Общая физика

УДК 537.534.7

Краевые поля бессеточных электронных спектрографов с однородными по Эйлеру электростатическими полями

И. А. Аверин, А. С. Бердников

Предметом исследования являются краевые поля электронных спектрографов с однородными по Эйлеру электрическими полями. Большинство рассмотренных ранее оптических схем используют приближение идеального скачка электрического поля для краевой области, что на практике приводит к дополнительным краевым полям, разрушающим идеальные спектрографические свойства исходной оптической схемы. В данной работе показано, как можно организовывать строго однородные по Эйлеру трёхмерные электростатические поля, которые сохранят идеальные спектрографические свойства и обеспечат бессеточный ввод и вывод частиц.

PACS: 41.20.Cv

Ключевые слова: однородность по Эйлеру, спектрографы, краевые поля.

Введение

Электронная спектроскопия — это мощный инструмент для получения информации о веществе, который может снабдить исследователя полезной информацией об особенностях химической структуры исследуемого объекта. Это метод с высокой поверхностной чувствительностью, которому в настоящее время нет аналогов при анализе проводящих и непроводящих поверхностей. Особенно актуален он стал в связи с переходом современной электроники на наноразмерную шкалу. Совмещение электронного микроскопа и электронного энергоанализатора, работающего в режиме спектрографа, является новым и перспективным приборным решением, которое даёт уникальную возможность исследовать характерные локальные свойства сканируемого объекта.

Такое приборное решение требует спектрографического режима работы энергоанализатора, определяющего весь диапазон электронного спектра для исследуемой точки объекта за одно измерение. Однако реализация *спектрографического* режима (весь набор энергий пучка измеряется одновременно в параллельном режиме и с одинаковой точностью) по сравнению с классическим *спектрометрическим* режимом (в каждый момент времени вырезается и точно измеряется только одна из энергий пучка) требует совершенно других подходов к конструкции и к оптимизации оптической схемы прибора. При спектрометрическом режиме необходимо собрать все частицы пучка с одной энергией в точке детектирования с максимально хорошим качеством фокусировки и обеспечить непопадание на детектор частиц с другими энергиями. Другими словами, при спектрографическом режиме нужно разделить единый поток заряженных частиц на максимально диспергированные потоки, каждый из которых соответствует одной энергии, и сфокусировать эти моноэнергетические потоки по отдельности в независимые и пространственно разнесённые точки детектирования с примерно одинаковым для всех точек качеством фокусировки. Это принципиально разные оптические задачи.

Важным инструментом здесь может быть теория спектрографических сред [1—4]. Эта теория базируется на общем принципе подобия траекторий в электрических полях, однородных по Эйлеру, у которых электрический потенциал удовлетворяет тождеству:

$$f\left(\lambda x, \lambda y, \lambda z, \ldots\right) \equiv \lambda^n f\left(x, y, z, \ldots\right).$$

Аверин Игорь Андреевич, младший научный сотрудник, аспирант[1,2].
Бердников Александр Сергеевич, ведущий научный сотрудник[1].
[1] Институт аналитического приборостроения РАН.
Россия, 190103, Санкт-Петербург, Рижский пр., 26.
[2] Санкт-Петербургский Политехнический Университет им. Петра Великого.
Россия, 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
E-mail: agreer@bk.ru

Статья поступила в редакцию 24 декабря 2015 г.

© Аверин И. А., Бердников А. С., 2016

Для таких полей справедливо [1—4]: если моноэнергетический поток частиц фиксированной энергии, стартующий из начала координат под некоторым углом, фокусируется по углу в некоторой точке пространства, то моноэнергетический поток любой другой энергии, также стартующий из начала координат и под тем же углом, точно так же фокусируется в точке, которая будет пропорционально масштабирована по отношению к началу координат. Коэффициент пропорциональности зависит от новой энергии по степенному закону, зависящему от показателя однородности *n*. Важно, что здесь качество фокусировки для всех моноэнергетических потоков будет одинаковым, а все точки фокусировки будут расположены вдоль прямой линии (плоскости), проходящей сквозь начало координат системы.

