

УДК 57.084.1:548.4

ГИБРИДНЫЙ ДЕВЯТИПОЛЮСНЫЙ ВИГГЛЕР КАК ИСТОЧНИК “ЖЕСТКОГО” РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА УСКОРИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ ВЭПП-4

© 2020 г. Г. Н. Баранов^{a, b, *}, К. Э. Купер^a, П. А. Пиминов^a, П. Д. Воблый^a, А. А. Легкодымов^a,
Л. И. Шехтман^a, А. Н. Шмаков^c, Е. Б. Левичев^a

^aИнститут ядерной физики СО РАН, Новосибирск, 630090 Россия

^bНовосибирский государственный технический университет, Новосибирск, 630073 Россия

^cИнститут катализа СО РАН, Новосибирск, 630090 Россия

*e-mail: g.n.baranov@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 12.01.2020 г.

После доработки 14.03.2020 г.

Принята к публикации 17.03.2020 г.

В институте ядерной физике был разработан и успешно установлен на ускорительный комплекс ВЭПП-4 гибридный девятиполюсный вигглер. Девять полюсов вигглера представляют собой электромагниты с железными сердечниками. Для достижения наибольшего поля в зазоре между полюсами вигглера установлены постоянные магниты с остаточной индукцией 1.2 Тл. Такая комбинация из электромагнитов и постоянных магнитов позволила добиться максимальной магнитной индукции 1.9 Тл при межполюсном зазоре 30 мм. В настоящее время в Сибирском центре синхротронного и терагерцового излучения аттестованы несколько методик выполнения измерений с использованием жесткого рентгеновского диапазона (50–250 кэВ) на основе излучения из девятиполюсного вигглера. Так, например, с использованием этого излучения проводят исследования по рентгеновской визуализации быстрых процессов, рентгеновской компьютерной томографии, рентгенофлуоресцентному анализу, а также рентгенографические исследования. Приводится краткий обзор этих исследований.

Ключевые слова: синхротронное излучение, вигглер, ондулятор, пучки заряженных частиц, источники синхротронного излучения.

DOI: 10.31857/S1028096020120080

ВВЕДЕНИЕ

На накопительном кольце ВЭПП-4М в 2017 г. был смонтирован и запущен в эксплуатацию девятиполюсный вигглер [1, 2]. Новый гибридный девятиполюсный вигглер с магнитной индукцией 1.9 Тл был сконструирован и создан для замены старого семиполюсного вигглера с индукцией 1.2 Тл. В табл. 1 представлены характеристики старого и нового вигглеров. Новый вигглер генерирует более жесткий спектр излучения, что значительно увеличивает поток фотонов в области энергии от 50 до 250 кэВ. На рис. 1 представлены результаты расчета для энергии пучка 4.5 ГэВ при токе 20 мА. Данный вигглер позволяет значительно расширить научные исследования в этом энергетическом диапазоне. Синхротронное излучение (СИ), генерируемое новым вигглером, широко используется в различных экспериментах, например, в исследовании быстро протекающих процессов, в экспериментах по микропучковой лучевой терапии и рентгенофлуоресцентному

анализу, в рентгенографических исследованиях [3, 4].

КОНСТРУКЦИЯ ВИГГЛЕРА

Полюса вигглера изготовлены из цельного куска электротехнической стали 10, обработанной на станке с числовым программным управлением. Вигглер содержит семь основных полюсов

Таблица 1. Параметры старого и нового вигглеров для ВЭПП-4М

Параметр	Старый	Новый
V_{\max} , Тл	1.2	1.905
Период, см	40	30
Основные полюса	5	7
Количество полюсов	7	9
Межполюсный зазор, см	4	3

