Устройство для диагностики электронного пучка

М. Андреев¹, С. Ковальский¹, С. Корнилов², Н. Ремпе²

¹Институт сильноточной электроники СО РАН

634055 Россия, Томск

e-mail: andreevmv_86@mail.ru, kovalskiy_ss@bptvac.ru

²Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

634050 Россия, Томск

e-mail: kornilovsky@gmail.com, remnik77@gmail.com

DOI 10.31554/978-5-7925-0524-7-2018-39-44

В работе представлено описание устройства, предназначенного для проведения диагностики электронного пучка, и полученные с использованием этого оборудования результаты. Устройство представляет собой двойной вращающийся зонд, работающий совместно с системой автоматического сбора и обработки сигнала с зонда. Устройство позволяет измерять и рассчитывать такие характеристики электронного пучка как его радиус, плотность тока, плотность мощности, угол сходимости и яркость.

Введение

Существуют различные методы и устройства для измерения параметров электронного пучка. Большинство из них содержат датчики, непосредственно контактирующие с электронным пучком. В качестве датчика может выступать тонкая проволока [1,2], периодически пересекающая пучок, или коллектор, на который попадает часть пучка, выделенная узкой щелью [3,4], калиброванным отверстием [5], либо прямым краем тугоплавкой пластины. Датчики позволяют получить распределение тока в выделенной части пучка. Это распределение содержит информацию о геометрии электронного пучка, плотности тока и плотности мощности в нем, яркости и угле сходимости. Имея такой набор данных о пучке, несложно установить взаимосвязь параметров пучка с характеристиками электронной пушки.

Перечисленные типы датчиков имеют большое сходство в способе получения первичной информации о пучке. Однако, существует и принципиальное различие между ними. Все датчики, кроме вращающегося зонда, используют для получения зондограммы отклонение либо развертку пучка по требуемой траектории. Траектория движения электронного пучка задается электромагнитными отклоняющими системами. При исследовании мощных

сфокусированных электронных пучков время контакта пучка с элементами системы диагностики пучка должно быть возможно более коротким. Это необходимо для исключения повреждения диагностического устройства. Следовательно, отклоняющие катушки пушки должны быть высокоскоростными. Кроме того, дополнительные трудности могут возникнуть при необходимости измерить параметры пучков на малых расстояниях от отклоняющих катушек. В таких случаях могут оказаться недопустимо большими углы отклонения из-за возможных искажений пучка, вносимых отклоняющими катушками. Создание таких катушек задача непростая.

В некоторых исследовательских и технологических задачах возникает необходимость контролировать параметры пучков, отклонение и развертку которых выполнить невозможно. Это, например, электронные пучки с энергией в сотни килоэлектрон-вольт, выведенные в атмосферу. В настоящей работе представлен один из возможных вариантов реализации контактного метода диагностики, в котором нет необходимости отклонять электронный пучок для измерения его параметров. В качестве датчика применяется проволочный двойной вращающийся зонд. Разработанное оборудование позволяет в автоматическом

режиме снимать распределение тока на зонд и транслировать его в основные характеристики электронного пучка.

Двойной вращающийся зонд. Конструкция и принцип действия

Разработанное зондовое оборудование представляет собой двойной вращающийся зонд и систему автоматического сбора и обработки сигнала с зонда (программно-аппаратный комплекс).

Основным элементом двойного вращающегося зонда является его измерительная часть. Измерительная часть состоит из двух параллельных вольфрамовых проволок **1** (рис.1), установленных на подвижном токосъемнике **2**. Проволочки могут находиться на одном из двух (10 mm или 30 mm) фиксированных расстояний друг от друга. Токосъемник с проволочками приводится во вращение двигателем **3**. С постоянной скоростью проволочки пересекают электронный пучок перпендикулярно оси и отбирают небольшую часть его тока.

Рис.1. Внешний вид двойного вращающегося зонда: 1–вольфрамовые проволочки; 2–токосъемник; 3–бесколлекторный двигатель; 4–шаговый двигатель; 5–линейный модуль; 6–индуктивные датчики; 7–коллектор.

Сигнал вида $U(t)$, возникающий при пересечении проволочками пучка, и поступает через BNC разъем в программно-аппаратный комплекс.

На рис. 2 показан вид зондограммы. Зонд содержит две проволочки, поэтому при каждом пересечении зондом пучка на зондограмме отображаются два пика.

