

СОЛЕНОВАЛЬНАЯ ЛИНЗА ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО СВЕРХБЫСТРОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ДИФРАКЦИИ

© 2022 г. Н. В. Шведунов^{a,b}, Д. А. Бобылев^{b,c,*},
М. Д. Сиомаш^{b,c}, В. И. Шведунов^{a,b}

^a НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова
Россия, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1, стр. 2

^b Лаборатория электронных ускорителей МГУ им. М.В. Ломоносова
Россия, 119992, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 77

^c Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова
Россия, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1, стр. 2

*e-mail: agava2309@yandex.ru

Поступила в редакцию 16.05.2022 г.

После доработки 02.06.2022 г.

Принята к публикации 06.07.2022 г.

Представлены результаты разработки соленоидальной линзы, предназначенной для экспериментов по сверхбыстрой электронной дифракции с использованием электронных пучков с энергией, равной единицам мегаэлектронвольт. Разработан метод определения рассогласования положений геометрического и магнитного центров линзы, основанный на измерении радиальной зависимости продольного магнитного поля.

DOI: 10.31857/S0032816222060180

ВВЕДЕНИЕ

Метод дифракции электронов с энергией несколько мегаэлектронвольт, сгруппированных в сгустки длительностью порядка 100 фс с зарядом порядка 100 фК с предельно малым поперечным эмиттансом, позволяет исследовать в режиме реального времени с атомным пространственным и временным разрешением процессы, происходящие в химических реакциях, биологических объектах, различных материалах, инициированные воздействием синхронизированных со сгустками лазерных импульсов фемтосекундной длительности. Метод дифракции электронов (см. обзор [1]) активно развивается с использованием электронных пучков с энергией в несколько мегаэлектронвольт в различных научных центрах [2–5] и становится важным инструментом исследований в различных областях науки, наряду с рентгеновским излучением комптоновских источников, лазеров на свободных электронах, источников синхротронного излучения.

Электронные сгустки с указанными выше характеристиками формируются с помощью СВЧ-пучки с фотокатодом. Важной частью установки по исследованию дифракции электронов является соленоидальная линза, фокусирующая пучок электронов на изучаемом образце. К соленоидальной линзе предъявляются следующие требо-

вания: обеспечение минимального фокусного расстояния порядка 1 м для энергий пучка в несколько мегаэлектронвольт; концентрация магнитного поля в достаточно узкой области вдоль направления движения пучка; минимальное воздействие нелинейных эффектов на поперечный эмиттанс пучка; стабильность параметров поля при большом тепловыделении в обмотке; совпадение с высокой точностью геометрического и магнитного центров линзы.

В данной статье приведены результаты расчета линзы, описана ее конструкция, представлены методика и результаты измерений характеристик магнитного поля.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Схематически сечение бронированной соленоидальной линзы показано на рис. 1а. Основными параметрами, определяющими фокусное расстояние линзы, являются число ампер-витков обмотки NI , ширина зазора полюсного наконечника s и диаметр отверстия d . С помощью этих параметров может быть приближенно описано распределение магнитного поля на оси линзы:

$$B_z(z) = k \frac{\mu_0 NI}{s} \frac{\text{sh}(2.636s/d)}{\text{ch}(2.636s/d) + \text{ch}(5.272z/d)}, \quad (1)$$

