

# משימת סיום מבוא לאופטיקה מודרנית ואלקטרואופטיקה, חלק 1

מגיש: דניאל ברוקר-315015594

## שאלה 1:

$$n_0 = 1.1 + \frac{594}{1000} = \frac{847}{500} = 1.694$$

$$\theta_1 = [2 + \text{mod}(594, 80)]^\circ = 36^\circ$$

$$\alpha = [3 + \text{mod}(5594, 45)]^\circ = 17^\circ$$

$$\lambda = [1000 + \text{mod}(594, 500)]\text{nm} = 1094 \text{ [nm]}$$

א.

לפי ברוסטר אם הגל יהיה מקוטב במקביל למישור ההתרחשות ויפגע בזווית  $\theta_1$  שמצאנו כל הגל יעבור ולא תהיה החזרה בכלל.

$$\theta_i = \arctan\left(\frac{n_0}{n_1}\right) = \arctan\left(\frac{1.694}{1}\right) = 59.4458^\circ$$

ב.

ידוע לנו מההרצאות כי העוצמה  $I \sim |E|^2$

נתון:  $I_0 = 5w$

$$I_1 = \frac{5}{2} = 2.5w$$

$$E_{1||} = E_1 * \cos(\alpha) = \sqrt{2.5} * \cos(17) = 1.512$$

$$E_{1\perp} = E_1 * \sin(\alpha) = \sqrt{2.5} * \sin(17) = 0.46228$$

נשתמש בחוק סנל למצוא את זווית השבירה:

$$n_1 * \sin(\theta_1) = n_2 * \sin(\theta_2)$$

$$n_1 * \sin(\theta_1) = n_0 * \sin(\theta_2)$$

$$\theta_2 = \arcsin\left(\frac{\sin(\theta_1)}{n_0}\right) = \arcsin\left(\frac{\sin(36)}{1.694}\right) = 20.30275^\circ$$

$$r_{||} = \frac{\tan(\theta_2 - \theta_1)}{\tan(\theta_2 + \theta_1)} = \frac{\tan(20.30275 - 36)}{\tan(20.30275 + 36)} = -0.1874$$

$$r_{\perp} = \frac{\sin(\theta_2 - \theta_1)}{\sin(\theta_2 + \theta_1)} = \frac{\sin(20.30275 - 36)}{\sin(20.30275 + 36)} = -0.32519$$

$$E_{2||} = E_{1||} * r_{||} = -0.2833488$$

$$E_{2\perp} = E_{1\perp} * r_{\perp} = -0.15032$$

$$I_2 = |E_{2||}|^2 + |E_{2\perp}|^2 = 0.1028826w \quad \text{עוצמת האור העובר:}$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{E_{2\perp}}{E_{2||}}\right) = \arctan\left(\frac{-0.15032}{-0.2833488}\right) = 27.94649676^\circ$$

במקרה של קיטוב מקביל למישור הפגיעה:

$$I_3 = I_2 * \cos^2(\beta) = 0.1028826 * \cos^2(27.94649676) = 0.0802865 w$$

במקרה של קיטוב ניצב למישור הפגיעה:

$$I_3 = I_2 * \cos^2(90 - \beta) = 0.1028826 * \cos^2(90 - 27.94649676) = 0.022596w$$

ג.

$$d_{t_{max}} = d_{r_{max}}$$

$$\frac{\lambda_v m}{2n * \cos(\theta)} = \frac{\lambda_v(m + 0.5)}{2n * \cos(\theta)}$$

$$(\lambda_v + 0.5)m = \lambda_v(m + 0.5) / * 2$$

$$\lambda_v[nm] = m = 1094$$

$$d_{t_{max}} = \frac{\lambda_v m}{2n * \cos(\theta)} = \frac{(1094 * 10^{-9}) * 1094}{2 * 1.694 * \cos(90 - 59.4458)} = 410216.4882[nm] = d$$

את הזווית בה צריך להיות מונח הלוח מצאני בסעיף א':

$$\theta_i = 59.4458^\circ$$

ד.

נחשב את T מקדם ההעברה ונציג אותו כפונקציה של  $\lambda$ .

