دراسة تجريبية لتأثير هول الكمومي في طبقات ثنائي كبريتيد المولبديوم (MoS_2) عند درجات الحرارة المنخفضة في المجال الحراري (90−270 K)

حسين الحسين[*]، جاسم الفواز[**]
لمى الشب[***] قيصر اليماني[****]
عدي الابراهيم[*****]

الملخص

تم في هذا العمل إجراء دراسة تجريبية شاملة لخصائص النقل الإلكتروني في طبقات كبريتيد المولبديوم (MoS_2) المحضرة بالطريقة المائية الحرارية والتي تعطي اطوار بلور مختلفة (3R,2H, 1T). جرى بحث قياسات مفعول هول واكثافة حوامل الشحنة والمقاومة الكهربائية والمغناطيسية وذلك باستخدام قياسات كمون هول، ضمن مجال واسع من درجات الحرارة الممتدة من التبريد الفائق(90 k: -183°C) حتى درجات الحرارة القريبه من الصفر المئوي (270 k : −3 °C). أظهرت قياسات كمون هول تغيرًا لاخطيًا واضحًا مع درجة الحرارة، تخلله انقلاب في إشارة كمون هول قرب درجة حرارة حرجة تقارب (T≈150 k)، ما يدل على انتقال حراري في آلية النقل وتعدد قنوات التوصيل. وكشفت كثافة حاملات الشحنة المستخلصة من القياسات المتناوبة (AC) والحجمية (BD) عن قيم كبيرة عند درجات الحرارة المنخفضة وصلت إلى حدود ($10^{11} - 10^{12}/cm^3$)، مع سلوك غير منتظم يعكس سيطرة الحالات الموضعية العميقة، في حين انخفضت الكثافة واستقرت عند قيم أصغر من ($10^9/cm^3$)، مع ارتفاع درجة الحرارة، نتيجة التحرير الحراري التدريجي لحوامل الشحنة. كما أظهر المتوسط الفعّال لكثافة الحوامل قيمة دنيا حادة بلغت نحو ($-5.5 \times 10^{11}/cm^3$) في المجال الحراري الانتقالي مؤكّدًا وجود إعادة توزيع إلكتروني في النظام. ومن جهة أخرى، كشفت المقاومة المغناطيسية عن استجابة لاخطية قوية للمجال المغناطيسي، مع تعزيز ملحوظ للمقاومة عند درجات الحرارة المنخفضة، يُعزى إلى التبعثر الكمومي وتأثيرات التداخل الإلكتروني في النظام ثنائي الأبعاد. وقد لوحظ تراجع تدريجي في المقاومة المغناطيسية الى القيمة ($2.63 \times 10^{11}\Omega.m$) مع ارتفاع درجة الحرارة الى (270 k) وهذا بسبب فقدان التماسك الطوري وسيطرة النقل الكلاسيكي. وتؤكد النتائج أن النقل الإلكتروني في طبقات MoS_2 تحكمه آليات متعددة تتغير مع درجة الحرارة والمجال المغناطيسي، مع دور محوري للحالات الموضعية والعيوب البنيوية عند التبريد الفائق. هذه الدراسة توفر فهمًا عميقًا لفيزياء الناقلية في المواد ثنائية الأبعاد، ما يجعلها ذات أهمية أساسية لتطوير الأجهزة الإلكترونية والنانوية العاملة في البيئات منخفضة الحرارة.

الكلمات المفتاحية: كبريتيد المولبيدينوم (MoS_2)، التبريد الفائق، كمون هول، المقاومة الكهربائية، الناقلية الكهربائية، كثافة حاملات الشحنة، السلوك الكمومي، القياسات الكهربائية.

[*]**حاصل على شهادة الدكتوراه، قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة حلب husianphy990@gmail.com**
[**]**حاصل على شهادة الدكتوراه، قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة حلب jasem.alfawwaz@gmail.com**
[***]**أستاذ مساعد ، قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة حلب**
[****]**أستاذ مساعد ، قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة الفرات**
[****]**مدرس، قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة حلب**

Experimental Study of the Quantum Hall Effect in Molybdenum Disulfide (MoS□) Layers at Low Temperatures in the Thermal Range (90–270 K)

Hussein AlHussein*
jasem alfawwaz**
Lama Alchab***
kaisr AlYamani****
Odai Alebraheem***

