

Nghiên cứu công nghệ mài bóng quang học gương cầu vật liệu thép hợp kim

Phạm Hồng Tuấn*, Nguyễn Xuân Thành, Nguyễn Thành Hợp

Trung tâm Quang điện tử, Viện Ứng dụng Công nghệ

Ngày nhận bài 13/7/2020; ngày chuyển phân biện 17/7/2020; ngày nhận phân biện 28/8/2020; ngày chấp nhận đăng 7/9/2020

Tóm tắt:

Tại Việt Nam, công nghệ gia công bề mặt cầu của các thấu kính thủy tinh bằng phương pháp mài nghiền dùng bột mài không liên kết đã được nghiên cứu và áp dụng rộng rãi. Tuy nhiên, phương pháp này gặp nhiều khó khăn đối với bài toán mài bóng quang học gương cầu làm từ vật liệu thép hợp kim. Bài báo giới thiệu một số kết quả ban đầu trong nghiên cứu công nghệ mài bóng quang học gương cầu vật liệu thép hợp kim, bao gồm các vấn đề: lựa chọn phương pháp và thiết bị gia công, thiết kế dụng cụ hỗ trợ và dụng cụ gia công, thử nghiệm và thiết lập quy trình gia công, đánh giá chất lượng sản phẩm. Gương cầu trên nền vật liệu thép hợp kim, đường kính 50 mm, bán kính cầu 70 mm đã được mài đánh bóng quang học thành công. Kết quả đo kiểm cho thấy, mẫu gương đáp ứng các yêu cầu đề ra đối với sản phẩm quang học ($N=1$, $\Delta N=1$, độ nhám bề mặt $Rz=0,05 \mu m$).

Từ khóa: đánh bóng, gương cầu thép hợp kim, mài quang học.

Chỉ số phân loại: 2.3

Đặt vấn đề

Bề mặt cầu là bề mặt cơ bản của hầu hết các thấu kính, gương - phần tử cơ bản của mọi dụng cụ hay hệ thống quang học. Công nghệ chế tạo các bề mặt cầu đã được nghiên cứu, phát triển từ rất lâu. Hiện nay, công nghệ chế tạo mặt cầu có thể được phân ra 4 nhóm: mài nghiền dùng bột mài không liên kết [1], mài dùng bột mài liên kết (đá mài) trên máy phay chính xác [2], mài trên máy tự động điều khiển số (máy CNC) sử dụng đá mài kim cương [2], tiện kim cương (Diamond turning) [3].

Tại Việt Nam, từ hơn 50 năm trở lại đây, phương pháp mài nghiền quang học chế tạo các thấu kính thủy tinh đã và đang được áp dụng rộng rãi tại các cơ sở sản xuất thiết bị quang học. Các ưu điểm chính của mài nghiền là: công nghệ đơn giản, chi phí đầu tư không lớn (máy mài, dụng cụ, vật tư), chế tạo được các thấu kính có kích thước trong dải rộng.

Trong khi đó, trên thế giới các nhà máy sản xuất thiết bị quang học đã chuyển sang áp dụng quy trình công nghệ mài bằng đá mài và công nghệ mài trên máy CNC. Ưu điểm của các công nghệ này là tạo ra năng suất cao hơn, giá thành gia công hạ, sản xuất linh hoạt theo các đơn hàng với số lượng sản phẩm khác nhau. Mặc dù các công nghệ này đã rất thành công với các thấu kính thủy tinh, nhưng với các bề mặt kim loại hay hợp kim thì hầu như chưa được công bố trên ấn phẩm đại chúng.

Trong bài viết này, chúng tôi giới thiệu kết quả nghiên cứu ứng dụng quy trình công nghệ mài dùng bột mài liên kết trên máy mài tốc độ cao, phục vụ mài và đánh bóng quang học mặt cầu của gương làm từ thép hợp kim, tạo tiền đề cho việc chế tạo các hệ quang học đặc biệt, hoặc chế tạo khuôn ép phun thấu kính plastic độ chính xác cao.

