1.

$$\theta_1 = 64°$$

$$n_0 = 1.722$$

$$\alpha = 15°$$

$$\lambda = 1122[nm]$$

א. נרצה העברה מלאה, כלומר נדרוש $\theta_i = \theta_B = \operatorname{atan}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) = 59.855°$. אנו יודעים שזווית ברוסטר מנטרלת מחזרה של קיטוב מקבילי, לכן על מנת לקבל העברה מלאה נרצה שהקרן בקיטוב מקביל.

ב. עוצמה של אור לא מקוטב לאחר מעבר במקטב תיהיה מחצית מערכה המקורי. כלומר במקרה שלנו $I_1 = 2.5[w]$. נמצא את זווית ההעברה ע"י חוק סנל:

$$\theta_t = \operatorname{asin}\left(\frac{\sin(64°)}{1.722}\right) = 31.463$$

$$E_1 = \sqrt{}(2.5)$$
$$E_{1p} = E_1 * \cos(15) = 1.527$$
$$E_{1s} = E_1 * \sin(15) = 0.409$$

$$t_{p_{a\to g}} = \frac{2 * \sin(\theta_t)\cos(\theta_i)}{\sin(\theta_t + \theta_i) * \cos(\theta_i - \theta_t)} = 0.545$$

$$t_{p_{g\to a}} = 1.827$$

$$t_{s_{a\to g}} = \frac{2 * \sin(\theta_t)\cos(\theta_i)}{\sin(\theta_t + \theta_i)} = 0.46$$

$$t_{s_{g\to a}} = 1.54$$

$$E_{tp} = t_{p_{a\to g}} * t_{p_{g\to a}} * E_{1p} = 1.52$$

$$E_{ts} = t_{s_{a\to g}} * t_{s_{g\to a}} * E_{1s} = 0.289$$

$$\boldsymbol{I_t = \left|E_{tp}\right|^2 + |E_{ts}|^2 = 2.4[w]}$$

$$\boldsymbol{\beta = \operatorname{atan}\left(\frac{E_s}{E_p}\right) = 10.8°}$$

ג.

על מנת לקבל רק החזרה בקיטוב אנכי נרצה שזווית הכניסה תיהיה זווית ברוסטר. כלומר $\boldsymbol{\theta_i = \theta_B = 59.855°}$ כלומר $\theta_t = 30.145$. זווית ברוסטר עבור הקצה התחתון של הזכוכית הינה $\theta_t = 30.145 = \operatorname{atan}\left(\frac{1}{1.722}\right) = \theta_B$, כלומר קיבלנו כי כאשר אנו מכניסים קרן בזווית ברוסטר, גם הפגיעה בקצה הזכוכית התחתון מתבצעת בזווית ברוסטר. על מנת שההחזרה האנכית תיהיה מקסימלית עבור אורך גל λ, נשתמש בפיתוח עבור החזרה מקסימלית שראינו בהרצאה ממהוד פברי פרו.

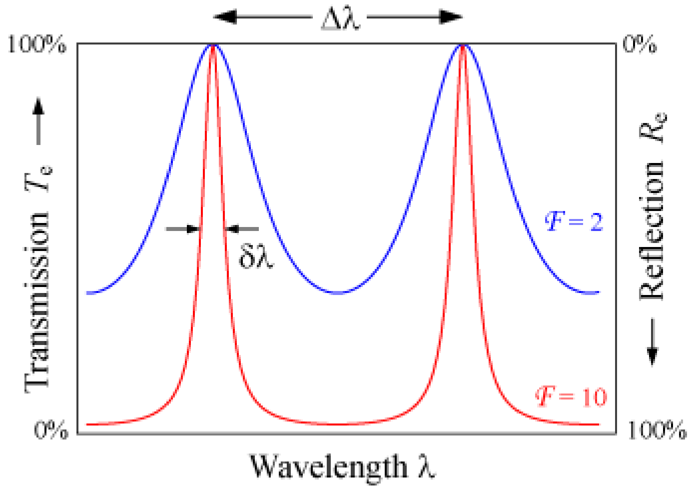
$$d = \lambda_v * \frac{m + 0.5}{(2 * n * \cos(\theta_t))}$$