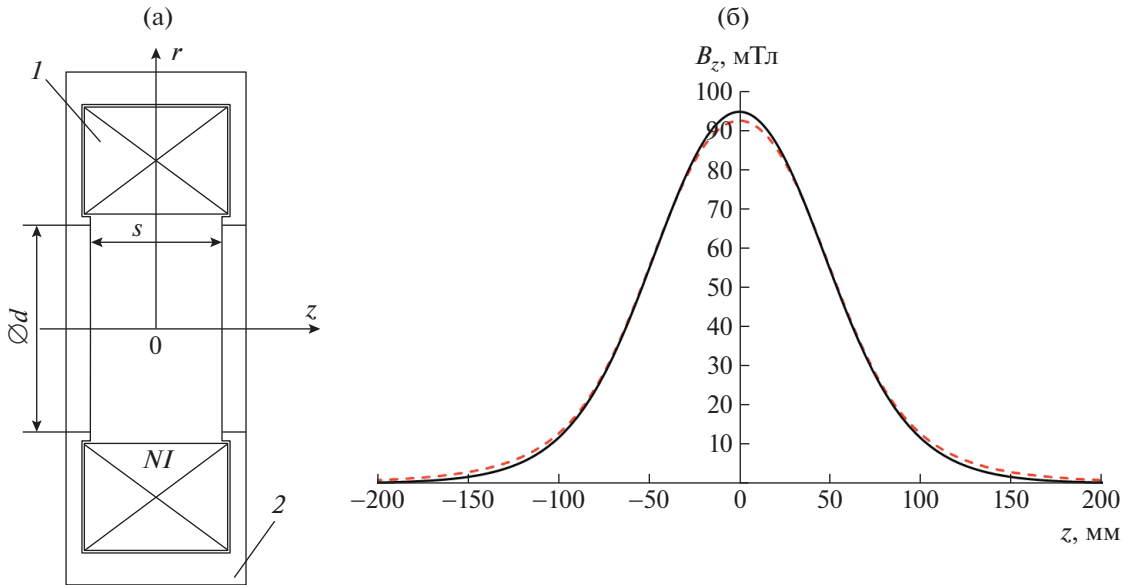


Рис. 1. а – схематический рисунок сечения соленоидальной линзы: 1 – обмотка, 2 – стальное ярмо; б – распределения магнитного поля на оси линзы, рассчитанные: черная сплошная кривая – по формуле (1), красная штриховая кривая – по программе POISSON – для $NI = 9600$ ампер-витков, $s = 0.085$ м, $d = 0.13$ м.

где z – координата вдоль оси соленоида, $k \approx 0.958$ – корректирующий фактор. Отметим, что это только одно из возможных приближенных описаний распределения поля на оси соленоидальной линзы, другие варианты можно найти в работе [6].

Более точно, с учетом магнитной проницаемости стали, распределение магнитного поля линзы может быть рассчитано с помощью различных программ, например POISSON [7]. На рис. 16 сравниваются распределения поля на оси линзы, рассчитанные по формуле (1) и по программе POISSON для $NI = 9600$ ампер-витков, $s = 0.085$ м, $d = 0.13$ м. В расчетах по программе POISSON использовалась зависимость магнитной проницаемости от индукции магнитного поля для Стали 20.

Фокусное расстояние соленоидальной линзы f определяется выражением

$$\frac{1}{f} = \frac{e^2}{4\gamma^2 m^2 v_z^2} \int_{-\infty}^{\infty} B_z^2(z) dz, \quad (2)$$

где e – заряд электрона, γ – его относительная энергия, m – масса, v_z – скорость вдоль оси линзы z .

Вводя обозначения $\xi \equiv \text{ch}\left(\frac{2.636s}{d}\right)$, $\eta \equiv \text{sh}\left(\frac{2.636s}{d}\right)$, $\xi \equiv \frac{5.272}{d}$ и подставляя выражение (1) в формулу (2), получим следующее выражение для фокусного расстояния:

$$\frac{1}{f} = \frac{e^2}{4\gamma^2 m^2 v_z^2} \left[k \frac{\mu_0 NI \eta}{s} \right]^2 \frac{2}{\xi(\xi^2 - 1)} \times \left[\frac{\xi}{\sqrt{\xi^2 - 1}} \ln \frac{\xi + 1 + \sqrt{\xi^2 - 1}}{\xi + 1 - \sqrt{\xi^2 - 1}} - 1 \right]. \quad (3)$$

Для пучка электронов с малым поперечным эмиттансом и энергией в несколько мегаэлектронвольт в условиях планируемых экспериментов $v_z \approx c$, где c – скорость света. Используя значения параметров $s = 0.085$ м, $d = 0.13$ м, получаем следующее выражение для фокусного расстояния:

$$\frac{1}{f} \approx 7.08 \cdot 10^{-7} \left[\frac{NI}{\gamma} \right]^2 \text{ м}^{-1}. \quad (4)$$

В частности, для кинетической энергии электронов 3.5 МэВ и $NI = 9600$ ампер-витков получаем $f \approx 0.72$ м.

КОНСТРУКЦИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЛИНЗЫ

Условия эксперимента, в котором планируется использовать линзы, накладывают ряд ограничений на ее конструкцию. В частности, внешний диаметр ярма не должен превышать 340 мм, размеры ярма вдоль оси линзы не должны быть более 120 мм, толщина ярма должна быть достаточной для того, чтобы индукция магнитного поля в нем не превышала 1 Тл. Эти обстоятельства ограничивают размеры сечения обмотки величиной 90 мм в продольном и 70 мм в радиальном направле-

