

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИРОВАННОГО БЕРИЛЛИЯ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ФАКТОРОВ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

В.С. Сизенев, И.Л. Струля*, А.В. Григорьевский*, В.М. Просвириков*,
В.Я. Менделеев*, С.Н. Сквородько ***

**ОАО «Композит», Королев, Россия;*

***ИВТ РАН, Россия*

Представлены результаты экспериментального исследования оптических характеристик, а также шероховатости поверхности образцов полированного бериллия до и после воздействия факторов космического пространства (электроны - 40 кэВ, $\Phi_e=3.7 \cdot 10^{16}$ эл./см², протоны - 20 кэВ, $\Phi_p=2.8 \cdot 10^{16}$ прот./см²). Исследования проводились на образцах, отличающихся размерами зерна, химическим составом и способом деформирования.

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных направлений применения бериллия в настоящее время остается металлооптика. Бериллий может применяться в металлооптике не только как материал силового корпуса, но и как отражающий материал. Согласно литературным [1-4] и полученным в ОАО "Композит" данным применение бериллия в ряде случаев позволяет существенно повысить характеристики оптических зеркал по сравнению с изделиями из традиционных оптических материалов, таких как ситалл и плавленный кварц. В частности, весьма перспективными являются сканирующие зеркала из бериллия для аппаратуры, работающей в ИК-области спектра.

Одна из основных проблем, с которой сталкиваются конструкторы и производители металлооптики, - получение качественной оптической поверхности непосредственно на бериллии. Существует целый ряд задач, где можно использовать зеркала из бериллия для работы как в диапазоне ультрафиолетового ($\lambda \leq 300$ нм), так и видимого ($\lambda = 380 \dots 760$ нм) излучений. Поскольку бериллий имеет в этих диапазонах низкий коэффициент зеркального отражения ($K_{ЗО} \leq 45 \dots 50\%$), на его поверхность наносят отражающие покрытия из других материалов: Al, Ag, Au, имеющих высокий КЗО в этих диапазонах. Однако недостаточное качество полируемой поверхности ($R_z \geq 300 \text{ \AA}$) не позволяет наносить отражающее покрытие непосредственно на бериллий, поэтому для получения полированной поверхности высокого класса используется слой другого, хорошо полируемого материала (специальное стекло, медь, никель, бронза), который наносится на бериллий в качестве конструкционного покрытия. Но помимо того, что нанесение этих конструкционных покрытий достаточно трудоемкий и дорогой процесс, полученная конструкция зеркала с разнородными материалами становится нестабильной при различных тепловых воздействиях, т. е. зеркало

теряет первоначальную форму при изменении температуры. Особенно это становится заметным для зеркал диаметром более 500 мм, поэтому уход от конструкционных покрытий и формирование оптической поверхности непосредственно на бериллии является перспективным направлением для конструкций зеркал, работающих в условиях перепада температур.

Кроме использования бериллиевых зеркал для работы в диапазоне коротких длин волн ($\lambda \leq 300 \dots 760$ нм) весьма перспективным является их применение в инфракрасном диапазоне ($\lambda = 2.0 \dots 12.0$ мкм): это зеркала приборов для дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) из космоса, а также зеркала силовой лазерной оптики. Здесь также желательно уйти от конструкционного покрытия, поскольку оптические элементы ИК-систем ДЗЗ могут работать в условиях глубокого захлаживания (190...240 К), а у силовых зеркал нагрузка может достигать 100 кВт/см².

Перспективность использования бериллия в оптике подтверждается тем, что Национальное аэрокосмическое агентство США (НАСА) в 2003 г. приступило к работам по изготовлению космического телескопа James Webb (JWST), в котором главное зеркало диаметром 6.5 м, состоящее из 18 сегментов, будет изготовлено из бериллия. Для изготовления сегментов фирма Brush Wellman использует специально разработанный оптический сорт бериллия марки 0-30. Ориентировочная стоимость бериллиевой части проекта составляет 18 млн дол. США. Вывод телескопа на орбиту планируется в 2010 г.

