

Ионизационно-рекомбинационный процесс как средство индикации степени сфокусированности пучка заряженных частиц или ионизирующего излучения

С.В. Блажевич*, А.В. Носков

Белгородский государственный университет, Белгород, 308015 Россия

Белгород, 308012 Россия

В работе предлагается метод управления фокусировкой пучка ионизирующего излучения, например пучка заряженных частиц. Для индикации степени сфокусированности пучка в заданной пространственной области используется ионизационно-рекомбинационный процесс в веществе, помещенном в эту область. При фиксированном значении полного тока пучка (потока ионизирующего излучения) максимальная фокусировка определяется по минимальному значению ионизационного тока, снимаемого с рабочего тела широкоапертурной ионизационной камеры.

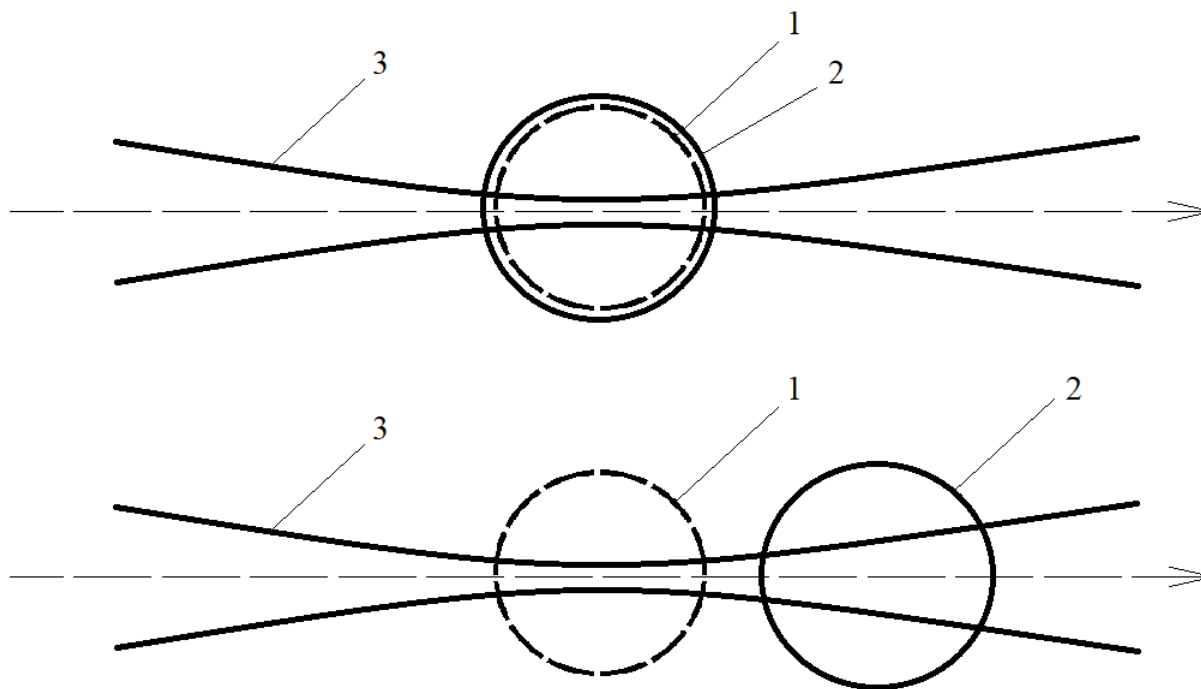


Рис. 1. Варианты расположения зоны контроля относительно рабочей зоны. 1 - зона индикации параметров пучка (зона контроля), 2 - рабочая зона, 3 - пучок ускоренных заряженных частиц или ионизирующего электромагнитного излучения.

В среднем каждая частица пучка производит в объеме ионизационной камеры некоторое количество носителей заряда, которое определяется геометрией и свойствами рабочего вещества. Плотность поперечного распределения пучка в зоне контроля $J(x, y)$ управляемо изменяется исполнительным устройством фокусировки (например, квадрупольной магнитной линзой).

Количество носителей электрического заряда, генерируемых в объеме камеры в результате ионизации, пропорционально интенсивности пучка, поэтому соответствующий ионизационный ток в камере (в отсутствие потерь носителей) может быть записан как

$$I_{IC} = q_e \cdot \eta \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} J(x, y) dx dy, \quad (1)$$

где η - коэффициент инжекции носителей заряда, q_e - модуль заряда электрона.