כדי למצוא את T נמצא ראשית את R ו  $\delta$  כדי להציב אותם בביטוי:

ניקח את  $r_s$  בגלל הקיטוב האנכי

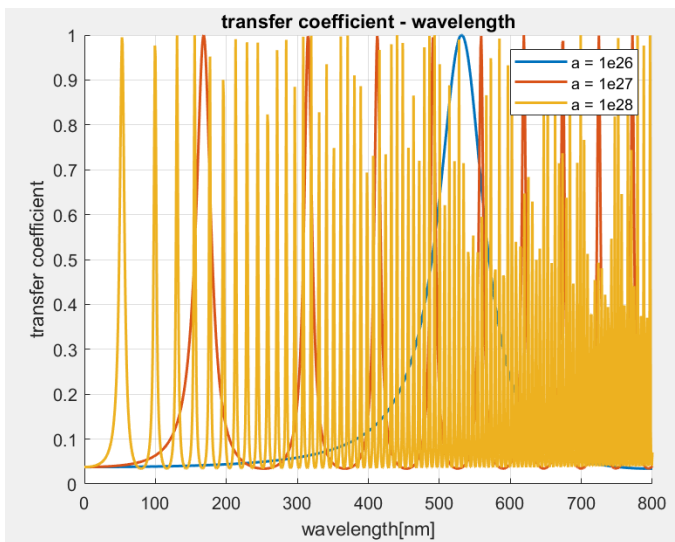
$$\delta = 4\pi n_v d * \frac{\cos(\theta_t)}{\lambda_v}$$

$$R = |r^2| \Rightarrow r_s = \frac{\sin(\theta_t - \theta_i)}{\sin(\theta_t + \theta_i)}$$

כדי למצוא את  $r_s$  יש לנו את  $\theta_t = \theta_i = 36^\circ$

$$\arcsin\left(\frac{\sin(\theta_i)}{n_v}\right)$$

$$T = \frac{I_t}{I_i} = \frac{(1 - R)^2}{(1 - R)^2 + 4R \cdot \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right)}$$



אפשר לראות לפי הנוסחה שקיבלנו למקדם השבירה ששג יגדל נצפה לקבל מקדם שבירה קטן יותר (מגדיל את האיבר השלילי).

אנחנו רואים בגרף שג גדולה יותר גוררת FSR (FSR הוא המרווח בין הפיקים החוזרים) קטן יותר וזה לא מסתדר עם הציפייה שמקדם שבירה קטן יותר יגדיל את הגל שנכנס אליו ייתן לנו אורך גל גדול יותר שיוביל ל FSR גדול יותר.

## שאלה 2:

$$n_2 = 1.1 + \frac{594}{1000} = 1.694$$

$$R_1 = [50 - 94] = -44 [mm]$$

$$R_2 = [50 - 55] = -5 [mm]$$

א.

לפי נוסחת לוטשי העדשות לעדשה דקה:

$$\frac{n_2 - n_1}{R_1} + \frac{n_3 - n_2}{R_2} = \frac{1}{f}$$

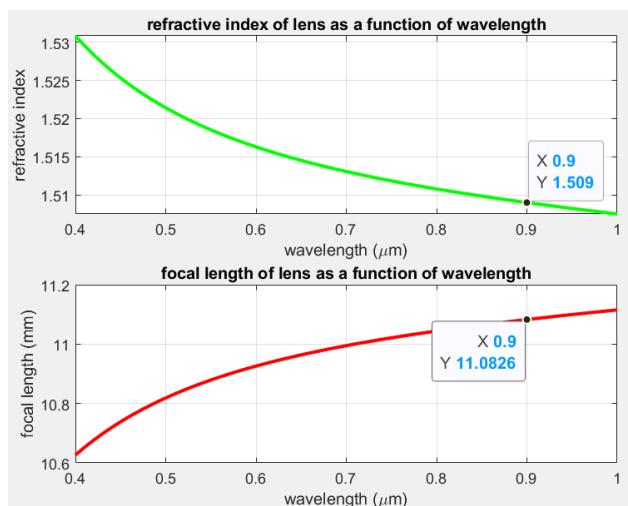
$$\frac{1.694 - 1}{-44} + \frac{1 - 1.694}{-5} = \frac{1}{f}$$

$$f = 8.128279 [mm]$$

קיבלתי מוקד חיובי כלומר מדובר בעדשה מרכזת ולכן ניתן לקבל דמות ממשית עבור  $u < f$ .

ב.

$$n_{BK7}^2(\lambda) = 1 + \frac{1.03961212\lambda^2}{\lambda^2 - 0.00600069867} + \frac{0.231792344\lambda^2}{\lambda^2 - 0.0200179144} + \frac{1.01046945\lambda^2}{\lambda^2 - 103.560653}$$



נוכל להוציא מהגרף של  $n_2$  כפונקציה של  $\lambda$  כי עבור אורך גל של 0.9 נקבל מקדם שבירה של  $n_{BK7} = 1.509$ .

