

УДК 671.152

DOI: 10.22213/2410-9304-2021-2-20-24

Разработка системы промышленного сканирования бриллиантов

М. В. Палабугин, студент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

В. П. Усольцев, канддат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Разработана система по сканированию драгоценных камней с помощью лазерного излучения. Составлена схема разработанной лазерной сканирующей установки. Проведен обзор дефектов, которые наиболее часто встречаются в кристаллах драгоценных камней и способны помочь в создании карты дефектов кристалла. Приведено описание методики, которая используется в создании паспорта изделия. Были установлены минимальные размеры объектов, которые мы сможем обнаружить с помощью данной установки. Рассчитана вероятность достоверного обнаружения дефекта в исследуемом объекте. Выявлены необходимые маркеры для установления уникальности драгоценного камня. Проведены эксперименты, где использовались полупроводниковые лазеры с длинами волн 405 и 532 нм. В результате было выяснено, что установка работает исправно и способна составлять карту дефектов прозрачных в оптической области объектов. Для повышения эффективности установки была составлена готовая база данных, в нее вошли наиболее распространенные дефекты, которые можно обнаружить в драгоценных камнях. Для удобного и быстрого поиска дефектов по базе данных была предложена иерархическая система упорядочивания дефектов. После сканирования кристалла получившиеся данные заносятся в личный паспорт изделия, что позволит в дальнейшем его идентифицировать.

Ключевые слова: лазерное сканирование, сканирование бриллиантов, драгоценные камни, полупроводниковые лазеры.

Введение

Тема ювелирных украшений всегда актуальна. От их подлинности зависит репутация человека и то, как к нему будут относиться. Если в СМИ появится хотя бы намек на то, что знаменитость носит поддельные украшения, то данная информация способна будет нанести существенный репутационный ущерб и привести к краху карьеры.

Мастерство же фальсификации драгоценных камней не стоит на месте. В последние годы перед ювелирами остро встала проблема подделки ювелирных украшений. Зачастую подделываются именно драгоценные камни. Все чаще на рынке появляются высококачественные подделки, которые с трудом можно отличить от оригинальных камней.

Все эти факты говорят о наличии проблемы в данной сфере. Цель этой публикации – предложить новый метод контроля оборота драгоценных камней, который позволит с высокой точностью определять подлинность кристаллов, входящих в ювелирное изделие. Для этого мы выяснили спектры пропускания интересующих нас драгоценных камней в оптическом диапазоне длин волн, разработали схему будущей установки по сканированию драгоценных камней, провели эксперимент, чтобы подтвердить работоспособность нашего метода.

В основе данного метода лежит запечатление теневой картины, которая образуется при проходе через исследуемый драгоценный камень лазерного когерентного излучения. Получившаяся карта распределения дефектов внутри бриллианта уникальна для каждого камня. Это связано с тем, что в процессе образования природного кристалла алмаза каждый камень проходит индивидуальные этапы становления. Каждый камень имеет свое уникальные распределение микро- и макродефектов. В этом они очень похожи на отпечатки пальцев людей. Полученное распределение теней разных форм и размеров на экране являются картой бриллианта. Эти сведения заносятся в электронный паспорт изделия и предъявляются по требованию, чтобы удостовериться в подлинности драгоценного камня [1].

Дефектный состав кристаллов алмаза

Рассмотрение дефектов, которые встречаются в бриллиантах, начнем с микродефектов. Под ними понимаются такие изъяны, размеры которых сопоставимы с размерами межатомных расстояний в кристаллической решетке алмаза. Основные дефекты данной категории – это точечные дефекты кристаллической решетки алмаза [2–5]. Они показаны на рис. 1.

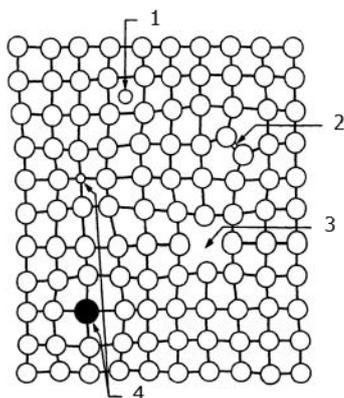


Рис. 1. Точечные дефекты кристаллической решетки алмаза: 1 – примесный атом внедрения (в основном это атомы углерода, азота, бора); 2 – изменение периодичности расположения атома кристаллической решетки (в результате чего изменяются длины атомных связей в кристаллической решетке); 3 – вакансия; 4 – примесный атом замещения (обычно это водород и кремний)

