

УДК 539.1:539.1.074.22:53.082.77:621.3.038.615

ИОНИЗАЦИОННО-РЕКОМБИНАЦИОННЫЙ ПРОЦЕСС КАК СРЕДСТВО ИНДИКАЦИИ СТЕПЕНИ ФОКУСИРОВКИ ПУЧКА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ИЛИ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2022 г. С. В. Блажевич^{а, *}, А. В. Носков^{а, б}

^аБелгородский государственный университет,
Белгород, 308015 Россия

^бБелгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
Белгород, 308012 Россия

*e-mail: blazh@bsu.edu.ru

Поступила в редакцию 22.07.2021 г.

После доработки 24.09.2021 г.

Принята к публикации 24.09.2021 г.

Предлагается метод управления фокусировкой пучка ионизирующего излучения, например, пучка заряженных частиц. Один из наиболее широко используемых методов регистрации излучения — ионизационный. Сопутствующий ионизации эффект рекомбинации носителей заряда в рабочем веществе детектора обычно рассматривают как нежелательный, снижающий точность измерения параметров излучения. Однако этот эффект может быть полезным и представлять основу метода определения максимальной степени фокусировки пучка частиц или ионизирующего излучения. При фиксированной величине полного тока пучка (потока ионизирующего излучения) максимальная фокусировка определяется по минимальной величине ионизационного тока в широкоапертурной ионизационной камере, используемой в качестве детектора. Сигнал ионизационной камеры изменяется в процессе фокусировки даже при фиксированном значении тока пучка за счет зависимости интенсивности рекомбинации носителей заряда в рабочем веществе камеры от их объемной плотности. Объемная плотность носителей, в свою очередь, пропорциональна плотности распределения частиц пучка ионизирующего излучения в объеме рабочего тела ионизационной камеры.

Ключевые слова: пучки заряженных частиц, индикация степени фокусировки, ионизационно-рекомбинационный процесс.

DOI: 10.31857/S1028096022060061

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивные пучки заряженных частиц и рентгеновское излучение широко используются в научных исследованиях [1–4], медицине [5–8] и производственных технологиях [9–13]. Поддержание заданного распределения плотности пучка в рабочей зоне является важной задачей, решение которой требует постоянного контроля параметров пучка. Для этого необходимо регулярно измерять их текущие значения, чтобы затем использовать при формировании управляющих сигналов для исполнительных механизмов фокусировки пучка. Оптимизация схем отображения и контроль параметров пучка в современных пучковых технологиях — актуальная задача. В настоящей работе рассмотрен простой в реализации метод управления фокусировкой пучка ионизирующего излучения, требующий минимального количества измеряемых параметров.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим задачу фокусировки пучка ионизирующего излучения или заряженных частиц в заданной пространственной области (рабочая зона). Выделим также зону индикации параметров пучка (контрольная зона). Поставим задачу обеспечения максимальной степени фокусировки в контрольной зоне. Таким образом, будет удовлетворено условие единственности решения задачи фокусировки. Если оптимальная (для конкретной технологии, в которой используется пучок) степень фокусировки, требуемая в рабочей зоне, не является максимальной, то достаточно сместить вдоль пучка зону контроля фокусировки относительно рабочей зоны (рис. 1б) и снова контролировать максимальную степень фокусировки.

Обеспечение максимальной степени фокусировки ионизирующего излучения (пучка заряженных частиц или фотонов) эквивалентно получению максимальной плотности потока излучения

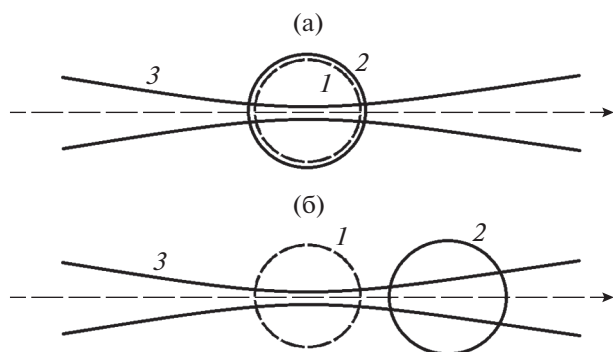


Рис. 1. Варианты расположения зоны контроля относительно рабочей зоны: а – зоны совмещены; б – рабочая зона смещена относительно зоны контроля в область расфокусированного пучка: 1 – зона индикации параметров пучка (зона контроля), 2 – рабочая зона, 3 – пучок ускоренных заряженных частиц или ионизирующего электромагнитного излучения.