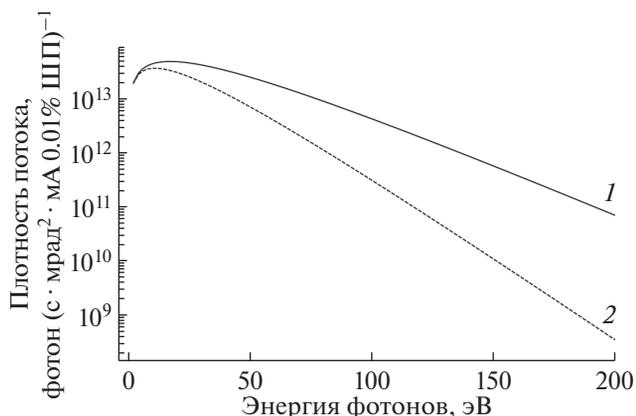


Рис. 1. Плотность потока фотонов из нового (1) и старого (2) вигглеров. ШП – ширина полосы.

и два полюса с катушками коррекции (структура поля: 1/2; -1; 1; -1, 1, -1, 1; -1, 1/2). Общий вид вигглера показан на рис. 2. Катушка основного полюса состоит из 16 витков, уложенных в два слоя. Медный проводник имеет прямоугольное поперечное сечение 13.5 × 13.5 мм с внутренним отверстием диаметром 7.5 мм. Проводник наматывают непосредственно на полюс. На боковые полюса наматывают восемь витков основного проводника и восемь витков коррекции размером 10 × 10 мм с внутренним диаметром 5 мм (рис. 3). Постоянные магниты изготовлены из сплава ниобия, железа и бора (NbFeB) и имеют остаточную индукцию 1.2 Тл. Магниты NbFeB были выбраны, потому что они имеют большую остаточную намагниченность, чем самарий-кобальтовые (SmCo) или керамические постоянные магниты, а также имеют хорошие прочностные характеристики. Эти магниты устанавливают между полюсами, как показано на рис. 4 [5].

Результаты магнитных измерений вигглера приведены в [6]. Для моделирования магнитных полей применяли программное обеспечение COMSOL [7], которое использует метод конечных элементов для расчетов. Моделирование проводили для максимального тока (2 кА). При изготовлении катушек использовали метод вакуумной заливки смолы. Смолы должны быть дегазированы в вакууме (менее 1 мбар при температуре 65–70°C), пока смесь не будет свободна от пузырьков воздуха и примесей с низкой температурой кипения. Для дегазации пресс-форму с собранными катушками нагревают до 65–70°C и вакуумируют до давления менее 1 мбар в течение нескольких часов. Затем катушки полностью заливают эпоксидной смолой. Во время процесса пропитки температура смолы и формы должна быть постоянной.

Расчет одного периода представлен на рис. 5, где показано распределение магнитного потока с

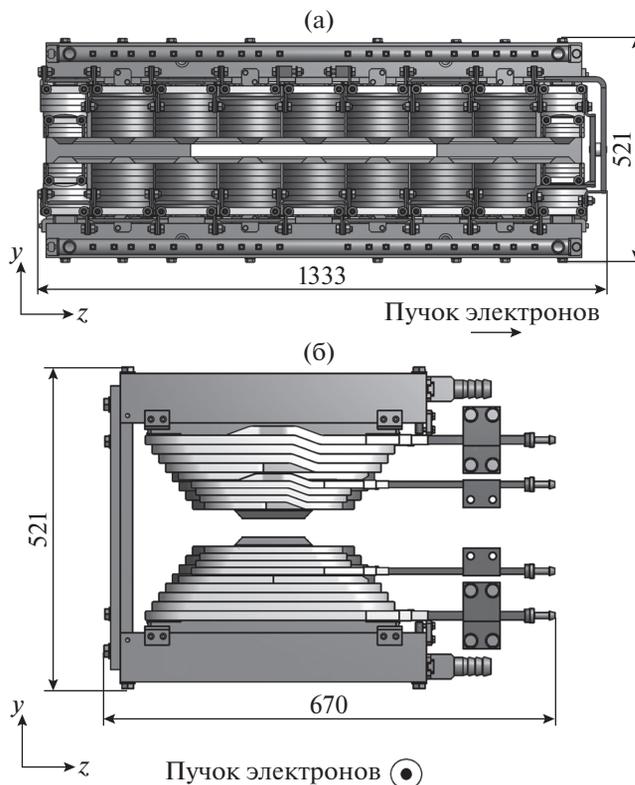


Рис. 2. Общий вид гибридного вигглера: а – вдоль оси *x*; б – вдоль оси *z*.