Полагаем, что значение интенсивности (тока) пучка $I = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} J(x, y) dx dy$ остается фиксированным при любом изменении распределения плотности пучка.

Если бы процесс рекомбинации носителей заряда отсутствовал, то величина электрического тока, протекающего через ионизационную камеру, также была бы фиксированной и не зависела от распределения интенсивности пучка, падающего на ионизационную камеру.

В результате рекомбинации части носителей заряда в рабочем веществе камеры ток ионизации уменьшается. Так как вероятность рекомбинации (при однократной ионизации) пропорциональна квадрату плотности распределения носителей ($n = n^- = n^+$) в объеме рабочего тела камеры [6], можно записать уравнение для плотности ионизационного тока камеры в установившемся режиме:

$$J_{IC} = q_e \cdot \eta \cdot J(x, y) - \kappa \cdot J_{IC}^2, \quad (2)$$

где κ - коэффициент рекомбинации. Решая это квадратное уравнение относительно J_{IC} , получаем выражение для плотности тока ионизации

$$J_{IC}(x, y) = \frac{1}{2 \cdot \kappa} \cdot \left(\sqrt{4 \cdot \kappa \cdot \eta \cdot q_e \cdot J(x, y) + 1} - 1 \right). \quad (3)$$

Интегрируя (3) по координатам в плоскости регистрации (поперечной пучку), получаем выражение для тока ионизации

$$I_{IC}(\kappa, \eta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{2 \cdot k} \cdot \left(\sqrt{4 \cdot \kappa \cdot \eta \cdot q_e \cdot J(x, y) + 1} - 1 \right) dx dy. \quad (4)$$

В качестве примера рассмотрим распределение плотности пучка в виде симметричного двумерного распределения Гаусса, центр которого находится на оси пучка:

$$J(x, y, \sigma) = \frac{I}{\pi \sigma^2} \cdot \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\sigma^2}\right), \quad (5)$$

где I - интенсивность ионизирующего пучка (ток пучка заряженных частиц), σ - параметр поперечного распределения пучка.

Полная интенсивность пучка

$$I(\sigma) = \frac{I}{\pi \sigma^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\sigma^2}\right) dx dy = I \quad (6)$$

имеет фиксированное значение в процессе фокусировки (не зависит от σ). Для описания процесса фокусировки будем использовать зависимость $\sigma = \sigma(U)$, где U - параметр управления исполнительными механизмами фокусировки. Мы рассматриваем однопараметрическое распределение плотности потока излучения, поэтому будем использовать один параметр U управления фокусом. Смоделируем зависимость параметра σ распределения плотности пучка от параметра U функцией, имеющей минимум при определенном значении параметра $U = U_{min}$:

$$\sigma(U) = (U - U_{min})^2 + \sigma_{min}. \quad (7)$$

С помощью параметра σ_{min} мы установим значение параметра, соответствующее максимальной степени фокусировки луча. U_{min} - значение управляющего параметра U , соответствующее максимальной фокусировке луча. Модельная зависимость $\sigma(U)$ представлена на Рис.2.