על מנת לקבל העברה מקסימלית עבור $\lambda_{v1} = \lambda_v + 0.5nm$ נשתמש בנוסחה שראינו עבור העברה מקסימלית:

$$d = \lambda_v * \frac{m}{2 * n * \cos(\theta_t)}$$

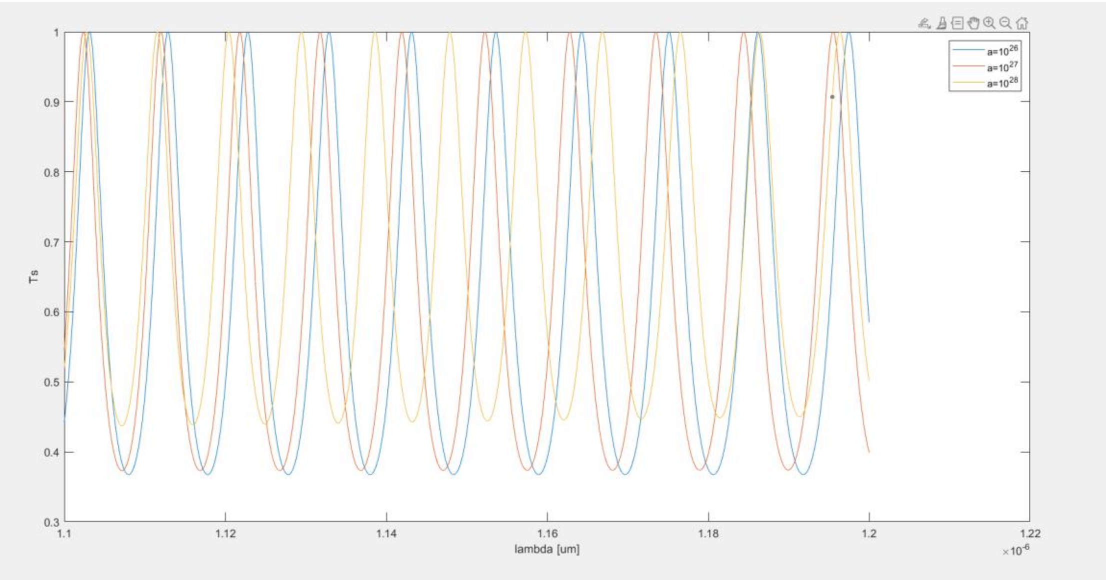
לאחר הצבת הערכים בשתי המשוואות ופתירת המערכת נקבל $m=\lambda * 10^9 = 1122$
נציב אל המשוואה עבור d ונקבל **d=0.4227[mm]**.
ניתן לבצע את חישוב זה בדרך נוספת:
כמו בדרך הקודמת אנו רוצים שזווית הכניסה תיהיה ברוסטר על מנת שנקבל רק החזרה בקיטוב אנכי.
לפי הגרף אותו ראינו בהרצאה ובתרגול עבור עוצמת העברה כפונקציה של אורך הגל, ניתן להסיק כי אנו מקבלים החזרה מקסימלית בדיוק באמצע הפרש המרחק בין הפיקים של העברה מקסימלית.
לכן נדרוש כי אורך הגל λ יתקבל בדיוק במרחק בין שני הפיקים של ההעברה המקסימלית. נתון לנו כי עבור $\lambda + 0.5[nm]$ אנו מקבלים העברה מקבילית מקסימלית(פיק) ולכן נדרוש כי הפיק שלפניו יתקבל עבור $\lambda - 0.5[nm]$. כלומר $\Delta\lambda = 1[nm]$. כעת נוכל להשתמש בנוסחה עבור הפרש בין הפיקים הנתונה ע"י $\Delta\lambda \approx \frac{\lambda_0^2}{2*n_0*d*\cos(\theta_t)}$. כך בעצם אנו דורשים שעבור אורך גל λ מקדם ההחזרה "יפול" בדיוק בנקודה בה יש החזרה מקסימלית(=1) ומשום שהחזרה היא רק אנכית, נקבל כי אין מעבר של קיטוב אנכי כלל . ובאופן דומה מיקמנו את אורכי הגל עבורם רצינו העברה מקסימלית בפיקים.
נבודד את d ונציב את הערכים המתאימים כאשר $\lambda_0 = 1122[nm]$ ונקבל $d = 0.4227[mm]$ כפי שקיבלנו בדרך הקודמת.