2. ХАРАКТЕРИСТИКА ИСХОДНЫХ ОБРАЗЦОВ

В качестве исходного материала для исследований были выбраны промышленно выпускаемые сорта металлокерамического бериллия: ДВ-30 и ТВ-30. В табл. 1 и 2 приведены химический состав, плотность и краткая

характеристика исходных образцов для проведения исследований.

Таблица 1

Химический состав и плотность полуфабрикатов из порошков крупностью 30 мкм

Тип полуфабриката	Содержание элементов, мас. %									Плотность, г/см ³
	Be	Si	Fe	Al	C	BeO	Σ(Cu, Ni, Mn, Mg)	Cr	Ti	
ДВ-30	98.7	0.013	0.028	0.006	0.07	1.81	1.3	-	-	1.85
ТВ-30	98.13	-	0.12	0.015	0.06	2.37	0.026	-	0.021	1.855

Таблица 2

Марки бериллия, использованные при исследованиях полируемости

Марка бериллия	Характеристика материала	Количество образцов
ДВ-30	Бериллий дистиллированный, выдавленный из горячепрессованной заготовки. Размер частиц прессуемого порошка < 30 мкм	2
ТВ-30	Бериллий технический, выдавленный из горячепрессованной заготовки. Размер частиц прессуемого порошка < 30 мкм	2

Исследованиями различных сортов бериллия, в том числе производства США (сорта S-65 и J-220), установлено, что для улучшения полируемости поликристаллического бериллия необходимо уменьшать в порошке содержание окиси и получать материал с микроструктурой, имеющей минимальный разброс в размере зерен. Также решающее значение имеет уменьшение

микропористости, которое связано в первую очередь с режимами дегазации в процессе компактирования порошков бериллия [7, 8].

С учетом изложенных рекомендаций изготовлены образцы материала с улучшенными характеристиками (основные характеристики приведены в табл. 3 и 4).

Таблица 3

Физико-химические свойства исходного порошка

Гранулометрический состав, мас. %						Удельная поверхн., м ² /г	Насып. вес, г/см ³	Вес утряс., г/см ³
5...10 мкм	10...20 мкм	20...30 мкм	30...40 мкм	40...50 мкм	60...80 мкм			
2.3	17.5	24.3	21.2	27.7	6.8	0.23	0.68	0.97

Таблица 4

Химический состав образцов

Химический состав, мас. %										
Be	Fe	Si	Mn	Mg	Al	Ni	Cu	O ₂	Cr	C
98.84	0.13	0.013	0.009	0.007	0.012	0.014	0.006	0.89	0.025	0.05

Из исходного порошка были изготовлены образцы диаметром 50 мм, высотой 10 мм в количестве 5 штук для исследования оптических характеристик материала.

Исследования микроструктуры проводились на микроскопе Leica DM IRM. Изображения были обработаны с помощью программы SIAMS. Типичная микроструктура образца показана на рис. 1.

Как видно из результатов обработки микроструктуры образцов, значения размеров зерен в долевом и продольном направлениях практически

одинаковы: $d_{cp} = 15.9...16.2$ мкм, максимальное значение $d_{max} = 35.8...42.8$ мкм; т. е. образцы имеют равномерную структуру. На кривой распределения зерен по размерам имеется ярко выраженный максимум, соответствующий размерам 18...22 мкм (более 60%).

Таким образом, использованные технологические приемы позволили значительно уменьшить содержание окиси, сделать ее распределение более равномерным по объему и получить микроструктуру с минимальным разбросом размеров зерен.



Рис. 1. Микроструктуры образцов материала с улучшенными характеристиками: долевая (а) и поперечная (б)

3. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ИЗ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКОГО БЕРИЛЛИЯ РАЗЛИЧНЫХ МАРОК

Для исследования пригодности к прецизионной оптической обработке (полируемости) были изготовлены цилиндрические образцы диаметром 50 мм из различных марок бериллия.

