ЛАБОРАТОРНАЯ =

УДК 539.1.076+53.08

ПРИМЕНЕНИЕ ЧЕТЫРЕХТОЧЕЧНОГО МЕТОДА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ОДНОРОДНОСТИ ТОЛЩИНЫ ВНУТРЕННЕГО НАПЫЛЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ ВАКУУМНЫХ КАМЕР ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТОВ КОМПЛЕКСА СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МАХ-IV

© 2019 г. О. В. Анчугов^{*a*}, Д. А. Шведов^{*a*,*}

^а Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

* e-mail: D.A.Shvedov@inp.nsk.su, e-mail: shvedda@mail.ru

Поступила в редакцию 04.10.2018 г. После доработки 04.10.2018 г. Принята к публикации 01.11.2018 г.

Для измерения однородности толщины внутреннего напыления керамических вакуумных камер устройств инжекции электронного пучка (кикеров) разработан и изготовлен прибор, позволяющий проводить измерения указанного параметра при размерах отверстия от 1 см и различной его геометрии. Диапазон измерения составляет от 0.1 до 100 мкм. Обоснована необходимость таких измерений, представлены различные типы датчиков и изложены результаты для некоторых вакуумных камер кикеров инжекции комплекса синхротронного излучения MAX-IV (Швеция).

DOI: 10.1134/S0032816219030029

введение

В последнее время в ускорителях для управления пучками заряженных частиц стали часто использовать импульсные магниты наносекундного диапазона (кикеры) с керамической вакуумной камерой. При этом магнитная система располагается вне вакуума, а вакуумная камера делается из керамики.

Для сохранения однородности вакуумной камеры по всему периметру ускорительного кольца необходимо, чтобы камера во всех элементах имела одинаковый импеданс для тока, наведенного циркулирующим пучком. Поэтому на внутреннюю поверхность камеры кикеров с определенной однородностью наносят металлическое покрытие либо магнетронным напылением, либо химическим осаждением металла из паровой фазы (CVD-напыление). Обычно толщину покрытия контролируют, измеряя сопротивление между фланцами камеры, считая, что покрытие однородно по периметру и длине.

При повышенных требованиях к однородности поля внутри магнита необходимо контролировать равномерность внутреннего напыления как по длине, так и по всему поперечному сечению. Все доступное для измерения оборудование довольно дорогое, обычно рассчитано на настольное измерение внешних, легкодоступных поверхностей образцов и не позволяет поместить датчик внутрь вакуумной камеры на требуемое расстояние ввиду ее ограниченных размеров, которые составляют от 1 см по ширине и нескольких сантиметров по длине, а также сложной геометрии (восьмиугольные или эллипсные камеры). Авторами было разработано и применено устройство, простое в использовании и позволяющее измерять толщину внутреннего напыления камер на расстоянии до 16 см от фланца.



Рис. 1. Принципиальная схема четырехточечного метода измерений.



Рис. 2. Датчик для продольного (а) и поперечного (б) измерения.

ОПИСАНИЕ ЧЕТЫРЕХЗОНДОВОГО ДАТЧИКА ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ПОКРЫТИЯ

Как уже говорилось, основной задачей является измерение неоднородности внутреннего покрытия вакуумных камер на длинах до 300 мм. Для этого было разработано устройство на основе четырехточечного метода измерения толщины тонкого слоя проводящего материала [1]. Его принцип заключается в следующем. К исследуемой поверхности прикладывают четыре зонда (рис. 1), расположенных на одинаковых расстояниях. На крайние зонды подают электрический ток *I*, а на внутренних — измеряют падение напряжения *U*. Для повышения точности измерений расстояние от границы поверхности до ближайшего зонда должно быть более 2s, где s — межзондовое расстояние [2].

По измеренному напряжению U при заданном токе I можно вычислить поверхностное сопротивление материала по формуле:

$$\rho_s = \frac{U}{I} \frac{\pi}{\ln 2} = \frac{U}{I} \cdot 4.5324.$$

При известном удельном сопротивлении материала покрытия исходя из полученных данных несложно вычислить его толщину *w*:

$$w = \rho / \rho_s$$
.

Для удобства пересчета толщины *w*, м, покрытия следует задавать ток датчика 45.3 мА. Тогда

$$w=\frac{10^{-2}\cdot\rho}{U},$$

где ρ , Ом · м — известное удельное сопротивление материала покрытия, а U, В — измеренное датчиком напряжение.

На рис. 2 показаны измерительные пробники с держателем и контактными зондами на конце для

продольного (рис. 2а) и поперечного (рис. 2б) измерения.

