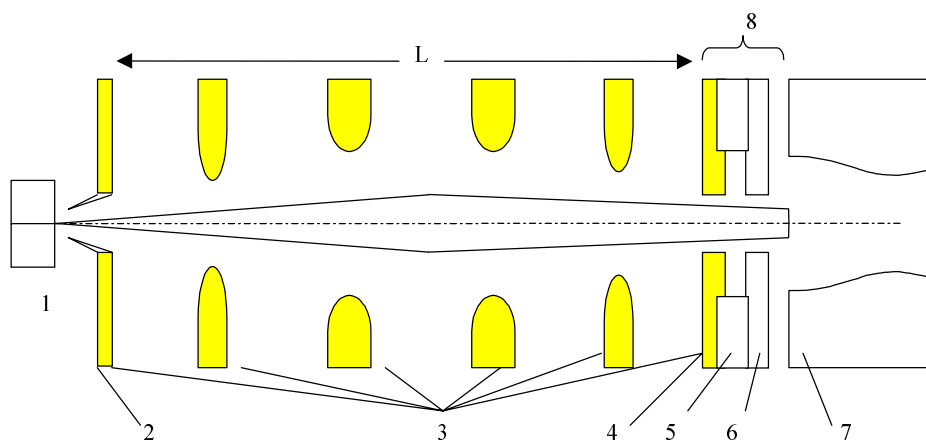


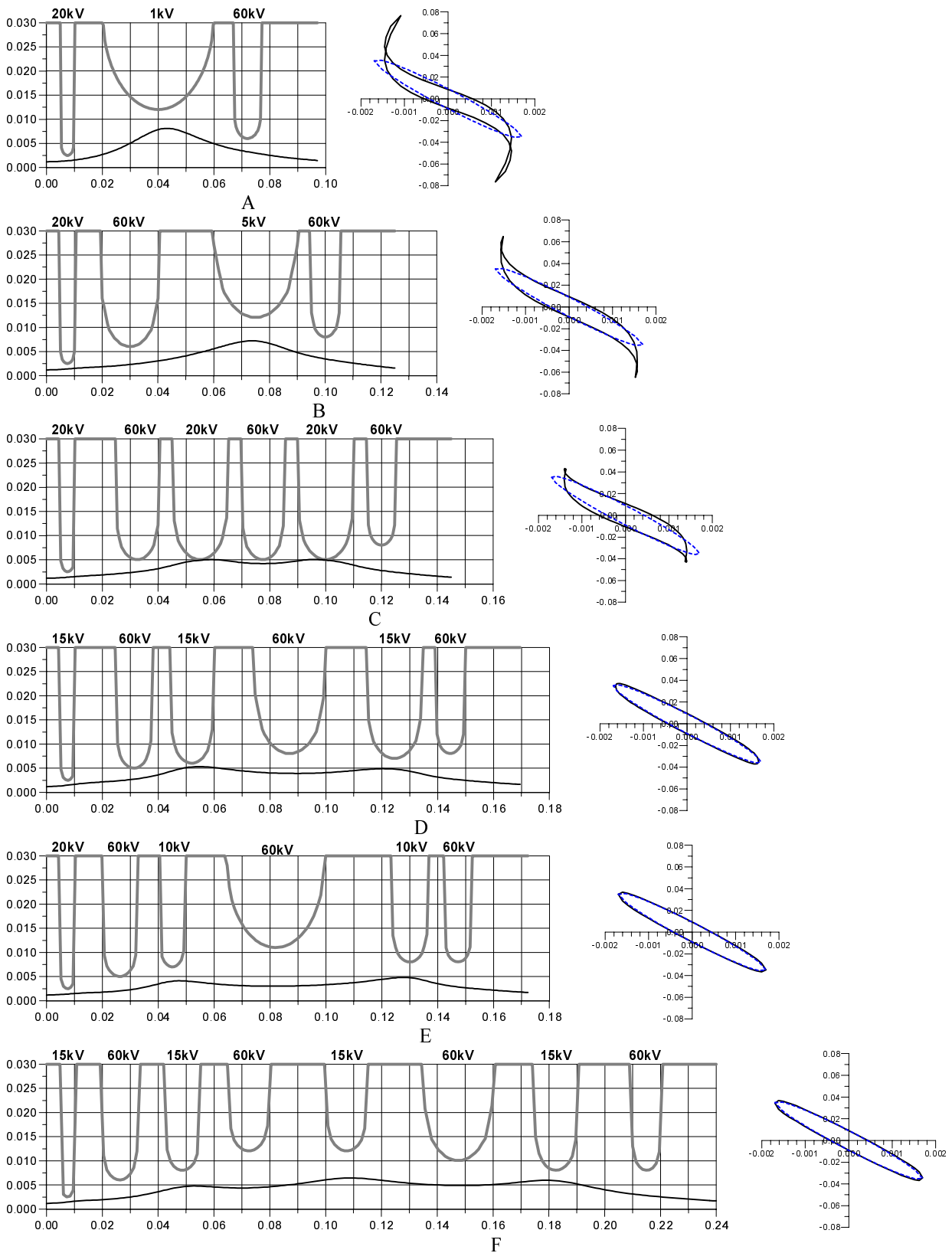
Рис. 1: Интегрирование оптической системы в состав инжектора.

