

التصحيح البصري السلبي لنظام حراري مكون من عدستين متباعدين

يعرب أحمد إبراهيم^{1*} حسان سليمان إبراهيم²

^{1*} طالب ماجستير في هندسة وعلوم البصريات، المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا،
masaibrahim.fix@damascusuniversity.edu.sy

² باحث في التصميم البصري، دكتور، مهندس، المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا،
hassanbrahim070@damascusuniversity.edu.sy

الملخص:

إن النظم الحرارية واسعة الانتشار بسبب الكلفة المنخفضة و وثوقيتها العالية وذلك عائد إلى تطوير الحساسات المصفوفية غير المبردة التي أدت إلى الاستغناء عن المسح الميكانيكي وعن التبريد. ولكن تعاني هذه النظم من الانزياح الحراري للمحرق، حيث تتغير قرينة انكسار مواد العدسات البصرية مع تغير درجة الحرارة فيتغير موقع الصورة عن الحساس مؤدياً إلى تشوه الصورة. تقدم هذه المقالة تصميماً بصرياً لنظام حراري بعدستين مصحح حرارياً خفيف الوزن وصغير الحجم. وحسب أفضل معلوماتنا، ليست هذه الحسابات موجودة في أي مرجع.

الكلمات المفتاحية: نظم حرارية- أشعة تحت حمراء- التصحيح الحراري- تصميم بصري - حسابات شبه محورية- حساسات مصفوفية غير مبردة - الانزياح الحراري للمحرق

تاريخ الايداع: 2023/6/25

تاريخ القبول: 2023/11/13



حقوق النشر: جامعة دمشق

سورية، يحتفظ المؤلفون

بحقوق النشر بموجب CC

BY-NC-SA

Optical Passive Athermalization For a Separated Two-Lens Thermal Imaging System

Yaarob Ahmad Ibrahim*¹ Hassan Souliman Ibrahim²

*¹. Msc. Student in Optics Engineering and Sciences, Higher Institute for Applied Science and Technology (HIASST) – Damascus – Syria, masaibrahim.fix@damascusuniversity.edu.sy

². Dr. Eng. Researcher in Optical Design □ □ Higher Institute for Applied Science and Technology (HIASST) – Damascus – Syria, hassanbrahim070@damascusuniversity.edu.sy

Received: 25/6/2023

Accepted: 13/11/2023



Copyright: Damascus University- Syria, The authors retain the copyright under a **CC BY- NC-SA**

Abstract:

Thermal imaging systems are widely used because of their continued reduced cost and increased reliability. This is mainly due to the development of Uncooled Focal Plane Arrays FPA which eliminated the need for mechanical scanners and coolers. But these systems suffer from thermal focal shift, where refractive indices change with temperature, which leads to image plane shift away from the surface of the detector resulting in blurred images. This paper proposes an optical design for a two-lens thermal imaging system that is athermalized using the optical passive method. The proposed design is small and light. To the best of our knowledge, these calculations are not carried out in the literature.

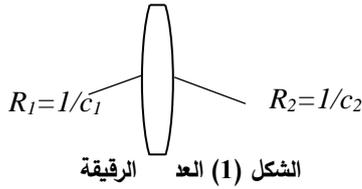
Keywords: Thermal Imaging Systems–Infrared Radiation –Athermalization–Optical Design–Paraxial Calculations–Uncooled Focal Plane Arrays–Thermal Focal Shift

تعالج هذه المقالة مسألة التصحيح الحراري البصري السلبي لنظام حراري مكون من عدستين متباعدتين. إن اقتصار النظام الحراري على عدستين يؤدي إلى إنقاص في الوزن والحجم والكلفة.

نبدأ بدراسة تغير البعد المحرقي للعدسة الرقيقة مع الحرارة.

1-1 تغير مواصفات العدسة الرقيقة مع تغير درجة الحرارة:

تعطفي تقريب العدسات الرقيقة القدرة البصرية ϕ (Optical power) وهي مقلوب البعد المحرقي بدلالة تقوس سطحها بالعلاقة التالية (Smith, 2008, 48):



الشكل (1) العدسة الرقيقة

$$\phi = (n - 1)(c_1 - c_2) \quad (1)$$

حيث n قرينة انكسار العدسة و c_1 و c_2 تقوس سطحي العدسة كما في الشكل 1. نأخذ لوغاريتم القيمة المطلقة للطرفين ثم نفاضل فنحصل على:

$$\log|\phi| = \log|n - 1| + \log|c_1 - c_2| \quad (2)$$

$$\frac{d\phi}{\phi} = \frac{dn}{n-1} + \frac{dc_1 - dc_2}{c_1 - c_2} \quad (3)$$

ومن تعريف معامل التمدد الطولي α لدينا:

$$\frac{dR}{R} = \alpha dT \quad (4)$$

وبما أن تقوس السطح c هو مقلوب نصف قطر السطح البصري R أي $c=1/R$ فإن التغير النسبي للتقوس يساوي التغير النسبي لنصف القطر قيمة ويعاكسه إشارة، أي:

$$\frac{dc}{c} = -\frac{dR}{R} = -\alpha dT \quad (5)$$

وبتعويض هذا التغير النسبي في (3) نحصل على التغير النسبي للقدرة البصرية للعدسة الرقيقة:

$$\frac{d\phi}{\phi} = \frac{dn}{n-1} + \frac{-\alpha c_1 dT + \alpha c_2 dT}{c_1 - c_2} \quad (6)$$

المقدمة:

باتت تطبيقات النظم الحرارية واسعة النطاق (Gade et al, 249: صيانة خطوط نقل الطاقة الكهربائية ومراقبة العزل الحراري للأبنية وكشف تسرب الغاز ومكافحة التلوث النفطي للبيئة ومراقبة محطات المعالجة وتطوير وتقنيش الدارات الإلكترونية ومراقبة توزع الإجهادات في المنظومات الميكانيكية وعمليات الإنقاذ والتطبيقات العلمية ومحطات الرصد الجوية والتطبيقات الطبية في التشخيص الطبي وفي استئصال الأورام والتطبيقات العسكرية في الاستطلاع والملاحة وأنظمة الكشف والملاحة.