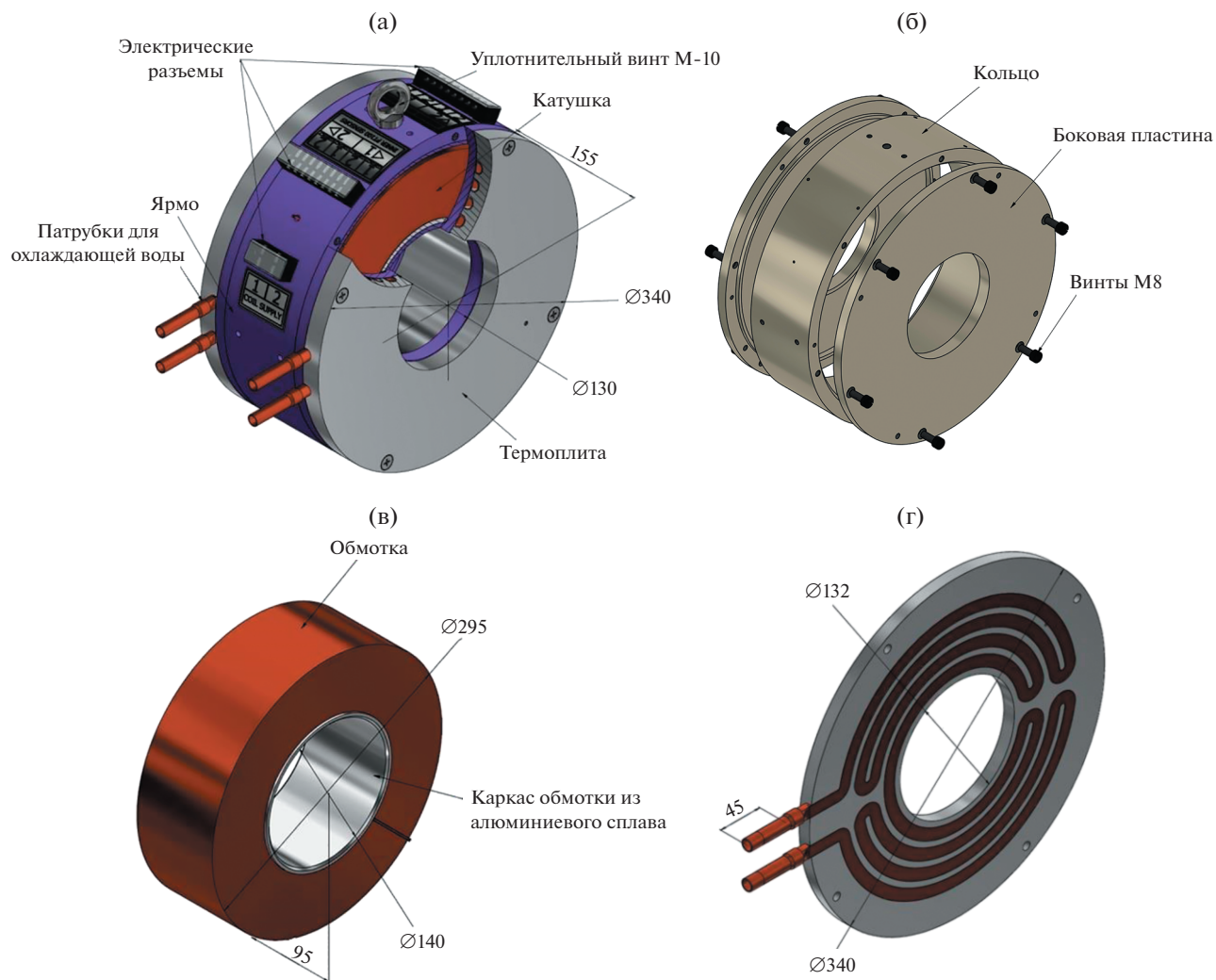


Рис. 2. Конструкция линзы: а – линза в сборе; б – ядро; в – обмотка; г – термоплита.

ниях. Дополнительные ограничения на параметры обмотки накладываются источником тока: максимальный ток обмотки не должен превышать 8 А, при этом максимальная мощность источника питания должна быть не более 450 Вт. Изоляция провода обмотки должна быть радиационно-стойкой и выдерживать испытания напряжением не менее 2 кВ. Стандартная номенклатура сечений провода с подходящими параметрами также накладывает ограничения на параметры обмотки.