Рис.2. Зондограмма двойного вращающегося зонда.

Расстояние между пиками зондограммы пропорционально расстоянию между проволочками. Зная это расстояние легко откалибровать горизонтальную ось зондограммы в единицах длины.

Для предварительных оценок легко определить условный радиус электронного пучка r_b из простого соотношения

$$r_b = \frac{1}{2} \cdot \Delta t_{AC} \cdot \frac{l}{\Delta t_{BD}}, \quad (1)$$

где Δt_{AC} – длительность пика на полувысоте зондограммы, l – расстояние между проволочками, Δt_{BD} – длительность между центрами пиков на зондограмме.

Для расчета таких параметров электронного пучка как угол сходимости θ и яркость B в конструкции двойного вращающегося зонда предусмотрено вертикальное перемещение измерительной части. Вертикальное перемещение обеспечивает шаговый двигатель **4** (рис.1). Вращение вала двигателя передается через муфту шариковинтовой пары линейного модуля HIWIN **5** и трансформируется в

линейное перемещение измерительной части зонда по вертикали. Ограничителем вертикального перемещения выступают сигналы с индуктивных датчиков 6. Датчики расположены в верхней и нижней части линейного модуля.

Для устранения влияния вторичных и отраженных электронов и регистрации полного тока электронного пучка предусмотрен изолированный коллектор 7. Коллектор изготовлен из меди и имеет водяное охлаждение. Коллектор позволяет регистрировать ток электронного пучка мощностью до 24 kW.

Система автоматического измерения и обработки сигнала

Программно-аппаратный комплекс управляет вращением и вертикальным перемещением измерительной части зонда и выполняет сбор и обработку сигналов с проволоочек и коллектора.

Программно-аппаратный комплекс выполняет следующие функции:

- a) фильтрует сигнал с зонда;
- b) синхронизирует развертку сигнала с вращением зонда;
- c) выбирает чувствительности и скорость развертки сигнала;
- d) обнаруживает максимумы и минимумы сигнала;
- e) считывает информацию о токе пучка с коллектора электронов, ускоряющем напряжении и токе фокусировки с аппаратуры электропитания и управления электронно-лучевой пушки;
- f) автоматически определяет эффективный радиус электронного пучка, распределение плотности тока и плотности мощности в пучке, угол сходимости и яркость электронного пучка.

Интерфейс программной части комплекса представлен на рис. 3. Интерфейс содержит две графические области и окна с некоторыми параметрами электронной пушки, параметрами и органами управления зондовым оборудованием.

Рис.3. Интерфейс программы диагностики характеристик электронного пучка: 1–графическая область распределения тока на зонд; 2–графическая область распределения плотности тока в пучке; 3–органы управления вращением и перемещением измерительной части двойного вращающегося зонда; 4–органы управления автоматическими расчетами; 5–область измеренных и рассчитанных значений характеристик электронного пучка.

Графическая область 1, предназначена для отображения зондограммы, полученной с двойного вращающегося зонда. Зондограмма может быть представлена в виде зависимости падения напряжения на измерительном резисторе зонда $U(t)$ или тока, протекающего в цепи измерительного резистора $I(t)$ от времени.

Графическая область 2, предназначена для отображения распределения нормированной на максимум плотности тока по радиусу пучка $J(r)$, распределения тока на зонд $I(x)$ и радиуса электронного пучка, определенного на трех различных уровнях распределения плотности тока. Представить рассчитанные характеристики можно с использованием сигнала как с первой, так и со второй проволоочки.

В область 3 окна программы выведены все основные органы управления вращением и вертикальным перемещением измерительной части двойного вращающегося зонда. В указанной области задаются скорость и направление вращения измерительной части зонда, диапазон ее вертикального перемещения, а также выведены кнопки запуска вращения и

вертикального перемещения измерительной части двойного вращающегося зонда.

В области 4 интерфейса программы представлены органы управления запуском автоматических измерений и расчетов характеристик электронного пучка, таких как эффективный радиус пучка, интегральные плотности тока и мощности в пучке, угол сходимости электронного пучка и яркость.

В область 5 выводится сводная информация о характеристиках электронного пучка, измеренных и рассчитанных в процессе работы зондового оборудования, а также основных параметрах электронной пушки, таких как ускоряющее напряжение, ток электронного пучка и ток фокусировки магнитной линзы, при которых были выполнены измерения.