КИКЕРЫ ДЛЯ ИСТОЧНИКА СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МАХ-IV

В кикерах инжекции электронного пучка в накопительные кольца источников синхротронного излучения МАХ-4 (Швеция) на энергию 3 и 1.5 ГэВ [3, 4] импульсное магнитное поле создается током в шинах, расположенных вне вакуумного объема. Вокруг обмотки располагается магнитопровод из ферритового материала. Вакуумная керамическая камера изнутри покрыта слоем титана толщиной порядка единиц микрометров. Поперечное сечение кикера показано на рис. 3.

Эффективность экранировки металлическим покрытием импульсного магнитного поля, действующего на пучок частиц, зависит от нескольких факторов: толщины покрытия, удельной проводимости материала покрытия и временных параметров им-



Рис. 3. Центральное поперечное сечение кикера.



Рис. 4. Продольный и поперечный виды керамических вакуумных камер для кикеров накопительного кольца МАХ-4: слева – кикера инжекции, справа – экспериментального кикера вертикального удара.

пульса, проходящего внутрь вакуумного объема. В связи с этим в данной конструкции был использован титан, который обладает достаточно высоким удельным сопротивлением, $(53-55) \cdot 10^{-8}$ Ом · м, а также всеми необходимыми вакуумными характеристиками. Титан напыляли магнетронным методом. Неоднородность наносимого покрытия способствует возбуждению токов изображения проходящего через кикер пучка, что в сумме с другими факторами может приводить к увеличе-

нию эммитанса (фазового объема) пучка и ухудшению других его характеристик.

ПАРАМЕТРЫ ВАКУУМНЫХ КАМЕР КИКЕРОВ

Для кикеров были разработаны вакуумные керамические камеры из материала с содержанием 99.8% Al₂O₃. Внутренняя поверхность камер была покрыта слоем титана толщиной не более 1–3 мкм.



Рис. 5. Силовые линии магнитного поля и наведенные токи в покрытии камеры.



Рис. 6. Результаты продольных измерений толщины покрытия. *R* – сопротивление между фланцами.

Выбором такой толщины покрытия достигался необходимый компромисс между затуханием поля за счет потерь на вихревые токи в покрытии при проникновении импульсного магнитного поля и минимальным импедансом связи с пучком [5].

На рис. 4 показаны продольный и поперечный виды камер для кикеров инжекции и экспериментального кикера вертикального удара для накопительного кольца МАХ-4.

Проведено компьютерное моделирование прохождения импульсного магнитного поля на частоте основной гармоники (0.75 МГц) кикера инжекции. В результате были определены наиболее критичные области внутренней поверхности керамики, где особенно важно иметь нужную толщину слоя титана и, что наиболее существенно, однородность слоя по длине камеры.

На рис. 5 показано распределение силовых линий магнитного поля и в цветовой палитре – плотность тока, наводимого в покрытии. Видно, что распределение плотности тока неоднородно и большая часть его приходится на боковые стенки камеры, поэтому при измерении однородности покрытия необходимо особое внимание обратить на эти области.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ТОЛЩИНЫ ПОКРЫТИЯ КАМЕРЫ КИКЕРА ИНЖЕКЦИИ ИСТОЧНИКА СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МАХ-IV

На рис. 6 показаны результаты измерения толщины покрытия внутренней поверхности камеры кикера инжекции накопительного кольца по восьми направлениям. Измерения проводились с интервалом 2 см на глубину до 16 см с каждой стороны. На основании результатов измерений, показанных на рис. 6а. камера была забракована, поскольку толщина напыления отличалась более чем в 10 раз, хотя измеренное сопротивление между фланцами соответствовало требуемому. На рис 66 показаны результаты измерений после повторного напыления поверхности данной камеры. Как вилно из графика. толшина напыления соответствует техническому заданию, согласно которому диапазон по толщине слоя напыления должен лежать в пределах 1 ± 0.3 мкм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Измерена толщина напыления титана на внутренней поверхности вакуумных камер, а также проведена оценка однородности напыления по длине камеры с точностью 0.2 мкм. Полученные результаты вполне удовлетворяют требованиям заказчика по качеству покрытия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Smits F.M.* // Bell System Technical Journal. 1958. V. 37. Issue 3. P. 711.
- 2. Valdes L.B. // Proc. IRE. 1954. V. 42. P. 420.
- Leemann S.C. // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. 2012. V. A 693. P. 117. https://doi.org/10.1016 /j.nima.2012.07.023
- Tavares P.F., Leemann S.C., Sjostrom M., Andersson A. // J. Synchrotron Rad. 2014. V. 21. P. 862. doi 10.1107/ S1600577514011503
- 5. Шведов Д.А., Анчугов О.В., Киселев В.А., Корепанов А.А., Синяткин С.В. // ПТЭ. 2015. № 3. С. 16. doi 10.7868/S0032816215030118