
ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 537.613
DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-1-60-68

МНОГОПОЛЮСНЫЕ НЕОДИМОВЫЕ МАГНИТЫ ДЛЯ ИСТОЧНИКА ПОЛЯРИЗОВАННЫХ АТОМОВ

К. А. ИВШИН¹, А. А. ВАСИЛЬЕВ¹, М. Е. ВЗНУЗДАЕВ¹,
С. С. КИСЕЛЕВ², П. А. КРАВЦОВ¹, А. Н. СОЛОВЬЕВ¹, И. Н. СОЛОВЬЕВ¹,
В. А. ТРОФИМОВ¹, Р. ЭНГЕЛЬС³

¹НИЦ „Курчатовский институт“ — Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова,
188300, Гатчина, Россия, E-mail: pkravt@gmail.com

²Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия

³Институт ядерной физики Исследовательского центра Юлих, 52425, Юлих, Германия

Рассматривается возможность построения градиентных магнитов из NdFeB-серийных дипольных магнитов для источников поляризованных атомов. Для квадрупольного и секступольного магнитов определена радиальная составляющая магнитного поля в средней плоскости магнита и на линии, параллельной оси магнита. Проведен сравнительный анализ результатов расчетов магнитного поля, выполненных в программе COMSOL MultiPhysics, с экспериментальными данными. Продемонстрирована возможность построения градиентных магнитных систем различной полюсности с использованием компьютерной программы для их 3D-моделирования.

Ключевые слова: магнитные системы, источники поляризованных атомов, квадрупольные магниты, секступольные магниты, 3D-моделирование магнитных систем.

Введение. Принцип получения поляризованных пучков водорода или дейтерия основан на выборе из атомарного пучка, движущегося в вакууме, атомов только в одном из состояний сверхтонкого расщепления уровней во внешнем магнитном поле [1—3]. Для водорода это выбор из четырех состояний, для дейтерия — из шести. Атомарные водород и дейтерий являются электрически нейтральными объектами. Для изменения траекторий таких атомов используются градиентные магнитные поля. При этом сила, действующая на атом, определяется магнитным моментом атома, умноженным на величину градиента магнитного поля. Так как магнитный момент атома в основном формируется магнитным моментом электрона, то изменение траекторий атомов во внешнем градиентном магнитном поле определяется, прежде всего, спином электрона. Достижение определенного состояния атомов в атомарном пучке обеспечивается комбинацией магнитных систем с блоками переходов между различными состояниями сверхтонкого расщепления. Интенсивность и степень поляризации атомарного пучка определяются качеством магнитной системы [4].

Традиционно магнитные системы строятся на основе квадрупольных и секступольных магнитов [5]. Постоянные многополюсные магниты создаются из набора сегментов, намагниченных определенным образом: см. рис. 1, где представлено изображение 24-сегментного

секступольного магнита, стрелки показывают направление намагниченности сегментов. Такой принцип позволяет получать высокие (до 1,7—1,8 Тл) магнитные поля на внутренней поверхности магнитов при магнитной индукции сегментов 1,2—1,3 Тл [6]. Производство такого типа магнитов — чрезвычайно дорогой и трудоемкий процесс.

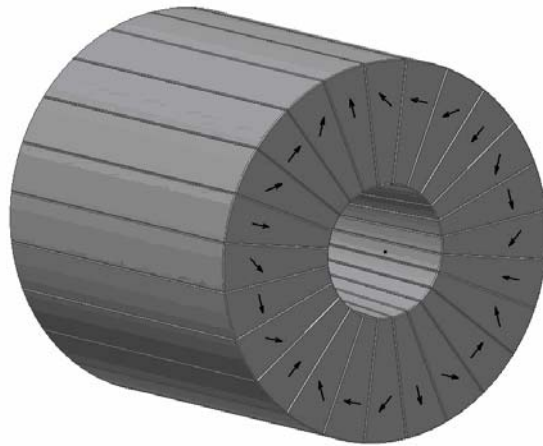


Рис. 1

В настоящей статье описывается процесс разработки и создания многополюсных магнитов из коммерческих неодимовых дипольных магнитов. Принцип построения шестипольного магнита из кубических диполей продемонстрирован на рис. 2.