Расчет характеристик пучка

Для быстрой диагностики формы и размеров пучка, а также определения тока фокусировки, достаточно получить распределение тока на зонд и воспользоваться выражением (1). Однако, распределение тока на зонд и величина радиуса пучка, оцененного по выражению (1) не дает полной картины о качестве электронного пучка.

Для более точного анализа необходимо использовать распределение плотности тока по радиусу пучка, а не распределение тока на зонд. Связано это с тем, что величина тока на зонд обусловлена двумя факторами: площадью поверхности проволочек, на которую попадают электроны, и величиной плотности тока в той области пучка, где находится проволочка. При движении проволочек в пучке оба фактора изменяются одновременно.

Распределение тока на зонд $I(x)$ может быть представлено выражением [6] вида

$$I(x) = \frac{J_0 \pi r_{ef}^2}{2} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{x + \frac{\delta}{2}}{r_{ef}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{x - \frac{\delta}{2}}{r_{ef}} \right) \right], \quad (2)$$

где J_0 – плотность тока на оси электронного пучка, r_{ef} – эффективный радиус пучка, $\operatorname{erf}(x)$ – интеграл вероятности (интеграл ошибки), δ – диаметр проволочки.

Для определения эффективного радиуса электронного пучка воспользуемся уровнем k_x на распределении тока на зонд, на котором определяется радиус пучка.

$$k_x = \frac{I(x)}{I_0}, \quad (3)$$

где $I(x)$ – ток на проволочку зонда в текущей координате x проволочки в пучке, I_0 – ток на зонд в координате $x = 0$.

Учитывая уравнение (2) уровень k_x может быть записан как

$$k_x = \frac{\left[\operatorname{erf} \left(\frac{x + \frac{\delta}{2}}{r_{ef}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{x - \frac{\delta}{2}}{r_{ef}} \right) \right]}{2 \operatorname{erf} \left(\frac{\delta}{2 r_{ef}} \right)}. \quad (4)$$

Решение интегрального уравнения (4) позволяет определить эффективный радиус электронного пучка.

Распределение плотности тока по радиусу пучка $J(r)$ подчиняется закону распределения Гаусса и может быть найдено как

$$J(r) = J_0 \exp \left(-\frac{r^2}{r_{ef}^2} \right). \quad (5)$$

С использованием распределения плотности тока по радиусу пучка $J(r)$ рассчитываются плотность мощности и яркость электронного пучка.

Для расчета плотности мощности в пучке w решается уравнение вида

$$w = J_{ef} \cdot U, \quad (6)$$

где J_{ef} – плотность тока, заключенная в пределах эффективного радиуса электронного пучка, U – ускоряющее электроны напряжение, приложенное между катодом и экстрактором электронной пушки.

Яркость электронного пучка может быть оценена из выражения [7] вида

$$B = \frac{J_{ef}}{\Omega}, \quad (7)$$

где Ω – телесный угол, в котором распространяется пучок.

При малых значениях угла сходимости телесный угол [7] определяется как

$$\Omega = \pi \cdot \theta^2. \quad (8)$$

Угол сходимости электронного пучка может быть определен из уравнения

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{r_{ef1} - r_{ef2}}{b_{12}} \right), \quad (9)$$

где r_{ef1} и r_{ef2} – эффективный радиус электронного пучка, измеренный в двух плоскостях, отстоящих друг от друга на расстоянии b_{12} .

На рис. 4 представлены скриншоты результатов автоматических измерений характеристик электронного пучка, иллюстрирующие результат работы зондового оборудования.

Для запуска автоматических измерений характеристик электронного пучка оператору достаточно установить скорость вращения токосъемника с проволочками 1, диапазон вертикального перемещения 2, толщину проволочек, расстояние между ними и номинал измерительного резистора. С использованием этих значений, по нажатию кнопки 3, зондовое оборудование выполнит автоматические расчеты характеристик электронного пучка.

