

УДК 621.3.032.11

**Нераспыляемый геттер как основное средство откачки
в вакуумной камере спиралевидного ондулятора,
предназначенного для когерентного электронного охлаждения**

А. М. Семенов

В статье описаны вакуумные камеры, которые были изготовлены в ИЯФ СО РАН как компоненты ондуляторов, предназначенных, в свою очередь, для проверки возможности уменьшения энергетического разброса адронного (ионного) пучка в модернизированном ускорителе RHIC (США) путем когерентного электронного охлаждения этого пучка. Для реализации данного процесса необходимо обеспечить сверхвысокий вакуум на уровне 10^{-9} Торр, что невозможно достичь только обычной откачкой вакуумными насосами из-за низкоапертурности и протяженности указанных вакуумных камер. В данных условиях в качестве основного средства откачки остаточного газа предложено использовать нераспыляемый геттер (поглотитель), нанесенный на внутреннюю стенку камеры. Описан способ нанесения нераспыляемого в процессе работы геттера на основе системы «титан—цирконий—ванадий» с температурой активации 180—200 °С, а также приводятся экспериментальные результаты газопоглощающих свойств этого геттера.

PACS: 07.30.Kf ; 68.43.-h

Ключевые слова: вакуумная камера, нераспыляемый геттер, магнетронное распыление, коэффициент прилипания.

Введение

Спиралевидные ондуляторы необходимы для проверки основных физических принципов, лежащих в основе когерентного электронного охлаждения ионных (адронных) пучков, т.е. уменьшения их энергетического разброса. Идея этого процесса основана на электростатическом взаимодействии между электронами и адронами, которое усиливается лазером на свободных электронах (в виде ондулятора) с высоким коэффициентом усиления. Этот метод предполагается в дальнейшем использовать в работах по уменьшению энергетического разброса адронного пучка в релятивистском коллайдере тяжёлых ионов RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider), которые ведет Брукхейвенская национальная лаборатория (США) с участием ИЯФ СО РАН.

Предварительные оценки показывают, что в указанных процессах для обеспечения достаточного времени жизни пучков заряженных частиц требуется фактически сверхвакуум на уровне 10^{-9} Торр в динамическом режиме. Этого невозможно достичь только обычной откачкой вакуумными насосами из-за низкоапертурности и протяженности вакуумных камер, что связано с ограничением пространства между магнитами ондулятора. В данных условиях в качестве основного средства откачки остаточного газа предложено использовать нераспыляемый геттер (поглотитель), нанесенный на внутреннюю стенку камеры. Однако конкретное применение этого способа, особенно для достижения сверхвысокого вакуума, требует выполнение некоторых дополнительных мероприятий по напылению геттера, подбор которого (с требуемыми свойствами), естественно, представляет тоже отдельную задачу. Другими словами, в условиях ондулятора ИЭФ СО РАН необходимо было выполнить самостоятельный комплекс достаточно сложных научных и конструкторских работ для достижения в ондуляторе вышеуказанного уровня сверхвысокого вакуума.

Семенов Алексей Михайлович, научный сотрудник.
Институт ядерной физики СО РАН им. Г. И. Будкера.
Россия, 630090, Новосибирск, проспект ак. Лаврентьева, 11.
Тел. +7 (383) 329-44-83.
E-mail: A.M.Semenov@inp.nsk.su

Статья поступила в редакцию 25 июля 2016 г.

Постановка задачи

В предложенном варианте достижения сверхвысокого вакуума стенка камеры не десорбирует газ, а наоборот, поглощает его [1, 2]. В настоящее время самым эффективным геттером считается нераспыляемый геттер системы «титан—цирконий—ванадий» с температурой активации 180—200 °С [3]. Кроме того, такой геттер обладает низкими коэффициентами фотонно-, ионно- и электронно-стимулированными десорбциями по сравнению с материалами, из которых обычно изготавливают вакуумные камеры для ускорителей (медь, алюминий или нержавеющая сталь) [4—8]. Однако нераспыляемые геттеры (НЕГ) не откачивают углеводороды и инертные газы, поэтому необходимо дополнительно применять магнитоэлектрические насосы с относительно малой скоростью действия (около 75 л/с по азоту), которые необходимо расположить на расстоянии 20—30 метров друг от друга [9, 10].

Концептуальный дизайн вакуумной камеры

В ИЯФ были изготовлены вакуумные камеры из алюминиевого сплава 6063-T6 с квадратным сечением 28×28 мм и длиной порядка трех метров. Толщина стенки 1,5 мм. Специальные экраны, необходимые для обеспечения «гладкости» камер, были изготовлены из бериллиевой бронзы и установлены в сильфонах. Порты для размещения датчиков положения пучка, сильфоны и фланцы изготовлены из нержавеющей стали марки 316 LN. Для соединения алюминиевого профиля с частями из нержавеющей стали использовался биметалл (нержавеющая сталь—алюминий).