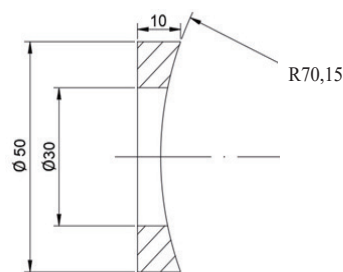
*Tác giả liên hệ: Email: phamhongtuan1@yahoo.com

cứu ứng dụng quy trình công nghệ mài dùng bột mài liên kết trên máy mài tốc độ cao, phục vụ mài và đánh bóng quang học mặt cầu của gương làm từ thép hợp kim, tạo tiền đề cho việc chế tạo các hệ quang học đặc biệt, hoặc chế tạo khuôn ép phun thấu kính plastic độ chính xác cao.

Thực nghiệm

Chi tiết gương cầu

Gương cầu (hình 1) có bề mặt cầu bán kính R70,15 mm được mài đánh bóng quang học.



Hình 1. Chi tiết gương cầu.

Vật liệu nền của chi tiết là thép hợp kim (thành phần thép: Fe 51%, Al 10%, Co 14%, Ni 18,5%, Cu 4%), độ cứng bề mặt 52 HRC. Bề mặt cầu bán kính R=70,15 mm cần được mài đạt độ chính xác bán kính 0,05%, được mài mịn đánh bóng đạt độ chính xác quang học ($N=1$; $\Delta N=1$), độ nhám bề mặt $Rz=0,05 \mu m$.

Research on the optical grinding and polishing technology of spherical mirror based on alloy steel materials

Hong Tuan Pham*, Xuan Thanh Nguyen,
Thanh Hop Nguyen

Center for Optoelectronics, National Center for Technological Progress

Received 13 July 2020; accepted 7 September 2020

Abstract:

In Vietnam, the technology of fabricating spherical surfaces of glass lenses by the loose abrasive grinding method has been researched and widely applied. However, this technology does not really match the needs of grinding and polishing optically the sphere on the basis of alloy steel. This paper introduces some initial results in researching the technology of optical mirror polishing of alloy steel materials. The issues studied include the selection of processing methods and equipment, design and manufacture of auxiliary tools and machining processes, and the methodology for characterisation product quality. A spherical mirror of 50 mm in diameter, 70 mm in spherical radius, based on alloy steel material has been optically polished. Test results show that the sample meets the requirements for optical products ($N=1$; $\Delta N=1$, surface roughness $R_z=0.05 \mu\text{m}$).

Keywords: alloy steel spherical mirror, optical grinding, polishing.

Classification number: 2.3

Nguyên lý mài và đánh bóng mặt cầu

Bề mặt cầu của gương được gia công theo các bước sau:

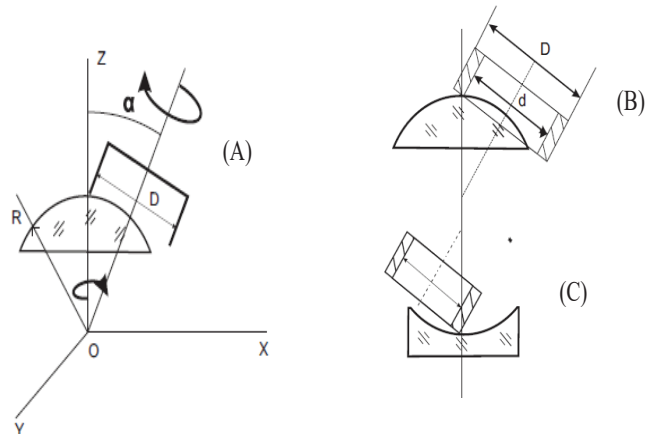
Bước 1 - Mài tinh mặt cầu (hình 2): máy phay được dùng để tạo hình bề mặt cầu của phôi. Dụng cụ mài là đá mài có gắn các hạt mài kim cương, được gắn chặt với trục chính của đầu phay, chi tiết gia công được gắn trên trục chính của máy. Trục quay của dụng cụ đi qua tâm bề mặt cầu của chi tiết và tạo với trục quay của chi tiết một góc α . Đá mài kim cương có dạng hình trụ để: phay mặt cầu lõm theo sơ đồ (2B), phay mặt cầu lồi theo sơ đồ (2C).