Оптическая полировка, в особенности при применении металлических материалов, является сложным физико-химическим процессом. Характеристики получаемых поверхностей значительно зависят от режимов обработки, применяемых полирующих составов и инструмента, микроклимата в производственном помещении, квалификации персонала и т.п. Для исключения перечисленных факторов при исследовании полируемости бериллия различных сортов особое внимание было уделено обеспечению эквивалентных условий обработки соответствующих образцов. Для этого предварительно изготовленные детали были смонтированы на единой технологической оснастке

(планшайбе из алюминиевого сплава). Образцы располагались на двух радиусах от центра планшайбы, при этом образцы одинаковых сортов монтировались в диаметрально противоположных участках.

Шлифование образцов осуществлялось в водной среде на латуни с использованием карбид-кремниевых (КЗ) шлифовальных порошков. Требования к поверхности после шлифовки – отсутствие видимых дефектов, шероховатость ~1000 Å по параметру Rq, плоскостность – не хуже 1 мкм на диаметре 150 мм. Полировка образцов осуществлялась с использованием пекоканифольной полировочной смолы. Технология оптической полировки разрабатывалась на основе традиционных оптических технологий с учетом физико-механических и химических особенностей бериллия. После завершения процесса оптической обработки форма поверхности образцов контролировалась с использованием лазерного интерферометра на длине волны $\lambda=0.6329$ мкм (рис. 2, 3).

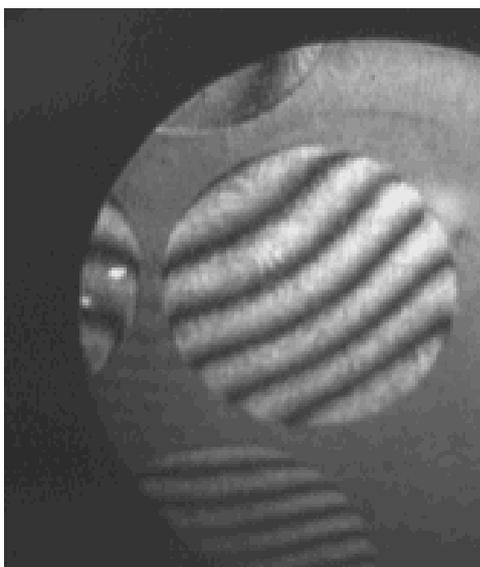


Рис. 2. Интерферограмма образцов в краевой части блока

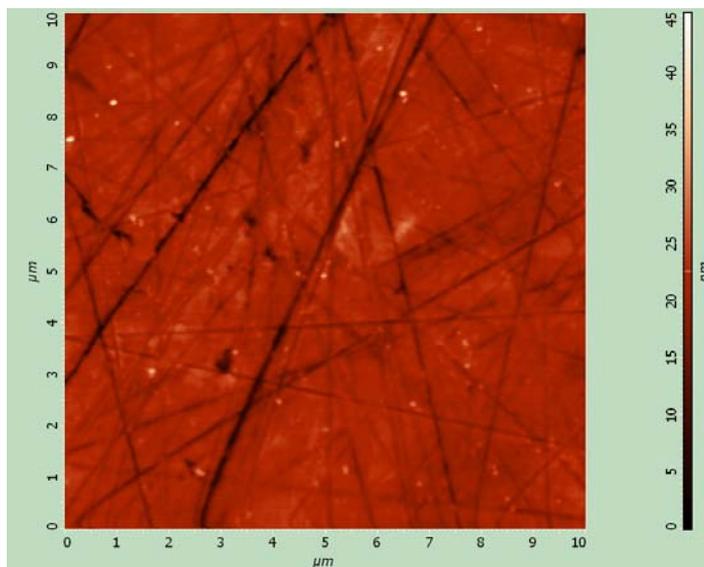


Рис. 3. Изображение полированной поверхности образца ТВ-30, полученное с помощью атомно-силового микроскопа.

4. ИССЛЕДОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОТРАЖЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ДО И ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЙ, МОДЕЛИРУЮЩИХ ФАКТОРЫ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

4.1. Измерение КЗО в диапазоне 200...900 нм

Коэффициент отражения полированных образцов в спектральном диапазоне 200 ...900 нм измерялся на двухлучевом автоматизированном спектрофо-тометре MPS-2000 фирмы “Шимадзу” с использованием многоцелевой приставки RТА-2000 с интегрирующей сферой (рис. 4). Углы падения излучения на образец составляли 15° при измерениях зеркального отражения и 0° при

Площадь сканирования 10x10 мкм

измерениях диффузного отражения. Метод измерений зеркального коэффициента отражения – абсолютный, диффузного отражения – относительный (образец сравнения - сульфат бария). Предельная погрешность измерений не превышает 0.3% при воспроизводимости результатов измерений 0.1%.

Оценка параметра σ , определяющего средне-квадратическое отклонение точек профиля от средней линии, проводилась в соответствии с соотношением [9]:

$$\sigma = (\lambda \cdot \sqrt{R_{\text{диф}}}) / 4\pi.$$

Рассчитанные значения параметра σ для длины волны 500 нм приведены в табл. 5.

Таблица 5

Значения параметра σ , рассчитанные для длины волны 500 нм

Образец	0	1	2	3	П	ДВ	ТВ
σ , нм	3.5	3.7	4.0	4.0	4.3	2.7	4.4

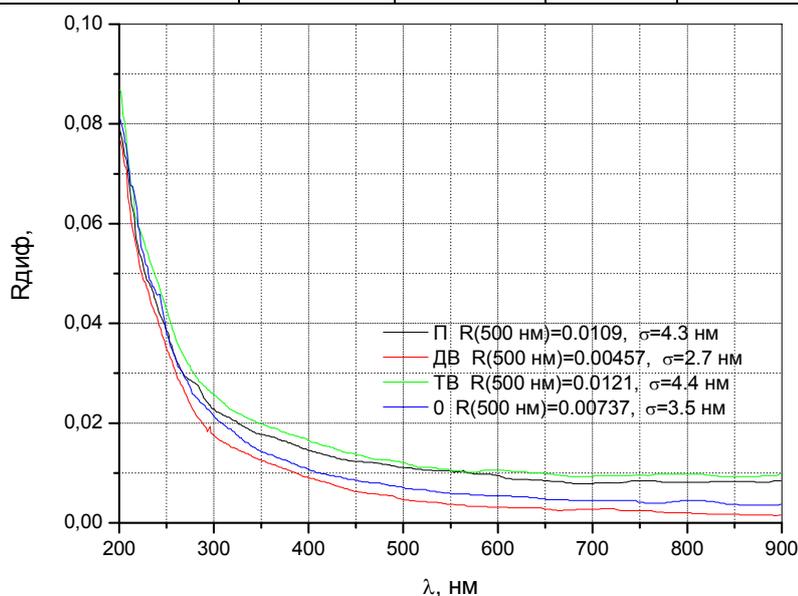


Рис. 4. Спектры коэффициентов диффузного отражения полированных образцов в интервале 200...900 нм

4.2. Измерения КЗО полированных образцов на длине волны $\lambda=10,6$ мкм и его спектральные измерения в диапазоне 2.5...12 мкм

Измерения в ИК-диапазоне 2.5...20 мкм проводились на двухлучевом ИК-спектрофотометре IR-435 фирмы “Шимадзу” с использованием приставок зеркального отражения, в которых реализуется угол падения 10° от нормали к поверхности образца (рис. 5).

Метод измерений относительный, в качестве образца сравнения использовалось алюминиевое зеркало с известным коэффициентом отражения на длине волны 10.6 мкм. Погрешность определения КЗО составляет 0.5 %.

Абсолютные значения КЗО образцов на длине волны 10.6 мкм (рассчитанные по образцу сравнения) показаны и в табл. 6.