На рис. 1. представлена 3D-модель вакуумной камеры.



Рис. 1. Трехмерное изображение вакуумной камеры ондулятора.

Для обеспечения надежной адгезии покрытия к внутренней стенке вакуумной камеры применена следующая методика очистки внутренней поверхности:

- обезжиривание при помощи тщательной протирки салфетками из отбеленной бязи, смоченными бензином;

- ультразвуковая мойка для удаления механических и химических загрязнений вначале в растворителе (трихлорэтилене) при 20 °С в течение 5 минут, затем в щелочном растворе (pH = 9,7) при 60 °С в течение 10 минут, причем процесс проходил при частоте ультразвука 18—22 кГц;

- Незамедлительная последующая промывка камеры в деминерализованной воде при 60 °С в течение 20 минут для удаления остатков растворителя и щелочи;

- сушка на воздухе при 25 °С до полного высыхания.

Так как осуществить финальную очистку всей камеры после сборки из-за сильфонов не представлялось возможным, то камеры дополнительно прогревались при температуре 180 °С в течение 24 часов для выявления возможных микротечей и предварительного обезгаживания камер от загрязнений в процессе финишной сборки.

Напыление нераспыляемого геттера было осуществлено на установке магнетронного напыления в ИЯФ СО РАН [11] во внешнем соленоидальном поле, которое позволяет получать равномерные покрытия на материале основы. Катод установки напыления состоял из трех переплетенных проволочек Ti, Zr и V с толщиной 0,5 мм и степенью чистоты больше 99 %. Напыление происходило в атмосфере аргона при давлении 5×10^{-3} Торр. В процессе напыления потенциал катода был установлен на уровне –280 В относительно заземленной камеры. Ток на катоде составлял 40 мА/м. Величина внешнего соленоидального поля варьировалась в диапазоне 250—300 Гс. Для лучшей адгезии температура на камере перед напылением поддерживалась на уровне 85—90 °С, и в процессе напыления вакуумная камера нагрелась на 20—30 °С.

Результаты измерений

Определение химического состава НЕГ проводилось на станции рентгенофлуоресцентного элементного анализа «РФА-СИ» на накопительном кольце ВЭПП-3 в ИЯФ СО РАН на образцах, размещенных на торцах камеры. Станция «РФА-СИ» оснащена кремневым монохроматором (Si₍₁₁₁₎), который дает возможность выделять энергию возбуждающих квантов в диапазоне от 8 до 42 кэВ. Регистрация РФА-спектра осуществляется детектором Si(Li) (Oxford Instrument, Pentafet), позволяющим получать спектры высокого качества с хорошим энергетическим разрешением (от 135 эВ до 5,9 кэВ) и высокой скоростью счета (до 20 кГц). Химический состав напыленного НЕГ для трех камер ондуляторов показан в таблице.

Таблица

Химический состав напыленного НЕГ для трех камер

Химический состав, %	Камера # 1	Камера # 2	Камера # 3
Титан	31,5	32	31
Цирконий	16,5	18,6	19
Ванадий	52	49,4	50

Толщина покрытия h может быть оценена по формуле:

$$h = 100tID^{-1} \quad (1)$$

где h — толщина покрытия, мкм; t — время напыления, час; I — ток катода, А/м; D — диаметр вакуумной камеры, мм. В нашем случае, чтобы получить толщину пленки около 2 мкм, необходимо 17 часов непрерывного напыления.

Измерение перепада давления на краях во время инъекции водорода используется как индикатор качества активации нераспыляемого геттера. Теоретически величина перепада давлений может быть вычислена из диффузионной модели Кнудсена для одномерного потока газа вдоль камеры с сорбирующими стенками. При квазистационарных условиях, т.е. при $\partial n/\partial t \approx 0$, концентрация газа n

вдоль камеры описывается дифференциальным уравнением второго порядка:

$$u \frac{d^2n}{dz^2} - \alpha Cn = 0 \quad (2)$$

где n — концентрация газа, молекул/см³; α — коэффициент прилипания; $C = Av/4$ — идеальная быстрая откачка стенками на единицу длины, см³/(с·см); v — среднеарифметическая скорость молекул, см/с; A — площадь поверхности стенок вакуумной камеры на единицу длины (периметр), см²/см; $u = A_c D$ — проводимость вакуумной камеры на единицу длины, см⁴/сек; A_c — сечение вакуумной камеры, см²; D — коэффициент Кнудсена, см²/с.