Bán kính cong R của mặt cầu được xác định theo góc nghiêng α của trục dao theo công thức (1) và (2):

$$+ \text{Mặt cầu lồi: } \sin \alpha = \frac{d}{2R} \quad (1)$$

$$+ \text{Mặt cầu lõm: } \sin \alpha = \frac{D}{2R} \quad (2)$$

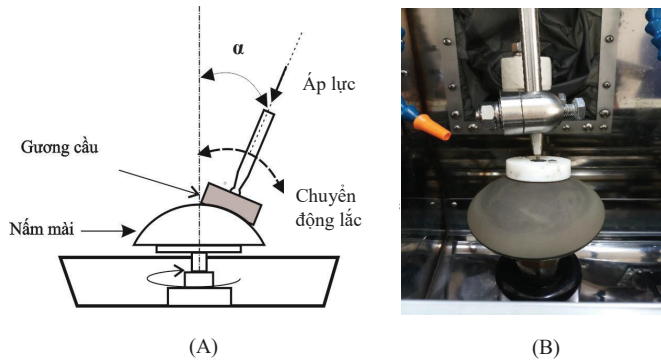
Trong đó: α là góc nghiêng giữa trục dụng cụ và trục chi tiết; D là đường kính ngoài của dụng cụ; d là đường kính trong của dụng cụ; R là bán kính của mặt cầu chi tiết.



Hình 2. Sơ đồ mài tinh mặt cầu trên máy phay. (A) Hệ tọa độ khi phay; (B) Phay mặt cầu lõm; (C) Phay mặt cầu lồi.

Bước 2 - Mài mịn quang học: mài mịn quang học là bước gia công tiếp theo của mài tinh, được thực hiện theo sơ đồ hình 3. Đá mài mịn (nám mài) có hình nấm cầu, bán kính cầu của mặt nấm bằng bán kính của chi tiết gương cầu. Bề mặt nấm cầu được phủ vật liệu composit gồm: hạt mài kim cương được kết dính bằng vật liệu liên kết (nhựa, hoặc kim loại). Nám mài có thân trụ để lắp lên trục chính máy mài tốc độ cao HSCPM-4. Chi tiết gương cầu được đặt áp lên mặt trên của nấm cầu, tự xoay quanh trục của nó và di chuyển qua lại nhờ cơ cấu cánh tay đề ép từ trên xuống.

Mài mịn quang học được thực hiện trên máy mài quang học tốc độ cao HSCPM-4 (hình 4), gồm 5 bước từ 1 tới 5, sử dụng 5 nám mài kim cương (hình 5) từ N^01 - N^05 với kích thước hạt kim cương tương ứng (bảng 1).



Hình 3. Máy mài mịn và đánh bóng. (A) Sơ đồ nguyên lý; (B) Ảnh chụp nắm mài và gương cầu.

Thông số công nghệ của quá trình mài mịn và đánh bóng quang học gồm: tốc độ trục chính gá nắm mài, tốc độ lắc của trục dụng cụ, góc lắc của trục dụng cụ, áp lực mài, thời gian mài. Các thông số công nghệ này được thiết lập dựa vào thông số cơ bản của máy mài và điều chỉnh thực nghiệm thành bộ thông số công nghệ ghi trong bảng 1.

Bảng 1. Các bước mài mịn quang học và dụng cụ.

TT	Tên bước mài mịn	Nắm mài/Kích thước hạt [μm]	Độ nhám bề mặt đạt được [Rz]
1	Mài mịn quang học lần 1	N ⁰ 1/100	1,25
2	Mài mịn quang học lần 2	N ⁰ 2/60	0,8
3	Mài mịn quang học lần 3	N ⁰ 3/40	0,6
4	Mài mịn quang học lần 4	N ⁰ 4/20	0,25
5	Mài mịn quang học lần 5	N ⁰ 5/8	0,1

Bước 3 - Mài bóng quang học: mài bóng quang học được thực hiện trên máy mài bóng quang học tốc độ cao HSCPM-4, sử dụng nắm nhựa đánh bóng (trên bề mặt nắm cầu kim loại có phủ vật liệu nhựa đánh bóng) và bột đánh bóng kim cương không liên kết, kích thước hạt 0,5 μm. Thông số công nghệ cần thiết lập gồm: tốc độ trục chính, tốc độ lắc, góc lắc, áp lực mài, thời gian đánh bóng.