ولقد برز في أواخر القرن العشرين تطور مثير أدى إلى تخفيض كلفة النظم الحرارية وهو تصنيع الحساسات الحرارية غير المبردة (Uncooled detectors) (Rogalski, 2011, 27). والسعي حثيث لإنقاص الكلفة. تعاني النظم الحرارية من مسألة الانزياح الحراري للمحرق حيث تتغير قرينة الانكسار لمواد العدسات المستعملة مع تغير الحرارة، ما يؤدي إلى انزياح مستوي الصورة مسبباً عدم الوضوح في الصورة (Lloyd, 1975, 261), (Hassan, 2023, 257). يحل التصحيح الحراري هذه المسألة بعدة طرق وهي التصحيح الميكانيكي الإيجابي والتصحيح الميكانيكي السلبي والتصحيح البصري السلبي. من بين هذه الطرق، التصحيح البصري السلبي وهو الأفضل حيث يؤدي إلى توفير في استهلاك الطاقة وزيادة في الوثوقية (Rogers, 1990, 746). تعالج الحسابات التصميمية الموجودة في الأدبيات حالة عدسات متلاصقة (عدستين وثلاث عدسات) ولكن الحسابات التصميمية شديدة التعقيد في حالة عدستين متباعدتين كما سنرى لاحقاً.

التصحيح البصري السليبي لنظام حراري مكون من عدستين متباعدتين

$$\frac{d\phi}{\phi} = \frac{dn}{n-1} + \frac{-\alpha(c_1-c_2)dT}{c_1-c_2} \quad (7)$$

$$\frac{d\phi}{\phi} = \frac{dn}{n-1} - \alpha dT \quad (8)$$

$$\frac{d\phi}{\phi} = \left[\frac{dn}{(n-1)dT} - \alpha \right] dT \quad (9)$$

$$\frac{d\phi}{\phi} = \gamma dT \quad (10)$$

حيث γ هو الثابت الحراري للزجاج:

$$\gamma = \frac{dn}{(n-1)dT} - \alpha \quad (11)$$

إبراهيم، إبراهيم

العلاقة (10) موجودة في الأدبيات انظر المرجع (Bass,

2010, 8.2) ولكن أردنا اشتقاقها هنا لتثبيت الأفكار.

تم استخلاص معدل التغير الحراري لقرينة الانكسار

(dn/dT) ومعامل التمدد الطولي (α) للمواد البصرية المستعملة

في النظم الحرارية غير المبردة من برنامج

التصميم البصري Zemax (Zemax, 1990). وتم ترتيب هذه

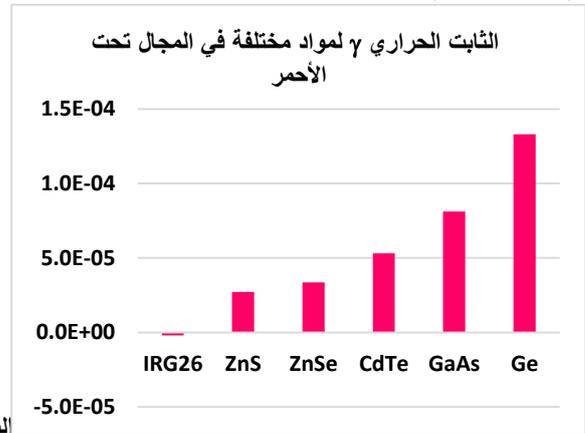
المواد وفق قيم γ المتصاعدة بالقيمة المطلقة في الجدول 1:

الجدول (1) قيم الثابت الحراري لمواد العدسات الحرارية.

الاسم المادة	رمز المادة	قرينة الانكسار عند طول الموجة 10 ميكرون	$\frac{dn}{dT}$ ($\times 10^{-6}$) (K^{-1})	$\frac{dn}{(n-1)dT}$ ($\times 10^{-6}$) (K^{-1})	معامل التمدد الطولي ($\times 10^{-6}$) (K^{-1})	الثابت الحراري للزجاج γ ($\times 10^{-6}$) (K^{-1})
سيلينات الزرنيخ	IRG26	2.77801	34.65	19.49	21.4	-1.91
كبريت التوتياء	ZnS	2.20025	40.43	33.69	6.6	27.09
سيلينات التوتياء	ZnSe	2.40644	57.36	40.79	7.1	33.69
تيلورات الكاديوم	CdTe	2.67221	97.25	58.16	5.0	53.16
زرنيخ الغاليوم	GaAs	3.27807	196.26	86.15	5.0	81.15
الجرمانيوم	Ge	4.00432	416.69	138.7	5.7	133

الانكسار والنسبة d/M أي نسبة كثافة المادة إلى كتلتها المولية ونظراً لتعقيد الموضوع فهو خارج إطار هذه المقالة.

ولتظهير قيم الثابت الحراري لهذه المواد بشكل أوضح نمثلها بيانياً في الشكل التالي:



الشكل

(1) قيم الثابت الحراري للزجاج في المجال تحت الأحمر.

نلاحظ أن الثابت الحراري للجرمانيوم هو الأكبر بين مواد العدسات في حين أن ثابت مادة IRG26 هو الأقل بينها. إن السبب العلمي في ذلك عالي التعقيد فعلاقة قرينة الانكسار بالمواد الفيزيائية الأخرى للمادة علاقة معقدة جداً فالمرجع (Sangwal, 1987, 527) يعطي علاقة تجريبية معقدة بين قرينة

2- طرائق التصحيح الحراري:

عندما تتغير درجة الحرارة تتغير أنصاف أقطار أسطح العدسات وثخاناتها وقرائن انكسارها كما تتغير أبعاد الحامل الميكانيكي للعدسات. تؤدي هذه العوامل إلى تغير موقع الصورة عن سطح الحساس مما يشوه الصورة ويؤدي إلى عدم وضوحها، وعليه فالحاجة ملحة للتصحيح الحراري.