- הגרף הבא נלקח מוויקיפדיה



ד.

נרצה לקבל גרף עבור ההעברת הקיטוב האנכי של השדה. ראינו בהרצאה כי עוצמת ההעברה עבור קיטוב אנכי במהוד פברי פרו מתקבלת מהנוסחה $\frac{I_t}{I_i}=\frac{(1-R)^2}{(1-R)^2+4*R*\sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right)}$ כאשר $R=|r_s|^2=\left|\frac{\sin(\theta_t-\theta_i)}{\sin(\theta_t-\theta_i)}\right|^2$. את הגרף שקיבלנו ניתן לראות מטה.



בסעיף זה נתון לנו כי מקדם השבירה משתנה כתלות ב λ באופן הבא:

$$n(\lambda)=n_0-\frac{a}{c^2}*\lambda^2$$

בנוסף, ראינו בהרצאה כי הנוסחה ל- FSR נתונה ע"י הנוסחה:

$$v_{FSR}=\frac{c}{2*n*d*\cos(\theta_t)}=\frac{c}{2d\cos(\theta_t)*(n_0-\frac{a}{c^2}*\lambda^2)}$$

הגדרתי את טווח הערכים של λ להיות בין *1100n* לבין *1200n* כאשר הלמדה שקיבלתי בסעיף א היא $\lambda_0=1122[nm]$. טווח הלמבדות יחסית קטן ולכן נציב בקירוב $\lambda=1150[nm]$ אל v_{FSR} על מנת לקבל מושג על התנהגות ה-*FSR*, נקבל:

$$v_{FSR}=\frac{c}{2d\cos(\theta_t)*(1.722-\frac{a}{c^2}*\lambda^2)}=\frac{c}{2d\cos(\theta_t)*(1.722-a*1.47*10^{-29})}$$

במבט כללי נשים לב שככל שאנו נגדיל את a כך המכנה שלנו יקטן, כלומר ה-v_{FSR} יגדל.

עבור ערכי a שנתונים לנו בתרגיל הביטוי $a*1.47*10^{-29}$ קטן יחסית ל 1.722- ולכן נצפה לקבל הגדלה קטנה של v_{FSR} כאשר נגדיל את a על פי הוקטור הנתון.

2.

$$n_2 = 1.722$$

$$R_1 = 28[mm]$$

$$R_2 = -24[mm]$$

א.

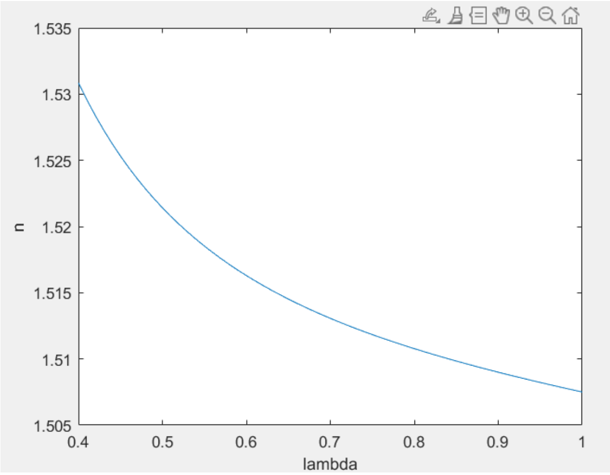
על מנת למצוא את מוקד העדשה התשמנו בנוסחת לוטשי העדשות כנראה מטה

$$\frac{1}{f} = \frac{n_2 - 1}{R_1} + \frac{1 - n_2}{R_2} => f = 17.9[mm] > 0$$

קיבלנו מוקד חיובי, כלומר עדשה מרכזת. לכן נוכל לקבל דמות ממשית בהתאם לקביעת ערך מתאים של מרחק העצם מן העדשה.

ב.