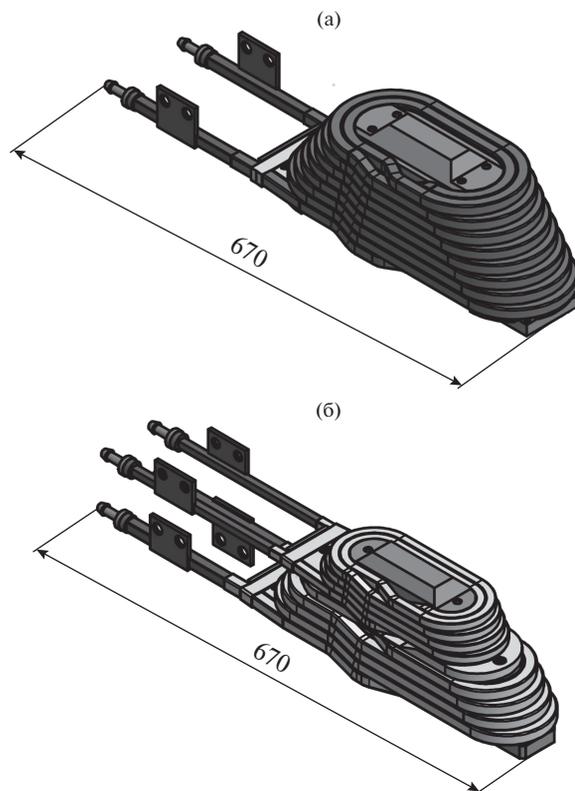


Рис. 3. Полюсы вигглера: а – центральный; б – боковой с катушкой коррекции.

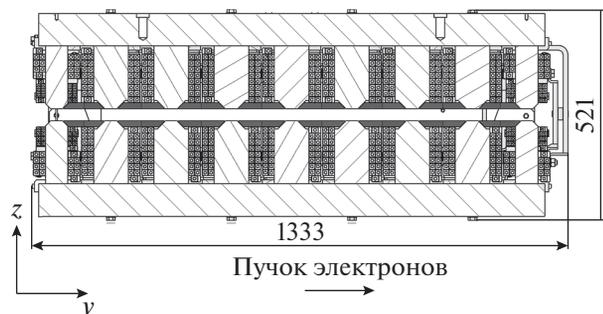


Рис. 4. Сечение вигглера.

постоянными магнитами и без них. Постоянные магниты имеют индукцию 1.2 Тл. Намагниченность внутри постоянных магнитов параллельна продольному направлению вигглера, что позволяет перераспределять часть магнитного потока и разгружать полюса.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИ

Высокоэнергетический диапазон СИ наиболее востребован при исследованиях, посвященных разработке метода микропучковой лучевой терапии, проводимых на экспериментальном стенде для радиационного воздействия на онкологические ткани лабораторных животных. Лучевая терапия, основанная на технике микропучкового облучения, является одним из передовых средств в борьбе с нейроонкологическими заболеваниями [8]. Использование массивов высокоинтенсивных микропучков рентгеновского излучения позволяет уменьшить негативное влияние радиации на здоровые ткани, окружающие злокачественные образования. В настоящее время при непосредственном участии биологов из Института цитологии и генетики СО РАН проводятся эксперименты по облучению мышей с имплантированными злокачественными опухолями головного мозга [9]. В дальнейшем полученные результаты позволят значительно улучшить качество лучевой терапии сложных онкологических заболеваний.