Thiết bị và dụng cụ gia công

Các bước gia công từ mài tính quang học - mài mịn quang học - mài bóng quang học được thực hiện trên 2 thiết bị máy phay mặt cầu CG-2 và máy mài đánh bóng quang học tốc độ cao HSCPM-4 (hình 4). Các thiết bị này được chế tạo bởi Công ty Sidai Precision, Hàn quốc. Dụng cụ gia công gồm: đá mài kim cương sử dụng cho máy mài cầu CG-2; các nắm mài kim cương (hình 5) lắp trên HSCPM-4 cho các bước mài mịn quang học (bước 1 - bước 5); nắm nhựa đánh bóng cho bước đánh bóng quang học. Tất cả các dụng cụ này được chúng tôi tính toán, lựa chọn và điều chỉnh cho phù hợp với mục tiêu đặt ra.



Hình 4. Các thiết bị mài đánh bóng quang học. Máy mài cầu CG-2 (bên trái); máy mài bóng quang học tốc độ cao HSCPM-4 (bên phải).

Nắm mài mịn R70 là chi tiết hình nắm cầu với bán kính mặt cầu 70,15 mm, có thân trụ đường kính Φ18 để lắp lên máy mài tốc độ cao HSCPM-4. Trên bề mặt nắm cầu phủ lớp vật liệu composit gồm hạt mài kim cương được kết dính bằng vật liệu liên kết (nhựa, hoặc kim loại). Lớp vật liệu composit có chiều dày 2 mm. Bề mặt nắm mài được tạo các rãnh thẳng hướng tâm hoặc xoắn hướng tâm tương ứng với từng nguyên công mài mịn. Có 5 loại nắm mài khác nhau tương ứng với 5 nguyên công mài mịn từ 1 tới 5.



Hình 5. Nắm mài kim cương (5 loại nắm mài khác nhau tương ứng với 5 nguyên công mài mịn từ 1 tới 5).

Thông số công nghệ mài/đánh bóng

Trên cơ sở tham khảo tài liệu [3] về các thông số công nghệ (tốc độ quay trục chính, tốc độ lắc của trục gá chi tiết và áp lực mài) và các thử nghiệm thực tế (góc trục nắm - trục gá chi tiết, áp lực mài, thời gian mài) trên thiết bị HSCPM-4, bộ 5 thông số công nghệ cho các quá trình mài đánh bóng các mẫu gương cầu đã được thiết lập (bảng 2).

Bảng 2. Thông số công nghệ mài/đánh bóng.

Thông số	Bước 1	Bước 2	Bước 3	Bước 4	Bước 5	Bước 6
Tốc độ quay của trục nắm mài (vòng/phút)	1.400	1.400	1.400	1.400	1.400	100
Tốc độ lắc của trục gá chi tiết (lượt/phút)	35	35	35	35	35	35
Góc trục nắm - trục gá chi tiết (độ)	15	15	15	15	15	0
Áp lực mài [atm]	3	3	1,2	1,2	1,2	0,2
Thời gian mài	60 giây	60 giây	60 giây	60 giây	60 giây	20 phút

Lưu ý: thông số công nghệ áp lực mài (bảng 2) được điều chỉnh giảm từ 3 atm xuống 1,2 atm bắt đầu tại bước 2 tới bước 5 nhằm giảm tốc độ mài mòn bề mặt, đảm bảo độ chính xác hình dạng bề mặt yêu cầu tại các bước tương ứng. Cũng với lý do tương tự, tại bước 6 (mài bóng quang học), tốc độ quay trục chính giảm từ 1.400 xuống 100 vòng/phút, áp lực mài giảm xuống 0,2 atm, thời gian mài bóng tăng lên 20 phút.

Kết quả và bàn luận

Ba mẫu gương cầu đã được mài đánh bóng hoàn chỉnh theo quy trình công nghệ đã được thiết lập gồm: các bước gia công (bảng 1), bộ thông số công nghệ (bảng 2). Chất lượng bề mặt gương cầu được kiểm tra, đánh giá theo 3 chỉ tiêu: bán kính cong bề mặt cầu, độ chính xác hình dạng bề mặt cầu và độ nhám bề mặt cầu.

