

Оптические свойства металлических зеркал для CO₂ – лазеров

¹ Владимир Ефимович Рогалин

² Иван Александрович Каплунов

¹ Национальный центр лазерных систем и комплексов «Астрофизика», Российская Федерация
125424, Москва, Волоколамское ш., 95
Кандидат физико-математических наук
E-mail: v-rogalin@mail.ru

² Тверской государственный университет, Российская Федерация
170100, г. Тверь, ул. Желябова, 33
Доктор технических наук, профессор
E-mail: Ivan.Kaplunov@tversu.ru

Аннотация. Рассмотрены оптические свойства металлических зеркал для мощных CO₂-лазеров. Сопоставлены и проанализированы оптические, теплофизические и механические свойства перспективных материалов для изготовления зеркал – Al, Be, Au, Ag, Mo, Cu, Si.

Ключевые слова: CO₂ – лазеры; ИК-оптика; металлические зеркала; металлические покрытия; металлодиэлектрические покрытия.

Введение. Лазерная техника уже более 30 лет успешно используются в промышленном производстве. Мощные лазеры на углекислом газе (CO₂-лазеры) получили широкое применение на рынке непрерывной резки и сварки благодаря своей высокой мощности и эффективности с точки зрения потребления электричества, надежности и рентабельности. Газовые лазеры на углекислом газе с накачкой электрическим разрядом в газовой среде и с длиной волны 10,6 мкм (инфракрасная оптика, ИК-оптика) используются как источники непрерывного излучения и широко распространены в технологиях лазерной резки (металлы, пластик, компаунды, текстиль, дерево и др.) и лазерной сварки. Данные технологии осуществимы благодаря хорошо контролируемой, локализованной высокой плотности мощности, достигаемой в малом фокусном пятне лазерным излучением среднего и высокого качества [1-4].

Оптические элементы CO₂-лазеров включают в себя отражающую оптику (зеркала оптических резонаторов) и выходные прозрачные окна. В производственных системах, оснащенных такими лазерами, передача лазерного излучения производится через атмосферу окружающей среды, отклонение луча производится обычно металлическими зеркалами. Кроме того, высокое по сравнению с традиционными газовыми лазерами, качество излучения дает большую стабильность параметров фокуса в рабочей зоне.

Отражающие зеркала изготавливают по обычной оптической технологии с использованием классических операций шлифовки и полировки, а так же с использованием алмазного точения. Высокоточная механическая обработка алмазным инструментом с адаптацией под длину волны 10,6 мкм дает возможность производить надежную асферическую отражательную оптику без последующего шлифования и полирования. Зеркала изготавливают на основе различных материалов и покрывают высокоотражательными оптическими покрытиями или, для ряда применений, еще и высокопрочными отражающими покрытиями (например, из молибдена для зеркал, используемых в сварочных головках).

Лазерные зеркала

В мощных CO₂ – лазерах, излучающих на длине волны 10,6 мкм, применяют обычно металлические зеркала. В отличие от прозрачных диэлектриков металлы отражающих зеркал имеет комплексный показатель преломления. В металле световая волна затухает из-за интенсивного излучения электронами вторичных (отражённых) волн. При попадании излучения на гладкую металлическую поверхность большая часть излучения отражается [1, 5]. Особенно широко металлические покрытия применяются в инфракрасной оптике и

имеют преимущества перед многослойными интерференционными покрытиями в среднем и дальнем ИК-диапазонах, которые имеют низкую оптическую и механическую прочность вследствие невысоких физико-химических свойств (по сравнению с материалами для видимой и ближней ИК-областей) и большую толщину плёнки.

В работе [3] приведены данные о результатах цикла многолетних работ по созданию силовой (преимущественно зеркальной) лазерной оптики. На начальном этапе традиционные оптические элементы (окна; зеркала, нанесенные на стеклянные подложки) не выдерживали воздействия интенсивного оптического излучения, зеркальные покрытия отслаивались. Часть излучения, поглощенная в покрытиях, вызывающая нагрев зеркал, приводила к искажениям формы отражающей поверхности зеркал выше допустимых пределов и разъюстировке резонаторов.