2-1 التصحيح الميكانيكي الإيجابي:

3-1 يعتمد على تحريك عدسة أو مجموعة عدسات على

طول المحور البصري لتعويض انزياح المحرق الذي

يتأثر بتغير درجة الحرارة

يمكن أن يكون التحريك يدوياً أو آلياً، إلا أن التصحيح

إبراهيم، إبراهيم
 وB هو البعد المحرقي الخلفي للجملته وهو المسافة بين
 العدسة الأخيرة ومستوي الصورة كما هو مبين في الشكل
 2 أعلاه.

يجب أن يتطابق الحساس مع مستوي الصورة في درجة
 الحرارة التصميمية (20 درجة مئوية) لضمان وضوح
 الصورة أي يجب أن يكون $B=L$. وعندما تتغير درجة
 الحرارة يتغير البعد المحرقي لكل من العدستين وفق العلاقة
 (10)، وتتغير المسافتان d و L وفق قانون التمدد الطولي
 (انظر العلاقة (4)) بمعامل التمدد الطولي لمادة الحامل
 الميكانيكي α_H .

نقوم برسم شعاع الحافة موازياً لمحور البصري لأن المشاهد بعيد
 عن النظام البصري بحيث يمكن اعتباره في اللانهاية. ونتتبع
 شعاع الحافة عبر العدستين لحساب المقادير شبه المحورية
 كالبعد المحرقي الخلفي والبعد المحرقي المكافئ وصولاً إلى
 معادلات التصحيح الحراري. نتبع الإجراءات المستعملة في
 التصميم البصري لتتبع الأشعة شبه المحورية (Smith, 2008,
 40).

توخياً للتسهيل نأخذ ارتفاع شعاع الحافة يساوي الواحد، فنحصل
 على زاوية شعاع الحافة بعد بروزه من العدسة الأولى:

$$u_1 = -\varphi_1 \quad (12)$$

ويكون ارتفاع الورود على العدسة الثانية:

$$h = 1 + u_1 d \quad (13)$$

$$h = 1 - d\varphi_1 \quad (14)$$

ونحصل على زاوية شعاع الحافة في فضاء الصورة:

$$u_2 = u_1 - h\varphi_2 \quad (15)$$

$$u_2 = -\varphi_1 - h\varphi_2 \quad (16)$$

ومنه نحسب القدرة البصرية لجملته العدستين:

$$\varphi = -u_2 \quad (17)$$

$$\varphi = \varphi_1 + h\varphi_2 \quad (18)$$

والبعد المحرقي الخلفي:

$$B = -\frac{h}{u_2} \quad (19)$$

$$B = \frac{h}{\varphi_1 + h\varphi_2} \quad (20)$$

التصحيح البصري السلبي لنظام حراري مكون من عدستين متباعدتين
 اليدوي غير ممكن إذا كان النظام الحراري أبعد من متناول اليد.
 ويحتاج التصحيح الآلي إلى محرك يستهلك طاقة كهربائية
 ويؤدي إلى أعطال ميكانيكية في المحرك
 (Liu, 2021,1)،(Rogers, 1990, 745)

2-2 التصحيح الميكانيكي السلبي:

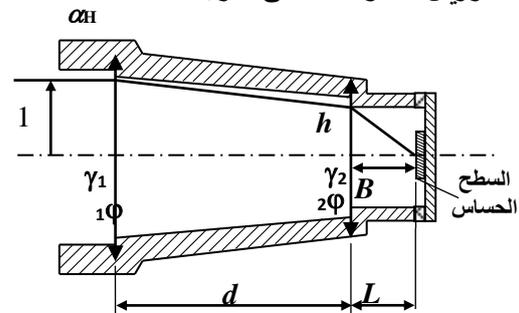
يعتمد على انتقاء مواد لحوامل العدسات وتصميمات ميكانيكية
 معقدة نسبياً بحيث تكون محصلة التغيرات في الأبعاد
 الميكانيكية الناتجة عن تغير الحرارة تعاكس انزياح المحرق.
 ولكن هذه الطريقة

غير فعالة في الأبعاد المحرقة الأكبر نسبياً كما أن استجابتها
 بطيئة لتغيرات الحرارة (Rogers, 1990, 744)،(Liu, 2021,1)
 3-2 التصحيح البصري السلبي: يعتمد على انتقاء مواد عدسات
 حرارية بحيث يكون انزياح المحرق الناتج عن تغير الحرارة
 معاكساً لتمدد الحامل الميكانيكي (Rogers, 1990, 746). وهذه
 الطريقة توفر الطاقة وتزيد وثوقية النظام البصري ولكن
 الحسابات النظرية لهذا التصميم معقدة حتى في حال نظام
 بصري يحوي عدستين فقط كما هو واضح من حجم الحسابات
 النظرية الواردة في هذه المقالة.

3- حسابات التصحيح الحراري السلبي بعدستين:

1-3 الحسابات شبه المحورية:

نأخذ عدستين تفصلهما مسافة d ، ويفصل بين العدسة الأخيرة
 والسطح الحساس مسافة L . ويؤمن الحامل الميكانيكي هاتين
 المسافتين d و L . والعدستان قدرتهما البصريتان φ_1 و φ_2
 وثابتاهما الحراريان α_1 و α_2 على الترتيب. الحامل الميكانيكي



الشكل (2) جملة عدستين ضمن حامل ميكانيكي.

التصحيح البصري السلبي لنظام حراريكون من عدستين متباعدتين

وبالاعتماد على العلاقة (18) يصبح البعد المحرقي الخلفي B

في العلاقة (20) كما يلي:

$$B = \frac{h}{\varphi} \quad (21)$$

من أجل تأمين وضوح الصورة عند درجة الحرارة

التصميمية 20 درجة مئوية يجب أن يؤمن الحامل الميكانيكي

مسافة البعد المحرقي الخلفي أي يجب أن يتحقق

الشرط:

$$B = L \quad (22)$$

وحتى يتحقق التصحيح الحراري في درجات حرارة أخرى

يجب أن يكون معدل تغير البعد المحرقي الخلفي B مع الحرارة

مساوياً لمعدل تغير بعد الحامل L أي:

$$\frac{\delta B}{\delta T} = \frac{\delta L}{\delta T} \quad (23)$$

$$\frac{\delta B}{\delta T} = \alpha_H B \quad (24)$$

لتخفيف عبء المعادلات نأخذ البعد المحرقي المكافئ

للعدستين يساوي الواحد فتكون القدرة البصرية للجملة

تساوي الواحد أيضاً أي $\varphi=1$. فتصبح المقادير الطولية

(كالخانات والطول الإجمالي (Total Track TOTR) والأبعاد

المحرقية) منسوبة إلى البعد المحرقي المكافئ (Effective

Focal length EFFL) وبالتالي لا واحدة لها، وعند انتهاء

الحسابات، نجري محاكاة لتحقيق البعد المحرقي المطلوب وذلك

بضرب المقادير الطولية بهذا البعد المحرقي فتستعيد هذه

المقادير واحداً الاعتيادية، وبناء على هذا التخفيف ولكون

$B=h/\varphi$ (انظر العلاقة (21))، تصبح المعادلة (24):

$$\frac{\delta B}{\delta T} = \alpha_H h \quad (25)$$

وهي معادلة التصحيح الحراري، وتصيح المعادلة (18):

$$\varphi_1 + h\varphi_2 = 1 \quad (26)$$

ومنه حتى يتحقق التصحيح الحراري يجب أن تتحقق المعادلات

(26) و(14) و(25). وهذه جملة ثلاث معادلات بأربعة

مجاهيل $\varphi_1, \varphi_2, d, h$ ، أي لدينا درجة حرية إضافية، فنستطيع

إضافة شرط الطول الإجمالي \square للنظام البصري، وهذا الإجراء

مفيد إذ أننا نستطيع ضمان طول معين للنظام البصري مع

التصحيح الحراري للحصول على نظام

إبراهيم، إبراهيم

بصري \square قصير إمعاناً في تخفيض الوزن والحجم والكلفة،

ونكتب شرط الطول الإجمالي كما يلي:

$$\Gamma = d + B \quad (27)$$

$$\Gamma = d + h \quad (28)$$

بالحل المشترك لجملة المعادلات (26) و $\square 14$ و $\square 25$ و

(28) نتوصل إلى حساب φ و φ_1 و φ_2 و d وحتى نتحقق

العلاقة (25) يجب أن نحسب مشتق البعد المحرقي الخلفي B

بالنسبة إلى درجة الحرارة. \square ولهذا الغاية يجب أن نحسب

مشتق h و φ بالنسبة إلى درجة الحرارة. أولاً نحسب مشتق h

بالنسبة إلى درجة الحرارة بمفاضلة العلاقة (14):

$$\frac{\partial h}{\partial T} = \frac{\partial}{\partial T} (1 - d\varphi_1) \quad (29)$$

$$\frac{\partial h}{\partial T} = -\varphi_1 \frac{\partial d}{\partial T} - d \frac{\partial \varphi_1}{\partial T} \quad (30)$$

وباستعمال العلاقة (10) والتمدد الطولي \square_H للحامل الميكانيكي

نجد $\frac{\partial d}{\partial T} = \alpha_H d$ وبالتعويض في (30) نحصل على:

$$\frac{\partial h}{\partial T} = -\varphi_1 \alpha_H d - d\gamma_1 \varphi_1 \quad (31)$$

$$\frac{\partial h}{\partial T} = -d\varphi_1 (\alpha_H + \gamma_1) \quad (32)$$

وثانياً نحسب مشتق القدرة البصرية φ لجملة العدستين بالنسبة

إلى درجة الحرارة كما يلي:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial T} = \frac{\partial (\varphi_1 + h\varphi_2)}{\partial T} \quad (33)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial T} = \frac{\partial \varphi_1}{\partial T} + \varphi_2 \frac{\partial h}{\partial T} + h \frac{\partial \varphi_2}{\partial T} \quad (34)$$

وباستعمال العلاقات (10) و (32) نحصل على تغير القدرة

البصرية بالنسبة إلى درجة الحرارة:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial T} = \gamma_1 \varphi_1 - d\varphi_1 \varphi_2 (\alpha_H + \gamma_1) + h\gamma_2 \varphi_2 \quad (35)$$

تُمكن هذه العلاقة (35) مع العلاقة (32) من حساب مشتق

البعد المحرقي الخلفي بالنسبة إلى درجة الحرارة. وباشتقاق

علاقة البعد المحرقي الخلفي (21) نحصل على:

$$\frac{\delta B}{\delta T} = \frac{\partial \left(\frac{h}{\varphi} \right)}{\partial T} \quad (36)$$

$$\frac{\delta B}{\delta T} = \frac{1}{\varphi} \frac{\partial h}{\partial T} - \frac{h}{\varphi^2} \frac{\partial \varphi}{\partial T} \quad (37)$$

مع أن القيمة الاسمية للقدرة البصرية φ تساوي الواحد عند

درجة الحرارة التصميمية إلا أنها تنحرف عن الواحد نتيجة لتغير

درجة الحرارة وهذا هو المقصود بالمقدار $\frac{\partial \varphi}{\partial T}$ في

التصحيح البصري السلبي لنظام حراريكون من عدستين متباعتين العلاقة (37).

وبتعويض العلاقات (32) و (35) في (37) نجد:

$$\frac{\delta B}{\delta T} = -\frac{1}{\phi} d\phi_1(\alpha_H + \gamma_1) - \frac{h}{\phi^2} [\gamma_1\phi_1 - d\phi_1\phi_2(\alpha_H + \gamma_1) + h\gamma_2\phi_2] \quad (38)$$

وبتعويض القيمة الاسمية للقدرة البصرية $\phi=1$ حسب (26) نحصل على:

$$\frac{\delta B}{\delta T} = -d\phi_1(\alpha_H + \gamma_1) - h[\gamma_1\phi_1 - d\phi_1\phi_2(\alpha_H + \gamma_1) + h\gamma_2\phi_2] \quad (39)$$

وبالاختصار نجد:

$$\frac{\delta B}{\delta T} = -d\phi_1(\alpha_H + \gamma_1) - h\gamma_1\phi_1 + dh\phi_1\phi_2(\alpha_H + \gamma_1) - h^2\gamma_2\phi_2 \quad (40)$$

$$\frac{\delta B}{\delta T} = (\alpha_H + \gamma_1)d\phi_1(h\phi_2 - 1) - h\gamma_1\phi_1 - h^2\gamma_2\phi_2 \quad (41)$$