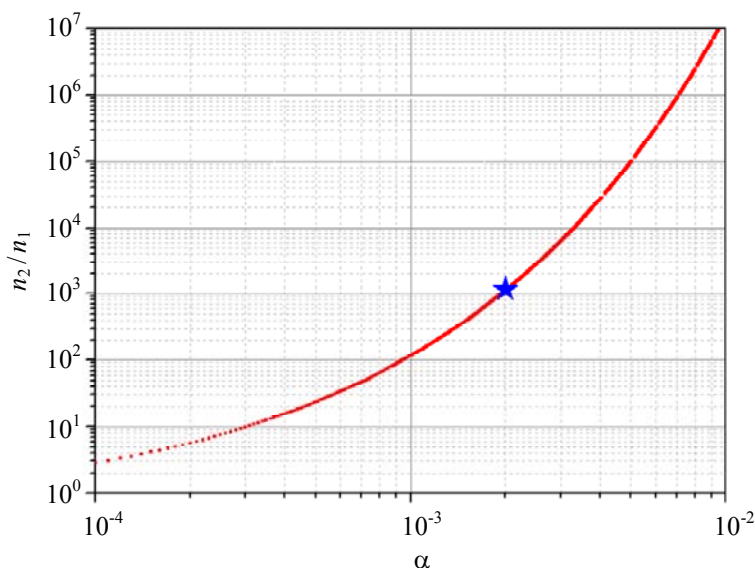


Рис. 2. Перепад давления на краях n_2/n_1 как функция коэффициента прилипания по водороду α . Кривая линия — расчет; звездочка — эксперимент.

Уравнение (2) применимо при условии, что длина камеры L много больше, чем характеристический размер f , а коэффициент прилипания α меньше отношения f/L . Решение дифференциального уравнения для перепада концентраций на краях камеры имеет следующий вид:

$$\frac{n_2}{n_1} = \cosh \left[L \cdot \sqrt{\frac{\alpha C}{u}} \right]. \quad (3)$$

Отношение давлений на краях камеры в зависимости от коэффициента прилипания показано

на рис. 2. Для «свежей» напыленной пленки НЕГ коэффициент прилипания по водороду равен $(2-3) \times 10^{-2}$, после вскрытия камеры на воздух с последующей активацией геттера $\alpha = (0,3-1) \times 10^{-2}$. Соответствующий перепад давлений (см. рис. 2) в идеале (т.е. для «свежей» НЕГ) должен был бы достигать величины более 10^7 . Однако точно измерить такую величину практически невозможно. Это связано с высокой чистотой напускаемого газа (водорода), а также с углеводородами (метан и др.), создаваемыми датчиками измерения давления, которые не откачиваются геттером. В реальности измеренная величина коэффициента прили-

пания по водороду оказалась равной 2×10^{-3} , т.е. практическая скорость откачки геттера по водороду достигает $8,8 \times 10^{-2}$ л/(с·см²).

Заключение

В работе представлен концептуальный дизайн вакуумной камеры спиралевидного ондулятора для когерентного электронного охлаждения с нанесенным нераспыляемым геттером на внутреннюю стенку камеры. Результаты проведенных исследований и богатый мировой опыт по использованию нераспыляемых геттеров показывают возможность применения НЕГ как основного средства откачки в протяженных узкоапертурных камерах в ускорительно-накопительных комплексах. При этом скорость откачки по водороду всей вакуумной камеры можно ожидать порядка трех тысяч литров в секунду.

В настоящее время описанные вакуумные камеры уже поставлены вместе со спиралевидными ондуляторами в Брукхейвенскую национальную лабораторию, где проводятся эксперименты, связанные с проверкой основных физических принципов когерентного электронного охлаждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Benvenuti C. / Proc. Sixth European Particle Accelerator Conference (Stockholm, 1998), pp. 200–204.
2. Benvenuti C., Chiggiato P., Cicoira F., and Aminot Y. L. // J. Vac. Sci. Technol. A. 1998. Vol. 16. No. 1. P. 148.
3. Benvenuti C., Escudeiro Santana A., Ruzinov V. // Vacuum. 2001. Vol. 60. P. 279.
4. Hedlund E., Malyshev O.B., Westerberg L., Krasnov A. A., Semenov A. M., Leandersson M., Zajec B., Kollmus H., Bellachiotto M. C., Bender M., Krämer A., and Reich-Sprenger H. // J. Vac. Sci. Technol. A. 2009. Vol. 7. No. 1. P. 139.
5. Mahner E., Hansen J., Kuchler D., Malabaila M., and Taborelli M. // Physical Review of Special Topics – Accelerators and Beams. 2005. Vol. 8. P. 053201.
6. Anashin V. V., Collins I. R., Dostovalov R. V., Fedorov N. V., Krasnov A. A., Malyshev O. B., Ruzinov V. L. // Vacuum. 2004. Vol. 75. P. 155.
7. Suetsugu Y., Kanazawa K., Shibata K., Hisamatsu H., Oide K., Takasaki F., Dostovalov R. V., Krasnov A. A., Zolotarev K. V., Konstantinov E. S., Chernov V. A., Bondar A. E., Shmakov A. N. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. 2005. Vol. 554. Issues 1-3. P. 92.
8. Ota N., Kanazawa K., Kobayashi M., Ishimaru H. // Vac. Sci. Technol. A. 1996. Vol. 14. No. 4.
9. Al-Dmour E., Einfeld D., Pasquaud J., Quispe M., Ahlbäck J., Fernandes Tavares P., Grabski M. / Proc. of Second International Particle Accelerator Conference, (San Sebastián, 2011), pp. 1551–1553.
10. Abakumova E., Anashin V., Balewski K., Boespflug R., Gusev G., Levichev E., Krasnov A., Kuzminykh V., Nagorny B., Pupkov Yu., Semenov A., Smaluk V., Tischer M., Wedekind H.-P., Zapfe K., Zhukov A., Zolotarev K. // Vacuum. 2012. Vol. 86. P. 822.
11. Анашин В. В., Жуков А. А., Краснов А. А., Семенов А. М. // ПТЭ. 2009. № 6. С. 127.