Были сформулированы требования к оптическим материалам для изготовления силовых зеркал и проанализированы свойства известных материалов. На схеме (рис. 1) показаны перспективы материалов в зависимости от относительных значений их механических и теплофизических свойств. Ось ординат – отношение модуля Юнга (E) к плотности (ρ), называемое удельной жёсткостью. За 100% принята величина E/ρ бериллия. Ось абсцисс это процентное соотношение теплопроводности (λ) и коэффициента термического расширения (α).

Обычно в ИК-оптике используют отражающие металлические покрытия толщиной до 2000 – 3000 Å, нанесённые на полированную поверхность из стекла, кварца или ситалла. Однако, вследствие сравнительно низкой теплопроводности подложек для работы с мощным лазерным излучением такие зеркала не применимы. Для мощных технологических непрерывных CO_2 -лазеров разработаны высокоотражающие металлодиэлектрические покрытия с коэффициентом отражения $R \geq 99,5\%$, наносимые, обычно, на подложки из кремния [6-8]. Например, по данным ЗАО «Тидекс» [8], выпускаемые ими металлодиэлектрические зеркала способны работать при плотности мощности непрерывного излучения 1 кВт/см². В импульсном режиме они выдерживают до 1 Дж/см². Однако, для применения в мощных импульсных ИК-лазерах этого недостаточно, и поэтому обычно используются цельнометаллические зеркала, поверхность которых иногда покрывается тонким однослойным влагозащитным покрытием [9]. Однако, и эти покрытия могут снижать оптическую стойкость. В работах [10, 11] исследовано взаимодействие интенсивного лазерного излучения с медными зеркалами, на которые наносились защитные алмазоподобные покрытия α – С:Н. Показано, что коэффициент отражения зеркал после нанесения покрытия не ухудшается, а порог возникновения оптического пробоя при воздействии излучения импульсного CO_2 -лазера сложным образом зависит от технологии нанесения покрытий и условий хранения. В случае применения зеркал в частотно-импульсных лазерах их делают охлаждаемыми [3].

В области 10 мкм высоким коэффициентом отражения ($R \geq 97\%$) обладают следующие металлы: алюминий, медь, серебро, золото, молибден и бериллий (рис. 2 – 5).

Серебро и золото, как драгоценные металлы, используются только для нанесения покрытий, причём серебро, ввиду слабой коррозионной стойкости, может быть использовано только с защитными покрытиями. Алюминиевые покрытия используются очень широко, в том числе из-за того, что они активно применяются и в других областях спектра, например, в УФ-области. Однако, алюминий сложен в обработке, и цельнометаллические зеркала высокого качества из него не делают.