Макродефекты. К ним относятся такие несовершенства бриллианта, которые возникают на уровне кристаллической решетки. Они появляются либо во время формирования кристалла или в уже сформированном виде (удары о породу при выходе на поверхность, сколы и трещины, возникшие при добыче и обработке). Зачастую такие дефекты можно обнаружить без использования специальной аппаратуры. Наиболее часто встречающимися дефектами этого класса являются пластинчатые сегрегации, аномальное двупреломление, дислокационные дефекты роста, двойникование [6–8].

Как микро-, так и макродефекты способны оказать серьезное влияние на физические и оптические свойства бриллианта.

Описание методики

Рассмотренные методы по дефектоскопии кристаллов алмаза способны с высокой точностью обнаруживать дефекты в кристаллах. Но получить карту дефектов можно лишь методом рентгеновской топографии. Это дорогой метод, и установок, которые позволят его осуществить, крайне мало.

Метод, предлагаемый в данной работе, является простым, доступным и интуитивно понятным на фоне всех остальных. Его точность зависит от длины волны лазерного излучения.

Начнем с того, что существует такое понятие, как шероховатость поверхности R_a . Оно связано с размерами бугорков и впадин на поверхности оптической детали. Эту величину можно найти по формуле [9, 10]:

$$R_a = \sqrt{\lambda^2 / 8\pi^3}, \tag{1}$$

где λ – длина волны излучения, а π – число Пи.

При $R_a > \sqrt{\lambda^2 / 8\pi^3}$ шероховатость поверхности линзы будет оказывать влияние на качество пучка, проходящего через нее.

При $R_a < \sqrt{\lambda^2 / 8\pi^3}$ шероховатость поверхности линзы не будет оказывать влияние на качество пучка, проходящего через нее.

Как видно из формулы, размеры частиц, которые будут искажать изображение, напрямую связаны с длиной волны. Чем меньше длина волны, тем меньше должны быть объекты, чтобы не исказить пучок. Эту фразу можно переформулировать: «Чем меньше длина волны, тем меньшие объекты мы сможем обнаружить». Так, если использовать полупроводниковый лазер с длиной волны 405 нм, минимальный размер объектов, которые будут влиять на распространение электромагнитного поля, составит 25,7 нм.

Мы получаем следующую формулу для установки минимальных размеров объектов, которые сможет обнаруживать наша оптическая система:

$$X = \sqrt{\lambda^2 / 8\pi^3}, \tag{2}$$

где X – минимальный размер объектов, который сможет уловить наша оптическая система.

Такая высокая точность позволит с легкостью обнаруживать дефекты в структуре бриллианта и составить их карту.

С помощью разработанной системы можно будет сканировать каждый отдельный бриллиант. Полученная карта дефектов будет прикреплена к электронному паспорту изделия. Эти сведения позволят опознать тот или иной драгоценный камень при необходимости. На основании результатов сканирования с определенной вероятностью можно будет говорить о подлинности камня. Достоверность исследований будет оцениваться исходя из ширины спектральной линии используемого лазера как при внесении информации в паспорт, так и при подтверждении этих данных во время повторного сканировании. А также от минимальных размеров изъянов, которые присутствуют в исследуемом объекте.

Формула для оценки достоверности исследований будет выглядеть так:

$$T_x = (1 - \Delta\lambda / X), \tag{3}$$

где T_x – вероятность достоверного обнаружения дефекта в исследуемом объекте; $\Delta\lambda$ – ширина спектра излучения лазера.

Таким образом, мы получаем следующее: чем меньше длина волны и выше монохроматичность излучения, тем меньшие объекты и с большей точностью мы сможем исследовать.

Разработанная лазерная установка позволит производить сканирование каждого отдельного алмаза. Полученные данные будут заноситься в цифровой паспорт изделия, что позволит опознать тот или иной камень. На основании полученного анализа можно будет с определенной вероятностью говорить о подлинности алмаза.

Благодаря этому решению, можно будет проводить качественный мобильный и оперативный контроль за оборотом драгоценных камней. Чтобы производить сканирование кристалла, необходим лазерный источник высокой монохроматичности на длине волны 405 нм. Выбор этой длины волны связан с пропускной способностью кристалла алмаза. На данной длине волны он прозрачен, что позволит вести исследования его структуры эффективно и с высокой точностью.