Abstract

In this work, a comprehensive experimental study of electron transport properties was conducted on molybdenum disulfide (MoS□) thin films synthesized via the hydrothermal method, which yields various crystalline phases (3R, 2H, 1T). Measurements of the Hall effect, charge carrier density, electrical resistivity, and magnetoresistance were investigated using Hall voltage measurements across a wide temperature range, extending from cryogenic temperatures (90 K: -183°C) up to near-freezing temperatures (270 K: -3°C). The Hall effect measurements showed a clear non-linear dependence on temperature, with a sign reversal near a critical temperature of approximately T≈150 k, indicating a thermal transition in the transport mechanism and the presence of multiple conduction channels. The charge carrier density extracted from alternating current (AC) and bulk (BD) measurements revealed high values at low temperatures, reaching approximately (10^{11}–10^{12}/cm³), with irregular behavior reflecting the dominance of deep localized states. As the temperature increased, the density decreased and stabilized at lower values (less than 10□/cm³), due to the gradual thermal release of charge carriers. The effective average carrier density also showed a sharp minimum of approximately (-5.5 × 10^{11}/cm³) in the transitional temperature range, confirming the presence of electronic redistribution in the system. Furthermore, the magnetoresistance exhibited a strong nonlinear response to the magnetic field, with a significant enhancement at low temperatures, attributed to quantum scattering and electron interference effects in the two-dimensional system. A gradual decrease in magnetoresistance to a value of (2.63 × 10^{11} Ω·m) was observed as the temperature increased to (270 k), due to the loss of phase coherence and the dominance of classical transport. These results confirm that electron transport in MoS□ layers is governed by multiple mechanisms that change with temperature and magnetic field, with a crucial role played by localized states and structural defects at very low temperatures. This study provides a deep understanding of the conductivity physics in two-dimensional materials, making it fundamentally important for the development of electronic and nanoelectronic devices operating in low-temperature environments.

Keywords: Molybdenum disulfide (MoS□), Hall effect, electrical resistance, electrical conductivity, charge carrier density, quantum behavior, electrical measurements**.**

***PhD holder in Physics, Department of Physics, Faculty of Science, Aleppo University.**
****PhD holder in Physics, Department of Physics, Faculty of Science, Aleppo University**
*****Assistant Professor, Department of Physics, Faculty of Science, Aleppo University.**
******Assistant Professor, Department of Physics, Faculty of Science, AlFurat University.**
******Lecturer, Department of Physics, Faculty of Science, Aleppo University.**

1-المقدمة:

1-1-الخصائص الكهربائية عند درجات الحرارة المنخفضة:

تُعد دراسة الخصائص الكهربائية للمواد شبه الموصلة عند درجات الحرارة المنخفضة من الموضوعات الأساسية في فيزياء الحالة الصلبة، لما توفره هذه الدراسات من فهم عميق لآليات النقل الإلكتروني والتفاعلات الأساسية بين حوامل الشحنة وبنية المادة. عند خفض درجة الحرارة، تقل الاهتزازات الحرارية للشبكة البلورية كذلك مع التبريد الفائق وخفض درجة الحرارة تقل الطاقة الحرارية المتاحة لتحرير حوامل الشحنة من مستويات الشوائب إلى حزمة التوصيل، مما يؤدي إلى ما يُعرف بمنطقة التجمّد(Freeze-out region) ، حيث ينخفض تركيز الحوامل الحرة بشكل ملحوظ. نتيجة لذلك تتغير آليات النقل الكهربائي ويصبح التوصيل أكثر حساسية للحالات الموضعية والعيوب البلورية. مما يؤدي إلى تغيّر جوهري في سلوك التوصيل الكهربائي مقارنة بدرجات الحرارة العالية. ويُعتبر كبريتيد المولبديوم (MoS_2) من المواد شبه الموصلة ثنائية الأبعاد التي أظهرت سلوكًا كهربائيًا مميزًا عند درجات الحرارة المنخفضة، خصوصًا في سياق دراسات الناقلية الإلكترونية تحت تأثير المجال المغناطيسي[1,2]. وتكتسب هذه الدراسات أهمية إضافية عند درجات حرارة منخفضة (90 k, -183°C)، حيث يمكن عزل التأثيرات الحرارية والتركيز على الخصائص الجوهرية للمادة. فعند درجات الحرارة المنخفضة، ينخفض تأثير الفونونات بشكل كبير مما يقلل من تشتت حوامل الشحنة الناتج عن الاهتزازات الشبكية. ونتيجة لذلك، يصبح النقل الإلكتروني أكثر انتظامًا، وتزداد حساسية التوصيل الكهربائي تجاه العيوب البلورية، الشوائب، والحالات السطحية. في هذا النطاق الحراري، يمكن ملاحظة أن التغير في الناقلية لا يعود بالدرجة الأولى إلى عدد الحوامل، بل إلى حركيتها وآليات التشتت المسيطرة وفي المواد ثنائية الابعاد(الطبقية) مثل□MoS يؤدي الانخفاض في درجة الحرارة إلى إبراز الطبيعة ثنائية الأبعاد للنقل الكهربائي، حيث يتركز التيار بشكل رئيسي داخل الطبقات كما أن التفاعلات بين الطبقات تصبح أقل تأثيرًا، مما يسمح بدراسة النقل الالكتروني داخل المستوى بدقة أكبر[3,4,5].