Таблица 6

Абсолютные значения КЗО полированных образцов

Образец	1	2	3	П	ДВ	ТВ
R (10.6 мкм)	0.960	0.960	0.965	0.965	0.985	0.959

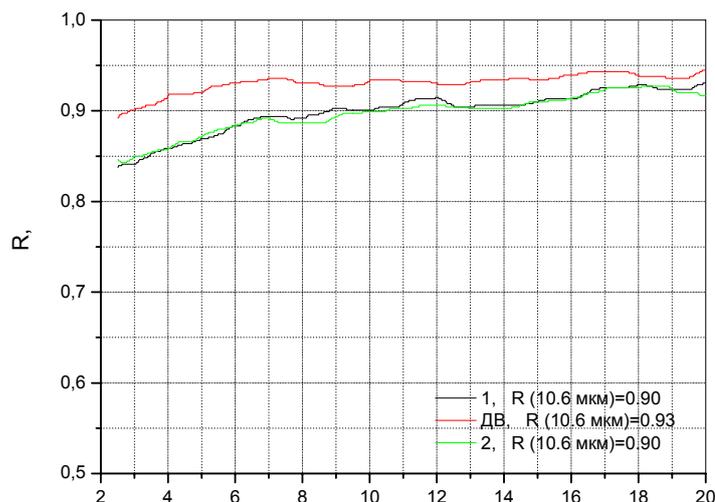


Рис. 5. ИК-спектры коэффициентов зеркального отражения полированных образцов в интервале 2.5...20 мкм

4.3. Факторы КП, воздействующие на бериллиевые образцы

Образцы бериллия подвергались комплексному воздействию ФКП со следующими параметрами облучения: электронное излучение $E_e=40$ кэВ, $\varphi_e=2.0 \cdot 10^{12}$ эл./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$; протонное излучение $E_p=20$ кэВ, $\varphi_p=2.0 \cdot 10^{12}$ прот./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$. Облучение проводилось на автоматизированном стенде УВ-1/2, предназначенном для исследования физико-

химических характеристик материалов и покрытий при комплексном воздействии ФКП [электронное и протонное излучения с энергиями заряженных частиц до 50 кэВ, электромагнитное излучение (ЭМИ) Солнца с интенсивностью до 10 ЭСО, вакуум до $1 \cdot 10^{-5}$ Па, температура $T = \pm 150$ °С] и изучения изменения их свойств для длительных сроков эксплуатации КА.

В табл. 7 приведены данные о дозовых нагрузках, полученных образцами.

Таблица 7

Величины дозовых нагрузок на образцы

Образец	$\Phi_e \times 10^{16}$, эл./ см^2	$\Phi_p \times 10^{16}$, прот./ см^2
1, край	3.35	2.12
ТВ-30, край	3.66	2.81
ДВ-30, центр	3.82	3.00
П, край	3.28	3.10
2, край	3.34	2.99

4.4. Исследование коэффициентов зеркального и диффузного отражений после воздействия ФКП

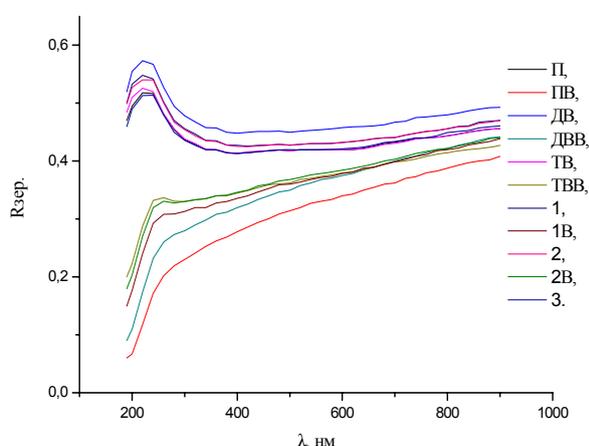


Рис. 6. Сравнение КЗО образцов бериллия до и после воздействия ФКП (последняя буква «В» в обозначениях соответствует воздействию)