Разработанная оптическая система состоит из самого лазерного источника 1; оптики, уширяющей лазерный пучок 2 до размеров, сопоставимых с исследуемым объектом 3; ячеистого экрана, который показывает распределение теней дефектов, тем самым образуя карту дефектов кристалла. Ее схема показана на рис. 2.

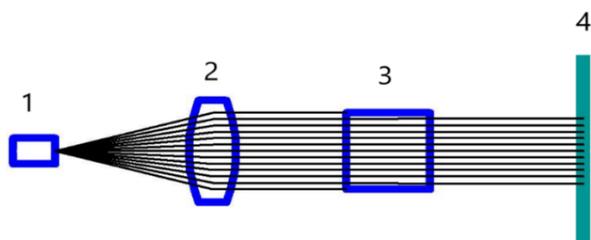


Рис. 2. Схема разработанной лазерной сканирующей установки: 1 – лазерный источник, 2 – уширяющая оптика, 3 – исследуемый объект, 4 – ячеистый экран

Эта лазерная установка имеет универсальное программное и аппаратное обеспечение, что позволяет добиться стабильности в ее работе.

Описание проведенного эксперимента

Чтобы удостовериться в жизнеспособности предложенного метода, нами был проведен эксперимент, в котором был исследован образец с дефектами. Источниками когерентного излучения служили лазеры с длиной волны 405 нм и $\Delta\lambda = 20$ нм, 532 нм и $\Delta\lambda = 20$ нм. Предварительно был определен размер дефектов, присутствующих в образце. Их размер варьируется от 5 до 100 мкм. Минимальная достоверность полученных результатов составила 0,996, что говорит об их высокой надежности.

Полученные теневые картины исследуемого объекта при помощи лазера с длиной волны 405 нм показаны на рис. 3 и 4. На рис. 5 и 6 теневые картины получены при использовании лазера с длиной волны 532 нм.

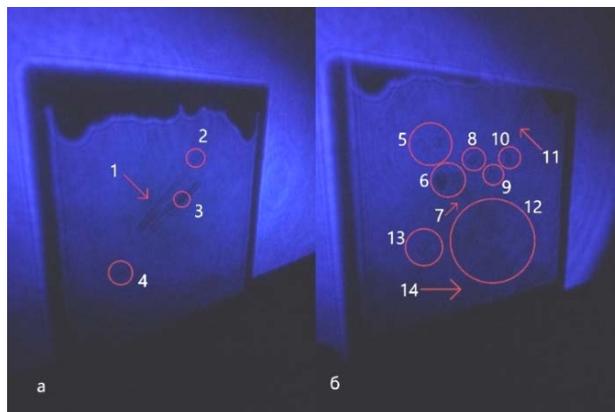


Рис. 3. Теневые карты граней 1 и 2 исследуемого объекта при использовании лазера с длиной волны 405 нм

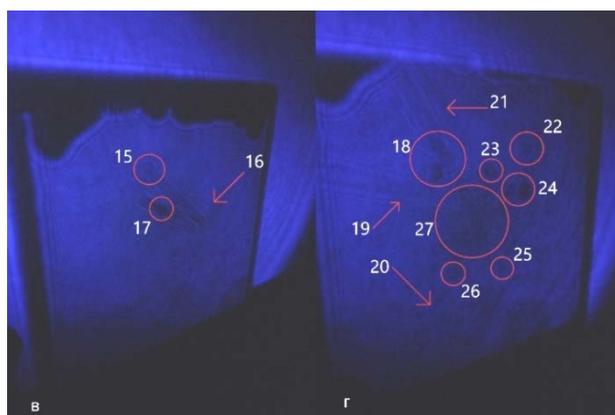


Рис. 4. Теневые карты граней 3 и 4 исследуемого объекта при использовании лазера с длиной волны 405 нм