в зоне контроля. Традиционные способы регистрации распределения плотности потока излучения (тока пучка заряженных частиц) предполагают его сканирование датчиком с малыми поперечными размерами или использование матриц детекторов или экранов, преобразующих его в распределение вторичного излучения. Недостатком традиционных методов является их сложность и чувствительность к поперечным смещениям пучка в процессе его фокусировки.

В настоящей работе предлагается метод индикации степени фокусировки пучка, практически нечувствительный к поперечным смещениям пучка при фокусировке. Для индикации используется эффект ионизации, возникающий в рабочем веществе, помещенном на пути пучка в зоне контроля.

Допустим, что рабочим веществом является газ в ионизационной камере. Пусть рабочий объем плоской ионизационной камеры с поперечными размерами, превышающими поперечные размеры пучка, и заданным продольным (по оси пучка) размером является зоной индикации пучка. Камера располагается перпендикулярно оси пучка, интенсивность проходящего через камеру пучка (ток пучка) заряженных частиц (или поток ионизирующего излучения) фиксируется. Электрический ток в ионизационной камере – единственный параметр, регистрируемый во время фокусирующего воздействия на пучок. Ионизационный ток определяется параметрами рабочего тела ионизационной камеры, размером ее рабочего объема, напряжением, подаваемым на электроды камеры, и интенсивностью пучка [14–16].

Основная идея предлагаемого метода состоит в использовании зависимости тока ионизации в камере от плотности пучка заряженных частиц (или ионизирующего электромагнитного излуче-

ния). При фиксированной интенсивности пучка эта зависимость обусловлена рекомбинацией неравновесных носителей заряда, возникающих в рабочем теле ионизационной камеры при взаимодействии с пучком. Вероятность рекомбинации носителей заряда пропорциональна произведению объемных плотностей положительных и отрицательных носителей электрического заряда, генерируемых пучком.

В результате рекомбинации часть носителей выпадает из процесса переноса заряда до того, как достигнет границы рабочего объема ионизационной камеры. Это приводит к изменению распределения плотности потока ионизирующих частиц и полного тока ионизации. Минимальный ионизационный ток будет наблюдаться при максимальной степени фокусирования пучка ионизирующих частиц. Таким образом, минимизируя ионизационный ток в процессе фокусирующего воздействия на пучок ионизирующих частиц, можно достичь максимальной степени его фокусировки в контролируемой зоне.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИНДИКАЦИИ СТЕПЕНИ ФОКУСИРОВКИ

Для иллюстрации возможности использования ионизационно-рекомбинационного процесса для индикации степени фокусировки пучка быстрых заряженных частиц (или пучка ионизирующего излучения) рассмотрим зависимость тока в ионизационной камере от пространственного распределения пучка.

В среднем каждая частица пучка генерирует в объеме ионизационной камеры некоторое количество носителей заряда, которое определяется геометрией и свойствами рабочего вещества. Плотность поперечного распределения пучка в зоне контроля $J(x, y)$ варьируется с помощью дополнительного устройства фокусировки (например, квадрупольной магнитной линзы). 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

$$I_{0IC} = q_e \eta \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} J(x, y) dx dy, \quad (1)$$

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

Полагаем, что интенсивность (тока) пучка $I = q_e \eta \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} J(x, y) dx dy$ остается фиксированной при любом изменении распределения плотности пучка. Если бы процесс рекомбинации носителей заряда отсутствовал, то величина элект-

трического 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 [15], можно записать уравнение для плотности ионизационного тока камеры в установившемся режиме:

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

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

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

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

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

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

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

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. Рассмотрим 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_{\min} :

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

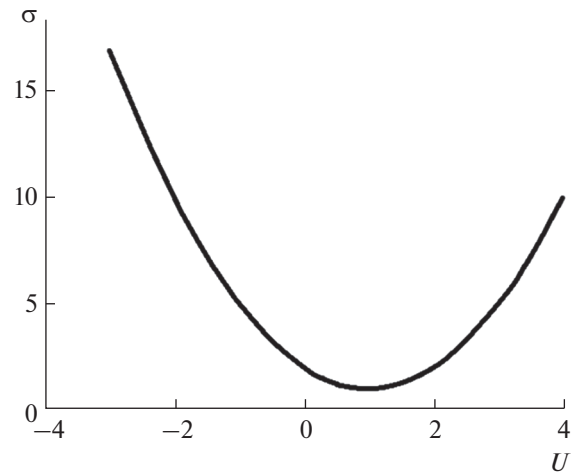


Рис. 2. Модельная зависимость (7) параметра σ распределения плотности пучка от параметра U управления фокусом: $U_{\min} = 1, \sigma_{\min} = 1$.