Одной из наиболее важных работ, проводимых в настоящее время в Сибирском центре синхротронного и терагерцового излучения (СЦСТИ), является исследование механизмов возникновения напряжений, возникающих в вольфраме при высокодинамических тепловых нагрузках [10]. Исследования, ведущиеся в этой области, обусловлены в первую очередь проектированием защитной первой стенки термоядерного реактора, создающегося на базе проекта ИТЭР. Использование СИ в области 60 кэВ позволяет определять напряжения, возникающие в вольфрамовой мишени, по смещению дифракционного пика, обу-

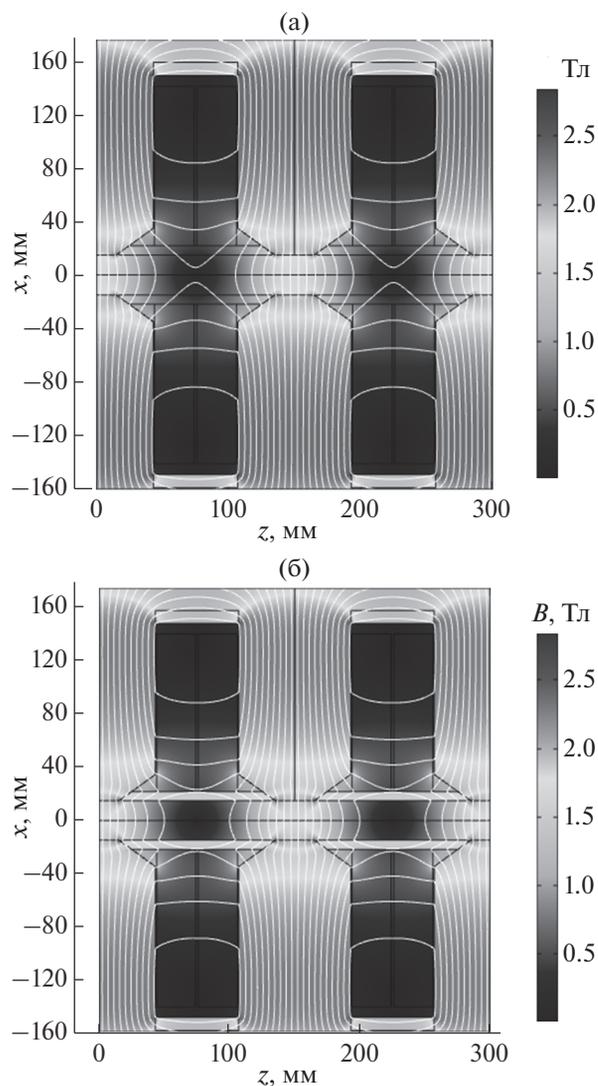


Рис. 5. Распределение магнитного потока одного периода: а – без постоянных магнитов; б – с постоянными магнитами.

словленного изменением межплоскостных расстояний. Высокая интенсивность СИ обеспечивает проведение таких измерений с временным разрешением на уровне 0.1 мс, что невозможно при использовании стандартных рентгеновских установок.

Еще одним классом задач, решаемых в СЦСТИ и требующих высокоэнергетического излучения, является рентгенофлуоресцентный анализ редкоземельных элементов (РЗЭ). Определение сверхмалых концентраций РЗЭ (на уровне 1 г на тонну и ниже) в геологических пробах имеет большое значение при проведении разведывательных мероприятий по поиску новых месторождений [11, 12]. Кроме того, концентрация РЗЭ позволяет получать ценную информацию о породообразующих геологических процессах, которую используют в

геохимических исследованиях. Актуальность применения рентгенофлуоресцентного анализа с использованием СИ для этих целей обусловлена высокой чувствительностью экспресс-метода, а также отсутствием сложных работ по пробоподготовке. Использование СИ с энергией более 50 кэВ, возбуждающего линии К-серии РЗЭ, позволяет решить проблему наложения полезного сигнала с флуоресцентными линиями основных элементов. Кроме того, уменьшается поглощение рентгеновского излучения в матрице образца, что сильно упрощает расчет при проведении количественного элементного анализа.