Данная работа является логическим продолжением работы [5]. Предметом исследования являются краевые поля электронных спектрографов (электростатические энергоанализаторы) с однородными по Эйлеру электрическими полями. Цель работы — показать, как можно организовывать строго однородные по Эйлеру трёхмерные электростатические поля, которые сохранят идеальные спектрографические свойства и обеспечат бесселеточный ввод и вывод частиц.

Основные подходы и результаты

К сожалению, в принципе не существуют двумерные и одновременно однородные по Эйлеру поля с выходными электродами, обладающими щелью для свободного выхода заряженных частиц. Однако можно показать, что имеются однородные по Эйлеру *трёхмерные* поля, которые максимально близки к соответствующим идеальным двумерным полям и при этом обладают выходной щелью. Эти поля не слишком хорошо поддаются попыткам выразить их в виде аналитической формулы, но их вполне можно рассчитать численно.

Опишем кратко данный процесс. Однородная по Эйлеру функция $U(x, y, z)$ с порядком однородности *n* может быть записана с помощью «донкиновской» подстановки следующим образом:

$$U(x, y, z) = \left(x + \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}\right)^n \varphi\left(\frac{y}{x + \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}, \frac{z}{x + \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}\right) = r^n \varphi(p, q),$$

где $\varphi(p, q)$ — произвольная функция двух переменных. Чтобы эта функция удовлетворяла трёхмерному уравнению Лапласа $U_{xx} + U_{yy} + U_{zz} = 0$, функция $\varphi(p, q)$, записанная в координатах:

$$p = \frac{y}{x + \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}},$$

$$q = \frac{z}{x + \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}},$$

должна удовлетворять двумерному эллиптическому уравнению:

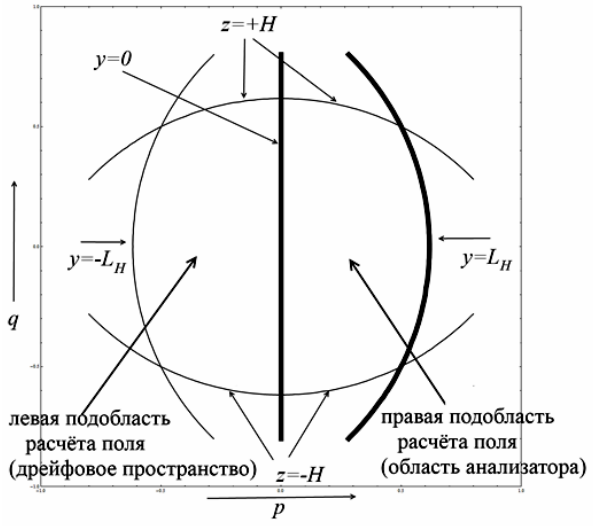
$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial p^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial q^2} - \frac{4np}{1 + p^2 + q^2}\frac{\partial \varphi}{\partial p} - \frac{4nq}{1 + p^2 + q^2}\frac{\partial \varphi}{\partial q} + \frac{4n^2}{1 + p^2 + q^2}\varphi = 0.$$

Для последнего уравнения можно поставить краевую задачу в координатах (p, q), и, определив численно решение $\varphi(p, q)$, после этого по предыдущей формуле восстановить во всём пространстве электростатический потенциал $U(x, y, z)$, однородный по Эйлеру. Эквипотенциальные поверхности полученной функции $U(x, y, z)$ дадут форму электродов, с помощью которых создаётся искомое электростатическое поле.