С учетом изложенных выше обстоятельств для изготовления обмотки был выбран медный провод прямоугольного сечения размером $1.4 \times 2.12 \text{ мм}^2$ в радиационно-стойкой каптоновой изоляции с высоким пробивным напряжением. Обмотка содержит 1200 витков, что при токе 8 А обеспечивает значение $NI = 9600$ ампер-витков. При температуре 20°C сопротивление обмотки составляет 4.5 Ом, что соответствует тепловой мощности

около 160 Вт при токе 8 А. В процессе работы будут иметь место разогрев обмотки, рост ее сопротивления и потребляемой мощности, поэтому в конструкцию соленоида для съема тепла были введены пластины с водяным охлаждением (термоплиты).

Конструкция линзы показана на рис. 2. Линза состоит из ядра с полюсными наконечниками, обмотки и двух термоплит, обеспечивающих ее охлаждение. Изготовленная линза в сборе показана на рис. 3а, ее части – ядро со скользящей посадкой на трубу из немагнитного материала, используемую в процессе измерений, обмотка и термоплита – показаны на рис. 3б, 3в, 3г соответственно.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Магнитные измерения соленоидальной линзы включали в себя следующее: измерение распре-

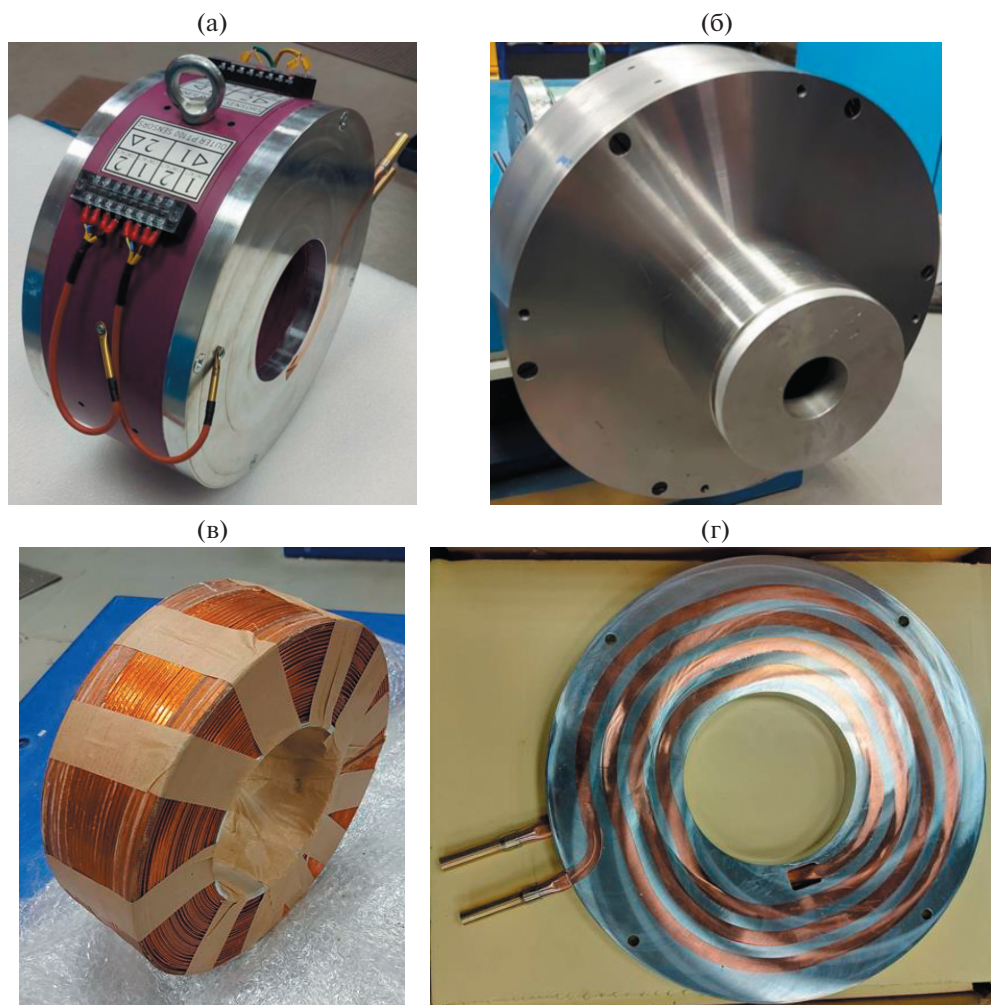


Рис. 3. Линза после изготовления: **а** – линза в сборе; **б** – ярмо на трубе со скользящей посадкой; **в** – обмотка; **г** – термоплита.

ления магнитного поля на оси с целью сравнения с расчетами и определения минимального фокусного расстояния; измерение распределения поля в центральной плоскости линзы в радиальном направлении для оценки вклада нелинейной компоненты силы в фокусировку пучка; измерение величины рассогласования магнитного и геометрического центров.