С помощью параметра σ_{\min} 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.

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

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

Процесс фокусировки моделируется зависимостью ионизационного тока от управляющего параметра U , выраженного в (8) посредством параметра $\sigma(U)$. Эта зависимость представлена на рис. 3 для разных значений параметра σ_{\min} . Минимумы на кривых ионизационного тока в камере 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 распределения плотности пучка ионизирующего излучения продемонстрирована суть предлагаемого способа индикации степени его фокусировки. В случае двух и более параметров управления фокусировкой минимум ионизационного тока ищется путем последовательного сканирования всех параметров управления. Процесс может быть автоматизирован с ис-

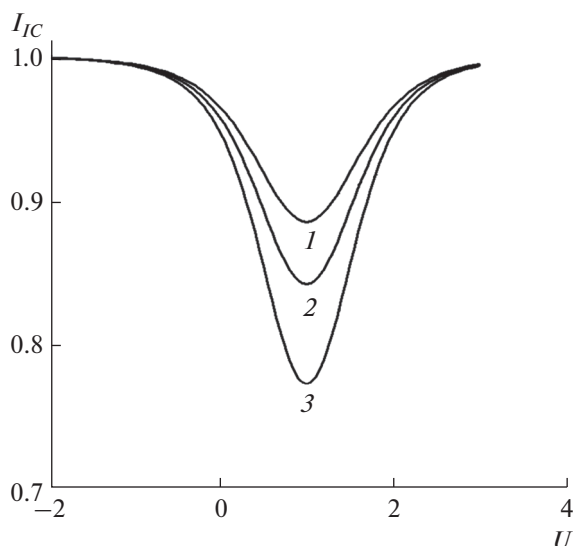


Рис. 3. Зависимость (8) электрического тока через ионизационную камеру от параметра управления фокусировкой U . Результаты расчетов проведены при фиксированных значениях параметров ($I = 1$, $\kappa = 1$, $\eta = 1$, $U_{\min} = 1$) для разных значений σ : 1 – 0.6; 2 – 0.8; 3 – 1.

пользованием одного из известных методов минимизации двумерной функции [17, 18].

ЭКСПЕРИМЕНТ

Предлагаемый метод испытан на эксперименте 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 контролировали с помощью плоской ионизационной воздушной камеры, в качестве одного из электродов которой использовали выходную фольгу ускорителя, а второй представлял собой тонкую изолированную металлическую пластину, на которую подавали электрическое напряжение около 100 В. Толщина слоя воздуха в камере составляла 1 мм. При максимальной фокусировке пучка (при минимальном токе ионизации), которую могла обеспечить квадрупольная линза, поперечные размеры пучка электронов на выходе из ускорителя были порядка 50 мкм. При среднем токе пучка приблизительно 5 мкА, длительности рабочего импульса ускорителя около 2 мкс и скважности 5×10^3 плотность импульсного тока пучка достигала величины порядка $10 \text{ А} \cdot \text{мм}^{-2}$, что в 10^4 раз превышало плотность 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 (малых размерах сфокусированного пучка), когда другие методы уже не работают (например, с использованием экрана, покрытого люминофором). Представленный способ управления фокусировкой пучков ионизирующих частиц или излучения зарегистрирован как изобретение [19].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен метод индикации максимальной фокусировки пучка заряженных частиц или ионизирующего электромагнитного излучения с использованием ионизационно-рекомбинационного эффекта взаимодействия излучения с веществом. Максимальной фокусировке пучка при фиксированном значении импульсного тока (интенсивности ионизирующего излучения) соответствует минимальное значение тока в широкоапертурной ионизационной камере, установленной на пучке в зоне контроля. Метод практически нечувствителен к боковым смещениям пучка в рабочей зоне при его фокусировке и может эффективно применяться в различных технологиях, связанных с использованием интенсивных пучков ионизирующего излучения. Следует отметить крайнюю простоту представленного метода. Метод апробирован на пучке линейного ускорителя электронов ЛУЭ-300 МэВ, где он позволил контролировать максимальную фокусировку пучка при работе с короткофокусной квадрупольной магнитной линзой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. Vladimirov I.Y., Ishkhanov B.S., Ovchinnikova L.Y. et al. // Moscow Univ. Phys. Bull. 2016. V. 71. P. 245. <https://doi.org/10.3103/S0027134916030139>
3. Павленко В.И., Ястребинский Р.Н., Едаменко О.Д., Тарасов Д.Г. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. 2010. № 1. С. 129.
4. Ворогушин М.Ф., Глухих В.А., Манукян Г.Ш., Карпов Д.А., Свинын М.П., Энгелько В.И., Яценко Б.П. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. 2002. № 3. С. 101.
5. Vretenar M. Accelerators for Medicine. Academic Training Lecture Regular Programme. 12 Jun 2018. (CERN) <https://indico.cern.ch/event/722936/>
6. Grizlov A.V., Iliin V.N., Lamonov S.V. et al. // Proceed. XI Int. Conf. on Charged Particle Accelerators Applied