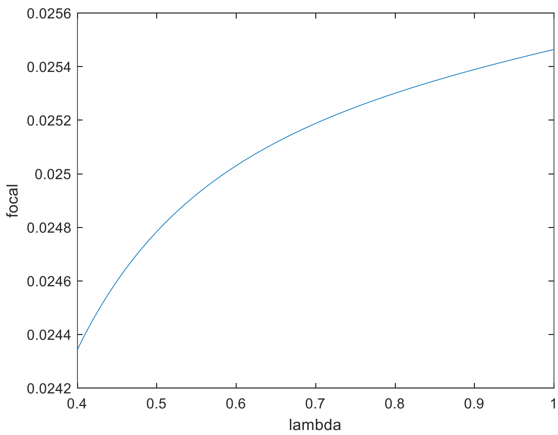
ראשית, ניתן לראות בגרף של מקדם השבירה כתלות באורך הגל כי ככל שאורך הגל גדל מקדם השבירה קטן.



כעת, נשים לב מהגרף מטה כי ככל שאנו מגדילים את אורך הגל אנו מקבלים הגדלה של מוקד העדשה. דבר זה הגיוני שכן לפי נוסחת לוטשי העדשות :

$$f = \left(\frac{n-1}{R1} + \frac{1-n}{-|R2|}\right)^{-1} = \left(\frac{n-1}{R1} + \frac{n-1}{|R2|}\right)^{-1}$$

כלומר ככל שאנחנו מגדילים את למבדה, מקדם השבירה קטן ולכן גם הביטוי שבתוך הסוגריים קטן וסה"כ 1 חלקי הביטוי גדל.



ג)

1. נבנה את מטריצת המעבר של העדשה:

$$R=32[mm]$$
$$\lambda_1 = 572[nm]$$
$$\lambda_2 = 460[mm]$$

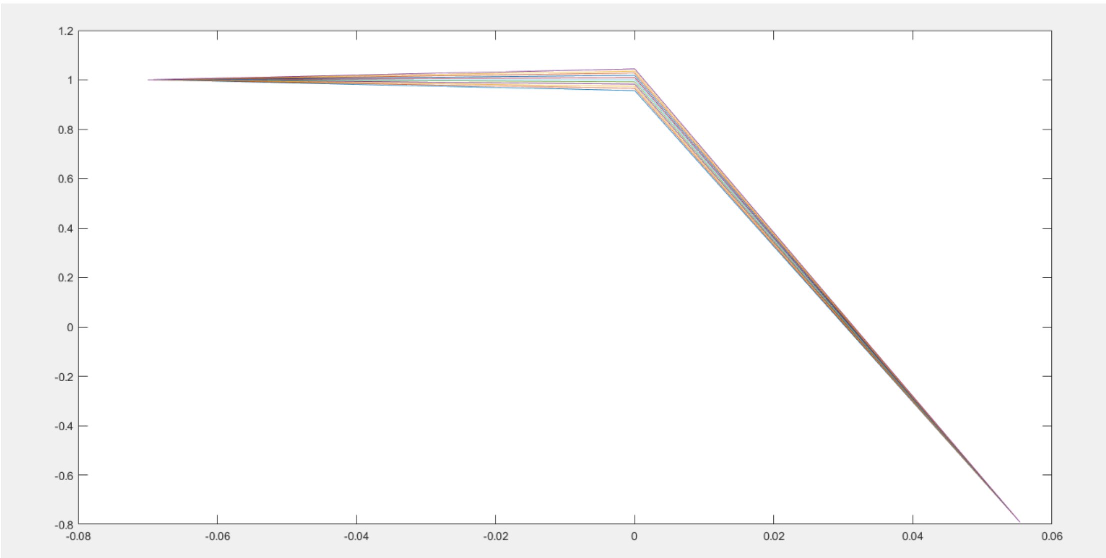
$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ (1-n)/R & n \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1-n}{nR} & \frac{1}{n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 2*\frac{1-n}{R} & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$$

ונציב לנוסחה של L2 אותה קיבלנו בתרגול :