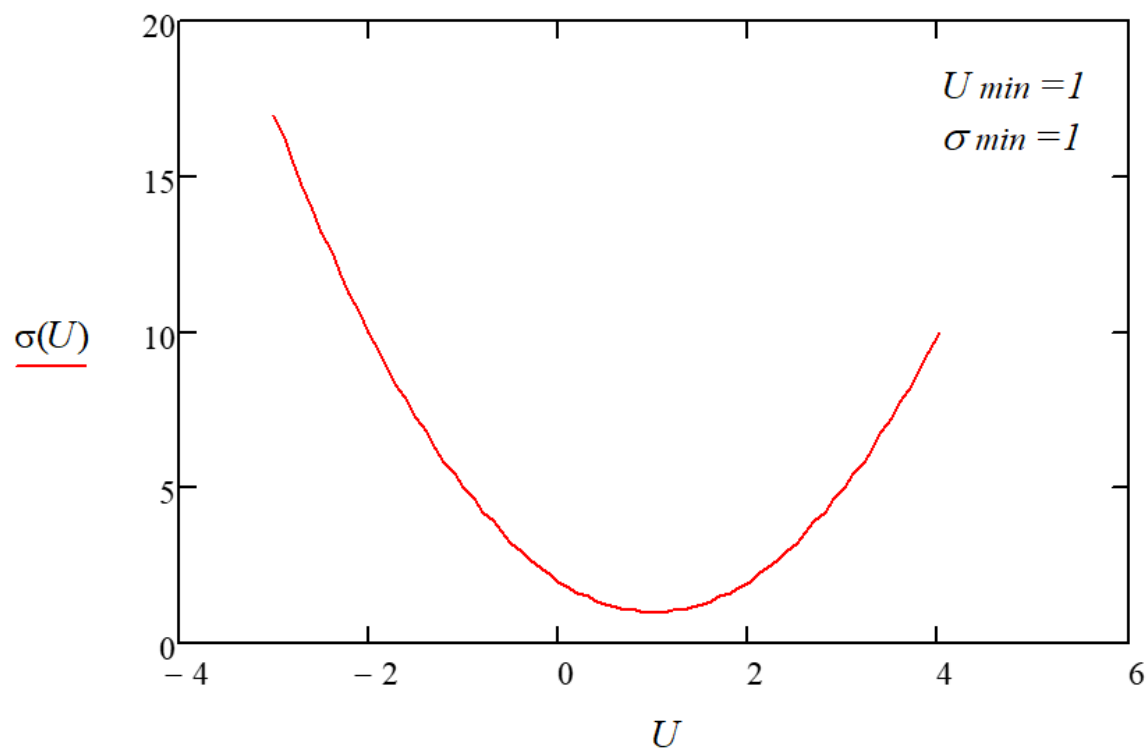


Рис. 2. Модельная зависимость (3) параметра σ распределения плотности пучка от параметра U управления фокусом.

Подставляя (5) в (4), получим выражение для электрического тока через камеру:

$$I_{IC}(\kappa, \sigma, q_e, \eta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{2 \cdot k} \cdot \left(\sqrt{4 \cdot \kappa \cdot \eta \cdot q_e \cdot J(x, y, \sigma)} + 1 - 1 \right) dx dy . \quad (8)$$

Процесс фокусировки моделируется зависимостью ионизационного тока от управляющего параметра U , опосредованную в (8) параметром $\sigma(U)$. Эта зависимость представлена на Рис. 3 для разных значений параметра σ_{min} .