Bán kính cong bề mặt cầu (Surface radius) và độ chính xác hình dạng bề mặt cầu (Surface number)

Việc xác định các thông số của bán kính cong và hình dạng bề mặt được kiểm tra bằng phương pháp dưỡng kiểm quang học [1]. Dưỡng kiểm quang học là một khối thủy tinh quang học có bề mặt lõm bán kính R=70,15 mm, được chế tạo với độ chính xác cao của bán kính bề mặt cầu, sai lệch cho phép của bán kính dưỡng kiểm so với giá trị danh định là: 0,01÷0,15%. Bán kính cầu của dưỡng kiểm quang học được đo bằng dụng cụ cầu kế (spherometer). Trong nghiên cứu này, cầu kế được sử dụng là thiết bị SpheroCompact của Công ty TriOptics - CHLB Đức (hình 6).



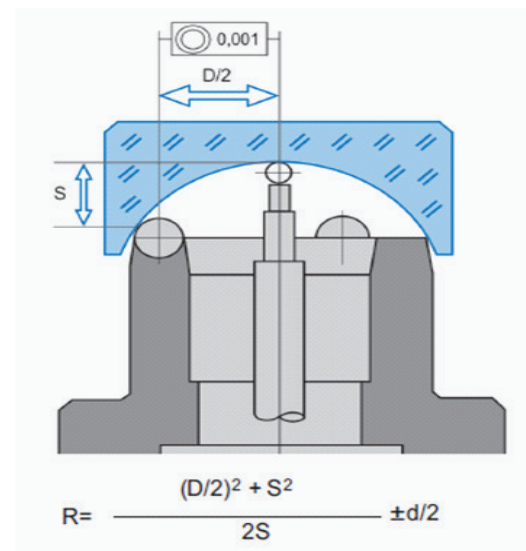
Hình 6. Thiết bị đo bán kính cầu SpheroCompact.

CERTIFICATE OF MEASUREMENT					
Company		: Trioptics GmbH			
Date		: Friday, April 10, 2020 10:00:04 AM			
Serial No.		: SST 044			
Ring		: Ring D 38mm SN 2666 (38.009594)			
Measured with		: Super Spherotronic HR - Trioptics			
MEASURING PROGRAM		: Lenses			
CONVEX		CONCAVE			
No.	Saggita[]	Radius[]	No.	Saggita[]	Radius[]
1	2.54830	70.14116			
2	2.54820	70.14389			
3	2.54820	70.14389			
4	2.54820	70.14389			
5	2.54810	70.14662			
6	2.54820	70.14389			
7	2.54820	70.14389			
8	2.54810	70.14662			
----- Measurements: 8		----- Measurements: 0			
Mean Val: +2.54819		+70.14423		+0.00000	
Std Dev: 0.00006		0.00175		+0.00000	
Saggita Diff.(mm) :		33.9714		0.0000	
Interference Rings:		124437.4		0.0	
Tolerance? :		NO		NO	
Maximum Tolerance 0.020% according to: DIN 58161-2					

Hình 7. Kết quả đo bán kính cầu.

Kết quả đo (hình 7) cho thấy sai số bán kính cong của bề mặt cầu đã chế tạo đạt 0,005 mm. Khi đo, bề mặt lõm R70,15 của dưỡng kiểm được áp với bề mặt lõm của gương cầu, nếu độ chính xác bề mặt của gương cầu đủ cao, tương ứng là khe hở không khí giữa bề mặt cầu lõm và dưỡng cầu đủ nhỏ, ta sẽ quan sát thấy các vân giao thoa. Trong nghiên cứu này, yêu cầu số lượng vân giao thoa (vòng quang) khi đo chỉ được phép nhỏ hơn 1: N≤1 vòng quang (1 vân giao thoa tương đương với khe hở giữa bề mặt sản phẩm và bề mặt dưỡng là λ/2, tức là ~0,25 μm).

Các vòng quang có thể xuất hiện dưới nhiều dạng hình khác nhau, ví dụ: vòng quang tròn thì bề mặt kiểm tra là bề mặt cầu; vòng quang có hình elíp thì bề mặt kiểm tra sẽ là phi cầu... Mức độ phi cầu được đánh giá bằng giá trị sai số hình dạng (ΔN). Giá trị ΔN là hiệu số vòng quang đo



được trên hai phương vuông góc với nhau. Kết quả đo bằng dưỡng kiểm quang học đạt giá trị: $N=1$; $\Delta N=1$.