עכשיו ניתן לראות כי עבור אורך גל זה נצפה ל  $f = 11.0826 [mm]$  לפי הגרף התחתון, נבדוק בעזרת נוסחת לוטשי העדשות:

$$\frac{n_2 - n_1}{R_1} + \frac{n_3 - n_2}{R_2} = \frac{1}{f}$$

$$\frac{1.509 - 1}{-44} + \frac{1 - 1.509}{-5} = \frac{1}{f}$$

$$f = 11.082565 [mm]$$

$$R = 24 + 10 = 34[mm]$$

$$\lambda_1 = [194 + 550] = 744 [nm] = 0.744 [um]$$

$$\lambda_2 = [84 + 450] = 534[nm] = 0.534 [um]$$

(1)

$$\frac{1}{f} = \frac{n-1}{R} + \frac{1-n}{-R} = \frac{2n-2}{R}$$

$$f = \frac{34}{2(1.512-1)} = 33.203125[mm]$$

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \text{ עבור עדשה דקה}$$

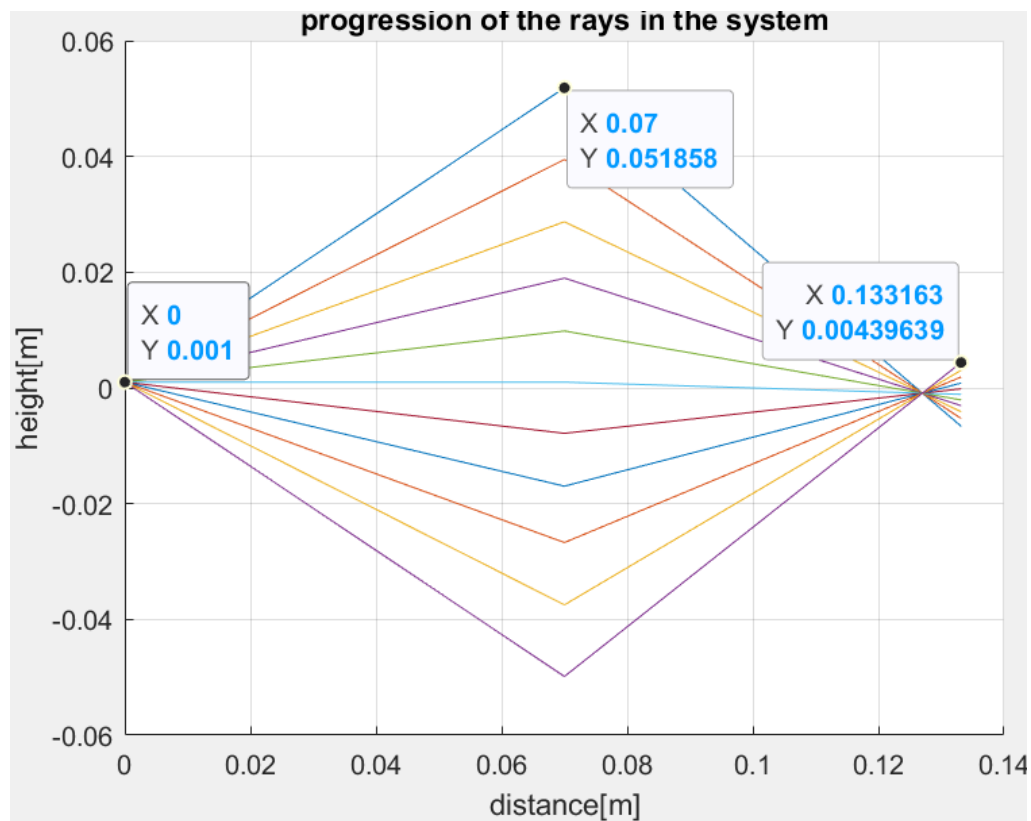
$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{33.203125} & 1 \end{pmatrix}$$

$$0 < L_2 = -\frac{AL_1+B}{CL_1+D} \text{ כעת נחפש}$$

$$L_2 = -\frac{70}{-\frac{70}{33.203125} + 1} = 63.16348195[mm] > 0$$

כלומר נקבל דמות ממשית.

(2)



מטריצת התקדמות מרחק  $d$  במרחב:  $\begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$