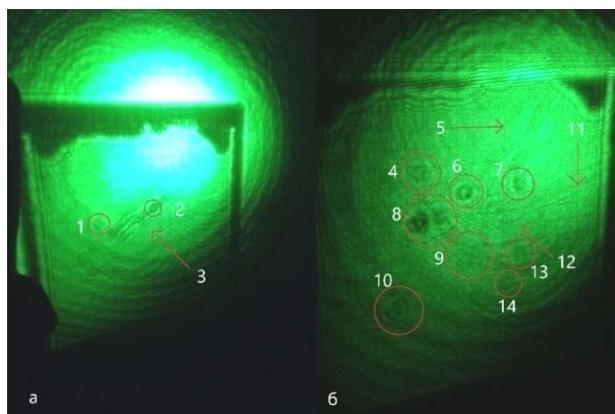


Рис. 5. Теневые карты граней 1 и 2 исследуемого объекта при использовании лазера с длиной волны 532 нм

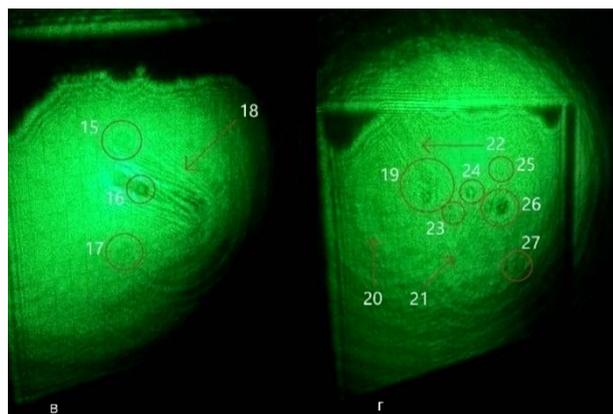


Рис. 6. Теневые карты граней 3 и 4 исследуемого объекта при использовании лазера с длиной волны 532 нм

На рис. 3–6: *а* – первая грань, *б* – вторая грань, *в* – третья грань, *г* – четвертая грань. В кружки обведены области, в которых были выявлены дефекты. Всего выявлено порядка 27 областей скопления дефектов как при использовании лазера с длиной волны 405 нм, так и с помощью лазера с длиной волны 532 нм. Наглядно видно, что использование лазера с меньшей длиной волны позволяет четче разглядеть мелкие дефекты. К примеру, на рис. 3 под цифрой 1 дефект имеет намного более четкое очертание. В то время как на рис. 5 под цифрой 3 тот же самый дефект имеет уже несколько размытые очертания.

Полученные результаты экспериментов говорят о полной пригодности и устойчивой работоспособности установки и собранной базы данных распределений затемнений на экране. Это позволит успешно справляться с задачей по распознаванию дефектов, наиболее часто встречаемых в алмазах.

Выводы

Таким образом, проведя эксперимент, мы смогли на практике убедиться в работоспособности разработанной лазерной установки, которая способна создавать карту дефектов тех или иных прозрачных в оптическом диапазоне объектов. Исследовав таким образом бриллиант, можно будет с высокой точностью запечатлеть все его особенности, после чего внести получившиеся данные в его личный паспорт, что позволит в дальнейшем его идентифицировать.

Для повышения эффективности установки была составлена готовая база данных, в которую вошли наиболее распространенные дефекты, которые можно обнаружить в бриллиантах. Для удобного и быстрого поиска дефектов по базе данных была предложена иерархическая система упорядочивания дефектов. В ней учте-

ны разнообразные формы и размеры дефектов, которые встречаются в бриллиантах, а также их расположение. Если просканированный образ бриллианта совпадет с уже имеющейся теневой картиной в базе данных, то с определенной вероятностью можно утверждать об идентичности. Данная вероятность напрямую зависит от достоверности проведенных измерений.

Библиографические ссылки

1. Гаранин В. К., Лейбов М. Б. Алмаз: штрихи к портрету (история открытия российских месторождений, особенности генезиса) // Минералогический альманах «В мире минералов». 2014. Т. 19, вып. 1. С. 30–47.
2. Yelissev A., Babich Yu., Nadoliny V., Fisher D., Feigelson B. *Diamond Relat. Mater.*, 2002, vol. 11, p. 23.
3. Елисеев А. П., Афанасьев В. П., Угапова С. С. Особенности оптического поглощения импактного алмаза // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2019. Т. 16. № 1. С. 55–61.
4. Zaitsev A. M. *Optical Properties of Diamond*, Institute of Mineralogy and Geophysics, Bochum, Germany, 2013, P. 501.
5. Lawrence S. Pan, Don R. Cania. *Diamond: Electronic Properties and Applications*. Kluwer Ac. Pub., 2013, P. 471.
6. Вайнштейн Б. К., Фридкин В. М., Инденбом В. Л. Современная кристаллография. В 4 т. М. : Наука, 1979.
7. Knuyt G., Neshidek M., Vandeveldt T. On the development of CVD diamond film morphology due to the twinning on {111} surfaces. *Diamond and Related Materials*, 1997, vol. 6, p. 435–439.
8. Knuyt G., Nesladek M., Meykens K. et al. On the {111} penetration twin density in CVD diamond films. *Diamond and Related Materials*, 1997, vol. 6, p. 1697–1706.
9. Bennett H. E., Porteus J. O. Relation between surface roughness and specular reflectance at normal incidence // *JOSA*. 1961. Vol. 51, no. 2. P. 123–129.
10. Тымкул В. М., Овчинников С. С., Кузнецов М. М. Оптический метод контроля шероховатости поверхности // *СибОптика-2013 : Междунар. науч. конф.* Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 1. С. 282–285.