Высокопроникающая способность СИ в диапазоне от 30 до 200 кэВ позволяет проводить рентгенографические исследования структуры крупных образцов. Особенно это актуально при изучении уникальных археологических и палеонтологических находок, так как данный метод позволяет получать трехмерное изображение структуры объекта без его разрушения. В настоящее время в СЦСТИ проводятся исследования сульфидных окаменелостей, позволивших реконструировать структуру древних растений, существовавших на нашей планете более миллиона лет назад.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-50-00080) с использованием уникальной научной установки “Комплекс ВЭПП-4–ВЭПП-2000” при финансовой поддержке

Минобрнауки России (уникальный идентификатор проекта RFMEFI61917X0008).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левичев Е.Б. // Письма в ЭЧАЯ. 2016. Т. 13. С. 1365.
2. Anashin V.V., Aulchenko V.M., Baldin E.M. et al. // Phys. Part. Nucl. 2013. V. 44. P. 657.
3. Алешаев А.Н., Зубков П.И., Кулипанов Г.Н. и др. // Физика горения и взрыва. 2001. Т. 37. С. 104.
4. Motz H., Thon W., Whiterhurst R.N. // J. Appl. Phys. 1953. V. 7. P. 826.
<https://doi.org/10.1063/1.1721389>
5. Vobly P., Baranov G., Levichev E. et al. // IEEE Trans. Appl. Superconduct. 2018. V. 28. № 3. P. 4101403.
<https://doi.org/10.1109/TASC.2018.2791921>
6. Piminov P.A., Baranov G.N., Bogomyagkov A.V. et al. // Phys. Proced. 2016. V. 84. P. 26.
7. Comsol Application. www.comsol.ru.
8. Grotzer M., Schultke E., Bräuer-Krisch E. et al. // Phys. Med. 2015. V. 31. № 6. P. 564.
9. Kuper K.E., Zavjalov E.L., Razumov I.A. et al. // Phys. Proced. 2016. V. 84. P. 252.
10. Аракчеев А.С., Шмаков А.Н., Шарафутдинов М.Р. и др. // Ж. структурн. химии. 2016. № 7. С. 1389.
<https://doi.org/10.15372/JSC20160703>
11. Легкодымов А.А., Купер К.Э., Назьмов В.П. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 1. С. 116.
<https://doi.org/10.3103/S1062873815010207>
12. Tsuji K., Injuk J., van Grieken R. // X-Ray Spectrometry: Recent Technological Advances. Chichester: John Wiley & Sons, 2004. P. 355.

Hybrid Nine-Pole Wiggler as a Source of “Hard” X-ray Radiation at the VEPP-4 Accelerator Complex

G. N. Baranov^{1,2,*}, K. E. Kuper¹, P. A. Piminov¹, P. D. Vobly¹, A. A. Legkodymov¹, L. I. Shekhtman¹, A. N. Shmakov³, E. B. Levichev¹

¹Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, 630090 Russia

²Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, 630073 Russia

³Boreskov Institute of Catalysis, Novosibirsk, 630090 Russia

*e-mail: g.n.baranov@inp.nsk.su

At the Institute of Nuclear Physics, a nine-pole hybrid wiggler was developed and successfully installed on the VEPP-4 accelerator complex. The nine poles of the wiggler are electromagnets with iron cores. To achieve the largest field, permanent magnets with a residual induction of 1.2 T were installed between the wiggler poles. Such a combination of electromagnets and permanent magnets made it possible to achieve a maximum magnetic induction of 1.9 T, with an interpolar gap of 30 mm. Currently, the Siberian Center of Synchrotron and Terahertz Radiation, several research methods using the “hard” X-ray range (50–250 keV) based on radiation from a nine-pole wiggler were certified. For example, using this radiation, X-ray imaging of fast processes, X-ray computed tomography, X-ray fluorescence analysis, and X-ray diffraction studies were carried out. A brief review of these studies is provided.

Keywords: synchrotron radiation, wiggler, undulator, charged particle beams, synchrotron radiation sources.