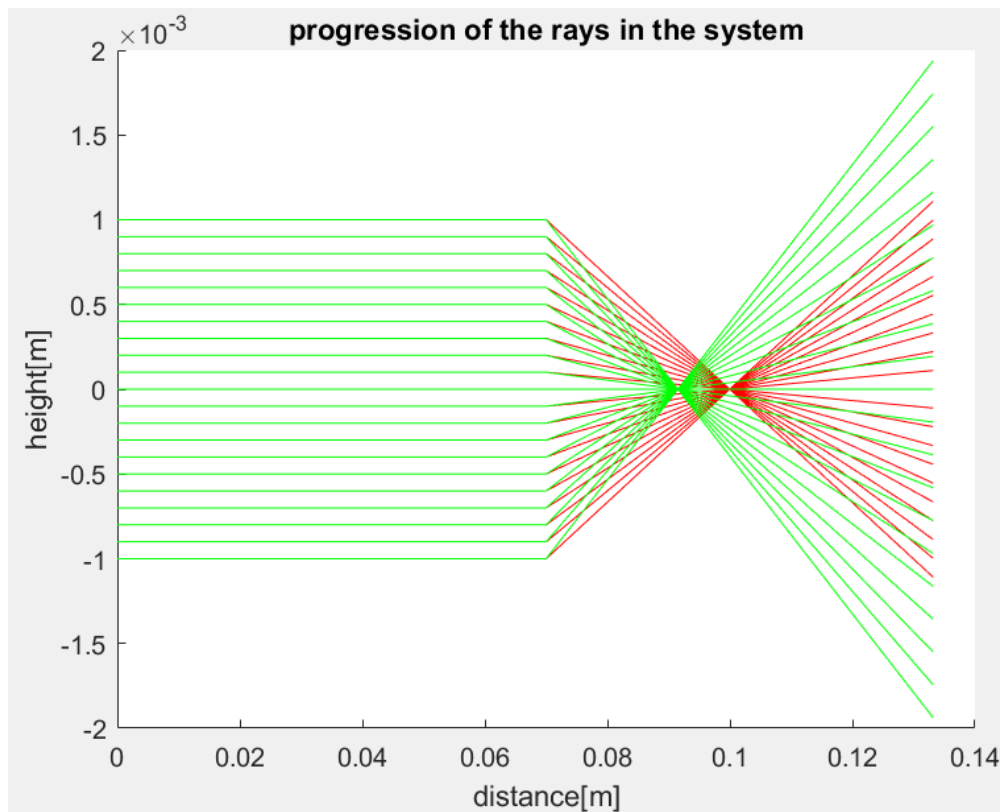
מטריצת עדשה דקה:  $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix}$

$$\begin{pmatrix} x' \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$M = \begin{pmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{L_2}{f} & L_2 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{L_2}{f} & L_2 + L_1 - \frac{L_1 L_2}{f} \\ -\frac{1}{f} & 1 - \frac{L_1}{f} \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} 1 - \frac{L_2}{f} & L_2 + L_1 - \frac{L_1 L_2}{f} \\ -\frac{1}{f} & 1 - \frac{L_1}{f} \end{pmatrix}$$

אורכי גל קצרים יותר (כמו אור ירוק) ( $\lambda = 495-565[nm]$ ) מתעקמים יותר מאורכי גל ארוכים יותר (כמו אור אדום) אורכי גל קצרים יותר (כמו אור ירוק) ( $\lambda = 620-750[nm]$ ) כאשר הם נתקלים בעדשה מרכזת זהה ניתן לראות כי אכן הקרניים הירוקות מתעקמות יותר ונפגשות במוקד קרוב יותר.



$$R = 24 + 10 = 34[mm] = R_1 = -R_2$$

$$\lambda_1 = [94 + 400] = 494 [nm]$$

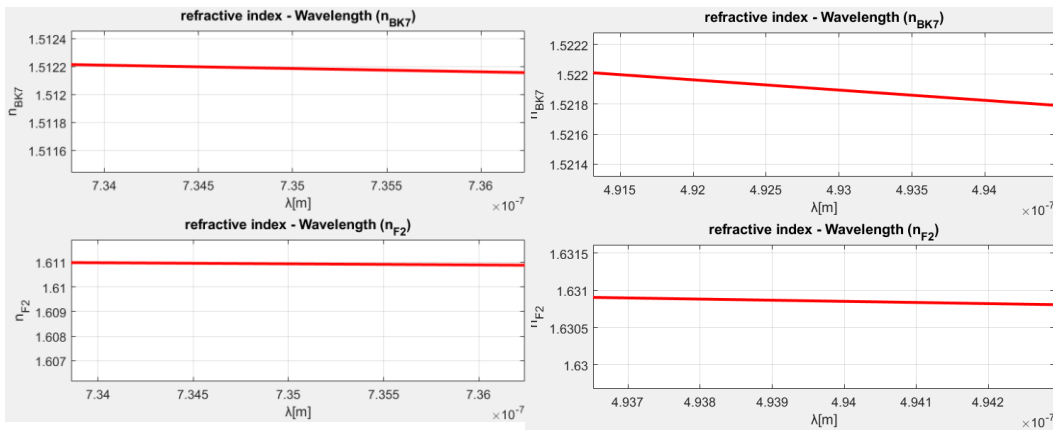
$$\lambda_2 = [135 + 600] = 735[nm]$$

$$d_1 = 0.12 + 0.1 = 0.22[mm]$$

$$d_2 = 1.59 + 1 = 2.59[mm]$$

(1)

נוכל להשתמש בקוד שכתבנו כדי להוציא עוד גרף של מקדם השבירה כפונקציה של אורך הגל גם עבור  $n_{F2}$  ולהוציא מהגרף את הערכים של  $n$  בהם נשתמש (לצורך נוחות יקראו  $n_2$  ו  $n_7$ ):