بتعويض (41) في (25) نحصل على:

$$(\alpha_H + \gamma_1)d\phi_1(h\phi_2 - 1) - h\gamma_1\phi_1 - h^2\gamma_2\phi_2 = \alpha_H h \quad (42)$$

فنصل إلى معادلة التصحيح الحراري:

$$(\alpha_H + \gamma_1)d\phi_1(h\phi_2 - 1) - h\gamma_1\phi_1 - h^2\gamma_2\phi_2 - \alpha_H h = 0 \quad (43)$$

إبراهيم، إبراهيم

بالحل المشترك لجملة المعادلات (26) و (14) و (25) و (43) نحصل على المقادير التصميمية لجملة العدستين. ولكن خشية الإطالة في هذا المقام، نخصص الملحق A لحل هذه المعادلات.

فيكون الحل من الملحق A:

$$\phi_1 = \frac{\alpha_H + \gamma_2}{\Gamma(\alpha_H + \gamma_2) - (\alpha_H + \gamma_1)} \quad (A. 22)$$

$$d = \frac{\Gamma - 1}{1 - \phi_1} \quad (A. 7)$$

$$h = 1 - d\phi_1 \quad (A. 3)$$

$$\phi_2 = \frac{1 - \phi_1}{h} \quad (A. 23)$$

4- النتائج:

نطلق من مادة الألمنيوم للحامل الميكانيكي بمعامل تمدد طولي $\alpha_H = 23 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ومن طول إجمالي مقداره 0.8 (بدون واحدة لكونه مقداراً نسبياً) ونغير مادتي العدستين بكل التوليفات المختلفة مثنى مثنى للمواد الواردة في الجدول 1. ونحسب من العلاقات الأربع (A.22-A.3-A.7-A.23) المقادير التصميمية لجملة العدستين، فنحصل على الجدول 2:

الجدول (2) المقادير التصميمية لجملة العدستين بناء على الحسابات شبه المحورية.

$ \phi_1 + \phi_2 $	d	ϕ_2	ϕ_1	$\alpha_2 (\times 10^{-6})$ (K ⁻¹)	α_1 ($\times 10^{-6}$) (K ⁻¹)	المادة 2	المادة 1
5.056088	0.122039	-2.41727	2.638816	27.09	-1.91	ZnS	IRG26
4.392478	0.149596	-2.05554	2.336934	33.68	-1.91	ZnSe	
3.481980	0.21936	-1.57024	1.911743	53.16	-1.91	CdTe	
3.012585	0.296899	-1.33896	1.67363	81.15	-1.91	GaAs	
2.754280	0.396672	-1.25009	1.504194	133	-1.91	Ge	
2.407465	-0.12233	1.772569	-0.6349	-1.91	27.09	IRG26	ZnS
27.81447	-0.01545	15.87178	-11.9427	33.68	27.09	ZnSe	
14.88705	0.033183	-7.85993	7.027127	53.16	27.09	CdTe	
6.155949	0.093711	-3.02173	3.134216	81.15	27.09	GaAs	
3.8538859	0.183811	-1.76581	2.088074	133	27.09	Ge	
2.1734298	-0.13074	1.643637	-0.52979	-1.91	33.68	IRG26	ZnSe
7.7418502	-0.0498	4.725834	-3.01602	27.09	33.68	ZnS	
39.406167	0.011814	-21.4777	17.92844	53.16	33.68	CdTe	
7.8883281	0.06874	-3.97879	3.909535	81.15	33.68	GaAs	

التصحيح البصري السلبي لنظام حراريكون من عدستين متباعدتين

إبراهيم، إبراهيم

4.2902864	0.15503	-2.00021	2.290076	133	33.68	Ge	CdTe
1.7865269	-0.14752	1.430806	-0.35572	-1.91	53.16	IRG26	
4.0901063	-0.08375	2.70211	-1.388	27.09	53.16	ZnS	
5.1012234	-0.07044	3.261919	-1.8393	33.68	53.16	ZnSe	
31.797077	0.014764	-17.251	14.54609	81.15	53.16	GaAs	
6.3186989	0.090611	-3.11146	3.207237	133	53.16	Ge	
1.53356889	-0.16108	1.291927	-0.24164	-1.91	81.15	IRG26	GaAs
2.7347859	-0.11225	1.953082	-0.7817	27.09	81.15	ZnS	
3.1414455	-0.10184	2.177598	-0.96385	33.68	81.15	ZnSe	
4.928085	-0.07241	3.166019	-1.76207	53.16	81.15	CdTe	
16.072471	0.030513	-8.51799	7.554479	133	81.15	Ge	
1.3343112	-0.17367	1.182724	-0.15159	-1.91	133	IRG26	Ge
1.9561222	-0.13966	1.524044	-0.43208	27.09	133	ZnS	
2.134324	-0.13226	1.622106	-0.51222	33.68	133	ZnSe	
2.778013	-0.11104	1.976936	-0.80108	53.16	133	CdTe	
4.190855	-0.0822	2.757861	-1.43299	81.15	133	GaAs	

نلاحظ من الجدول 2 أن المسافة لابين العدستين تأخذ قيماً سالبة وهذه تؤدي إلى حلول مرفوضة. يحتوي العمود الأخير في الجدول 2 مجموع القيمتين المطلقتين للقدرة البصرية للعدستين. وهذا المقدار مهم فكلما نقص كانت الزيوغ أقل والصورة أوضح. فكما هو معروف فإن زيوغ الصورة تقل بزيادة البعد المحرقي للعدسة أي بنقصان

الجدول (3) المقادير التصميمية لجملة عدستين من IRG26 والجرمانيوم.