Измерения проводились на специальном стенде (рис. 4). Линза в сборе, но без охлаждающих пластин размещалась на трубе из немагнитного материала методом скользящей посадки. Измерения продольного и радиального распределений поля осуществлялись с помощью измерителя магнитной индукции РШ1-10, абсолютная точность которого определяется выражением $\pm(1.5 + 10/B_{\text{изм}})\%$, где $B_{\text{изм}}$ – измеренное значение магнитной индукции. Чувствительность шкалы данного прибора составляет 0.1 мТл, что недостаточно для измерения с требуемой точностью рас-

согласования магнитного и геометрического центров линзы. Для этих измерений на основе датчика Холла ПХЭ605118В был изготовлен измеритель магнитной индукции, позволяющий регистрировать изменения индукции на уровне лучше 0.01 мТл. Для перемещения щупов измерителей магнитной индукции использовался прецизионный двухкоординатный стол.

Для измерений рассогласования положений магнитного и геометрического центров линзы нами был разработан метод, основанный на радиальной зависимости продольного магнитного поля. В пределах некоторого диапазона отклонений от оси радиальная зависимость продольного магнитного поля может быть описана выражением

$$B_z(z, r) \approx B_z(z, r = 0) - \frac{d^2 B_z(z, r = 0)}{dz^2} \frac{r^2}{4} + \dots \quad (5)$$

Если магнитная ось линзы смещена относительно геометрической на расстояние Δr , то при

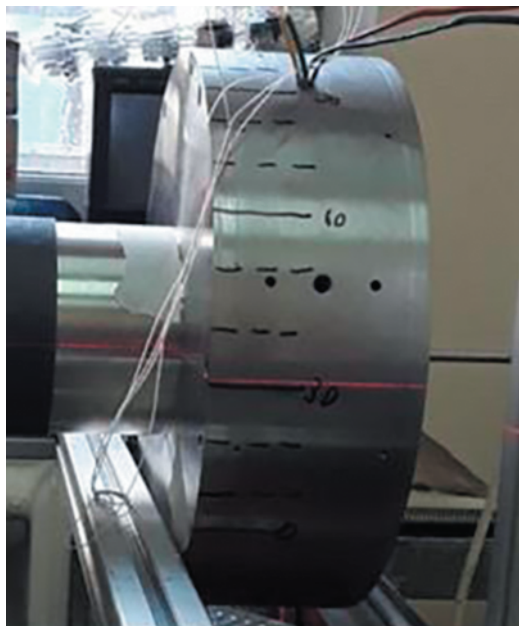


Рис. 4. Стенд для магнитных измерений соленоидальной линзы.

фиксированном положении r_H датчика Холла и вращении линзы вокруг геометрической оси разность максимального и минимального значений магнитной индукции составит

$$|\Delta B_z(z, r)| \approx \left| \frac{d^2 B_z(z, r=0)}{dz^2} r_H \Delta r \right|. \quad (6)$$

Зависимость второй производной распределения магнитной индукции на оси линзы, рассчитанного по программе POISSON для тока 8 А, показана на рис. 5 (черная сплошная кривая). Максимальное значение второй производной достигается в центральной плоскости линзы и составляет

$$\left| \frac{d^2 B_z(z=0, r=0)}{dz^2} \right| \approx 0.034 \text{ мТл/мм}^2.$$

Поместив датчик Холла на расстоянии 50 мм от оси, при рассогласовании магнитного и геометрического центров 0.1 мм мы должны зарегистрировать в ходе поворота линзы на 360° максимальное изменение магнитной индукции, равное 0.17 мТл. Величина рассогласования осей в пределах 0.1 мм обеспечивает выполнение линзой своих функций.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Измеренные и расчетные распределения индукции магнитного поля на оси для токов 8 и 6 А показаны в сравнении на рис. 6. Как видно, результаты расчетов и измерений хорошо согласуются. Некоторое превышение измеренного распределения поля над расчетными значениями имеет место при удалении от центра линзы более чем на 100 мм. С точки зрения фокусировки пучка данное превышение не играет существенной роли, оно может быть снижено установкой тонких экранов из магнитомягкой стали поверх пластин охлаждения.