עבור  $\lambda_1 = 494 [nm]$

$$n_7 \approx 1.522 \text{ ו } n_2 \approx 1.631$$

עבור  $\lambda_2 = 735 [nm]$

$$n_7 \approx 1.512 \text{ ו } n_2 \approx 1.611$$

מטריצת התקדמות מרחק  $d$  במרחב:  $\begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$

מטריצת מעבר דרך משטח כדורי:  $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_1 - n_2}{n_2 * R} & \frac{n_1}{n_2} \end{pmatrix}$

המטריצה שמייצגת את העדשה תהיה:

$$\begin{aligned} M &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_2 - 1}{R_3} & n_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_7 - n_2}{n_2 * R_2} & \frac{n_7}{n_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1 - n_7}{n_7 * R_1} & \frac{1}{n_7} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_2 - 1}{R_3} & \frac{d_2(n_2 - 1) + n_2 R_2}{R_3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_7 - n_2}{n_2 * R_2} & \frac{n_7}{n_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1 - n_7}{n_7 * R_1} & \frac{1}{n_7} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_2 - 1}{R_3} & \frac{d_2(n_2 - 1) + n_2 R_2}{R_3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_1 \\ \frac{n_7 - n_2}{n_2 * R_2} & \frac{d_1(n_7 - n_2) + n_7 R_2}{n_2 * R_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1 - n_7}{n_7 * R_1} & \frac{1}{n_7} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_2 - 1}{R_3} & \frac{d_2(n_2 - 1) + n_2 R_2}{R_3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 + \frac{1 - n_7}{n_7 * R_1} * d_1 & \frac{d_1}{n_7} \\ \frac{n_7 - n_2}{n_2 * R_2} + \frac{d_1(n_7 - n_2) + n_7 R_2}{n_2 * R_2} * \frac{1 - n_7}{n_7 * R_1} & \frac{d_1(n_7 - n_2) + n_7 R_2}{n_2 * R_2 * n_7} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

$$= \left( \frac{1}{R_3} \quad \frac{0}{R_3} \right) \left( \frac{\frac{n_7 * R_1 + (1 - n_7)d_1}{n_7 * R_1}}{(n_7 - n_2)n_7 * R_1 + (d_1(n_7 - n_2) + n_7 R_2)) * (1 - n_7)} \quad \frac{\frac{d_1}{n_7}}{d_1(n_7 - n_2) + n_7 R_2} \right)$$

$$A = \frac{n_7 * R_1 + (1 - n_7)d_1}{n_7 * R_1}$$

$$B = \frac{d_1}{n_7}$$

$$C = \frac{(n_7 * R_1 + (1 - n_7)d_1)(n_2 - 1)}{n_7 R_3 R_1} + \frac{((n_7 - n_2)n_7 * R_1 + (d_1(n_7 - n_2) + n_7 R_2)) * (1 - n_7)(d_2(n_2 - 1) + n_2 R_2)}{n_2 R_2 n_7 R_1 R_3}$$

$$D = \frac{d_1(n_2 - 1)}{R_3 n_7} + \frac{(d_1(n_7 - n_2) + n_7 R_2)(d_2(n_2 - 1) + n_2 R_2)}{n_2 R_3 R_2 n_7}$$

עכשיו נוכל להציב את הנתונים שלנו ב- $C$  ולהשוות בין  $C$  של  $\lambda_1$  ל- $C$  של  $\lambda_2$  כי ידוע לנו ש  $C = -\frac{1}{f}$  ואנחנו מחפשים מוקד שווה.

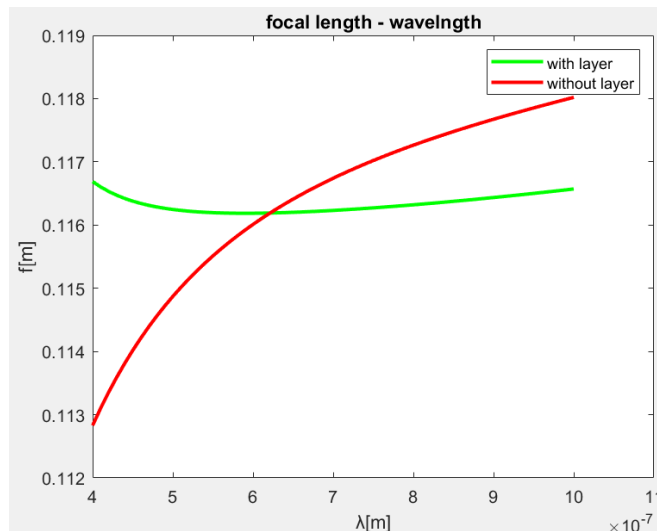
עבור  $\lambda_1 = 494 [nm]$

$$C = \frac{-0.674R_3 + 34.238}{55.454R_3}$$

עבור  $\lambda_2 = 735 [nm]$

$$C = \frac{-0.666R_3 + 32.74}{54.774R_3}$$

וכאשר נשווה בניהם מתקבל  $R_3 = 136.503 [mm]$ .