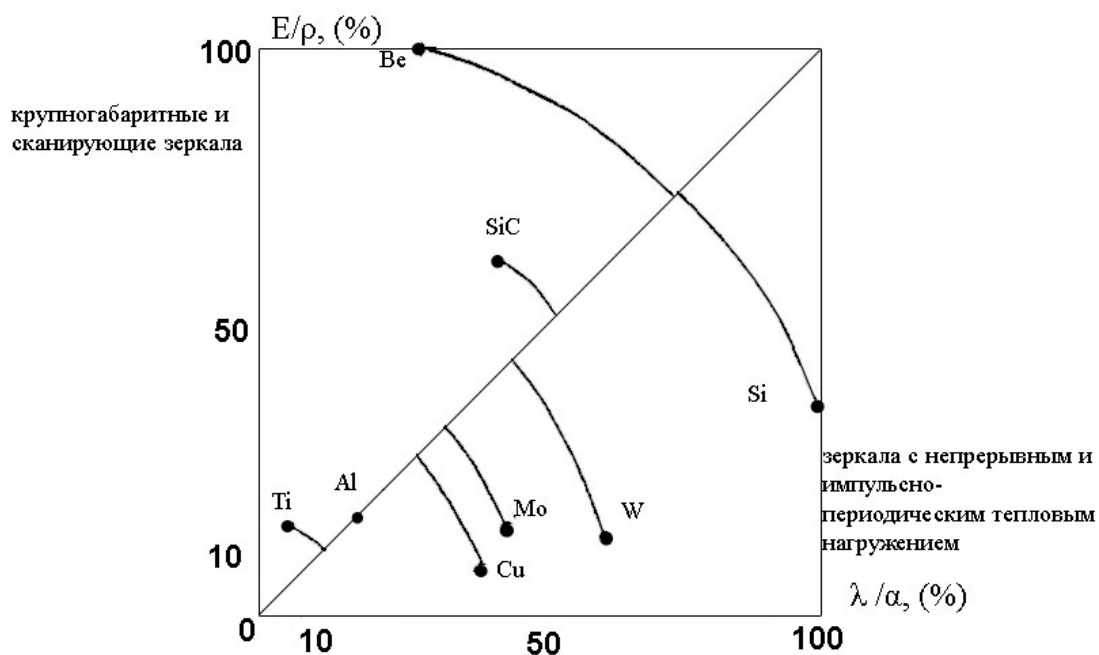


Рис. 1. Сопоставление перспективных материалов для подложек силовых лазерных зеркал в зависимости от их механических и тепловых свойств [3]

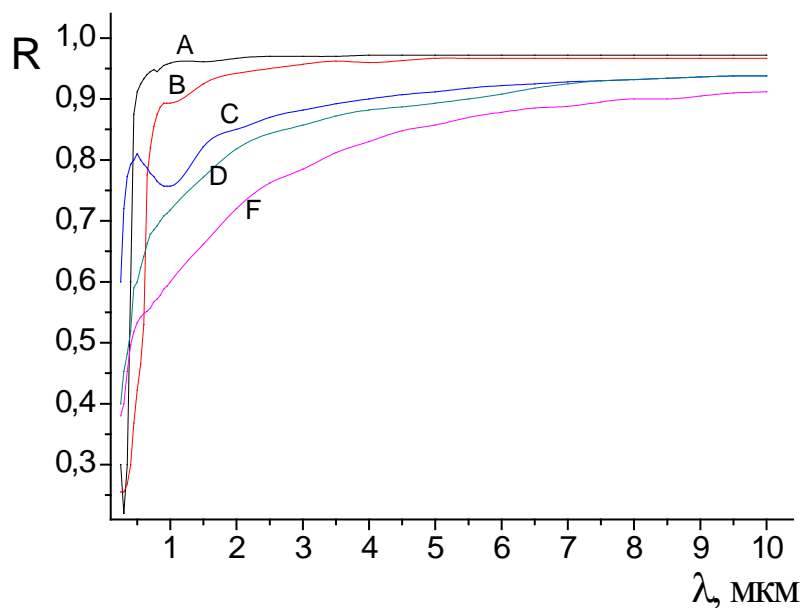


Рис. 2. Коэффициент отражения различных металлов как функция длины волны: А – полированное серебро, В – медь, С – алюминий, D – никель, F – углеродистая сталь [4]