$ \varphi_1 + \varphi_2 $	B	d	φ_2	φ_1	\square_2 ($\times 10^{-6}$) (K ⁻¹)	\square_1 ($\times 10^{-6}$) (K ⁻¹)	المادة 2	المادة 1
2.7543	0.4033	0.3967	-1.2501	1.5042	133	-1.91	Ge	IRG26

5-التحقق من النتائج:

فيصبح البعد المحرقي للعدسة الأولى $f_1=90/\varphi_1$ ويصبح البعد المحرقي للعدسة الثانية $f_2=90/\varphi_2$ وتصبح d و B الجديدتان مضروبين ب 90 والقيم الناتجة مبينة في الجدول 4. البعد المحرقي مقلوب القدرة البصرية أي $f=1/\varphi$. ولتحقيق بعد محرقي قيمته 90mm نجري تحاكياً نسبته 90 أي نضرب المقادير التصميمية الطولية السابقة بالعدد 90،

الجدول (4) الأبعاد المحرقيّة والثخانات لجملة العدستين.

B (mm)	d (mm)	f_2 (mm)	f_1 (mm)	n_2	n_1	المادة 2	المادة 1
36.297	35.703	71.995-	59.833	4.00432	2.77801	Ge	IRG26

والعدسة الثانية مبعدة نسبها مستوية مقعرة فيكون بعدها

المحراقي:

$$\frac{1}{f_2} = -\frac{n_2-1}{R_2}$$

ويكون نصف قطر سطحها المقعر:

$$R_2 = -(n_2 - 1)f_2 = 216.296 \text{ mm}$$

ندخل أنصاف الأقطار والثخانات المحسوبة أعلاه في بيئة Zemax. ونحرص على إدخال معامل التمدد الطولي للحامل

الميكانيكي الموافق للألمنيوم في العمود $1E-6 \times TCE$ كما في

الشكل 3: كل

للتحقق من النتائج ندخل المقادير التصميمية في برنامج

Zemax وننتحقق من البعد المحراقي المكافئ لجملة العدستين

والطول الإجمالي ثم نغير درجات الحرارة للتأكد من أن التصميم

المحسوب مصحح حرارياً. ولذلك نحسب أنصاف أقطار

العدستين.

العدسة الأولى مقربة نسبها محدبة مستوية فيكون بعدها

المحراقي وفق العلاقة (1):

$$\frac{1}{f_1} = \frac{n_1-1}{R_1}$$

ويكون نصف قطر سطحها المحدب:

$$R_1 = (n_1 - 1)f_1 = 106.384 \text{ mm}$$

Surf	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter	TCE x 1E-6
OBJ	Standard		Infinity	Infinity		0.000000	0.000000
STO	Standard		106.384000 V	0.000000	IRG26	0.000000	-
2	Standard		Infinity	35.703000 V		5.003535	23.000000
3	Standard		Infinity	0.000000	GERMANIUM	0.000000	-
4	Standard		216.296000 V	36.297000 V		2.008128	23.000000
IMA	Standard		Infinity	-		0.000000	0.000000

EFFL: 89.997 WFNO: 8.97685 ENPD: 10 TOTR: 71.998

الشكل (3) معطيات العدستين في بيئة Zemax.

القيم هو التقريب الذي اتخذناه إلى ثلاث منازل عشرية أي إلى

أقرب ميكرون في المقادير الطولية. ثم ندخل أيضاً درجات حرارة

متدرجة من 40- إلى 60 درجة مئوية. وهذا المجال هو المجال

الحراري المعتمد في التصحيح الحراري (Greisukh,

2022,5) فتصبح معطيات النظام الحراري المصمم كما يلي:

يتبين من الشريط السفلي في الشكل 3 أن البعد المحراقي

المكافئ يساوي $EFFL=89.997 \text{ mm}$ وهو قريب جداً من القيمة

التصميمية 90 mm كما يتبين أن الطول الإجمالي

يساوي $TOTR=71.998 \text{ mm}$ وهو أيضاً قريب من القيمة

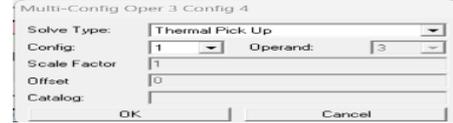
التصميمية 72 mm 0.8×90 . السبب في هذا الفرق الطفيف بين

Active	1/7	Config 1*	Config 2	Config 3	Config 4	Config 5	Config 6	Config 7
1: TEMP	0	20.000000	-40.000000	-20.000000	0.000000	20.000000	40.000000	60.000000
2: PRES	0	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000
3: CRVT	1	9.399910E-003 V	9.411995E-003 T	9.407963E-003 T	9.403935E-003 T	9.399910E-003 T	9.395882E-003 T	9.391870E-003 T
4: CRVT	3	0.000000	0.000000 T					
5: CRVT	4	4.623294E-003 V	4.624876E-003 T	4.624349E-003 T	4.623821E-003 T	4.623294E-003 T	4.622767E-003 T	4.622240E-003 T
6: CRVT	5	0.000000	0.000000 T					
7: THIC	1	0.000000	0.000000 T					
8: THIC	2	35.703000 V	35.653730 T	35.670153 T	35.686577 T	35.703000 T	35.719423 T	35.735847 T
9: THIC	3	0.000000	0.000000 T					
10: THIC	4	36.294970 V	36.244873 T	36.261572 T	36.278271 T	36.294970 T	36.311669 T	36.328368 T