1-2-درجات الحرارة المنخفضة والناقلية الفائقة:

من المهم التمييز بين الناقلية عند درجات الحرارة المنخفضة وبين الناقلية الفائقة (Superconductivity) : الناقلية الفائقة تُعرّف بأنها اختفاء المقاومة الكهربائية كليًا عند درجة حرارة حرجة معينة (Tc) وقريبة من الصفر المطلق (0 k)، إضافة إلى طرد المجال المغناطيسي (تأثير مايسنر). في حين أن MoS_2 في حالته الاعتيادية لا يُظهر ناقلية فائقة ذاتية، إلا أن انخفاض درجة الحرارة يؤدي إلى تغيير ملحوظ في النقل الإلكتروني دون الوصول إلى حالة المقاومة الصفرية، وقد أظهرت دراسات حديثة أن MoS_2 يمكن أن يُظهر ناقلية فائقة في ظروف خاصة، مثل: الاشابة العالية، تطبيق جهد بوابة كهربائية قوي، أو التلامس مع مواد فائقة التوصيل. إلا أن هذه الحالات تُعد استثنائية، وتختلف عن السلوك الكهربائي المدروس في هذا العمل، الذي يركز على النقل الإلكتروني منخفض الحرارة وليس على الناقلية الفائقة بمعناها الفيزيائي الصارم [6,7,8].

العلاقة بين المدى الحراري وقياسات تأثير هول:

تكتسب قياسات تأثير هول ضمن هذا المدى الحراري أهمية خاصة، إذ تسمح بتتبع التغير في نوع وكثافة الحوامل المشحونة مع درجة الحرارة. ففي درجات الحرارة المنخفضة، تعكس قياسات هول الخصائص الجوهرية للمادة بشكل مباشر، بينما عند درجات الحرارة الأعلى، تتأثر النتائج بمساهمة الحوامل الحرارية والتشتت الفونوني. إن مقارنة نتائج تأثير هول عند (-183°C) مع تلك المقاسة قرب درجة حرارة قريبة من الصفر المئوي(-3°C) توفّر رؤية شاملة حول

تطور آليات الناقلية، وتساعد في التمييز بين السلوك (نصف الناقل) الداخلي وتأثيرات العيوب كما أن هذا النطاق الحراري الواسع يسمح بالكشف عن أي تغيرات غير اعتيادية في السلوك الكهربائي قد تشير إلى انتقالات في آلية الناقلية أو إلى تأثيرات فيزيائية ناشئة [9,10].

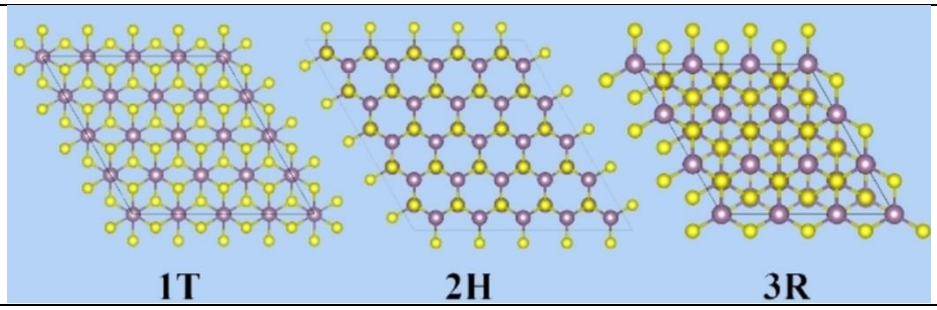
2-البنية البلورية لكبريتيد المولبديوم (MoS□):

يوجد MoS_2، سواءً كان طبيعيًا أو صناعيًا، في أحد الأطوار الثلاثة: $2H-MoS_2$، و$R-MoS_2$، و $1T-MoS_2$، حيث تُمثل H وR وT التماثل السداسي والمعيني والرباعي، على التوالي، بينما تُمثل الأرقام "1" و"2" و"3" عدد الطبقات لكل خلية وحدة (Number of layers per unit cell) كما هو موضح بالجدول (1).