(2)

(3)

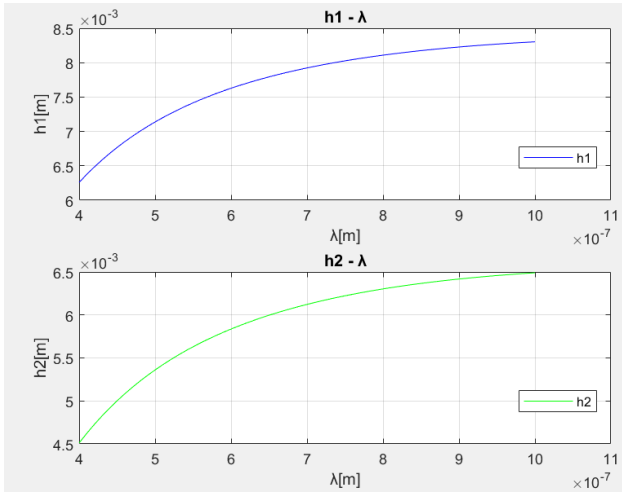
נשתמש במשוואות:

$$h_1 = -\frac{\frac{n}{n'} - D}{C} = \frac{D-1}{C}$$
$$h_2 = \frac{1-A}{C}$$

לאחר שכבר חישבנו את המטריצה של המערכת בסעיף קודם.

$$h_{1avg} = 0.0077[m]$$

$$h_{2avg} = 0.0059[m]$$





## נספחים-קוד:

### שאלה 1:

```
%1
disp('1:');
%1D
disp('1D:');

n0 = 1.694;
a = [1e26, 1e27, 1e28]; %Hz^2
d = 410216.4882; %[nm]
theta_i = 36; %degrees

lambda_margin = linspace(0, 800, 1000); %[nm]

T_value = zeros(length(a), length(lambda_margin));

%loop over each coefficient 'a'
for i = 1:length(a)
    %refractive index for each wavelength
    v = physconst('LightSpeed') ./ (lambda_margin * 1e-9); %Hz
    n = n0 - a(i) ./ v.^2;

    theta_t = asin(sin(theta_i) ./ n);

    r_s = sin(theta_t - theta_i) ./ sin(theta_t + theta_i);
    R = abs(r_s).^2;

    delta = 4 * pi * (n0 - a(i) ./ v.^2) .* d .* cos(theta_t) ./ lambda;

    %transfer coefficient
    T = ((1 - R).^2) ./ ((1 - R).^2 + 4 * R .* sin(delta/2).^2);

    T_value(i, :) = T;
end

%plot transfer coefficients for each 'a'
figure;
hold on;
for i = 1:length(a)
    plot(lambda_margin, T_value(i, :), 'LineWidth', 1.5);
end
hold off;

%plot
title('transfer coefficient to wavelength');
xlabel('wavelength[nm]');
ylabel('transfer coefficient');
legend('a = 1e26', 'a = 1e27', 'a = 1e28');
grid on;
```