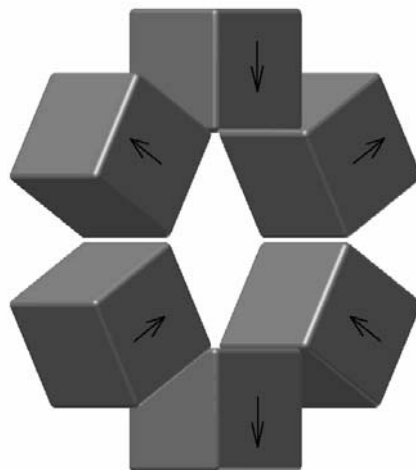


Рис. 2

Постоянные магниты на основе сплава $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ с тетрагональной кристаллической структурой обладают значительно большей магнитной индукцией, чем другие известные (например, ферритовые Fe-Ba или Fe-Sr) магниты, которая составляет 1,15—1,45 Тл (теоретический предел около 1,6 Тл). NdFeB-магниты значительно превосходят по устойчивости к размагничиванию магниты типа AlNiCo. Деградация магнитных свойств неодимовых магнитов во времени составляет около 2 % за 5 лет. Естественно, многополюсные магниты, построенные из магнитных диполей, имеют меньшее поле на внутренней поверхности, чем сегментированные. Однако благодаря простоте изготовления и существенно меньшей стоимости можно создавать не менее эффективные магнитные системы, наращивая длину магнитной системы, оптимизируя внутренние диаметры магнитов и варьируя количество полюсов магнитов вдоль магнитной системы.

В ходе исследований была поставлена задача изготовить опытные образцы квадрупольного и секступольного магнитов, построенных из дипольных магнитов кубической формы, измерить распределение магнитных полей и сравнить полученные результаты с расчетом, выполненным с помощью программы COMSOL MultiPhysics [7].

Измерение высокоградиентного магнитного поля. Методика измерения распределения магнитного поля в многополюсных магнитах описана в работе [8]. Для измерения радиальной составляющей магнитного поля используется датчик Холла, расположенный на оси держателя, изготовленного из немагнитного материала (см. рис. 3). Держатель фиксируется на шпинделе фрезерного станка в определенном положении. Сам магнит располагается на поворотном столе. Такая структура позволяет перемещать магнит относительно датчика Холла по трем координатам X , Y , Z и поворачивать его. Точность позиционирования составляет $\pm 0,1$ мм по всем осям и $\pm 0,5^\circ$ по углу φ .

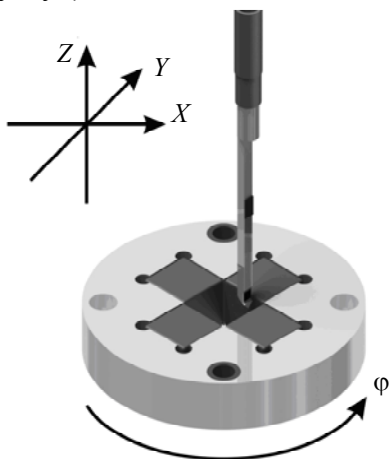


Рис. 3

Датчик Холла имеет чувствительную область $2 \times 0,5 \times 0,01$ мм и откалиброван методом ядерного магнитного резонанса. Суммарная погрешность измерения магнитного поля с учетом погрешностей калибровки составляет менее 1 %. Сравнение с расчетными данными проводилось по результатам следующих измерений:

— измерение радиальной составляющей магнитного поля при радиусе (r), близком к внутреннему радиусу проходного отверстия магнита, в зависимости от угла поворота магнита (шаг угла 2°);

— измерение радиальной составляющей магнитного поля при фиксированном радиусе, близком к внутреннему радиусу магнита, в зависимости от координаты Z вдоль оси магнита.