الجدول (1): يلخص المراحل البلورية لـ MoS□

الطور البلوري	عدد الطبقات في خلية الوحدة	السلوك الإلكتروني النموذجي	البنية البلورية	التنسيق	مرجع
1T-MoS□	طبقة واحدة	سلوك معدني / ناقلية عالية	بنية ثلاثية (Trigonal)	تنسيق ثماني السطوح	[11]
2H-MoS□	طبقتان	سلوك نصف ناقل (Semiconducting)	بنية سداسية (Hexagonal)	تنسيق منشوري ثلاثي السطوح	[12]
3R	3 طبقات	سلوك نصف ناقل (Semiconducting)	(Rhombohedral)	تنسيق ثماني السطوح	[12]

يمكن تحديد الاختلاف بين هذه الاطوار من خلال المنظر العلوي للطبقات، حيث يُظهر الشكل (1) المنظرين العلوي والجانبي للهياكل الذرية للطبقات الأحادية من أطوار 2H-MoS□ و 1T-MoS□ و 3R-MoS□ في طوري 2H-MoS□ و 3R-MoS□ ترتبط ذرة المولبديوم (Mo) بشكل تساهمي مع ست ذرات من الكبريت(S) ، مما يؤدي إلى تكوين تنسيق منشوري ثلاثي السطوح حول ذرة المولبديوم. أما في طور 1T-MoS□، فإن ذرة المولبديوم تكون محاطة بست ذرات كبريت بترتيب يُشكّل تنسيقًا ثماني السطوح [13,14].



الشكل (1): يبين المنظرين العلوي للهياكل الذرية للطبقات الأحادية من أطوار $2H-MoS_2$ و 1T-MoS□ و 3R-MoS□ [15].

3-أهمية البحث: يُعد اختيار هذا المدى الحراري اختيارًا علميًا مدروسًا، إذ يجمع بين (التبريد الفائق183°C-) درجات حرارة منخفضة كفاية لتقليل التشتت الفونوني ودرجات حرارة نسبيًا قريبة من الصفر المئوي(3°C-) وهي ظروف تشغيل

قاسية للأجهزة الإلكترونية القائمة على كبريتيد المولبديوم MoS، حيث ان دراسة تأثير هول والخصائص الكهربائية لكبريتيد المولبديوم ضمن المدى الحراري (3°C, -183°C-) توفّر فهمًا متكاملًا لتطور الناقلية الإلكتروني في هذه المادة، وتسهم في تقييم إمكاناتها للتطبيقات الإلكترونية المستقبلية.

4- الدراسة العملية والتجريبية:

4-1- الأدوات والأجهزة:

1) منظومة قياس تاثير هول من الطراز (HMS-5000)
2) مجهر القوة الذرية (AFM).
3) مطياف الأشعة السينية (XRD) من شركة Leybold Didactic، طراز(554-81).
4) فرن المعالجة الحرارية من شركة Carbolite، طراز CWF 1200.
5) خلاط مغناطيسي مع سخان، طراز (2-502p) من شركة PMC.
6) جهاز Autoglaze من شركة SMIC.
7) معدات التحضير الكيميائي.

4-2- طريقة التحضير:

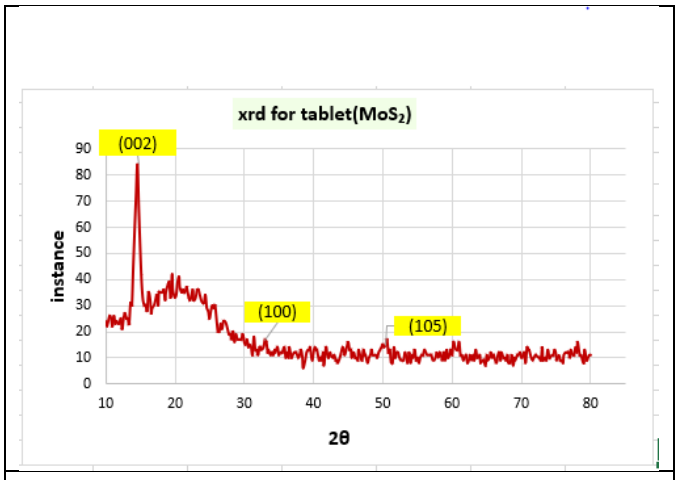
لتحضير هياكل (MoS_2) النانوية، تم إجراء عملية التصنيع باستخدام الطريقة الحرارية المائية. في عمليات تصنيع جسيمات MoS_2 النانوية النموذجية، يُستخدم كبريتيد الصوديوم كمصدر للكبريت للحصول على كبريتيد الموليبدينوم من خلال التفاعلات الكيميائية. [16, 17] يمكن تقسيم مراحل التحضير إلى الخطوات التالية: وُضع (1.235 gr) من رباعي هيدرات هيبتامولوبيدات الأمونيوم ($(NH4)_6Mo_7O_{24}\ 4H_2O$) في (25ml) مل من الماء المقطر مع التحريك المستمر. بعد 30 دقيقة، أُضيف (0.5gr) من أحادي هيدرات حمض الستريك ($C_6H_8O_7\ H_2O$) إلى المحلول السابق. بعد ذلك، أُضيف (0.31gr) من بلورات كبريتيد الصوديوم (Na_2S) إلى خليط المحلول. ثم نُقل المحلول إلى جهاز تعقيم عند درجة حرارة (200) درجة مئوية لمدة (6) ساعات. ثم بُرّد بشكل طبيعي إلى درجة حرارة الغرفة. بعد ذلك، غُسل المنتج الأسود النهائي بالإيثانول ثم بالماء المقطر. وجُفف المسحوق الناتج عند درجة حرارة (70°C) درجة مئوية. بعد ذلك قمنا بضغط كمية من البودرة الناتجة قدرها (1gr) باستخدام مكبس هيدروليكي عند استطاعه ($5ton/cm^2$) فحصلنا على قرص بقطر (14mm) وسماكة (3mm) كما هو موضح بالشكل (2).