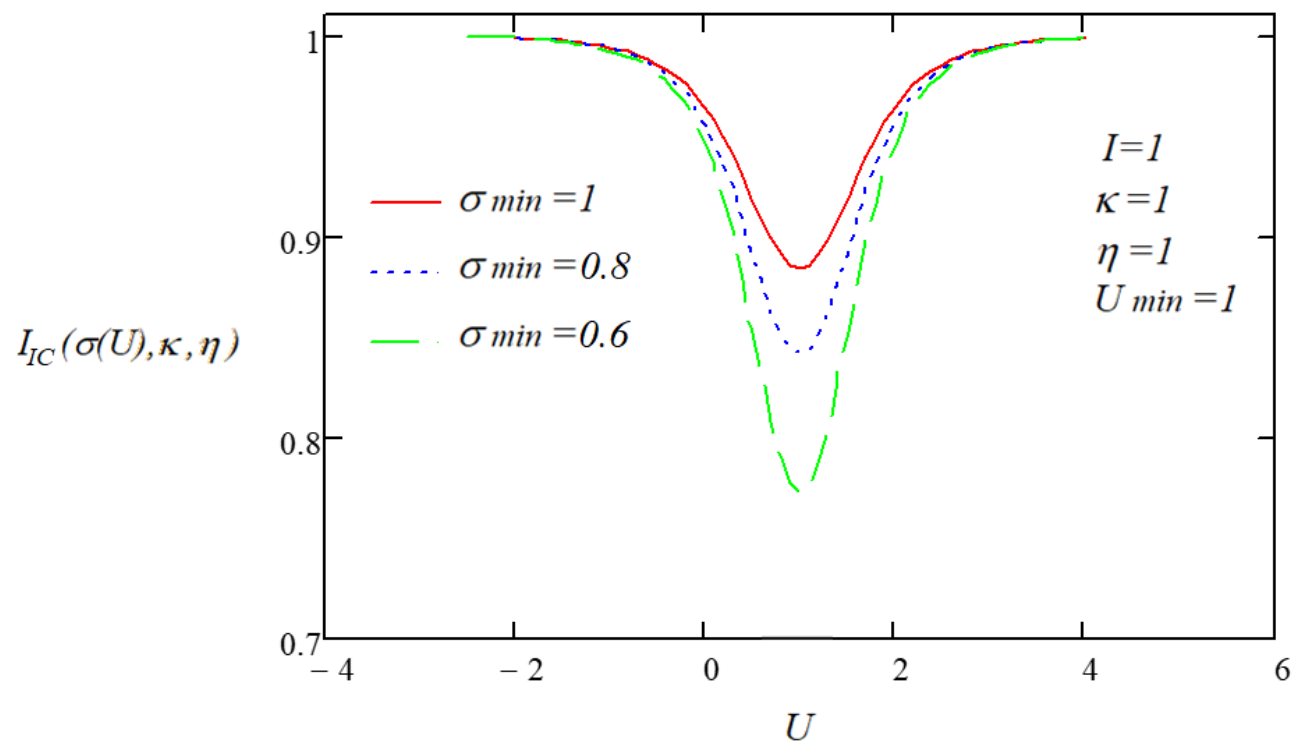


Рис. 3. Зависимость (10) электрического тока через ионизационную камеру от параметра управления фокусировкой U .

Минимумы на кривых ионизационного тока в камере, показанные на Рис.3, соответствуют максимальной плотности носителей заряда, генерируемых пучком в зоне контроля, и, следовательно, максимальной фокусировке ионизирующего пучка. Глубина минимума зависит от параметра σ_{min} , который моделирует минимальное значение параметра распределения σ для конкретной системы фокусировки.

Таким образом на простейшем примере однопараметрического распределение плотности пучка ионизирующего излучения мы продемонстрировали суть предлагаемого нами способа индикации степени его фокусировки. В случае двух и более параметров управления фокусировкой минимум ионизационного тока ищется путем последовательного сканирования всех параметров управления.

Экспериментальная проверка метода.

Нами был проведен эксперимент по фокусировке электронного пучка с энергией 150 МэВ на ускорителе ЛУЭ-300 Харьковского физико-технического института. Электронный пучок фокусировался с помощью короткофокусной квадрупольной магнитной линзы. Параллельный пучок с поперечными размерами порядка 5 мм фокусировался на выходе ускорителя сразу за выходной фольгой ускорителя.

Степень фокусировки контролировалась плоской ионизационной воздушной камерой, в качестве одного из электродов которой использовалась выходная фольга ускорителя, а второй представлял собой тонкую изолированную металлическую пластину, на которую подавалось электрическое напряжение порядка 100 В. Слой воздуха в камере имел толщину 1 мм. При максимальной фокусировке пучка (при минимальном токе ионизации), которую могла обеспечить квадрупольная линза, пучок электронов на выходе из ускорителя имел поперечные размеры порядка $50 \mu m$. При среднем токе пучка, составляющем приблизительно $5 \mu A$, длительности рабочего импульса ускорителя около $2 \mu s$ и скважности $5 \cdot 10^3$, плотность импульсного тока пучка достигала величину порядка $10 A \cdot mm^{-2}$, что в 10^4 раз превышало плотность импульсного тока пучка до фокусировки. В ходе эксперимента было обнаружено, что фокусировка пучка релятивистских электронов с помощью ионизационной камеры может быть успешно осуществлена при таких высоких плотностях тока пучка, при которых другие методы уже не работают (например, экран, покрытый люминофором). Представленный способ управления фокусировкой пучков ионизирующих частиц или излучения зарегистрирован как изобретение [8].