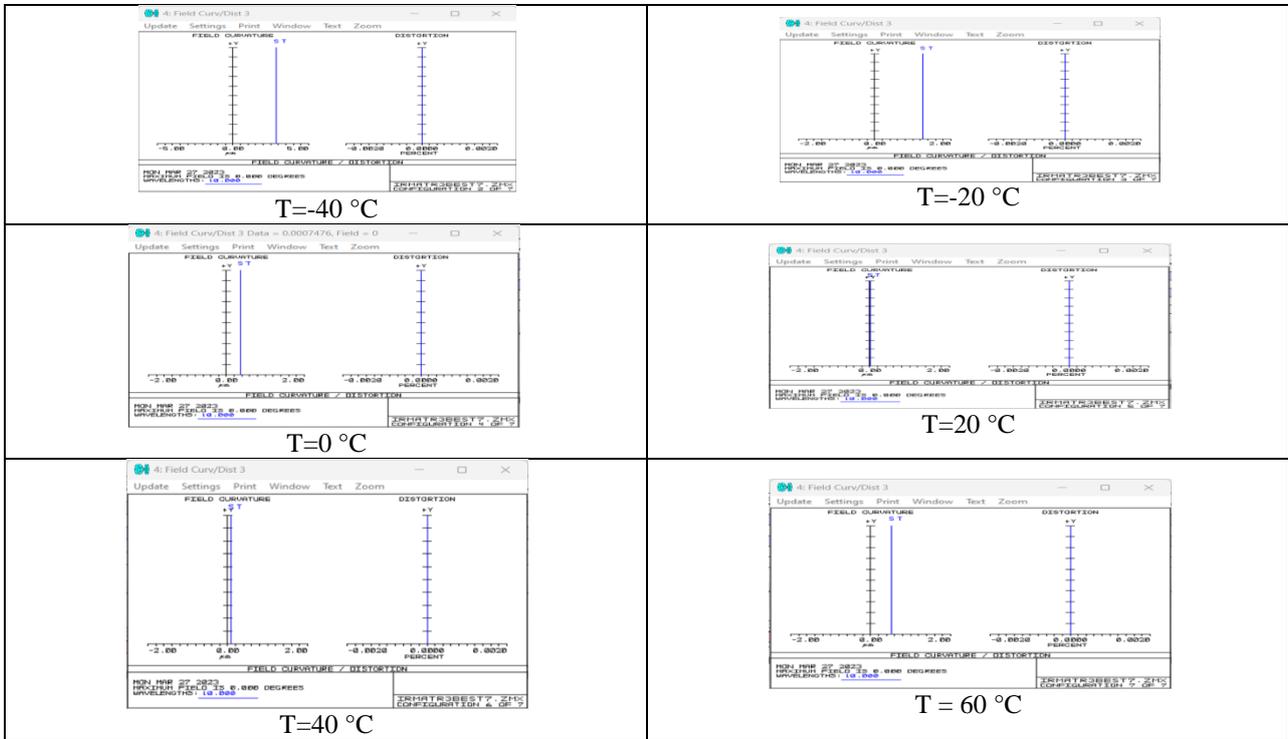
الشكل (4) درجات حرارة متدرجة 40- إلى 60 درجة مئوية للتأكد من التصحيح الحراري ضمن هذا المجال.

الرسالييساري من الشكل 6) منسوباً إلى سطح الحساس
(الخط الأسود المدرج لـ Oy).

ثم نجعل السماكات وأنصاف الأقطار تتغير وفقاً لدرجة
الحرارة. وذلك باختيار Thermal Pick Up من القائمة
المنسدلة Solve Type كما في الشكل 5:



الشكل (5) صندوق الحوار الذي يسمح بجعل معطيات العدسات
تتغير مع درجة الحرارة في بيئة Zemax.
فنحصل على موقع مستوي الصورة (الخط الأزرق في



الشكل (6) انزياح المحرق في المجال الحراري 40- إلى 60 درجة مئوية.

1

بكثير من معيار ريلي الذي يعتبر النظام البصري مصححاً من
زيغ انزياح المحرق إذا كان الزيغ أقل من ربع طول الموجة
(Smith, 2008, 348).

6-الخاتمة:

أجريت دراسة التصحيح الحراري لجملة عدستين ولهذا

يتبين من الشكل 6 أنه على كامل المجال الحراري المدروس لا
يتجاوز انزياح المحرق 3 ميكرون وهذه قيمة صغيرة جداً، فوق
العلاقة $W = \frac{1}{(8f\#)^2}$ ، حيث \square انزياح المحرق و $f\#$ هي
الفتحة العددية وتساوي عادة 1 في النظم الحرارية غير المبردة،
يؤدي هذا الانزياح إلى زيغ صدر موجه مقداره 0.4 ميكرون
أي 0.04 من طول الموجة التي تساوي 10 ميكرون وهذا أقل

12 من 10

إبراهيم، إبراهيم

$$h\varphi_2 = 1 - \varphi_1 \quad (A.11)$$

ومن العلاقة (A.3) نستنتج:

$$d\varphi_1 = 1 - h \quad (A.12)$$

ونعوض (A.11) و (A.12) في المعادلة (A.1):

$$(\alpha_H + \gamma_1)(1 - h)(-\varphi_1) - h\gamma_1\varphi_1 - h\gamma_2(1 - \varphi_1) - \alpha_H h = 0 \quad (A.13)$$

وبالاختصار نجد:

$$-(\alpha_H + \gamma_1)\varphi_1 + h\varphi_1(\alpha_H + \gamma_1) - h\gamma_1\varphi_1 - h\gamma_2 + h\gamma_2\varphi_1 - \alpha_H h = 0 \quad (A.14)$$

$$-(\alpha_H + \gamma_1)\varphi_1 + h\alpha_H\varphi_1 + h\gamma_1\varphi_1 - h\gamma_1\varphi_1 - h\gamma_2 + h\gamma_2\varphi_1 - \alpha_H h = 0 \quad (A.15)$$

$$-(\alpha_H + \gamma_1)\varphi_1 + h(\alpha_H\varphi_1 - \gamma_2 + \gamma_2\varphi_1 - \alpha_H) = 0 \quad (A.16)$$

$$-(\alpha_H + \gamma_1)\varphi_1 + h[(\alpha_H + \gamma_2)\varphi_1 - (\gamma_2 + \alpha_H)] = 0 \quad (A.17)$$

$$-(\alpha_H + \gamma_1)\varphi_1 + (\alpha_H + \gamma_2)h(\varphi_1 - 1) = 0 \quad (A.18)$$

من (A.10) نجد أن $h(1 - \varphi_1) = 1 - \Gamma\varphi_1$ فنعوضها

في (A.18):

$$-(\alpha_H + \gamma_1)\varphi_1 - (\alpha_H + \gamma_2)(1 - \Gamma\varphi_1) = 0 \quad (A.19)$$