- in Medicine and Industry, St.-Petersburg, Russia, 2005, P. 132.
7. *Alimov A.S., Alimov E.A., Kamanin A.N. et al.* Beam Parameters Measurement of Technological 10 MeV Linac. https://www.researchgate.net/publication/238769202_Beam_parameters_measurement_of_technological_10_MeV_linac [accessed Oct 11 2021].
 8. *Черняев А.П., Кольванова М.А., Борщеговская П.Ю.* // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физика. Астрономия. 2015. № 6. С. 28.
 9. *Voiko V.I., Valyae A.N., Pogrebnyak A.D.* // Phys. Usp. 1999. V. 42. № 11. P. 1139. <https://doi.org/10.1070/PU1999v042n11ABEH000471>
 10. *Salimov R.A.* // Phys. Usp. 2000. V. 43. P. 189. <https://doi.org/10.1070/1070pu2000v043n02ABEH00671>
 11. *Гурин А.Г., Корнилов Е.А., Ложкин Р.С.* // Электротехника і електромеханіка. 2013. № 4. С. 47.
 12. *Cleland M.R.* Industrial Applications of Electron Accelerators. CERN Accelerator School. Zeegse, Netherlands, 2005. P. 383.
 13. *Machi S.* Growing Industrial Applications of Electron Accelerator in Japan. Topical Meeting AccApp09, IAEA Satellite Mtg. Application of Electron Accelerator, 2009.
 14. *Wilkinson D.H.* Ionization Chambers and Counters. N.Y.: Cambridge Univ. Press, 1950. 266 p.
 15. *Bychkov Y.I., Korolev Y.D., Khuzeev A.P.* // Sov. Phys. Tech. Phys. 1974. V. 19. Iss. 1. P. 140.
 16. *Eletskii A.V., Smirnov B.M.* // Sov. Phys. Usp. 1982. V. 25. P. 13. <https://doi.org/10.1070/PU1982v025n01ABEH004494>
 17. *Hooke R., Jeeves T.A.* // J. ACM. 1961. V. 8. P. 212.
 18. *Nelder J.A., Mead R.* // Comput. J. 1965. V. 7. P. 308.
 19. Патент № 1 667 519 (СССР) Способ контроля фокусировки пучка ионизирующего излучения / *Блазhevich С.В., Стратиенко В.А.* // 1991. Заявка № 4766 185, 1989.

Ionization-Recombination Process as a Means of Indicating the Degree of Focusing of a Beam of Charged Particles or Ionizing Radiation

S. V. Blazhevich^{1, *}, A. V. Noskov^{1, 2}

¹Belgorod State University, Belgorod, 308015 Russia

²Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, 308012 Russia

*e-mail: blazh@bsu.edu.ru

A method for controlling the focusing of an ionizing radiation beam, for example, a beam of charged particles is proposed. Ionization is one of the most widely used radiation detection methods. The effect of recombination of charge carriers in the working substance of the detector, accompanying ionization, is usually considered as undesirable, which reduces the accuracy of measuring the radiation parameters. However, this effect can be useful and represent the basis of the method for determining the maximum degree of focusing of a particle beam or ionizing radiation. At a fixed value of the total beam current (ionizing radiation flux), the maximum focusing is determined from the minimum value of the ionization current in a wide-aperture ionization chamber used as a detector. The signal of the ionization chamber changes during focusing even at a fixed value of the beam current due to the dependence of the intensity of recombination of charge carriers in the working substance of the chamber on their bulk density. The bulk density of carriers, in turn, is proportional to the distribution density of the particles of the ionizing radiation beam in the volume of the working medium of the ionization chamber.

Keywords: charged particle beams, focusing degree indication, ionization-recombination process.