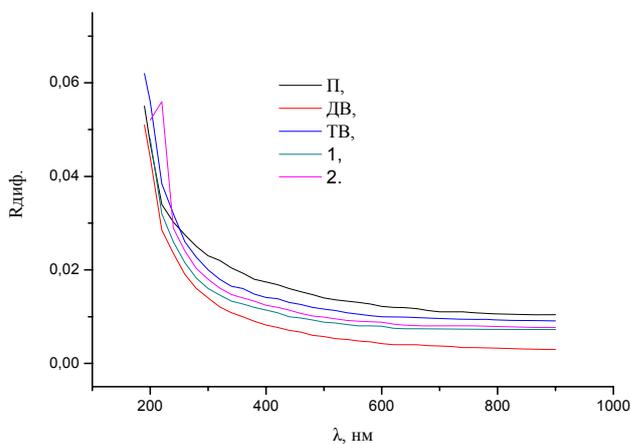


Рис. 7. Коэффициент диффузного отражения бериллиевых образцов после воздействия ФКП

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦОВ ДО И ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ФКП

Измерение параметров шероховатости поверхности образцов бериллиевых зеркал

проводилось на профилометре Talystep 2010 с размером наконечника иглы 0.1 мкм в направлении трассирования. Тип фильтра – Гауссов, базовая длина L - 80 мкм, длина трассы – 170 мкм.

Таблица 8

Параметры шероховатости до и после воздействия ФКП

Образец	До воздействия	После воздействия
ТВ-30	Ra = 1.33 нм Rq = 2.28 нм Rz = 17 нм	Ra = 1.76 нм Rq = 3.63 нм Rz = 27 нм
ДВ-30	Ra = 0.398 нм Rq = 0.788 нм Rz = 7 нм	Ra = 2.77 нм Rq = 3.35 нм Rz = 17 нм
1	Ra = 1.06 нм Rq = 2.28 нм Rz = 21 нм	Ra = 2.23 нм Rq = 3.07 нм Rz = 19 нм
2	Ra = 1.87 нм Rq = 3.21 нм Rz = 19 нм	Ra = 5.38 нм Rq = 8.9 нм Rz = 53 нм
3	Ra = 0.582 нм Rq = 1.01 нм Rz = 7 нм	Ra = 0.607 нм Rq = 0.984 нм Rz = 7 нм

6. ВЫВОДЫ

1. Качество оптической поверхности, получаемой полировкой, существенно зависит от гранулометрического состава исходного порошка, химического состава, количества окиси и наличия пористости материала. Кристаллографическая текстура оказывает значительное влияние на качество полируемой поверхности, поскольку в текстурированном материале при полировке оптическая поверхность формируется на зернах, имеющих преимущественную ориентировку, в то время как в изотропном - ориентировка зерен хаотичная.

2. Экспериментально показано, что причинами низких значений шероховатости полированной поверхности ($R_z \geq 300 \text{ \AA}$) промышленных сортов поликристаллического бериллия являются макродефекты, обусловленные выкрашиванием частиц окиси бериллия, наличием включений и остаточной пористости.

3. Экспериментально определен оптимальный фракционный состав исходного порошка для получения оптического бериллия ($10 \dots 30 \text{ мкм} > 85\%$), а также ограничения по химическому составу: содержание кислорода не более 0.7%, углерода - не более 0.08%, железа - не более 0.1%.

4. Образцы оптического бериллия, полученные по экспериментальной технологии, ТИ 932-1300-456-2007 "Оптический сорт бериллия" показали высокие значения: $R_z = 95 \dots 100 \text{ \AA}$, КЗО составил 98.4...98.5%.

5. Сравнение полученных результатов до и после воздействия ФКП показывает, что вследствие воздействия шероховатость поверхности образцов практически не изменилась, коэффициент

зеркального отражения в диапазоне длин волн 200...400 нм уменьшился с 50 до 30%, что свидетельствует об изменении характера материала после воздействия ФКП.