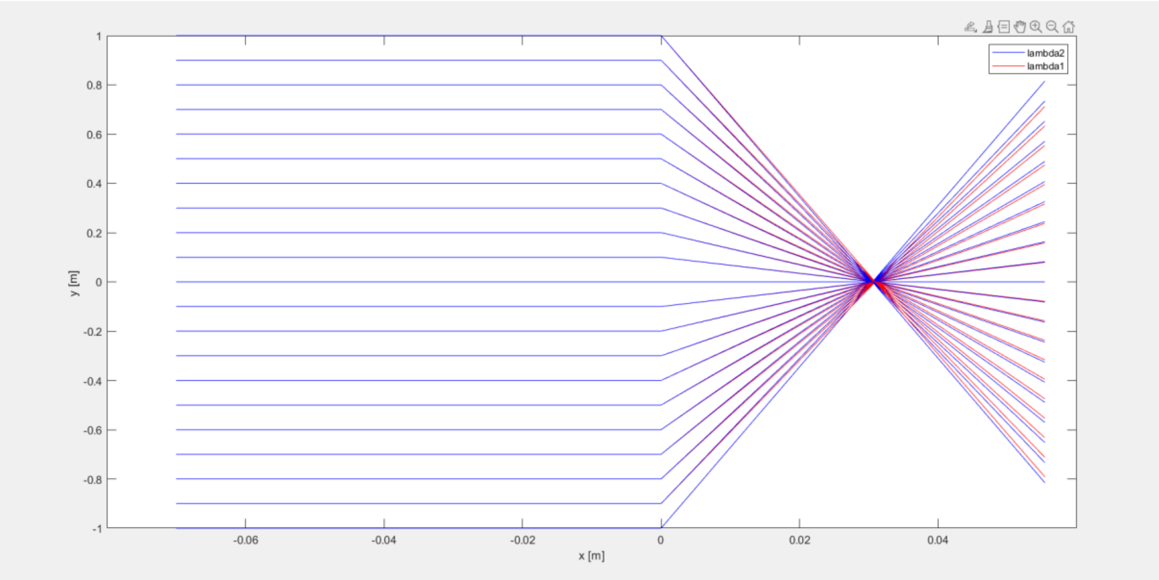
$$L_2 = -\frac{A*L_1+B}{C*L_1+D} = 55.4[mm]$$

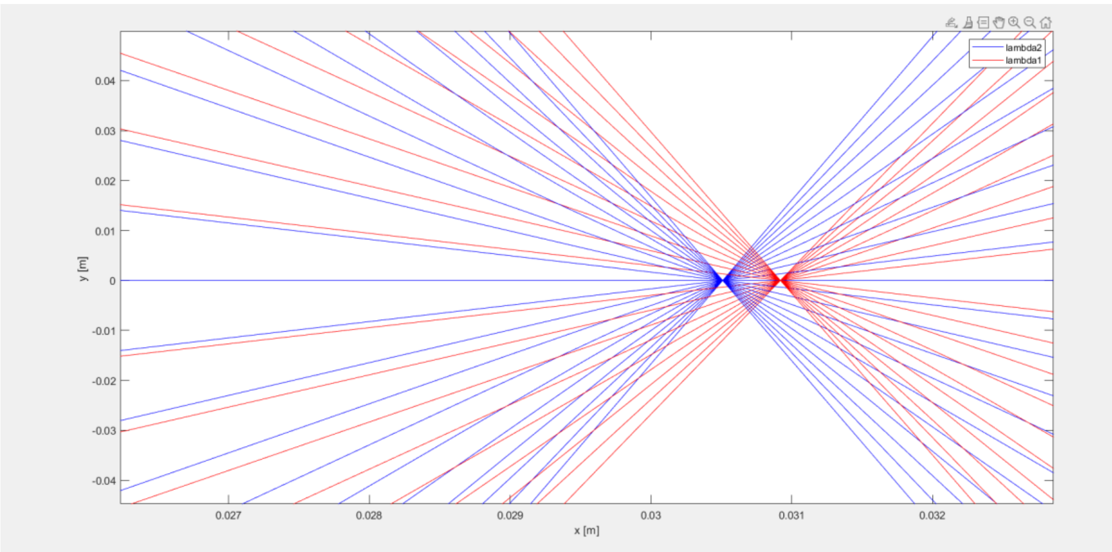
.2

ניתן לראות בתרשים כי אכן הקרניים יוצאות מהנקודה $L_1 = -70[mm] = -0.07[m]$ בגובה 1 ופוגעות בעדשה בזוויות שונות כאשר הן כולן נפגשות במרחק $L_2 = 55.4[mm] =$ $0.0554[m]$ מימן לעדשה. כלומר הדמות מתקבלת במרחק זה.