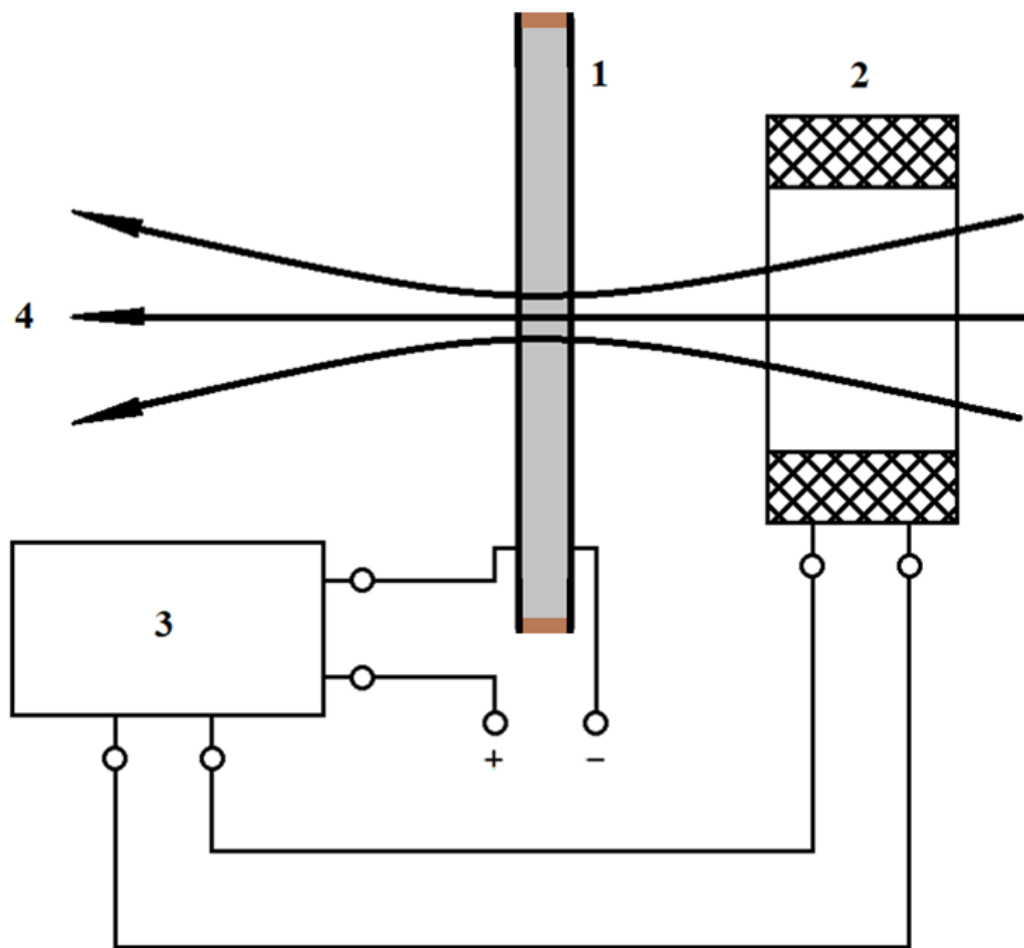


Рис. 4. Схема управления фокусировкой пучка ионизирующего излучения. 1 - ионизационная камера, 2 – исполнительное устройство фокусировки, 3 - система управления фокусировкой, 4 - пучок ионизирующего излучения.

Литература

- [1] Accelerators AND Beams TOOLS of Discovery and innovation// Published by the Division of Physics of Beams of the American Physical Society, 2013 https://www.aps.org/units/dpb/upload/accel_beams_2013.pdf
- [2] Maurizio Vretenar Accelerators for Medicine// Academic Training Lecture Regular Programme. 12 Jun 2018. (CERN) <https://indico.cern.ch/event/722936/>
- [3] Boiko V I, Valyaev A N, Pogrebnyak A D “Metal modification by high-power pulsed particle beams” Phys. Usp. **42**(11) 1139–1166 (1999); DOI: 10.1070/PU1999v042n11ABEH000471
- [4] R.A.Salimov “High-energy electron accelerators for industrial applications” Phys. Usp. 43 189 (2000) DOI: [10.1070/1070pu2000v043n02ABEH000671](https://doi.org/10.1070/1070pu2000v043n02ABEH000671)
- [5] Ionization Chambers and Counters. D. H. Wilkinson. New York: Cambridge Univ. Press, 1950. 266 pp.
- [6] Bychkow, Y. I., Korolev, Y. D., and Khuzeev, A. P_ Ionization and recombination coefficients in a discharge excited by fast electrons // _Sov Phys Tech Phys (1974) Volume 19, Issue 1, Jul, Pages 140-141
- [7] A.V. Eletsii, B.M. Smirnov “Dissociative recombination of electrons and molecular ions” Sov. Phys. Usp. 25 13–30 (1982) DOI: [10.1070/PU1982v025n01ABEH004494](https://doi.org/10.1070/PU1982v025n01ABEH004494)
- [8] S.V. Blazhevich, V.A. Stratiyenko Sposob kontrolya fokusirovki puchka ioniziruyushchego izlucheniya // Patent SSSR № 1667519, 1991 g. po zayavke № 4766185, 1989 g. (In Russian)
- ([8] С. В. Блажевич, В. А. Стратиенко Способ контроля фокусировки пучка ионизирующего излучения // Патент СССР № 1667519 1991 г. по заявке № 4766185, 1989 г.)