Квадрупольный магнит. Для построения квадрупольного магнита (рис. 4) использовались кубические дипольные магниты размером $20 \times 20 \times 20$ мм, изготовленные из материала N38 (магнитная индукция 1,22—1,25 Тл). В средней плоскости магнита при $r = 9$ мм ($r_{\max} = 10$ мм) были выполнены измерения радиальной составляющей магнитного поля (B) по всей окружности с шагом 2° . Результаты измерений и расчета в программе COMSOL MultiPhysics, представленные на рис. 5, а, позволяют сделать вывод о хорошем соответствии расчетных и экспериментальных данных с небольшим систематическим занижением величины B в области полюсов.

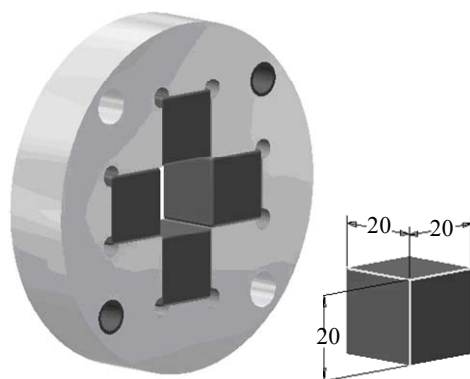


Рис. 4

Магнитное поле в области полюсов имеет только радиальную составляющую. По результатам измерений можно сделать вывод об одинаковой намагниченности полюсов и, следовательно, о совпадении геометрической оси магнита с магнитной осью. Расчеты в программе COMSOL MultiPhysics совпали с экспериментальными данными при выборе намагниченности диполей 1,25 Тл, что соответствует верхней границе паспортных данных на материал N38.