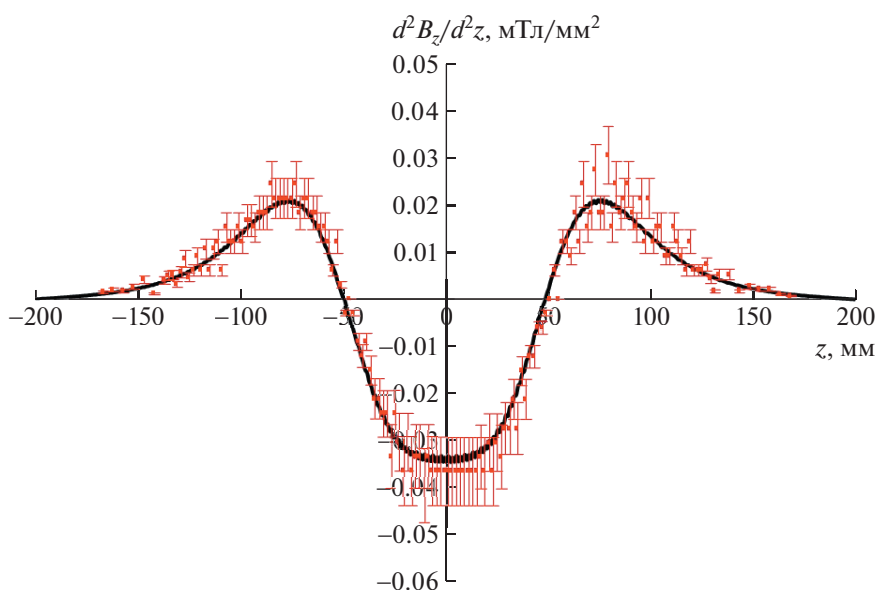


Рис. 5. Зависимость второй производной распределения магнитной индукции на оси линзы для тока 8 А. Черная сплошная кривая – расчет по программе POISSON; красные точки с погрешностями – результаты, полученные из измеренного распределения.

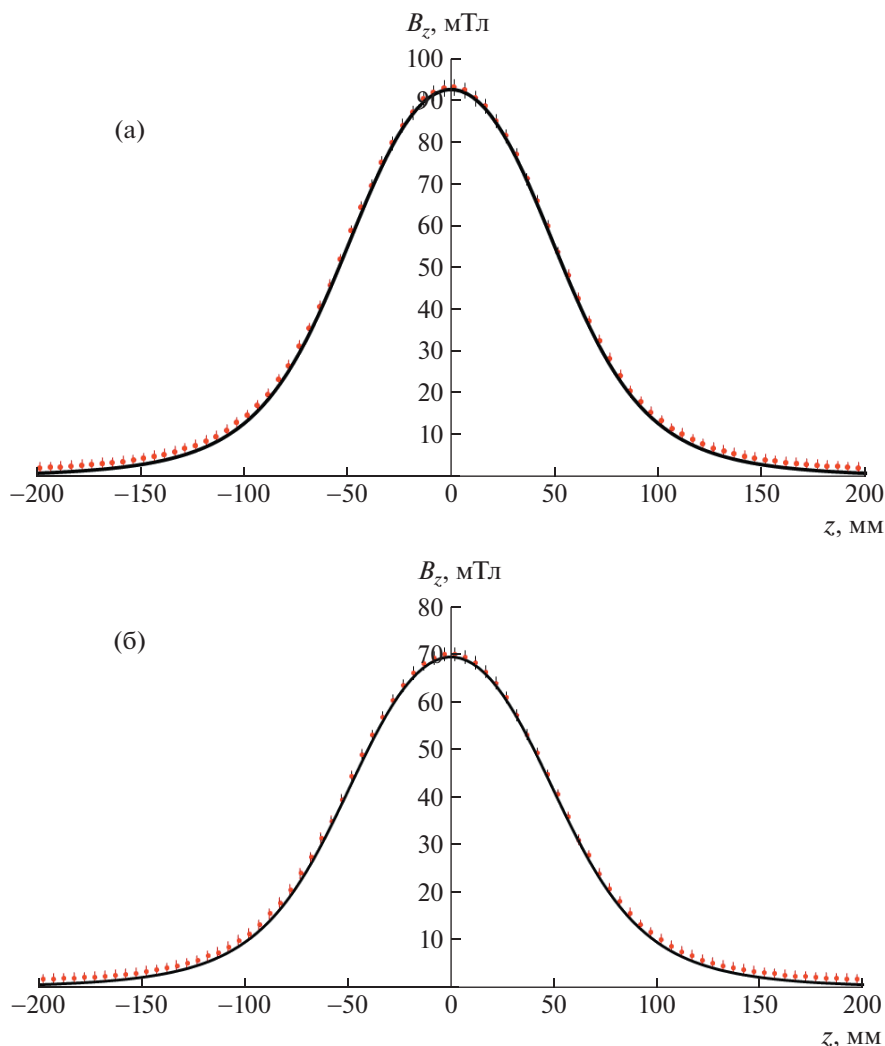


Рис. 6. Сравнение измеренного (красные точки с погрешностями) и расчетного (черная сплошная кривая) распределений индукции магнитного поля на оси для токов: **а** – 8 А, **б** – 6 А.