(3) ניתן לראות כי אכן הקרניים נכנסות אל העדשה בזווית 0 ובגובה משתנה. בניגוד לסעיף הקודם בו ראינו כי נוצרת דמות במרחק L_2 מימן לעדשה, הדמויות נוצרות במוקד העדשה בהתאם לאורך הגל של הקרן הנכנסת. תופעה זו מתרחשת משום שכל הקרניים נכנסות אל העדשה במקביל למישור האופטי ולכן יפגשו במוקד העדשה כפי שלמדנו בהרצאה. ניתן לראות את מוקדי העדשה טוב יותר בגרף השני מטה. אצלינו $\lambda_1 = 0.572$ ו-$\lambda_2 = 0.46$ כלומר היינו מצפים שהמוקד עבור λ_1 יהיה יותר מעבור λ_2 ואכן קיבלנו זאת כפי שניתן לראות מהגרף השני.





ד.

.1

בהרצאה ראינו כי עבור מטריצת ABCD עבור n'=1 מתקיים $C=-\frac{1}{f}$. לכן, על מנת למצוא את R3 עבורו נקבל מוקד זהה לשני אורכי בגל, נתחיל בלמצוא את מטריצת המעבר בעדשה. לאחר מכן נציב את הערכים המתאימים עבור λ_1 ו-λ_2, נחלץ את האיבר C משתי המטריצות ונשווה ביניהם.

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1-n_{F2}}{R_3} & n_{F2} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_{F2}-n_{BK7}}{n_{F2}*R} & \frac{n_{Bk7}}{n_{F2}} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ (1-n_{BK7})/(n_{BK7*R}) & 1/n_{BK7} \end{pmatrix}$$

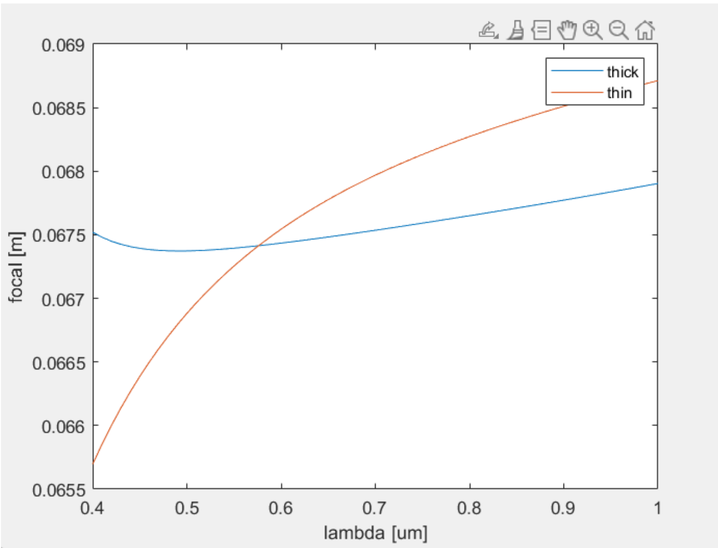
לאחר קבלת הפתרון השתמשנו בפקודה:

solution=solve(m1(2,1)==m2(2,1),R3); על מנת לחלץ את R3.

סה"כ קיבלנו כי R3=0.321[meter].

.2

ניתן לראות כי עבור $\lambda \approx 0.58[um]$ נקבל כי מוקד העדשה בעלת השכבה שווה לזה של העדשה ללא השכבה.



ניזכר כי בסעיף הקודם נדרשנו למצוא R3 עבורו מתקיים כי מוקד העדשה בעלת השכבה שווה עבור λ_1 ו-λ_2. לפי הגרף ניתן לראות כי יש כמה ערכי למדה אשר מקיימים את דרישה זו ובפרט λ_1 ו-λ_2 שעבורם נקבל *f=0.0674[m]*.