1 – газоразрядная камера источника; 2 – извлекающий электрод источника, он же первый электрод оптической системы; 3 – электроды оптической системы; 4 – фланец (стенка) инжектора, он же последний электрод оптической системы; 5 – устройство механического сочленения инжектора и ускоряющей структуры; 6 – фланец (стенка) резонатора с ПОКФ; 7 – электроды ускоряющей структуры; 8 – зона неуправляемого движения пучка на участке стыковки инжектора с ускоряющей структурой.

<sup>3</sup> Этот эллипс на рис.2-3 указан штриховой линией.

<sup>4</sup> Варьировались положение на оси, потенциал, апертура и толщина внутренних электродов; геометрия и потенциалы крайних электродов (первого и последнего) не менялись.

<sup>5</sup> Эффективность методики позволяла без особых усилий анализировать до 500000 вариантов одной конструкций.



**Рис. 2:** Результаты оптимизации согласующей оптики для ускорителя с ПОКФ.

Слева – геометрия системы, потенциалы на электродах и огибающая пучка; справа – аксептанс ускоряющей структуры (штрих) и эмиттанс пучка, предсказанный абберационной моделью (сплошная линия, проекция  $g'$ ).

### 3. Результаты и выводы

Анализ полученных результатов показывает, что в рассматриваемом диапазоне параметров для качественного согласования и доускорения пучка необходима, как минимум, 6-электродная система с запиткой низковольтных электродов потенциалами ниже<sup>6</sup> 15 кВ (рис. 2Е). В противном случае максимальный коэффициент заполнения апертуры близок к единице, что не гарантирует 100%-ое токопрохождение в реальных условиях, рис. 2С, D. Количество электродов может варьироваться, рис. 2А-Е, и должно определяться, исходя из газовой эффективности источника, требований к вакууму на входе в ускоритель, габаритов откачных средств.

Аберрации оптической системы в значительной мере могут быть скомпенсированы полем пучка. На рис. 3В представлен фазовый портрет модельных частиц, полученный в результате тестирования оптики, приведенной на рис. 2Е. Рядом (рис. 3А, кривая 1) показана эволюция их среднеквадратичного эмиттанта (относительные единицы). После перераспределения тока по сечению, происходящего в результате самосогласования пучка с оптическим каналом, величина эмиттанта возвращается практически к первоначальному значению. Для сравнения (кривая 2) дана та же характеристика после замены нелинейного поля пучка линейным<sup>7</sup>. В коротких системах (рис. 2А, В) плотность пучка оказывается недостаточной для полной компенсации аберрационных эффектов, которые здесь более значительны из-за большей удельной силы линз<sup>8</sup>.