Отношение индукции магнитного поля в центре линзы для токов 8 и 6 А составляет 1.33 ± 0.05 , что соответствует соотношению токов $8/6 \approx 1.33$. Это свидетельствует об отсутствии насыщения стали при максимальном рабочем токе. Фокусные расстояния, рассчитанные на основании измеренного поля по формуле (2) для энергии 3.5 МэВ, составляют 0.71 ± 0.01 м и 1.24 ± 0.01 м для токов 8 и 6 А соответственно, эти значения соотносятся обратно пропорционально соотношению токов и близки к расчетным. Эффективная

длина линзы $L^{\text{eff}} = \frac{\int B_z dz}{B_{z=0}}$ в обоих случаях равна

131 ± 1 мм (сравни с расчетным значением 128 мм). Превышение эффективной длины, полученной из результатов измерений, над величиной, следующей из расчетов, обусловлено превышением измеренного поля над расчетными значениями в

области, удаленной от центра линзы. Это превышение не имеет принципиального значения для планируемых экспериментов. Сравнение вторых производных расчетного и измеренного полей также свидетельствует о хорошем соответствии параметров линзы расчетным значениям.

На рис. 7 показаны в сравнении измеренная в центральной плоскости линзы радиальная зависимость продольной компоненты магнитной индукции и рассчитанная по формуле (5) для тока 8 А. Как видно, в пределах ± 50 мм измеренные значения достаточно хорошо описываются квадратичной зависимостью. Диаметр электронного пучка в области линзы в планируемых экспериментах не будет превышать 5 мм, соответственно вклад квадратичного члена в выражении (5) в пределах диаметра пучка будет менее 0.06%. Таким образом, влиянием aberrаций линзы на рост эмиттанса пучка можно пренебречь.

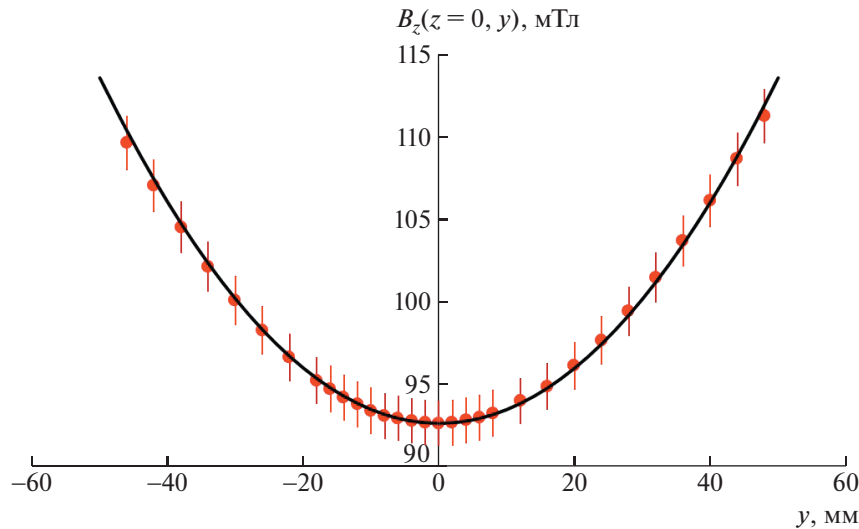


Рис. 7. Измеренная в центральной плоскости линзы радиальная зависимость продольной компоненты магнитной индукции (точки) и рассчитанная по формуле (5) (сплошная кривая) для тока 8 А.