الشكل (2):يبين القرص المحضر من كبريتيد المولبديوم

4-3-طيف انعراج الأشعة السينية:

تبين من خلال طيوف الأشعة السينية (XRD) للاقراص المحضرة من (MoS_2) وجود قمم تبلور واضحة، حيث بينت قياسات انعراج الأشعة السينية وجود قمة موافقة للمستوي البلوري (002) المقابل للزاوية ($2\Theta=14.6°$) والذي يميز طبقات كبريتيد المولبديوم بأطوارها الوحيدة او المتعددة كما هو موضح بالشكل (3) وهذا يتوافق مع البطاقات المرجعية لثنائي كبريتيد المولبديوم ((PDF#75-1539)) [18].



الشكل (3): يبين طيف الاشعة السينية لعينة(tablets– MoS_2)

وبالاعتماد على قانون براغ لانعراج الأشعة السينية كما في العلاقة (1)، يمكن تعيين المسافة بين المستويات البلورية المحددة بقرائن ميللر (hkl):

$$2d_{hkl}\sin(\theta_{hkl}) = n\lambda \qquad (1)$$

حيث أنd_{hkl}: يمثل البعد بين المستويات البلورية المتوازية وفق الاتجاه hkl، والزاوية (θ_{hkl}): هي زاوية الانعراج، و n: هي رتبة الانعراج.

λ: تمثل طول موجة الاشعة السينية ($\lambda = 1.541\ A^0$) حيث β عرض منتصف الشدة لكل قمة مقدراً بالراديان، ومن أجل القمم المميزة الثلاثة الموافقة للزاويا والتعريض الموافق لكل شدة تم تلخيص نتائج قياس (XRD) بالجدول (2):

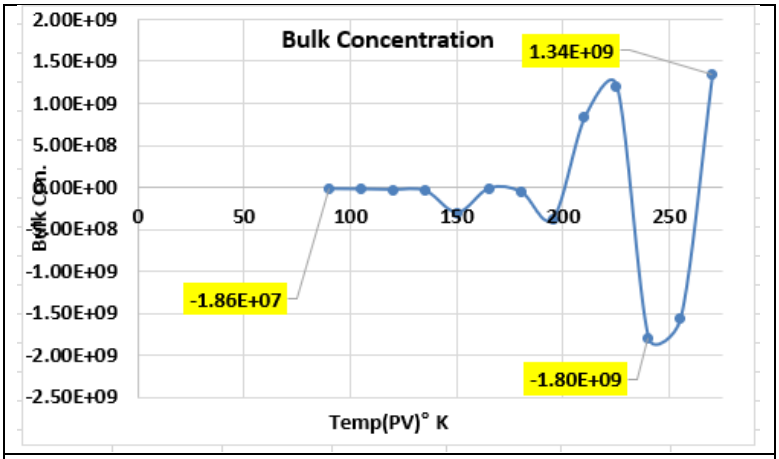
جدول(2): تلخيص طيف (XRD)

2θ	Hkl	Θ (degree)	d (A^0)
14.4	**(002)**	7.2	6.14
33.4	**(100)**	16.7	5.36
55	**(105)**	27.5	4.26