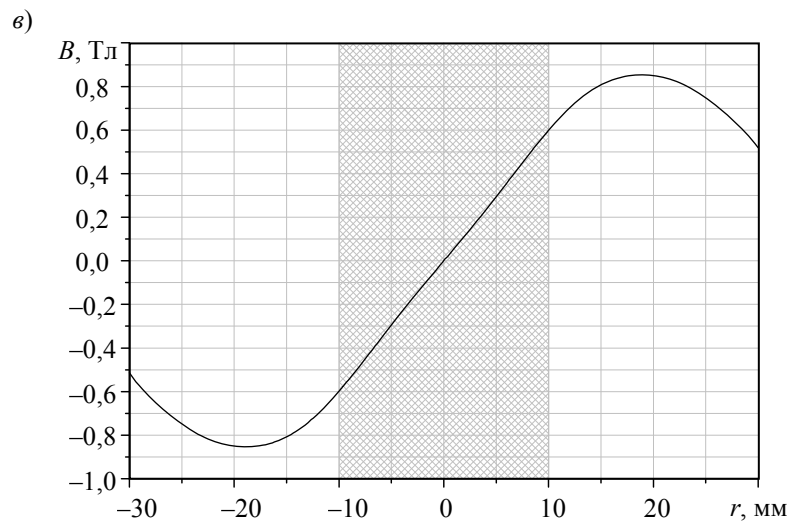
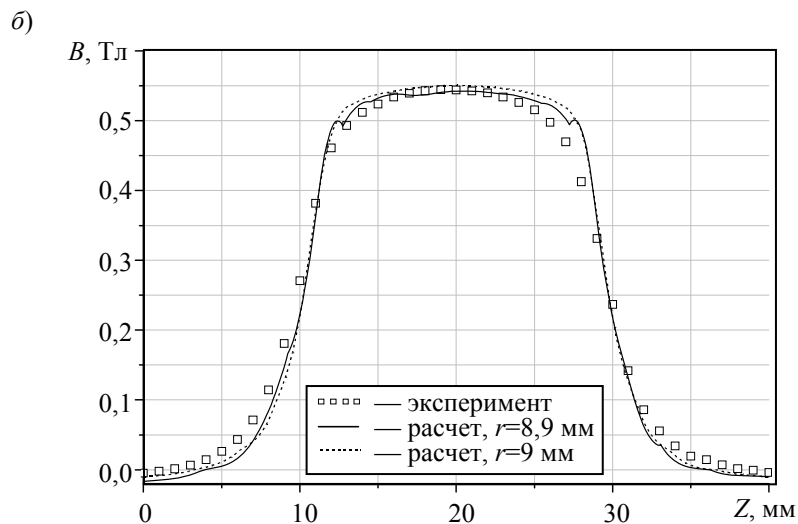
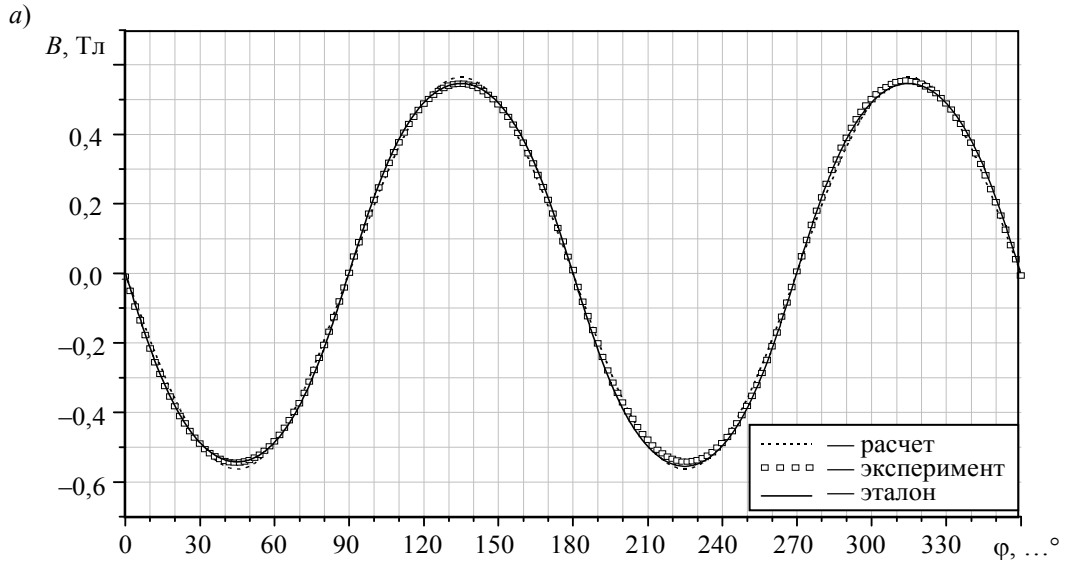


Рис. 5

Измеренное значение магнитного поля распределено по правильному синусоидальному закону. Для идеальных квадрупольных используется формула

$$B = B_0 \frac{r}{r_0} \sin(2\varphi + \varphi_0),$$

где B_0 — поле на внутренней поверхности магнита, r_0 — внутренний радиус магнита, φ_0 — начальная фаза, r и φ — полярные координаты.

При аппроксимации экспериментальных данных с вариационными параметрами B_0 и φ_0 при $r_0 = 10$ мм и $r = 9$ мм получаем $B_0 = 0,626 \pm 0,005$ Тл и $\varphi_0 = 180 \pm 1^\circ$.

На рис. 5, б представлена зависимость радиальной составляющей магнитного поля при $r = 9$ мм на одном из полюсов вдоль оси Z . Сравнение результатов измерений с расчетной зависимостью при $r = 9$ мм показывает существенное расхождение, а при $r = 8,9$ мм расчетная зависимость демонстрирует лучшее совпадение с экспериментом. Такой анализ может быть полезен для методики точного определения как внутреннего радиуса магнита, так и радиуса, при котором измеряется магнитное поле.