При работающей аппаратуре электропитания и управления электронно-лучевой пушкой программно-аппаратный

комплекс автоматически, по интерфейсу RS232 и Ethernet, считывает ее показания (величину ускоряющего напряжения 4 и ток фокусирующей катушки 5), а также ток электронного пучка 6 с коллектора электронов.

a

b

Рис.4. Результат диагностики параметров электронного пучка с током 50 mA и энергией 30 keV: 1–установка скорости вращения зонда; 2–установка положения зонда по вертикали; 3–кнопка запуска для автоматических вычислений; 4–значение ускоряющего напряжения; 5–значение тока фокусировки пучка; 6–значение тока электронного пучка с коллектора; 7–зондограмма $U(t)$; 8–распределение тока на зонд $I(x)$; 9–значение эффективного радиуса электронного пучка; 10–распределение плотности тока вдоль радиуса пучка $J(r)$; 11–значение интегральной плотности тока; 12–значение интегральной плотности мощности; 13–значение диаметра пучка на трех выбранных уровнях распределения; 14–значение угла сходимости пучка; 15–значение яркости электронного пучка.

Поступающий в программно-аппаратный комплекс сигнал вида $U(t)$ 7 автоматически транслируется в распределение тока на зонд $I(x)$ 8.

Заложенный в программно-аппаратный комплекс алгоритм решения уравнений (2)–(6) позволяет определить эффективный радиус электронного пучка 9, построить распределение плотности тока по радиусу пучка 10 и оценить интегральную плотность тока в пучке 11 и интегральную плотность мощности 12. По полученному распределению плотности также определяется диаметр электронного пучка на трех выбранных уровнях распределения 13.

Время автоматического измерения и расчета характеристик электронного пучка в одной плоскости составляет 150–200 ms.

Для расчета угла сходимости и яркости электронного пучка, измерительная часть зонда перемещается в плоскость, положение которой соответствует вертикальной координате, заданной ранее. Во второй плоскости выполняется измерение и расчет эффективного радиуса электронного пучка, построение распределения плотности тока по радиусу пучка, оценка интегральной плотности тока, интегральной плотности мощности и собственно расчет угла сходимости 14 и яркости 15 электронного пучка по выражениям (7)–(9).

В возможности зондового оборудования, заложена функция проведения экспериментальных исследований. Она заключается в выполнении автоматических измерений с накоплением данных. Результатом работы этой функции выступают таблицы с данными зависимостей выбранных характеристик электронного пучка и электронно-лучевой пушки.

Заключение

Разработанное зондовое оборудование имеет широкие возможности по использованию, как в научно-исследовательских, так и в конкретных прикладных технологических задачах применения электронных пучков и позволяет:

- выполнять автоматически расчеты основных характеристик электронного пучка;
- считывать показания аппаратуры электропитания и управления электронно-лучевой пушкой;
- работать в режиме экспериментальных исследований.

Время диагностики характеристик электронного пучка зондовым оборудованием в одной плоскости составляет не более 200 ms.

Качество проведения диагностики характеристик электронного пучка с использованием разработанного зондового оборудования подтверждается полученными результатами. Так, например, яркость электронного пучка, генерируемого пушкой с плазменным эмиттером, составляет величину порядка $10^{10} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{rad}^{-2}$. Аналогичные данные [7] получены с использованием зонда с щелевыми датчиками [4], разработанного фирмой TWI ltd.

Литература

- [1] С.Ю. Корнилов, И.В. Осипов, Н.Г. Ремпе // Приборы и техника эксперимента. 2009. №3. С. 104–109.
- [2] U. Reisgen, M. Schleser, A. Abdurakhmanov, and A. Gumenyuk // Physics of Plasmas. 2012. V.19. No.1. 013106.
- [3] J.W. Elmer, A.T. Teruya, and D.W. O'Brien // Welding Journal. 1993. V.72. 493/s.
- [4] A. Kaur, C. Ribton, W. Balachandaran, Journal of Materials Processing Technology. 2015. Vol.221. P. 225-232.
- [5] Y.-X. Wei, M.-G. Huang, S.-Q. Liu, J.-Y. Liu, B.-L. Hao, C.-H. Du, P.-K. Liu, Measurement Science and Technology. 2013. Vol.24. No.2. 025901.
- [6] J. W. Elmer and A. T. Teruya, Welding Journal. 2001. Vol.80. 288/s.
- [7] С.Ю. Корнилов, Н.Г. Ремпе, А. Beniyash, N. Murray, T. Hassel, C. Ribton // Письма в ЖТФ. 2013. Т.39. Вып.19. С. 1–8.