باخذ المتوسط الحسابي تبين أن $d_{hkl}=5.25\ ^{\circ}A$

4-4- دراسة التركيز الحجمي لكبريتيد المولبديوم (MoS_2) مع درجة الحرارة في التبريد الفائق:

لقد تمت جميع الدراسات الكهربائية في التبريد الفائق مع تطبيق حقل مغناطيسي قدره (556 m.T) وتطبيق تيار كهربائي قدره (1 n A)، مع خطوة قياس قدرها (15 k)، مع تأخير زمني قدره (5 Sec) لكل خطوة قياس، تمت دراسة التركيز الحجمي لحاملات الشحنة كما هو موضح بالشكل (4) حيث يبين تغير تركيز الحوامل الحجمية (BulK Concentration)المستخرج من قياسات تأثير هول بدلالة درجة حرارة العينة (T)، ضمن المجال الحراري الممتد تقريباً من 90 k إلى 270 k يمثل المحور الأفقي درجة حرارة العينة الفعلية، بينما يمثل المحور العمودي تركيز الحوامل مع الأخذ بعين الاعتبار الإشارة المستخلصة من معامل هول، مما يسمح بتحديد كل من مقدار التركيز ونوع الحوامل المسيطرة. وعند درجات الحرارة المنخفضة من (90 k) حتى حوالي (150 k) ، يكون تركيز الحوامل قريباً جداً من الصفر مع وجود تقلبات طفيفة حوله، كما أن الإشارة غير مستقرة. يُعزى هذا السلوك إلى ما يُعرف بمنطقة التجمّد (Freeze-out region). في هذه المنطقة يكون معامل هول ضعيفاً جداً، وتصبح القياسات شديدة الحساسية للضجيج التجريبي كما هو موضح بالشكل (4)



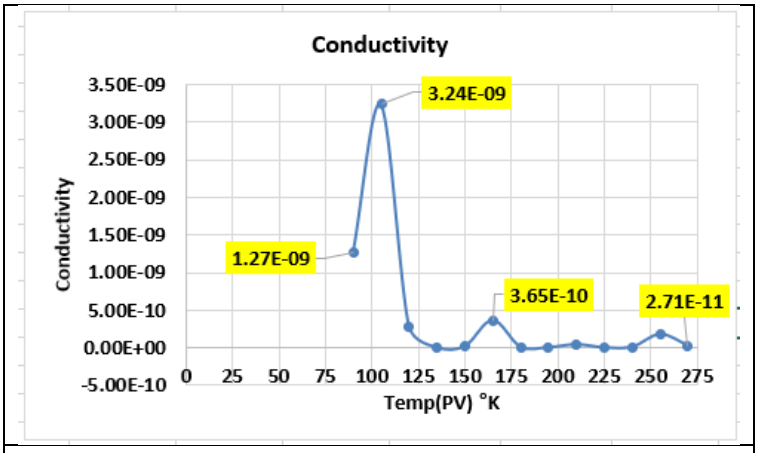
الشكل (4): دراسة التركيز الحجمي مع تغير درجات الحرارة T

مع ارتفاع درجة الحرارة إلى المجال الوسطي تقريباً بين 190 k, 150 k ، تبدأ المادة بالدخول في منطقة انتقالية، حيث يلاحظ تغير طفيف في تركيز الحوامل دون استقرار واضح. مع مساهمة متزامنة لنوعين من الحوامل، ما يؤدي إلى عدم وضوح سيطرة نوع واحد منها. في المجال الحراري الأعلى، وتحديداً بين حوالي (200–240 k) ، يظهر سلوك غير اعتيادي يتمثل في ازدياد حاد في التركيز الظاهري يتبعه انعكاس في الإشارة من موجبة إلى سالبة ثم العودة إلى موجبة. يشير هذا السلوك بوضوح إلى وجود نقل متعدد الحوامل(Two-carrier conduction) ، حيث تساهم كل من الإلكترونات والثقوب في عملية النقل الكهربائي. في هذه الحالة لا يعود نموذج الحامل الواحد المستخدم لاستخراج تركيز الحوامل من معامل هول صالحاً، إذ يصبح معامل هول معتمداً على تراكيز وحركيات كلا النوعين من الحوامل. وعليه فإن القيم السالبة الكبيرة الظاهرة في هذا المجال لا تمثل تركيزاً فيزيائياً حقيقياً، وإنما هي نتيجة رياضية لانهيار نموذج الحامل الواحد عند وجود أكثر من نوع حامل مسيطر. (عند درجات الحرارة الأعلى) أعلى من (250 k)، يستقر تركيز الحوامل مرة أخرى عند قيم موجبة كبيرة نسبياً، مما يدل على سيطرة نوع واحد من الحوامل، غالباً نتيجة زيادة التوليد الحراري للإلكترونات والثقوب، وبداية الاقتراب من السلوك الذاتي .(Intrinsic or near-intrinsic behavior) في هذا المجال تصبح القياسات أكثر موثوقية مقارنة بالمنطقة الانتقالية.