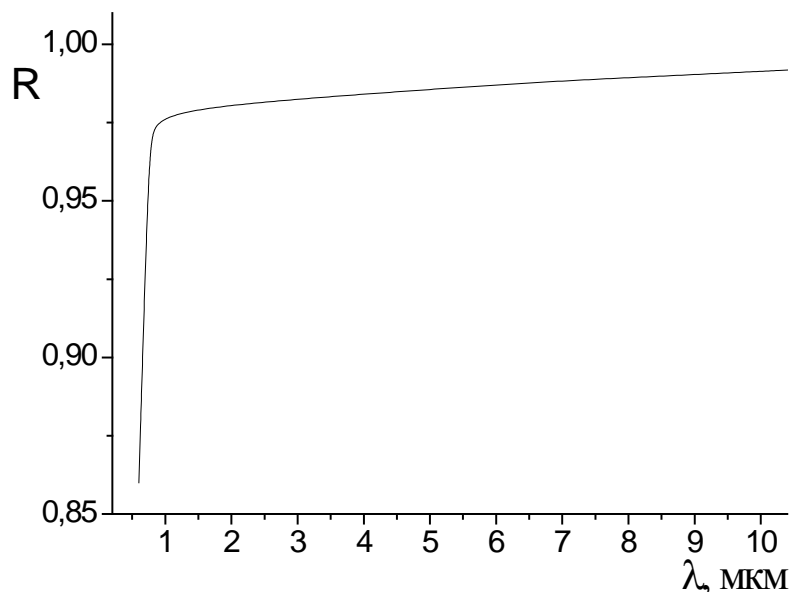


Рис. 3. Спектр отражения серебряного покрытия с защитой на подложке из стекла К-8. (Отражение измерено при угле падения 41 градус) [12]

В таблице 1 приведены основные свойства металлов, используемых для изготовления мощных CO₂ – лазеров. Данные по механическим свойствам взяты из справочника [13], остальные, за исключением R для Be и Mo, из справочника [14].

Таблица 1

Основные свойства металлов для изготовления зеркал мощных CO₂ - лазеров

Материал	R, λ=10 мкм	T _{пл} , К	ρ, г/см ³	α, 10 ⁶ , град ⁻¹	с, Кал/моль·град	χ, Вт/(м× К)	H _Б , 10 ⁷ Н/м ²	E, 10 ⁷ Н/м ²	σ _Т , 10 ⁷ Н/м ²
Al	98	933,5	2,699	23,4	5,82	221,5 (295К)	18,4	6,85	5,63- 6,44
Be	98,5 [15]	1560	1,844	13,9	3,93	179 (373К)			
Au	98	1337,6	19,299	14,43	6,07	310 (273- 373 К)	18,9	8,06	
Ag	99	1235	10,499	18,8	6,06	432,5 (300К)	20,6	2,59	
Mo	98 [16]	2890	10,218	5,0	5,98	138 (300К)	134	30900	29,4
Cu	98,5	1357	8,933	16,61	5,84	401,2 (300К)	52	11,2	6,85
Si	28	1688	2,332	2,56	4,79	152 (300К)			

В таблице: ρ – плотность; α - коэффициент линейного расширения; с – удельная теплоёмкость; χ - теплопроводность (при температуре); H_Б – твёрдость по Бринеллю; E – модуль Юнга; σ_Т – предел текучести.

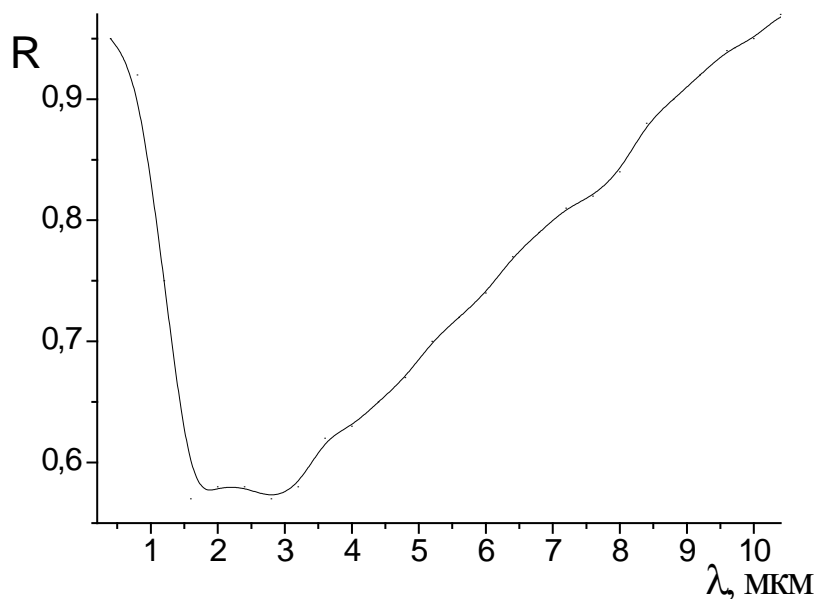


Рис. 4. Спектр отражения молибдена [11]