Сравнительный анализ экспериментальных данных с результатами моделирования магнитного поля в программе COMSOL MultiPhysics демонстрирует хорошее их совпадение, что позволяет моделировать большие магнитные системы, используя в качестве начальных данных свойства магнитных диполей.

Для изменения траекторий атомов водорода и дейтерия требуется градиент магнитного поля. На рис. 5, в приведена расчетная зависимость магнитного поля от радиуса в средней плоскости магнита. Начало координат соответствует центру магнита, внутренняя часть магнита расположена в области от -10 до $+10$ мм, где магнитное поле практически линейно, что соответствует идеальному квадруполью. Таким образом, создан квадрупольный магнит с проходным отверстием 20×20 мм и градиентом магнитного поля 60 Тл/м.

Секступольный магнит. Для построения секступольного магнита (рис. 6) использовались кубические дипольные магниты размером $10 \times 10 \times 10$ мм, изготовленные из материала N38 (магнитная индукция $1,22$ — $1,25$ Тл). В средней плоскости магнита при $r = 8$ мм ($r_{\max} = 8,6$ мм) были выполнены измерения радиальной составляющей магнитного поля по всей окружности с шагом 2° .

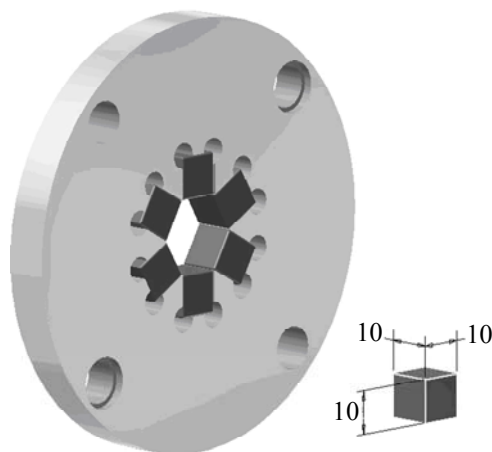


Рис. 6

Результаты измерений и расчета в программе COMSOL MultiPhysics, представленные на рис. 7, а, позволяют сделать вывод о хорошем соответствии расчетных и экспериментальных данных с небольшим систематическим занижением величины B в области полюсов. Магнитное поле в области полюсов совпадает с радиальной составляющей. Некоторое несоответствие расчетных и измеренных величин может быть вызвано разбросом намагниченности полюсов или их геометрическим положением.

Измеренное значение магнитного поля распределено по правильному синусоидальному закону. Для идеальных секступольных магнитов используется формула

$$B = B_0 \frac{r^2}{r_0^2} \sin(3\varphi + \varphi_0).$$

При аппроксимации экспериментальных данных с вариационными параметрами B_0 и φ_0 при $r_0 = 8,6$ мм и $r = 8$ мм получаем $B_0 = 0,55 \pm 0,01$ Тл и $\varphi_0 = 180 \pm 1^\circ$.

На рис. 7, б) приведена расчетная зависимость магнитного поля как функция радиуса в средней плоскости магнита. Начало координат соответствует центру магнита, внутренняя его часть расположена в области от $-8,6$ до $+8,6$ мм, где магнитное поле имеет параболическую зависимость, что соответствует идеальному секступолю. Таким образом, создан секступольный магнит с проходным отверстием 17,2 мм и градиентом магнитного поля у внутренней поверхности магнита 119 Тл/м.