.3

נשתמש בנוסחה עבור המישורים העיקריים שראינו בתרגול כאשר התוצאה הסופית עבור H2 H1 מתקבלת לאחר לקיחה של ממוצע הערכים על וקטורי H עבור ערכי למדה כמו בסעיף הקודם:

$$H_1 = -L_1 = -\frac{\frac{n}{n'} - D}{C} = 0.1375[mm]$$

$$H_2 = L_2 = \frac{1-A}{C} = -2[mm]$$

כאשר A C D נובעים ממטריצת המעבר בעדשה $\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$ אותה שראינו בסעיף ד.1.

נספחים:

```
%Q1

id_3last=622;
id_4last=2622;
id_2befor_last=26;
n0=1.1+id_3last/1000;
theta1=(2+mod(id_3last,80));
lambda_nm=(1000+mod(id_3last,500));
alfa=(3+mod(id_4last,45));
%Q1_a
theta_Bd=atand(n0);
theta_Tb=90-theta_Bd;
%Q1_b
I1=2.5;
theta_tb=asind((sind(theta1)/n0));
E1=sqrt(I1);
E1_p=E1*cosd(15);
E1_s=E1*sind(15);
t_p=@(theta_i1,theta_t1)
2*sind(theta_t1)*cosd(theta_i1)/(sind(theta_i1+theta_t1)*cosd(theta_t1-
theta_i1));
t_s=@(theta_i2,theta_t2)
2*sind(theta_t2)*cosd(theta_i2)/sind(theta_i2+theta_t2);
tp_aTOg=t_p(theta1,theta_tb);
tp_gTOa=t_p(theta_tb,theta1);
ts_aTOg=t_s(theta1,theta_tb);
ts_gTOa=t_s(theta_tb,theta1);
Etp=tp_aTOg*tp_gTOa*E1_p;
Ets=ts_aTOg*ts_gTOa*E1_s;
It=Ets^2+Etp^2;
%Q1_c
c=3*10^8;
delta_lambda=1*10^(-9);
syms d
d_lambda=(lambda_nm*10^(-9))^2/(2*n0*d*cosd(theta_Tb));
d=double(solve(d_lambda==delta_lambda,d));
%Q1_d
lambda0=( 1100:0.01:1200)*10^(-9);
a=[10^26 10^27 10^28];
d2=0.4227*10^(-4);
thata_B=atan(n0);
for i=1:length(a)
    aval=a(i);
    n=n0-(aval*lambda0.^2/c^2);
    theta_t=asin(sin(thata_B)./n);
    r_s=(sin(theta_t-thata_B)./sin(thata_B+theta_t));
    R=abs(r_s).^2;
    delta=4*pi.*n*d2.*cos(theta_t)./lambda0;
    ver_pVal1=(1-R).^2./((1-R).^2+4.*R.*(sin(delta/2).^2));
    plot(lambda0,ver_pVal1)
    hold on
end
legend('a=10^{28}','a=10^{27}','a=10^{26}')
xlabel("lambda [um]")
ylabel("Ts")
hold off
```

```
%Q2

%Q2_a
n2_a=1.1+622/1000;
R1_a=(50-22)*10^(-3);
R2_a= -(50-26)*10^(-3);
f1=((n2_a-1)/R1_a+(1-n2_a)/R2_a)^(-1);

% Q2_b
x1=linspace(0.4,1,61);
nBK7=@(x1)sqrt( 1 + 1.03961212*x1.^2./(x1.^2-
0.00600069867)+0.231792344*x1.^2./(x1.^2-
0.0200179144)+1.01046945*x1.^2./(x1.^2-103.560653));
n1=nBK7(x1);
R1=28*10^(-3);
R2=-24*10^(-3);
y=((n1-1)./R1+(1-n1)./R2).^(-1);

%plot(x1,n1)
plot(x1,y)
xlabel('lambda [um]')
ylabel('focal [m]')

%Q2_c1
lambda1_c=(mod(622,200)+550)*10^(-3);
lambda2_c=(mod(622,102)+450)*10^(-3);
R_c1=(mod(622,30)+10)*10^(-3);
n_c=nBK7(lambda1_c);
L1=70*10^(-3);
A_c1=1;