## שאלה 2:

```
%2
disp('2:');
%2C1
disp('2C1:');
lambda_margin = (0.4:0.01:1);%μm

f_len_new = zeros(size(lambda_margin));
n_val_of_n7 = zeros(size(lambda_margin));

%focal lengths for every wavelength
for j = 1:length(lambda_margin)
    wavelength = lambda_margin(j);

    %n_BK7 formula
    n = sqrt(1 + 1.03961212./(1-0.00600069867./wavelength^2) + 0.231792344./(1-
0.0200179144./wavelength^2) + 1.01046945./(1-103.560653./wavelength^2)));
    n_val_of_n7(j) = n;

    %lens maker's formula
    f = (n - 1) * ((1/(-44)) - (1/(-5))); % R1 = -44 and R2 = -5
    f_len_new(j) = 1 / f;
end

%plot n to λ
figure;
subplot(2, 1, 1);
plot(lambda_margin, n_val_of_n7, 'g', 'LineWidth', 2);
xlabel('λ(\μm)');
ylabel('n');
title('refractive index of lens to wavelength');
grid on;

%plot f to λ
subplot(2, 1, 2);
plot(lambda_margin, f_len_new, 'r', 'LineWidth', 2);
xlabel('λ[\μm]');
ylabel('f [mm]');
title('focal length to wavelength');
grid on;
%%
%2C2
disp('2C2:');
R = 34e-3; %radii of curvature
lambda1 = 744e-9;%[m]
lambda2 = 534e-9;%[m]
f = 33.203125e-3; %[m]
L1 = 70e-3;%d to lens [m]
L2 = 63.16348195e-3;%d from lens to figure[m]
theta_range = linspace(pi/5, -pi/5, 11);%angles

%progression in space matrix
prog_mat = [1, L1; 0, 1];
%thin lens matrix
thin_lens_mat = [1, 0; -1/f, 1];

heights_aray = zeros(length(theta_range), 3);

%run over angles
for j = 1:length(theta_range)
```

```

    %incoming beam hight- 0.001[m]
    beam_initial = [0.001; tan(theta_range(j))];

    to_hit = prog_mat * beam_initial;
    hit = thin_lens_mat * to_hit;
    beam_finial = prog_mat * hit;

    heights_array(j, :) = [beam_initial(1), hit(1), beam_finial(1)];
end

%plot
figure;
hold on;
for j = 1:length(theta_range)
    plot([0, L1, L1 + L2], heights_array(j, :), '-');
end
xlabel('distance[m]');
ylabel('height[m]');
title('progression of the rays in the system');
grid on;

%%
%2C3
disp('2C3:');

f = 33.203125e-3; %[m]

%ray heights
heights_lambda1 = zeros(length(-10:1:10), 3);
heights_lambda2 = zeros(length(-10:1:10), 3);

%iterate over heights
h_range = -0.001:0.0001:0.001;
for j = 1:length(h_range)
    %incoming beam
    beam_initial = [h_range(j); 0];

    to_hit = prog_mat * beam_initial;
    hit = thin_lens_mat * to_hit;
    beam_finial = prog_mat * hit;

    heights_lambda1(j, :) = [beam_initial(1), hit(1), beam_finial(1)];

    %lambda2
    thin_lens_mat_lambda2 = [1, 0; -1/(f*(lambda2/lambda1)), 1];
    hit_lambda2 = thin_lens_mat_lambda2 * to_hit;
    beam_finial_lambda2 = prog_mat * hit_lambda2;

    heights_lambda2(j, :) = [beam_initial(1), hit_lambda2(1), beam_finial_lambda2(1)];
end

%plot
figure;
hold on;
%lambda1
plot([0, L1, L1 + L2], heights_lambda1(:, :), 'red');
%lambda2
plot([0, L1, L1 + L2], heights_lambda2(:, :), 'green');
xlabel('distance[m]');
ylabel('height[m]');
title('progression of the rays in the system');
hold off;

```

```

%%
%2D1
%%
%2D2
disp('2D2:');
R2=-34.*10.^(-3);%[m]
R1=34.*10.^(-3);%[m]
R3=136.503.*10.^(-3);%[m]
d1=0.22.*10.^(-3);%[m]
d2=2.59.*10.^(-3);%[m]
lambda_margin = (400*(10.^(-9)):10*(10.^(-9)):1000*(10.^(-9)));%[m]

f_len = zeros(size(lambda_margin));
n_val_of_n7 = zeros(size(lambda_margin));
n_val_of_n2 = zeros(size(lambda_margin));

for j = 1:length(lambda_margin)
    wavelength = lambda_margin(j);
    %n_BK7 formula
    n7=sqrt(1 + 1.03961212./(1-0.00600069867./(wavelength.*10^6)^2) + 0.231792344./(1-
    0.0200179144./(wavelength.*10^6)^2) + 1.01046945./(1-103.560653./(wavelength.*10^6)^2));
    n_val_of_n7(j) = n7;
    %n_F2 formula
    n2=sqrt(1 + 1.34533359./(1-0.00997743871./(wavelength.*10^6)^2) + 0.209073176./(1-
    0.0470450767./(wavelength.*10^6)^2) + 0.937357162./(1-111.886764./(wavelength.*10^6)^2));
    n_val_of_n2(j) = n2;

    numerator = n2 .* R3 .* (n2 .* R2 .* (-n7 + 1) + (n7 - n2) .* (n7 .* R1 + d1 .* (-n7 + 1))) +
    ...
    (d2 .* (n2 * R2 .* (-n7 + 1) + (d1 .* (1 - n7) + n7 .* R1) .* (n7 - n2)) + n2 .* R2
    .* (n7 .* R1 + d1 .* (-n7 + 1))) .* (n7 - n2);

    denominator = n7 .* n2^2 .* R1 .* R2 * R3;

    expression = numerator ./ denominator;
    f_len(j)=-1./expression;
end

%refractive index to wavelength
figure;
subplot(2, 1, 1);
plot(lambda_margin, n_val_of_n7, 'r', 'LineWidth', 2);
xlabel('\lambda[m]');
ylabel('n_{BK7}');
title('refractive index - Wavelength (n_{BK7})');
grid on;

subplot(2, 1, 2);
plot(lambda_margin, n_val_of_n2, 'r', 'LineWidth', 2);
xlabel('\lambda[m]');
ylabel('n_{F2}');
title('refractive index - Wavelength (n_{F2})');
grid on;

%avarages
f_avg=mean(f_len);
disp(f_avg);
n7_avg=mean(n_val_of_n7);
disp(n7_avg);
R1_avg=2.*f_avg.*(n7_avg-1);
R2_avg=-2.*f_avg.*(n7_avg-1);

lambda_margin = (400*(10.^(-9)):10*(10.^(-9)):1000*(10.^(-9)));%[m]