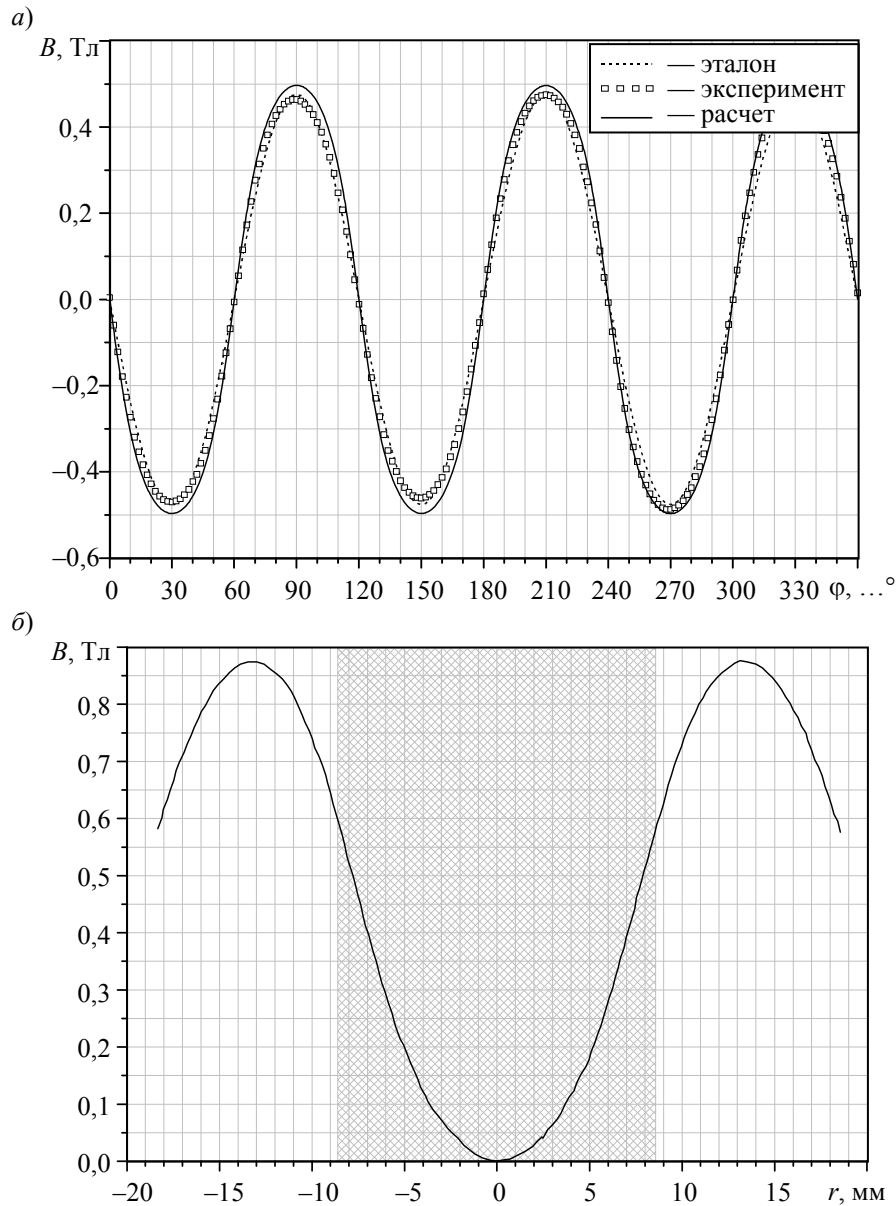


Рис. 7

Заключение. В результате исследования подтверждена возможность создания магнитных систем с высоким градиентом из серийно выпускаемых NdFeB-магнитов. Изготовлены

градиентные магниты из магнитов кубической формы с магнитной индукцией 1,2 Тл (материал N38):

- квадруполь (из кубических магнитов 20×20×20 мм);
- секступоль (из кубических магнитов 10×10×10 мм).

Результаты измерения радиальной составляющей магнитного поля в средней плоскости магнитов для различных углов показали следующее:

- разброс магнитной индукции полюсов магнита не более 2 %;
- расхождение магнитной и геометрической осей магнита не более 0,2 мм.