6. Дальнейшие работы необходимо продолжить в направлении получения полуфабрикатов из наночастиц бериллия ($d = 50 \dots 100 \text{ нм}$) с минимальным содержанием примесей, в первую очередь окиси ВеО. В исследованных случаях оптические характеристики поликристаллического бериллия зависели в основном от качества оптической поверхности (наличия макродефектов типа выкрашиваний, растратов, пористости и т.д.). В случае использования нанобериллия, видимо, уже потребуется учитывать взаимодействие электромагнитного излучения с дефектами кристаллического строения: вакансиями, блочностью структуры, дислокациями. Возможно, что для полировки нанобериллия потребуется разработка новых методик и способов полировки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mirror for James Webb Space Telescope approved. NASA and NORTPROR Grumman news Rtleases Posted; September 10. 2003.

2. Вторичное бериллиевое зеркало №1 для VLT телескопа: Обзор характеристик / Марк Кейрел. REOSC - Avenue de la tour MAURY - 91280 sain TPIERRE DUPERRAY, France.

3. Новый процесс изготовления размерно-стабильного бериллиевого зеркала / Марк Кейрел. REOSC Thomas Parsonage, Brush Weliman, Inc.

4. A. Braem, M.E. Kostrikov. *Radiation Transporent Mirrors for Rich Defect ors*: HEP Preprint 93-129. Protvino, 1993, 49 p.

5. В.С. Сизенев, Е.В. Выговский. *Бериллиевые зеркала со стеклянным покрытием для детектора RICH ускорителя LHCb*. 01. 09. 2006 г.

6. *Бериллиевые зеркала для гальванометров* // Harold Wtissmah Opticon corp., 799 middlesex turn pike. Billerica. M A 01821.

7. Б.В. Сырнев, Г.С. Рычков, В.В. Савчук, Ю.В. Шахворостов, Ф.С. Туганбаев. Влияние наноструктуры границ зерен на качество спеченного

бериллия // *Вестник ВКГТУ*. Усть-Каменогорск, 2003, №2.

8. Г.С. Рычков, Б.В. Сырнев, Т.А. Умарова. Образование микропор в металлокерамическом бериллии при термической обработке // *Вестник ВКГТУ*. Усть-Каменогорск, 2003, №3.

9. А.С. Топорец. *Оптика шероховатой поверхности*. Л.: «Машиностроение», 1988, с. 163.

Статья поступила в редакцию 12.09.2008 г.

ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОЛІРОВАНОГО БЕРИЛІЮ В УМОВАХ ВПЛИВУ ФАКТОРІВ КОСМІЧНОГО ПРОСТОРУ

*В.С. Сізенев, І.Л. Струля, А.В. Григоревський, В.М. Просвіріков,
В.Я. Менделєєв, С.Н. Сквородько*

Наведено результати експериментального дослідження оптичних характеристик, а також шорсткості поверхні зразків полірованого берилію до та після впливу факторів космічного простору (електрони – 40 кеВ, $\Phi_e=3.7 \cdot 10^{16}$ ел./см², протони – 20 кеВ, $\Phi_p=2.8 \cdot 10^{16}$ прот./см²). Дослідження проводилися на зразках, які відрізняються розмірами зерна, хімічним складом і засобом деформування.

OPTICAL PROPERTIES OF POLISHED BERYLLIUM UNDER SPACE ENVIRONMENTAL EXPOSURE CONDITIONS

*V.S. Sizenev, I.L. Strulya, A.V. Grigorevsky, V.M. Prosvirikov,
V.Ya. Mendeleyev, S.N. Skovorod'ko*

Results are reported from experimental studies of optical characteristics, and also of polished beryllium sample surface roughness before and after space environmental exposure (40 keV electrons, $F_e=3.7 \cdot 10^{16}$ el./cm², 20 keV protons, $F_p=2.8 \cdot 10^{16}$ p./cm²). The experiments were performed on samples differing in the grain size, chemical composition and the deformation technique.