بالإصلاح نجد قيمة φ_1 :

$$-(\alpha_H + \gamma_1)\varphi_1 - (\alpha_H + \gamma_2) + \Gamma\varphi_1(\alpha_H + \gamma_2) = 0 \quad (A.20)$$

$$\varphi_1 = \frac{\alpha_H + \gamma_2}{\Gamma(\alpha_H + \gamma_2) - (\alpha_H + \gamma_1)} \quad (A.22)$$

وتحسب باقي القيم من العلاقات التالية:

$$d = \frac{\Gamma - 1}{1 - \varphi_1} \quad (A.7)$$

$$h = 1 - d\varphi_1 \quad (A.3)$$

ومن (A.11) نحسب φ_2 :

$$[\Gamma(\alpha_H + \gamma_2) - (\alpha_H + \gamma_1)]\varphi_1 = \alpha_H + \gamma_2 \quad (A.21)$$

$$\varphi_2 = \frac{1 - \varphi_1}{h} \quad (A.23)$$

التصحيح البصري السليبي لنظام حراريكون من عدستين متباعدين الغرض طورنا علاقات رياضية غير موجودة في الأدبيات على ما نعلم. تُؤمّن هذه العلاقات التصحيح الحراري مع الحفاظ على طول ثابت للجملة البصرية وتُمكن من حساب المقادير التصميمية للجملة. وتم التحقق من صلاحية هذه العلاقات باستخدام برنامج التصميم البصري الشهير Zemax. وتبين أن اختيار العدسة الأولى من IRG26 والعدسة الثانية من الجرمانيوم يُمكن بشكل فريد من التصحيح الحراري في مجال حراري واسع من 40 إلى 60 درجة مئوية بنظام حراري حجمه صغير ووزنه خفيف وكلفتهم منخفضة نسبياً.

الملحق (A) حل معادلات التصحيح الحراري:

لدينا أربع معادلات بأربعة مجاهيل φ_1 و φ_2 و d و h :

$$(\alpha_H + \gamma_1)d\varphi_1(h\varphi_2 - 1) - h\gamma_1\varphi_1 - h^2\gamma_2\varphi_2 - \alpha_H h = 0 \quad (A.1)$$

$$\varphi_1 + h\varphi_2 = 1 \quad (A.2)$$

$$h = 1 - d\varphi_1 \quad (A.3)$$

$$h + d = \Gamma \quad (A.4)$$

لحلها نبدأ بتعويض (A.3) في (A.4):

$$1 - d\varphi_1 + d = \Gamma \quad (A.5)$$

$$1 + d(1 - \varphi_1) = \Gamma \quad (A.6)$$

ومنه قيمة d بدلالة φ_1 :

$$d = \frac{\Gamma - 1}{1 - \varphi_1} \quad (A.7)$$

وبتعويض قيمة d في (A.3):

$$h = 1 - \frac{\Gamma - 1}{1 - \varphi_1}\varphi_1 \quad (A.8)$$

$$h = \frac{1 - \varphi_1 - \Gamma\varphi_1 + \varphi_1}{1 - \varphi_1} \quad (A.9)$$

نجد قيمة h بدلالة φ_1 :

$$h = \frac{1 - \Gamma\varphi_1}{1 - \varphi_1} \quad (A.10)$$

ومن العلاقة (A.2) نجد:

التمويل: هذا البحث ممول من جامعة دمشق وفق رقم

التمويل (501100020595).

- 8- ZEMAX Development Corporation, (1990-2005), "Optical Design Program User's Guide", www.zemax.com
- 9- Hassan H. M., Eldessouky T. A and Medhat M., 2023, "Compact Athermalized LWIR Objective Lens", J. Opt. (March 2023) 52(1), pp. 261–268, <https://doi.org/10.1007/s12596-022-00892-2>
- 10-Sangwal K. and Kucharczyk W., 1987, "Relationship between density and refractive index of inorganic solids", J. Phys. D: Appl. Phys. 20 (1987) 522-525. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/20/4/019>
- 11- Liu T., Wang C., Yu Y., Liu Z. and He F., 2021, "Passive Athermal Optical Design Method Considering Thermal-Induced Surface Deformation", Photonics, 8, 396. <https://doi.org/10.3390/photonics8090396>
- 12-Greisukh G. I., Levin I. A. and Ezhov E. G., 2022, "Design of Ultra-High-Aperture Dual-Range Athermal Infrared Objectives", Photonics, 9, 742. <https://doi.org/10.3390/photonics9100742>

References

- 1- Bass, M., Mahajan, V. N., Stryland, P. J. Rogers and M. Roberts (2010), "Handbook of optics", Volume II: Design, Fabrication, and Testing; Sources and Detectors; Radiometry and Photometry, Mc Graw-Hill, 2010, ISBN 978-0-07162927-0, Chapter 8, Thermal Compensation Techniques, 8.1-8.16.
- 2- Gade, R. and Moeslund, T. B. (2014) "Thermal Cameras and Applications: A Survey", Machine Vision and Applications, 25:245-262, <https://doi.org/10.1007/s00138-013-0570-5>,
- 3-Lloyd, J. M. (1975), "Thermal imaging Systems", Plenum Press, New York, chapter 6, Optics, 212-282.
- 5- Rogalski, A., (2011) "Infrared Detectors", 2nd-ed., ISBN 978-1-4200-7671-4, CRC Press, 876.
- 6- Rogers, P. J., (1990), "Athermalized FLIR Optics", Proc. SPIE Vol. 1354, International Lens Design Conference, 742-750, <https://doi.org/10.1117/12.47878>
- 7- Smith, W. J., (2008), "Modern Optical Engineering", 4th edition, Mc. Graw-Hill, chapter 3, Paraxial Optics and Calculations, 35-52.

مسرد مصطلحات

Athermalization	التصحيح الحراري
Effective focal length (EFFL)	البعد المحرق المكافئ
Infrared radiation	الأشعة تحت الحمراء
Optical design	التصميم البصري
Optical power	القدرة البصرية
Paraxial calculations	حسابات شبه محورية
Thermal imaging systems	النظم الحرارية
Thermal Focal Shift	الانزياح الحراري للمحرق
Total track (TOTR)	الطول الإجمالي
Uncooled Focal Plane Arrays	حساسات مصفوية غير مبردة