4-5- دراسة الناقلية الكهربائية لكبريتيد المولبديوم (MoS_2) بدلالة درجة الحرارة T:

يبين الشكل (2) تغير التوصيلية الكهربائية للمادة المدروسة بدلالة درجة حرارة العينة (T) ضمن المجال الحراري الممتد تقريباً من 90 k إلى 270 $°K$ وترتبط التوصيلية بتركيز الحوامل الحرة وحركيتها وفق العلاقة $\sigma = qn\mu$ **حيث إن q تمثل شحنة الإلكترون الأساسية وتساوي تقريبًا** $q = 1.602 \times 10^{-19}\ C$ **بينما n هو تركيز الحوامل الحرة و μ هي حركية الحوامل.وكون في** MoS_2 **يوجد نوعين من الحاملات n, p:** $\sigma = q(n\mu_n + p\mu_p)$

و n و p يمثلان تركيز الإلكترونات والفجوات على التوالي، بينما μ_n , μ_p تمثلان حركيتهما._لذا فإن سلوكها يعكس آلية النقل الكهربائي داخل المادة وعند درجات الحرارة المنخفضة (90–120 k~) ، تُظهر التوصيلية قيماً منخفضة مع وجود قيمة عظمى واضحة، ناتجة عن التوازن بين الزيادة التدريجية في تركيز الحوامل بسبب بداية تأيين الشوائب، وارتفاع الحركية نتيجة ضعف آليات التشتت في هذا المجال الحراري. ومع ارتفاع درجة الحرارة إلى المجال الوسطي (120–170 k~)، تنخفض التوصيلية بشكل حاد، ويُعزى ذلك إلى الانخفاض الكبير في حركية الحوامل نتيجة ازدياد تشتتها بالفونونات الشبكية، رغم استمرار الزيادة الطفيفة في تركيز الحوامل كما هو موضح بالشكل (5):



الشكل (5): يبين تغيرات الناقلية الكهربائية الحجمية σ مع درجة الحرارة T

عند درجات الحرارة الأعلى من (170 k) ، تستقر التوصيلية عند قيم منخفضة مع تقلبات طفيفة، مما يشير إلى تعادل تأثير زيادة تركيز الحوامل مع الانخفاض المستمر في الحركية، إضافة إلى احتمال وجود نقل متعدد الحوامل كما تدل عليه قياسات تأثير هول. يُظهر هذا المنحنى أن التوصيلية لا تتبع سلوكاً رتيباً مع درجة الحرارة، بل تتحدد بتفاعل معقد بين تركيز الحوامل وحركيتها، مما يستلزم تحليلها بالاقتران مع نتائج تأثير هول لفهم آلية النقل الكهربائي بصورة شاملة وقد تم ترتيب نتائج هذا القياس في الجدول (3).

لقد تم جميع القياسات حاسوبيا باستخدام منظومة قياس تاثير هول من الطراز (HMS-5000) وهي منظومة حاسوبيا تقوم باخذ جميع القياسات بشكل الكتروني وحاسوبي ودون تدخل من الباحثين فقط نقوم بتطبيق التيار الكهربائي والحقل المغناطيسي وحقن غاز النتروجين السائل او الهليوم حسب الدرجة المطلوبة ومع بدء القياس كل شي يتم حاسوبيا والقياسات ويتم تصدير النتائج بشكل ملف exel.

الجدول (3): يبين تغييرات كل من الناقلية و تركيز الحوامل وحركتها و الناقلية السطحية مع درجات الحرارة

Temp(PV)K	Bulk Con.	Sheet Con.	SheetResistance	Resistivity	Conductivity
90	-1.86E+07	-1.86E+06	8.32E+06	7.86E+08	1.27E-09
105	-2.15E+07	-2.15E+06	6.02E+06	3.09E+08	3.24E-09
120	-2.82E+07	-2.82E+06	6.56E+06	3.49E+09	2.87E-10
135	-4.24E+07	-4.24E+06	7.40E+06	3.68E+11	2.71E-12
150	-3.02E+08	-3.02E+07	6.90E+06	5.79E+10	1.73E-11
165	-1.12E+07	-1.12E+06	3.29E+06	2.74E+09	3.65E-10
180	-5.62E+07	-5.62E+06	1.17E+06	1.19E+11	8.38E-12
195	-3.73E+08	-3.73E+07	1.39E+05	3.77E+11	2.66E-12
210	8.35E+08	8.35E+07	6.34E+05	2.38E+10	4.20E-11
225	1.21E+09	1.21E+08	5.71E+05	2.34E+10	4.27E-13
240	-1.80E+09	-1.80E+08	4.94E+05	1.13E+11	8.87E-12
255	-1.57E+09	-1.57E+08	5.79E+05	5.58E+09	1.79E-10
270	1.34E+09	1.34E+08	3.88E+05	3.69E+10	2.71E-11