B_c1=0;
C_c1=@(n_1) 2*(1-n_1)/R_c1;
D_c1=1;
c1=C_c1(n_c);
%f3=-1/c1;
L2=-(A_c1*L1+B_c1)/(c1*L1+D_c1);
%Q2_c2
r_cordinate=[-L1 0 L2];
M_L2=[1 L2; 0 1]*[1 0;c1 1]*[1 L1; 0 1];
counter=1;
theta1=-pi/5:pi/25:pi/5;

for i=1:length(theta1)
    r_vec=[1 1+L1*theta1(i) M_L2(1,1)*1+M_L2(1,2)*theta1(i)];
    plot(r_cordinate,r_vec)
    hold on

end
hold off


%Q2_c3
x=-1:0.1:1;
n_c3=nBK7(lambda2_c);
c2=C_c1(n_c3);
%f4=-1/c2;
M_L2_c3=[1 L2; 0 1]*[1 0;c2 1]*[1 L1; 0 1];
for i=1:length(x)
    r_vec_c3=[x(i) x(i) M_L2(1,1)*x(i)];
```

```
    r_vec2_c3=[x(i) x(i) M_L2_c3(1,1)*x(i)];
    plot(r_cordinate,r_vec_c3,'red')
    plot(r_cordinate,r_vec2_c3,'blue')
    hold on

end
hold off
legend('lambda2','lambda1')
xlabel("x [m]")
ylabel("y [m] ")
%Q2_d1

d1=(mod(622,1.01)+0.1)*10^(-3);
d2=(mod(622,2.17)+1)*10^(-3);
R2_d=(mod(622,30)+10)*10^(-3);
lambda1_d=(mod(622,100)+400)*10^(-3);
lambda2_d=(mod(622,153)+600)*10^(-3);
syms R3
nF2=@(l)sqrt( 1+ 1.34533359*l.^2./(l.^2-
0.00997743871)+0.209073176*l.^2./(l.^2-
0.0470450767)+0.937357162*l.^2./(l.^2-111.886764));
M1=@(nF2,nBK7) [1 0;(1-nF2)/R3 nF2]*[1 d2;0 1]*[1 0;(nF2-nBK7)/(nF2*R2_d)
nBK7/nF2]*[1 d1;0 1]*[1 0;(1-nBK7)/(nBK7*R2_d) 1/nBK7];
m1=M1(nF2(lambda1_d),nBK7(lambda1_d));
m2=M1(nF2(lambda2_d),nBK7(lambda2_d));
R3_sul=double(solve(m1(2,1)==m2(2,1),R3));

%Q2_d2
lambda_d4=(0.4:0.01:1);
nBK7_vec=zeros(length(lambda_d4),1);
f=zeros(length(lambda_d4),1);
f_thin=zeros(length(lambda_d4),1);
for i=1:length(lambda_d4)
    nF21=nF2(lambda_d4(i));
    nBK71=nBK7(lambda_d4(i));
    nBK7_vec(i)=nBK71;
    m3=subs(M1(nF21,nBK71),R3,R3_sul);
    f(i)=-1/(m3(2,1));
end

plot(lambda_d4,f)
hold on
favg=mean(f);
nBK7avg=mean(nBK7_vec);
R1_d2=2*favg*(nBK7avg-1);
R2_d2=-R1_d2;

for i=1:length(lambda_d4)
    nBK72=nBK7(lambda_d4(i));
    M4=[1 0;(1-nBK72)/R1_d2 nBK72]*[1 d1; 0 1]*[1 0;(1-nBK72)/(nBK72*R1_d2)
1/nBK72];
    f_thin(i)=-1/M4(2,1);
end
plot(lambda_d4,f_thin)
xlabel('lambda [um]')
ylabel('focal [m]')
legend('thick','thin')
hold off
%b1=f(3);
```

```
%b2=f(22);
%Q2_d3
H1=zeros(length(lambda_d4),1);
H2=zeros(length(lambda_d4),1);
for i=1:length(lambda_d4)
    nBK7_d=nBK7(lambda_d4(i));
    nF2_d=nF2(lambda_d4(i));
    M_d3=subs(M1(nF2_d,nBK7_d),R3,R3_sul);
    H1(i)=-(1-M_d3(2,2))/M_d3(2,1);
    H2(i)=(1-M_d3(1,1))/M_d3(2,1);
end

H1avg=double(mean(H1));
H2avg=double(mean(H2));
```