Сравнительный анализ результатов угловых измерений радиальной составляющей магнитного поля и измерений при движении датчика Холла параллельно оси магнита с результатами моделирования в программе COMSOL MultiPhysics показал хорошее их совпадение. Это позволяет использовать расчеты в программе COMSOL MultiPhysics для моделирования всей магнитной системы и отказаться от трудоемких измерений магнитного поля.

Градиент магнитного поля у квадрупольного и секступольного магнитов в 2—2,5 раза ниже, чем у многосегментных магнитов из аналогичного материала. Следовательно, для обеспечения сравнимой селективности в поляризованном источнике требуется более чем вдвое большая длина магнитной системы. При наличии достаточного пространства в экспериментальной установке использование многополюсных магнитов, построенных из стандартных диполей, становится оправданным благодаря низкой стоимости и простоте производства.

Статья подготовлена по результатам работы, выполненной в рамках эксперимента PolFusion при поддержке Российского научного фонда (проект № 14-12-01056).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ramsey N. F. Molecular Beams. Oxford, UK: Oxford University Press, 1956.
2. Dunham J. S., Galovich C. S., Glavish H. F., Hanna S. S., Mavis D. G., Wissink S. W. Polarized gas jet targets // Nuclear Instruments & Methods. 1984. Vol. 219. P. 46.
3. Krämer D. et al. The source of polarized heavy ions (PSI) at the Heidelberg MP tandem // Nuclear Instruments & Methods. 1984. Vol. 220. P. 123.
4. Mikirtychyants M. et al. The polarized H and D atomic beam source for ANKE at COSY-Jülich // Nuclear Instruments & Methods. 2013. A. Vol. 721 P. 83—98.
5. Halbach K. Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material // Nuclear Instruments & Methods. 1980. Vol. 169. P. 1.
6. Vasiliev A. et al. 24th segment high field permanent sextupole magnets // Rev. of Scientific Instruments. 2000. Vol. 71. P. 9.
7. COMSOL [Электронный ресурс]: <<http://www.comsol.com>>.
8. Измерение магнитных полей в многополюсных магнитах с большим градиентом / А. А. Васильев, П. А. Кравцов, В. А. Трофимов. Гатчина, 2007. (Препринт / ПИЯФ № 2720).

Сведения об авторах

- Кузьма Александрович Ившин** — НИЦ „Курчатовский институт“ — ПИЯФ им. Б. П. Константинова; мл. научный сотрудник; E-mail: kuzmaivshin@gmail.com
- Александр Анатольевич Васильев** — канд. физ-мат. наук; НИЦ „Курчатовский институт“ — ПИЯФ им. Б. П. Константинова; заведующий лабораторией; E-mail: vassilie@pnpi.spb.ru
- Марат Евгеньевич Взнуздаев** — канд. хим. наук; НИЦ „Курчатовский институт“ — ПИЯФ им. Б. П. Константинова; ст. научный сотрудник; E-mail: vznuzdaev@gmail.com
- Сергей Степанович Киселев** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО; кафедра световодной фотоники; E-mail: kss212@mail.ru

- Петр Андреевич Кравцов** — канд. физ-мат. наук; НИЦ „Курчатовский институт“ — ПИЯФ им. Б. П. Константинова; ст. научный сотрудник; E-mail: pkravt@gmail.com
- Александр Николаевич Соловьев** — НИЦ „Курчатовский институт“ — ПИЯФ им. Б. П. Константинова; стажер; E-mail: solo.alex.nik@gmail.com
- Иван Николаевич Соловьев** — НИЦ „Курчатовский институт“ — ПИЯФ им. Б. П. Константинова; стажер; E-mail: ivan.solessi@gmail.com
- Виктор Алексеевич Трофимов** — канд. физ-мат. наук; НИЦ „Курчатовский институт“ — ПИЯФ им. Б. П. Константинова; ст. научный сотрудник; E-mail: VTrofimov@gmail.com
- Ральф Энгельс** — доктор; Институт ядерной физики Исследовательского центра Юлих; ст. научный сотрудник; E-mail: r.w.engels@fz-juelich.de

Рекомендована кафедрой
световодной фотоники
Университета ИТМО

Поступила в редакцию
21.09.15 г.