References

1. Garanin V.K. Leybov M.B. [Diamond: strokes to the portrait (the history of the discovery of Russian deposits, features of the genesis)]. *Mineralogicheskii almanah «V mire mineralov»*, 2014, vol. 20, no. 1, pp. 30–47 (in Russ.).
2. Yelissev A., Babich Yu., Nadoliny V., Fisher D., Feigelson B. *Diamond Relat. Mater.*, 2002, V. 11, P. 23.
3. Eliseev A.P., Afanasyev V.P., Ugapova S.S. *Fundamentalnye problem sovremennogo materialove-*

deniy [Fundamental problems of modern materials science], 2019, vol. 16, no. 1, pp. 55-61 (in Russ.).

4. Zaitsev A.M. Optical Properties of Diamond, Institute of Mineralogy and Geophysics, Bochum, Germany, 2013, P. 501.

5. Lawrence S. Pan, Don R. Cania. Diamond: Electronic Properties and Applications. Kluwer Ac. Pub., 1994, p. 176-192.

6. Vaynsteyn B.K., Fridkin B.M., Indenbom V.L. *Sovremennay kristallografiy in chetyreh tomah* [Modern crystallography in four volumes]. Moscow, Nauka Publ. (in Russ.).

7. Knuyt G., Neshidek M., Vandeveldel T. On the development of CVD diamond film morphology due to the

twinning on {111} surfaces. *Diamond and Related Materials*, 1997, vol. 6, pp. 435-439.

8. Knuyt G., Nesladek M., Meykens K. et al. On the {111} penetration twin density in CVD diamond films. *Diamond and Related Materials*, 1997, vol. 6, pp. 1697-1706.

9. Bennett H. E., Porteus J. O. Relation between surface roughness and specular reflectance at normal incidence // *JOSA*. 1961. Vol. 51, no. 2. Pp. 123-129.

10. Tymkul V.M., Ovchinnikov S.S., Kuznecov M.M. *Opticheskie metody kontroly sherohovatosty poverhnisty* [Optical method of surface roughness control]. *SibOptika-2013 : Mezhdunar. nauch. konf.* [Proc. of the «SibOptika – 2013» (eds. Tymkul V. M., Ovchinnikov S. S., Kuznecov M. M.)], vol. 1, pp. 282-285 (in Russ.).

Development of an Industrial Diamond Scanning System

M. V. Palabugin, Student, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

V. P. Usoltsev, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

A system for scanning precious stones using laser radiation has been developed. A diagram of the developed laser scanning facility has been drawn up. A review of defects that are most common in gem crystals and which can help in creating a map of crystal defects has been carried out. The description of the technique used in the creation of the product passport is given. The minimum sizes of objects that we can detect using this setting have been set. The probability of reliable detection of a defect in the object under study is calculated. Markers necessary to establish the uniqueness of a gem are identified. Experiments have been carried out using semiconductor lasers with wavelengths of 405 nm and 532 nm. As a result, it was found that the installation is working properly and is capable of mapping the defects of objects transparent in the optical region. To increase the efficiency of the installation, a ready-made database was compiled, which included the most common defects that can be found in gemstones. For a convenient and quick search for defects in the database, a hierarchical system for ordering defects was proposed. After scanning the crystal, the resulting data is recorded into the personal passport of the product, which will allow it to be identified in the future.

Keywords: laser scanning, scanning diamonds, gemstones, semiconductor lasers.

Получено: 12.04.2021