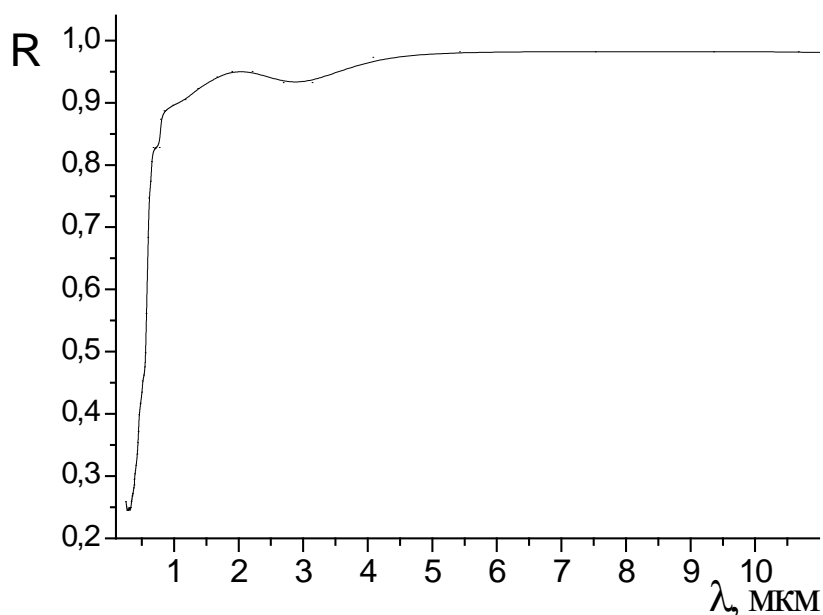


Рис. 5. Спектр отражения бескислородной меди в ИК-области [12]

Для изготовления облегчённых высококачественных зеркал, применяемых в космических аппаратах или иных ответственных приборах, иногда используют бериллий. Ограничения применения связаны с токсичностью, поэтому для его получения и обработки требуются специальные условия, что резко ограничивает использование. Тем не менее [12, 15, 17], одним из основных направлений применения бериллия в настоящее время остается металлооптика, причём преимущественно космическая. Применение бериллия в ряде случаев позволяет существенно повысить характеристики оптических зеркал по сравнению с изделиями из традиционных оптических материалов, таких, как ситалл и плавленый кварц, стекло К-8. Отношение прочности к плотности (E/ρ) – удельная жесткость – у бериллия значительно выше, чем у авиационных сталей и сплавов на основе титана и алюминия. Для оценки уровня стабильности формы оптических изделий во время эксплуатации

механические свойства материалов оценивают с помощью показателя удельной жесткости. Среди известных конструкционных материалов бериллий обладает наименьшей плотностью и максимальным модулем упругости и имеет рекордное значение удельной жесткости, величине которого бериллий превосходит другие легкие металлы в 5–6 и более раз. Высокая удельная жесткость в сочетании с хорошей удельной прочностью позволяет снизить массу конструкции при повышении ее механических характеристик. При одинаковой деформации формы оптической поверхности зеркал под действием силы тяжести зеркала из традиционных оптических материалов и других металлов будут тяжелее бериллиевых в два и более раз.

Перспективными изделиями из бериллия являются сканирующие зеркала для аппаратуры, работающей в ИК-области спектра. Одна из основных технических проблем – получение качественной оптической поверхности на бериллии. В некоторых случаях для улучшения качества поверхности бериллия на нем создают конструкционное стеклянное покрытие толщиной несколько миллиметров, на которое после оптической обработки наносится отражающее покрытие. Такие зеркала применяют при создании информационных систем. Существует технология [15] получения конструкционных стеклянных покрытий на изделиях диаметром до 1000 мм, не содержащих дефектов в виде трещин и газовых пузырей, способных подвергаться оптической обработке шлифованием и полированием и сохраняющих свою целостность при заданных воздействиях динамических нагрузок и перепадов 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) для приборов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса, а также силовой лазерной оптики. Оптические элементы ИК-систем ДЗЗ могут использоваться в условиях глубокого космического холода (190...240 К), а у силовых зеркал нагрузка может достигать 100 кВт/см^2 [15, 17-18].