Ссылка для цитирования: *Ившин К. А., Васильев А. А., Взнуздаев М. Е., Киселев С. С., Кравцов П. А., Соловьев А. Н., Соловьев И. Н., Трофимов В. А., Энгельс Р.* Многополюсные неодимовые магниты для источника поляризованных атомов // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 1. С. 60—68.

MULTIPOLE NEODYMIUM MAGNETS FOR POLARIZED ATOM SOURCE

**K. A. Ivshin¹, A. A. Vasilyev¹, M. E. Vznuzdaev¹,
S. S. Kiselev², P. A. Kravtsov¹, A. N. Soloviev¹, I. N. Soloviev¹,
V. A. Trofimov¹, R. Engels³**

¹National Research Center "Kurchatov Institute" — Petersburg Nuclear Physics Institute,
188300, Gatchina, Russia, E-mail: pkravt@gmail.com

²ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia

³Nuclear Physics Institute of the Juelich Research Center
(Institut fuer Kernphysik Forschungszentrum Juelich), 52425, Juelich, Germany

A possibility of high gradient magnets construction from the commercially available NdFeB dipole magnets for the polarized atomic beam sources is described. Radial component of the magnetic field for quadrupole and six-pole magnets is measured at the middle plane of the magnet as function of the angle and along the magnet axis. Characteristics of magnetic field of the magnets calculated using COMSOL MultiPhysics software are compared to the experimental results. The feasibility to effectively use the software for 3D-simulation of the gradient multipole magnet systems to be developed is demonstrated.

Keywords: magnet systems, polarized atomic sources, quadrupole magnets, six-pole magnets, 3D-modeling of magnet systems.

Data on authors

- Kuzma A. Ivshin** — NRC "Kurchatov Institute" — Petersburg Nuclear Physics Institute; Junior Scientist; E-mail: kuzmaivshin@gmail.com
- Alexander A. Vasilyev** — PhD; NRC "Kurchatov Institute" — Petersburg Nuclear Physics Institute; Head of the Department; E-mail: vassilie@pnpi.spb.ru
- Marat E. Vznuzdaev** — PhD; NRC "Kurchatov Institute" — Petersburg Nuclear Physics Institute; Senior Scientist; E-mail: vznuzdaev@gmail.com
- Sergey S. Kiselev** — PhD, Associate Professor; ITMO University, Department of Light-Guided Photonics; E-mail: kss212@mail.ru
- Petr A. Kravtsov** — PhD; NRC "Kurchatov Institute" — Petersburg Nuclear Physics Institute; Senior Scientist; E-mail: pkravt@gmail.com
- Aleksander N. Soloviev** — NRC "Kurchatov Institute" — Petersburg Nuclear Physics Institute; Intern; E-mail: solo.alex.nik@gmail.com
- Ivan N. Soloviev** — NRC "Kurchatov Institute" — Petersburg Nuclear Physics Institute; Intern; E-mail: ivan.solessi@gmail.com
- Victor A. Trofimov** — PhD, NRC "Kurchatov Institute" — Petersburg Nuclear Physics Institute; Senior Scientist; E-mail: VTrofimov@gmail.com
- Ralf Engels** — PhD; Nuclear Physics Institute; Senior Scientist; E-mail: r.w.engels@fz-juelich.de

For citation *Ivshin K. A., Vasilyev A. A., Vznuzdaev M. E., Kiselev S. S., Kravtsov P. A., Soloviev A. N, Soloviev I. N., Trofimov V. A., Engels R.* Multipole neodymium magnets for polarized atom source // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie*. 2016. Vol. 59, N 1. P. 60—68 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-1-60-68