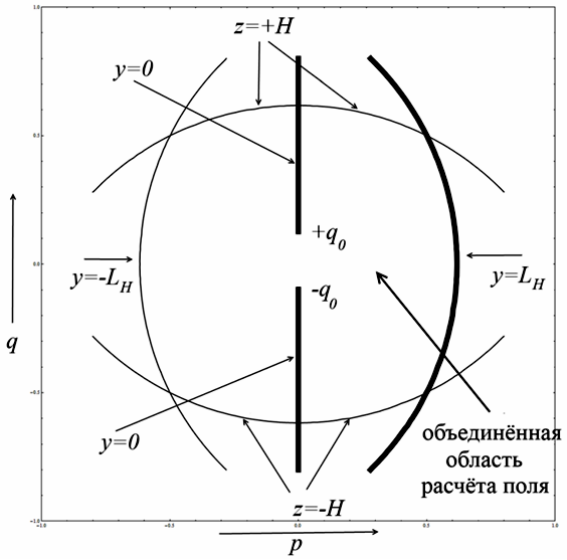
Двумерная область в координатах (p, q) для сечения $x = \text{const}$ спектрометра с идеальным скачком поля для случая $n = 2$ (т. е. для потенциала $U(x, y, z) = U_0 xy / L^2$; см. схему электродов на рис. 2, но без клиновидной входной щели) показана на рис. 1, *а*, где граничными линиями служат:

- граница $y = 0$, соответствующая «ближнему» (входному и выходному) электроду в виде вертикальной плоскости (выделена жирной линией),
- граница $y = L_H$, соответствующая отражающему «дальнему» электроду в виде гиперболически изогнутой цилиндрической поверхности, которая отсекает уход на бесконечность по направлению $y \to +\infty$ (выделена жирной линией),
- вспомогательная линия $y = -L_H$, которая отсекает уход на бесконечность по направлению $y \to -\infty$,

• вспомогательные линии $z = \pm H$, которые отсекают уход на бесконечность по направлениям $z \to +\infty$ и $z \to -\infty$.



а



б

Рис. 1. Вспомогательные двумерные области в координатах p, q, соответствующие сечению x = const однородного по Эйлеру электрического поля: а — при бесконечно узкой переходной области краевого поля энергоанализатора (случай планарного поля и идеальной сетки в качестве вход входного/выходного электрода), б — при наличии бессеточной щели для входного/выходного электрода энергоанализатора.

Для правой подобласти решением поставленной краевой задачи будет функция $\varphi_A(p, q)$, которой в координатах (x, y, z) соответствует потенциал $U(x, y, z) = U_0 xy / L^2$. Для левой подобласти решением краевой задачи будет функция $\varphi_B(p, q) = 0$, которой в координатах (x, y, z) соответствует потенциал $U(x, y, z) = 0$. Это решение совпадает с конфигурацией идеального сеточного электрода с бесконечно узким краевым полем.

Добавим к рис. 1, *а* «дырку» между подобластями, что приведёт к новой краевой задаче с теми же самыми краевыми условиями, но с границами, показанными на рис. 1, *б*. Решение (численное) этой краевой задачи даст новую функцию $\varphi_C(p, q)$, с помощью которой по формуле с предыдущего слайда конструируется трёхмерный электростатический потенциал $U(x, y, z)$, однородный по Эйлеру с показателем однородности $n = 2$ и обеспечивающий щель между электродами, пригодную для ввода и вывода заряженных частиц. Электроды для получившегося электрического поля показаны на рис. 2.

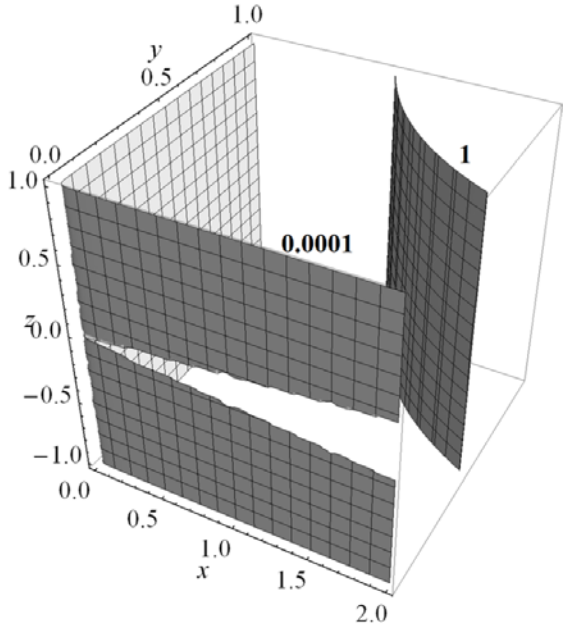


Рис. 2. Трёхмерные электроды, соответствующие почти планарному электростатическому полю, однородному по Эйлеру с n = 2, при которых у электростатического спектрографа формируется бессеточная щель для выхода частиц в бесполевое дрейфовое пространство.