Зона неуправляемого движения частиц на участке стыковки инжектора с ускоряющей структурой (см. рис. 1) должна быть минимизирована. Увеличение этой зоны требует формирования пучка большего радиуса и угла сходимости в плоскости последнего электрода. Как следствие – увеличение апертуры канала и дополнительная натечка газа в ускоряющую секцию; выше уровень аберраций из-за необходимости более сильной фокусировки широкого пучка; продолжительнее некомпенсируемое воздействие поля пучка, которое нелинейно в случае неоднородной плотности заряда по сечению. Длина участка стыковки в расчетах составляла 20-30 мм и близка к оптимальной.

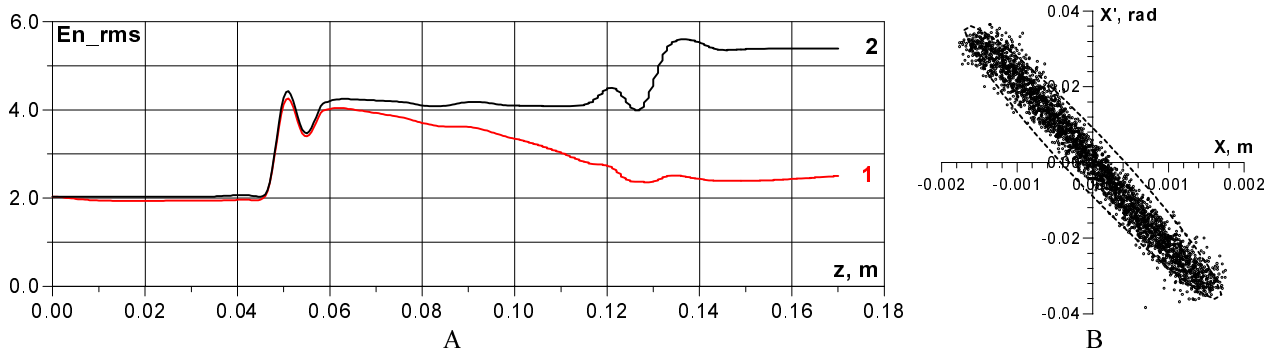


Рис. 3.

### Литература

- [1] C. Allen et al. "Design Studies of Low Energy  $H^-$  Beam Transport with Electrostatic Lenses", Linac'90, Albuquerque, 1990, p. 402; M. Reiser, "Transport of High-intensity Beams", NS-32(5), 1989 и др.
- [2] Yu. Zuev. "Field Form Optimization in Low Energy Beam Transport System", BDO'94, S.-Petersburg, 1994, p. 267.
- [3] M. Reiser. "Theory and Design of Charged Particle Beams", NY.: Wiley, 1994.
- [4] O.A. Anderson. "Internal Dynamics and Emittance Growth in Space-charge-dominated Beams", PA, V.21, 1987.
- [5] Yu. Zuev. "Nonlinear Phenomena in Space Charge Dominated Beam Transport", BDO'98, S.-Petersburg, 1998.
- [6] Yu. Zuev. "Advanced Equations for Investigation of Beam Envelope and Emittance Growth", BDO'97, Dubna, 1997, p. 56-65.
- [7] Yu. Zuev. "Practical Optimization of Multielectrode Electrostatic Lens", BDO'2000, S.-Petersburg, 2000.
- [8] Yu.A.Svistunov et al. "NPK LUTS Project of Contraband Detection System", Linac'2000, Monterey, 2000, TUE12.
- [9] G.E. Derevyankin, V.G. Dudnikov. "Production of High Brightness  $H^-$  Beams in Surface Plasma Sources", AIP, No111, 1983, pp. 376-397.

<sup>6</sup> Реализация этого условия требует либо снижения извлекающего напряжения на источнике, либо усложнения системы питания инжектора. При запитке низковольтных электродов от отдельного источника с регулируемым напряжением дополнительно появляется возможность оперативной подстройки оптического тракта.

<sup>7</sup> Замена поля в численном эксперименте проводилась из условия сохранения поведения огибающей.

<sup>8</sup> Полная компенсация аберраций в коротких линзах возможна при меньшей расходимости пучка из источника.