Максимально полная реализация рекордно высоких весо-жесткостных свойств бериллия при создании оптических зеркал предполагает наличие заготовок материала необходимого качества. Бериллий – элемент с малым межатомным расстоянием, и введение большинства примесей в виде легирующих добавок создает сильные искажения кристаллической решетки. В связи с этим существенное внимание уделяется чистоте материала.

Молибден – прекрасный материал для зеркал CO_2 – лазеров (рис. 4). Он наиболее долговечен по сравнению с кремнием и медью, и может быть рекомендован для промышленного применения, абразивные и пылевые воздействия могут вызвать острые проблемы с другими типами зеркал. Молибден характеризуется высокой отражательной способностью, низким тепловым расширением и высокой твердостью. Отражательная способность зеркал из молибдена без покрытия на длине волны 10,6 мкм $>98\%$, так что эти зеркала применяют как с отражающим покрытием, так и без него. Молибденовые зеркала без покрытия представляют интерес в оптических системах, где отражательная способность не является первостепенной, но где важна долговечность. Поверхность молибденового зеркала без отражающего покрытия довольно долговечна и выдерживает менее квалифицированную и более грубую очистку, чем, например, серебряное отражающее покрытие, которое требует защиты [16].

Наиболее широко в мощных импульсных и частотно-импульсных CO_2 - лазерах применяются зеркала из меди или её сплавов. Небольшие добавки в медь бериллия, циркония или хрома практически не влияют на оптические свойства, но заметно повышают механические [3, 19].

Для изготовления работающих в ИК-диапазоне лазерных зеркал, в том числе и охлаждаемых, для высокомошных лазерных систем, используют либо бескислородную медь высокого качества (рис. 5), либо вышеупомянутые сплавы на её основе. В бескислородной меди марки МОБ содержится 99,97 % меди, а максимальное количество кислорода не превышает 0,001 % [19]. Медь характеризуется очень высокой теплопроводностью, что гарантирует максимальное качество лазерного излучения при предельных нагрузках. Медные зеркала достаточно дорогие в производстве, так как технология их полировки трудоёмка. При эксплуатации медных зеркал необходимо учитывать, что это очень мягкий, пластичный материал, который легко затирается. При чистке рабочей поверхности этих зеркал должна соблюдаться максимальная осторожность, даже в том случае, когда они имеют защитное покрытие [16, 20]. Для улучшения коррозионной стойкости на поверхность медного зеркала иногда наносят золотое покрытие.

Заключение. С самого начала CO_2 - лазеры проявили себя как «рабочие лошадки» в промышленных лазерных областях применения благодаря своей надежности, рентабельности и безопасности. Широкий диапазон материалов от акрила и алюминия до полистирола, титана и циркония делает CO_2 - лазер универсальным инструментом резки и сварки.

Основой лазеров является современная и признанная технология изготовления лазерного источника, а также рассмотренные выше материалы и на их основе изготовленные оптические компоненты – отражающие зеркала.

Примечания:

1. Шмаков В.А. Силовая оптика [Текст] / В.А. Шмаков. М.: Наука, 2004. 318 с.
2. ROFIN-SINAR Laser GmbH [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.rofin.com>.
3. Алексеев В.А. Силовая лазерная оптика [Текст] / Алексеев В.А., Нарусбек Э.А., Ямпольский В.И. // Лазерные и оптические системы: Н.-тех.сб. М.: ГИЦ НПО Астрофизика, 1994. С. 124-130.
4. Сайт ООО «ЛАЗЕР ХИТ». [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://lazer-hit.tiu.ru/>
5. Соколов А.В. Оптические свойства металлов. [Текст] / А.В. Соколов. М.: Физматгиз, 1961, 464 с.
6. Пат. 2097802 Российская Федерация, G02B5/28 Интерференционное зеркало [Текст] / Глебов В.Н.; заявитель и патентообладатель Научно-исследовательский центр по технологическим лазерам РАН. № 95100833/28; заявл. 19.01.1995; опуб. 27.11.1997.
7. Ledger, A.M., Inhomogeneous interface laser mirror coatings [Текст] / A.M. Ledger // Applied Optics. 1979. V. 18. № 17. P. 2979-2989.
8. Сайт ЗАО «Тидекс». [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://tydexoptics.com/ru>.
9. Панасенко В.В. Оптические покрытия для CO_2 – лазеров [Текст] / В.В. Панасенко, И.С. Гайнутдинов, Н.Е. Залилова, В.А. Сапелкин, В.С. Нурумова // Тез. докл. IV Всесоюз. конф.: Оптика лазеров. Л: ГОИ, 1983. С. 275.
10. Коншина Е.А. Взаимодействие интенсивного лазерного излучения с защитными покрытиями α С:Н [Текст] / Е.А. Коншина // ЖТФ. 1998. Т. 68. № 9. С. 59–66.
11. Коншина, Е.А. Особенности колебательных спектров алмазоподобных и полимерных плёнок α С:Н [Текст] / Е.А. Коншина, А.И. Вангонен // ФТП. 2005. Т. 39. Вып. 5. С. 616-621.
12. Сайт ЗАО «Опто-Технологическая Лаборатория». [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.optotl.ru/>
13. Таблицы физических величин. Справочник. [Текст] / Под ред. И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1006 с.
14. Свойства элементов. Справочник. В двух частях. Часть 1. Физические свойства. [Текст] / Под ред. Г.В. Самсоновой; 2-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1976. 599 с.
15. Любарский С.В. Зеркала из нетрадиционных для оптики материалов [Текст] / С.В. Любарский // Оптический журнал. 1996. № 4. С. 33-39.
16. Производственная компания ООО «Электростекло». [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.elektrosteklo.ru>.
17. Сизенев В.С. Оптические свойства полированного бериллия в условиях воздействия факторов космического пространства [Текст] / В.С. Сизенев, И.Л. Струля, А.В. Григорьевский, В.М. Просвириков, В.Я. Менделеев, С.Н. Сковородько // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. 2010. № 1. С. 21-27.
18. Любарский С.В. Термооптический стенд для тестирования крупногабаритной оптики в условиях глубокого охлаждения в вакууме. [Текст] / С.В. Любарский, Л.Ш. Олейников, В.Б. Григорьев, М.М. Чулков, А.Д. Шнырев // Оптический журнал. 1997. № 8. С. 20–23.
19. Николаев А.К. Медь и жаропрочные медные сплавы [Текст] / А.К. Николаев, С.А. Костин. М.: ДПК Пресс. 2012. 715 с.
20. Дробот А.Д. Деграция и восстановление медных зеркал импульсного CO_2 – лазера [Текст] / А.Д. Дробот, М.К. Ильин, Р.М. Овнянян, В.Е. Рогалин, С.А. Филин, В.И. Ямпольский // Электронная техника, сер. Лаз. техн. и оптоэлектрон. 1990. Вып. 2(54). С. 49-51.

UDC 621.3.038.84

The Optic Properties of Metallic Mirrors for CO₂ Lasers

¹Vladimir E. Rogalin

²Ivan A. Kaplunov

¹National Center of Laser Systems and Complexes «Astrophysica», Russian Federation

Volokolamskoe sh., 95, Moscow, 125424

PhD (physics-matematical)

E-mail: v-rogalin@mail.ru

²Tver State University, Russian Federation

Zhelyabova Str. 33, Tver, 170100

Dr. (technical), Professor

E-mail: Ivan.Kaplunov@tversu.ru

Abstract. The article examines the optic properties of metallic mirrors for powerful CO₂ lasers. It compares and analyses the optic, thermophysical and mechanical properties of the following perspective materials for producing mirrors: Al, Be, Au, Ag, Mo, Cu, Si.

Keywords: CO₂ lasers; infrared optics; metallic mirrors; metallic coating; metal-dielectric coating.