```

```

f_len_new = zeros(size(lambda_margin));

for i = 1:length(lambda_margin)
    wavelength = lambda_margin(i);

    n7=sqrt(1 + 1.03961212./((1-0.00600069867./(wavelength.*10^6)^2) + 0.231792344./((1-
0.0200179144./(wavelength.*10^6)^2) + 1.01046945./((1-103.560653./(wavelength.*10^6)^2)));
    n_val_of_n7(i) = n7;
    C_ABCD = (n7 - 1) .* ((1./(R1_avg)) - (1./(R2_avg)));
    f_len_new(i) = 1 ./ C_ABCD;
end

%plot focal length to wavelength
figure;
plot(lambda_margin, f_len, 'g', 'LineWidth', 2);
hold on;
plot(lambda_margin, f_len_new, 'r', 'LineWidth', 2);
hold off;
xlabel('\lambda[m]');
ylabel('f[m]');
title('focal length - wavelength');
legend('with layer', 'without layer');

%%
%2D3
disp('2D3:');
%Principal planes
h1 = zeros(size(lambda_margin));
h2 = zeros(size(lambda_margin));

n_val_of_n7_D3 = zeros(size(lambda_margin));
n_val_of_n2_D3 = zeros(size(lambda_margin));

%ABCD matrix
A_bcd = zeros(size(lambda_margin));
a_B_cd = zeros(size(lambda_margin));
ab_C_d = zeros(size(lambda_margin));
abc_D = zeros(size(lambda_margin));

lambda_margin = (400*(10.^(-9)):10*(10.^(-9)):1000*(10.^(-9)));\%[m]
for i = 1:length(lambda_margin)
    wavelength = lambda_margin(i);

    %n_BK7 formula
    n7=sqrt(1 + 1.03961212./((1-0.00600069867./(wavelength.*10^6)^2) + 0.231792344./((1-
0.0200179144./(wavelength.*10^6)^2) + 1.01046945./((1-103.560653./(wavelength.*10^6)^2)));
    n_val_of_n7_D3(i)=n7;
    %n_F2 formula
    n2=sqrt(1 + 1.34533359./((1-0.00997743871./(wavelength.*10^6)^2) + 0.209073176./((1-
0.0470450767./(wavelength.*10^6)^2) + 0.937357162./((1-111.886764./(wavelength.*10^6)^2)));
    n_val_of_n2_D3(i)=n2;

    %spherical surface hit matrix
    R1_mat = [1, 0; (1-n7)/(n7*R1_avg), 1/n7];
    R2_mat = [1, 0; (n7-n2)/(n2*R2_avg), n7/n2];
    R3_mat = [1, 0; (n2-1)/(1*R3), n2/1];
    %space progression matrix
    d1_mat = [1, d1; 0, 1];
    d2_mat = [1, d2; 0, 1];
    %total system matrix
    tot_system_mat = R3_mat * d2_mat * R2_mat * d1_mat * R1_mat;

    A_bcd(i) = tot_system_mat(1, 1);
    a_B_cd(i) = tot_system_mat(1, 2);
    ab_C_d(i) = tot_system_mat(2, 1);
    abc_D(i) = tot_system_mat(2, 2);

```

```

    %h1 and h2 for each wavelength
    h1(i) = (abc_D(i) - 1 )/ab_C_d(i);
    h2(i) = (1 - A_bcd(i))/ab_C_d(i);
end

h1_avg = mean(h1);
h2_avg = mean(h2);
disp(['h1_average = ', num2str(h1_avg)]);
disp(['h2_average = ', num2str(h2_avg)]);

%plot h1 to wavelength
figure;
subplot(2,1,1)
plot(lambda_margin, h1, 'b', 'DisplayName', 'h1');
xlabel('\lambda[m]');
ylabel('h1[m]');
title('h1 - \lambda');
legend('h1', 'Location', 'Best');
grid on;

%plot h2 to wavelength
subplot(2,1,2)
plot(lambda_margin, h2, 'g', 'DisplayName', 'h2');
xlabel('\lambda[m]');
ylabel('h2[m]');
title('h2 - \lambda');
legend('h2', 'Location', 'Best');
grid on;

```