NEG as the main pumpdown facility in a chamber of a helical undulator for coherent electron cooling

A. M. Semenov

Budker Institute of Nuclear Physics (BINP)
11 Lavrent'ev av., Novosibirsk, 630090, Russia
E-mail: A.M.Semenov@inp.nsk.su

Received July 25, 2016

In present paper, the chambers were described which were produced in BINP SB RAS and placed into undulators for possibility checkup of Coherent electron Cooling application in updated RHIC (BNL, USA). One of the way for ultra-high vacuum obtaining is NEG sputtered film application in the narrow extensive chambers. The experimental results of NEG gettering characteristics are also presented here.

PACS: 07.30.Kf ; 68.43.-h

Keywords: vacuum chamber, NEG, magnetron sputtering, sticking factor.

REFERENCES

1. C. Benvenuti, in *Proc. Sixth European Particle Accelerator Conference* (Stockholm, 1998), pp. 200–204.
2. C. Benvenuti, P. Chiggiato, F. Cicoira, and Y. L. Aminot, *J. Vac. Sci. Technol. A*, **16**, 148 (1998).
3. C. Benvenuti, A. Escudeiro Santana, and V. Ruzinov, *Vacuum* **60**, 279 (2001).
4. E. Hedlund, O. B. Malyshev, L. Westerberg, A. A. Krasnov, A. M. Semenov, M. Leandersson, B. Zajec, H. Kollmus, M. C. Bellachioma, M. Bender, A. Krämer, and H. Reich-Sprenger, *J. Vac. Sci. Technol. A*, **7**, 139 (2009).
5. E. Mahner, J. Hansen, D. Kuchler, M. Malabaila, and M. Taborelli, *Physical Review of Special Topics – Accelerators and Beams* **8**, 053201 (2005).
6. V. V. Anashin, I. R. Collins, R. V. Dostovalov, N. V. Fedorov, A. A. Krasnov, O. B. Malyshev, and V. L. Ruzinov, *Vacuum* **75**, 155 (2004).
7. Y. Suetsugu, K. Kanazawa, K. Shibata, H. Hisamatsu, K. Oide, F. Takasaki, R. V. Dostovalov, A. A. Krasnov, K. V. Zolotarev, E. S. Konstantinov, V. A. Chernov, A. E. Bondar, and A. N. Shmakov, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* **554**, 92–113 (2005).
8. N. Ota, K. Kanazawa, M. Kobayashi, and H. Ishimaru, *J. Vac. Sci. Technol. A*, **14** (4), (1996).
9. E. Al-Dmour, D. Einfeld, J. Pasquaud, M. Quispe, J. Ahlbäck, P. Fernandes Tavares, and M. Grabski, in *Proc. of Second International Particle Accelerator Conference*, (San Sebastián, 2011), pp. 1551–1553.
10. E. Abakumova, V. Anashin, K. Balewski, R. Boespflug, G. Gusev, E. Levichev, A. Krasnov, V. Kuzminykh, B. Nagorny, Yu. Pupkov, A. Semenov, V. Smaluk, M. Tischer, H.-P. Wedekind, K. Zapfe, A. Zhukov, and K. Zolotarev, *Vacuum* **86**, 822 (2012).
11. V. V. Anashin, A. A. Krasnov, A. M. Semenov, and A. A. Zhukov, *Instruments and Experimental Techniques* **52** (6), 882 (2009).