Заключение

Для синтезированных по рассматриваемой методике трёхмерных электростатических полей выходной электрод имеет щель специального профиля, обеспечивающую беспрепятственный ввод и вывод заряженных частиц. Возмущения поля, вызванные выходным электродом со щелью, изменяют оптимальные угол влёта и угол наклона детектирующей плоскости, но при разумных размерах щели эти отклонения будут малы. При этом самым существенным моментом является то, что возмущённое трёхмерное поле по-прежнему является строго однородным по Эйлеру. Поэтому рас-

считанная численно электродная конфигурация со щелью может быть использована в качестве эффективного электронного спектрографа ничуть не хуже, чем её идеальный прототип с бесконечно узкой областью краевого поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Голиков Ю. К., Краснова Н. К.* // ЖТФ. 2011. Т. 81. № 2. С. 9.

2. *Краснова Н. К.* // ЖТФ. 2011. Т. 81. № 6. С. 97.

3. *Голиков Ю. К., Краснова Н. К.* Теория синтеза электростатических энергоаннализаторов. — Санкт-Петербург: Изд-во Политехнического университета, 2010.

4. *Краснова Н. К.* Теория и синтез диспергирующих и фокусирующих электронно-оптических сред. Диссертация д-ра физ.-мат. наук. Санкт- Петербург, Санкт-Петербургский политехнический университет, 2014.

5. *Аверин И. А.* Осесимметричные электростатические электронные спектрографы, использующие однородные по Эйлеру потенциалы с нецелочисленными порядками однородности / Тезисы VI конференции «Масс-спектрометрия и её прикладные проблемы». 12—17 октября 2015 г. Москва.

Fringe fields of gridless electronic spectrographs with Euler's homogeneous electrostatic fields

I. A. Averin[1,2] *and A. S. Berdnikov*[1]

[1] Institute of Analytical Instrumentation of the RAS
26 Rizskiy pr., St. Petersburg, 190103, Russia

[2] Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Polytechnical str., St. Petersburg, 195251, Russia
E-mail: agreer@bk.ru

Received December 24, 2015

Subject of research is the fringe field region of electronic spectrographs with Euler's homogeneous electric fields. Most of the previously discussed optical systems use the model of perfect jump of electric field for the boundary region, which leads to additional fringe fields that depletes the ideal spectrographic optical properties of the original scheme. This paper shows how to organize a three-dimensional electrostatic field which is strictly homogeneous in Euler terms that will retain perfect spectrographic properties and provide gridless input and output of particles.

PACS: 41.20.Cv

Keywords: Euler's homogeneity, spectrographs, fringe fields.

REFERENCES

1. Yu. K. Golikov and N. K. Krasnova, Tech. Phys. **56,** 164 (2011).

2. N. K. Krasnova, Tech. Phys, **56,** 843 (2011).

3. Yu. K. Golikov and N. K. Krasnova, *The theory of Electrostatic Energy Analyzers Synthesis* (St.Petersburg: St.Petersburg Polytechnic University Publishing, 2010) [in Russian].

4. N. K. Krasnova, Dr. Sci. Thesis (St. Petersburg Polytechnic University, 2014) [in Russian].

5. I. A. Averin, *Axially symmetric electrostatic electronic spectrographs using Euler's homogeneous potentials with non-integral order of homogeneity*, in *Abstracts of the VI Conference «Mass Spectrometry and Its Application Problems»* (Moscow, Russia. 2015) [in Russian].