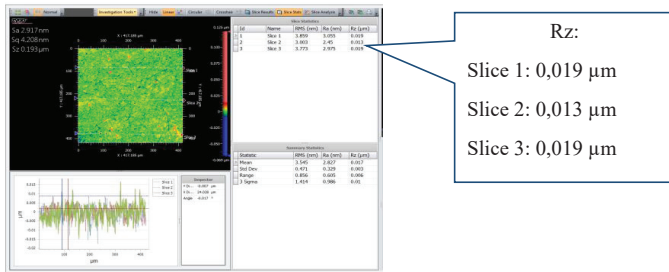
Độ nhám bề mặt (Surface roughness)

Độ nhám là thông số quan trọng, ảnh hưởng tới hệ số phản xạ của bề mặt gương. H.E. Bennett [4] đã nghiên cứu và xây dựng biểu thức liên hệ giữa độ nhám của bề mặt phẳng với hệ số phản xạ góc tại góc pháp tuyến và đã kiểm chứng bằng thực nghiệm:

$$R_s = R_0 \exp[-(4\pi\sigma)^2 \cdot \lambda^2] \tag{3}$$

Trong đó: R_s là hệ số phản xạ góc của bề mặt nhám; R_0 là hệ số phản xạ góc của bề mặt lý tưởng của cùng vật liệu; σ là độ nhám bình phương trung bình; λ là bước sóng ánh sáng chiếu tới bề mặt. Các biểu thức có nghĩa trong trường hợp khi độ nhám trung bình bình phương nhỏ hơn so với bước sóng ánh sáng.

Trong nghiên cứu này, độ nhám bề mặt được đo đạc bằng phương pháp giao thoa ánh sáng trắng [5] (White light interferometry) trên thiết bị 3D Optical Profiler-ZeGate™ Pro của Công ty Zygo (hình 8).



Hình 8. Kết quả đo độ nhám bề mặt gương cầu sau đánh bóng trên thiết bị Optical Profiler-ZeGate™ Pro.

Kết quả phép đo độ nhám trên thiết bị 3D Optical Profiler-ZeGate™ Pro cho các mẫu có giá trị Rz từ 0,013 tới 0,019, nhỏ hơn Rz=0,05 theo yêu cầu kỹ thuật đặt ra đối với sản phẩm mặt cầu lõm.

Kết luận

Trong bài báo này, một quy trình công nghệ mài đánh bóng gương cầu làm từ thép hợp kim đã được nhóm nghiên cứu thử nghiệm. Quy trình công nghệ gồm: các bước gia công (bảng 1) và dụng cụ gia công tương ứng (các dụng cụ đã được thiết kế chế tạo: các nắm mài, bộ dưỡng kiểm quang học, các dụng cụ gá kẹp), cùng với bộ thông số công nghệ (bảng 2). Trên cơ sở quy trình này, 3 chi tiết gương cầu làm từ thép hợp kim đã được gia công tinh bề mặt cầu, mài mịn và đánh bóng quang học đạt thông số: độ chính xác bán kính cầu nhỏ hơn 0,05%R; độ nhám bề mặt Rz: 0,02; số vòng quang N: 0,5-1,0; sai số vòng quang ΔN: 1. Kết quả thực nghiệm và đo kiểm cho thấy, sản phẩm đáp ứng yêu cầu kỹ thuật đề ra. Bên cạnh đó, các tác giả đã nghiên cứu xây dựng quy trình công nghệ gia công bề mặt cầu lõm (quy trình gia công, bộ thông số công nghệ...). Đây là tài liệu tốt cho gia công các loại gương cầu kim loại có đường kính từ 10-100 mm trên máy HSCPM-4. Các bề mặt cầu trên nền thép hợp kim, ngoài ứng dụng chế tạo gương cầu quang học, còn có thể ứng dụng chế tạo khuôn ép thấu kính plastic, hoặc chế tạo van bi cầu...

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Taylor and Francis Group (2017), *Handbook of Optical Engineering*.
 [2] Nguyễn Hồng Ngọc (2005), *Giáo trình công nghệ quang học*, Học viện Kỹ thuật Quân sự.
 [3] Hank H. Karow (2004), *Fabrication Methods for Precision Optics*, John Wiley & Sons, Inc.
 [4] H.E. Bennett, et al. (1961), "Relation between surface roughness and specular reflection at normal incidence", *Journal of the Optical Society of America*, **51(2)**, pp.123-129.
 [5] https://en.wikipedia.org/wiki/White_light_interferometry.