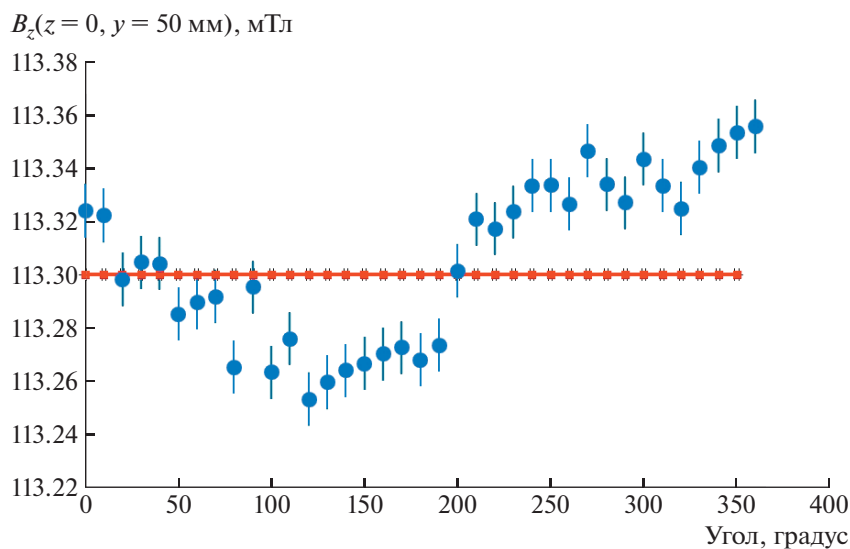


Рис. 8. Изменение продольной компоненты магнитной индукции в центральной плоскости линзы при ее вращении: красная прямая линия — измерения с помощью прибора РШ1-10 с ценой деления 0.1 мТл, голубые точки — измерения с помощью прибора на основе датчика Холла ПХЭ605118В с чувствительностью лучше 0.01 мТл. Ток 8 А.

На рис. 8 показано изменение продольной компоненты магнитной индукции в центральной плоскости линзы при ее вращении, полученное при измерении прибором РШ1-10 с ценой деления 0.1 мТл и прибором на основе датчика Холла ПХЭ605118В с чувствительностью лучше 0.01 мТл для тока 8 А. Чувствительность РШ1-10 оказалась недостаточной, изменения магнитной индукции при вращении линзы не были зафиксированы. Прибор на основе датчика Холла ПХЭ605118В позволил зафиксировать вариации индукции в пределах 0.1 мТл. Это соответствует рассогласо-

ванию магнитной и геометрической осей линзы не более 0.06 мм, что находится в пределах допустимого значения.

Следует отметить, что помимо таких факторов, как точность изготовления, неоднородность магнитных свойств материала, локальная остаточная намагниченность ярма линзы, вклад в наблюдаемую вариацию индукции магнитного поля могут давать и другие факторы, в частности, перемещение подводящих проводов при вращении линзы, а также температурный дрейф датчика Холла в течение измерений. Полученная оценка,

таким образом, является оценкой сверху, ее величина позволяет использовать геометрический центр линзы для ее юстировки при установке на ось пучка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана соленоидальная линза, характеристики которой соответствуют требованиям ее применения в экспериментах по сверхбыстрой электронной дифракции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ищенко А.А., Асеев С.А., Баграташвили В.Н., Панченко В.Я., Рябов Е.А.* // УФН. 2014. Т. 184. № 7. С. 681. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0184.201407a.0681>
2. *Renkai Li, Wenhui Huang, Yingchao Du, Lixin Yan, Qiang Du, Jiaru Shi, Jianfei Hua, Huaibi Chen, Taibin Du, Haisheng Xu, Xianhai Lu and Chuanxiang Tang* // Proc. IPAC. 10. P. 229. 2010. <https://accelconf.web.cern.ch/IPAC10/papers/mopea066.pdf> https://spms.kek.jp/pls/ip-ac2010/toc.right_frame?p_session_id=MOPEA
3. *Sciaini G., Dwayne Miller R.J.* // Rep. Prog. Phys. 72011. V. 4. P. 096101. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/74/9/096101>
4. *Weathersby S.P., Brown G., Centurion M., Chase T.F., Coffee R., Corbett J., Eichner J.P., Frisch J.C., Fry A.R., Gühr M., Hartmann N., Hast C., Hettel R., Jobe R.K., Jongewaard E.N. et al.* // Rev. Sci. Instrum. 2015. V. 86. P. 073702. <https://doi.org/10.1063/1.4926994>
5. *Kourkafas G., Kamps T., Panofski E.* Considerations of an Ultrafast Electron Diffraction experiment at HZB. Ultrafast Beams and Applications workshop. Yerevan, Armenia, 04.07.2017. <http://candle.am/wp-content/uploads/2017/02/10.20-G.-Kourkafas.pdf>
6. *El-Kareh A.B., El-Kareh J.C.* Electron beam, lenses, and optics. V. 1. U.S.A., Academic Press, 1970.
7. *Halbach K., Holsinger R.F.* // Part. Ace. 1976. V. 7. P. 213. <http://cds.cern.ch/record/700607>