4-6- دراسة الناقلية السطحية Sheet Conductance (G) لكبريتيد المولبديوم (MoS_2):

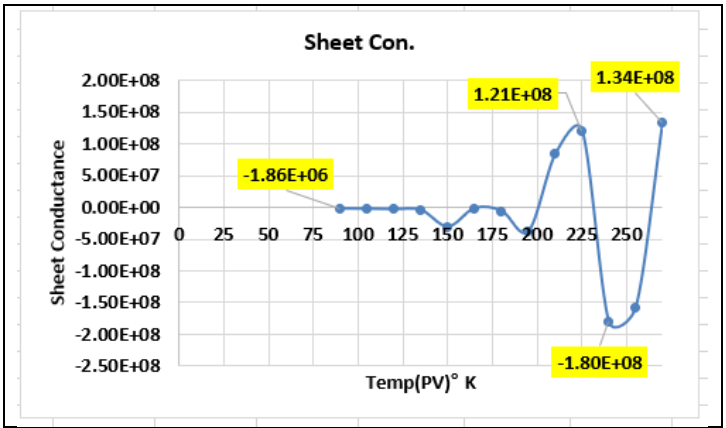
Sheet Conductance: هي مقياس لقدرة طبقة رقيقة ثنائية البعد (2D) او فلام رقيقة (Thin Film) على توصيل التيار الكهربائي بغض النظر عن أبعادها الجانبية. ولها الرمز (G) والسؤال هو لماذا نستخدم Sheet Conductance؟ في العينات الرقيقة جدًا (أفلام رقيقة، واجهات ثنائية الأبعاد): السمك t صغير جدًا وغير متجانس أحيانًا يصعب استخدام الناقلية الحجمية (σ) لذلك نستخدم كمية لا تعتمد على السمك الهندسي مباشرة. وتعطى بالعلاقة: $G = \sigma \cdot t$

حيث σ: الناقلية الحجمية (S/m) و t: سمك العينة (m) و G تعطى بواحدة Siemens

تمت دراسة الناقلية السطحية لعينة MoS_2 في مدى حراري بين نحو(k 270-90) وكما يظهر في الشكل (6)، تبقى الناقلية السطحية عند درجات الحرارة المنخفضة واقل من k 170 صغيرة جدًا وقريبة من الصفر، مما يشير إلى محدودية عدد الحاملات الحرة وتراجع سلوك نصف الناقل وسيطرة آليات نقل ضعيفة تتوافق مع سلوك شبه عازل وهو السلوك المميز مع التبريد العميق الذي يؤدي الى ظهونر حالات تجميد حوامل الشحنة او ما يُعرف بمنطقة التجمّد-Freeze) (out region. مع ارتفاع الحرارة إلى المجال (k 210-180) ، يبدأ مقدار الناقلية بالتحسن تدريجيًا، إلا أن بعض

نقاط القياس تُظهر قيمًا سالبة. ومن المهم الإشارة إلى أن **الناقلية الفيزيائية لا يمكن أن تكون سالبة**، ولذلك فإن هذه القيم تُعزى إلى تغيّر اتجاه إشارة الجهد في قياس Van der Pauw نتيجة **تقلبات الجهد الناتجة عن حساسية الجهاز**. وبالتالي تعدّ تشويهات تجريبية (measurement artifacts) مرتبطًة في ديناميكا الحاملات وكذلك بظهور مساهمات عرضية ناتجة عن تأثير هول كما هو موضح بالشكل (6).

في المجال (220−240 k) ، ترتفع الناقلية السطحية بشكل واضح لتصل إلى قيم كبيرة في حدود $(1.0 - 1.3)\times10^{8}$ S، مما يشير إلى زيادة ملحوظة في عدد الحاملات الحرة و تحسن حركيتها نتيجة تنشيط حراري أكبر.



الشكل (6): تغيرات الناقلية السطحية (G) مع تغيرات مع تغيرات الحرارة في مجال التبريد الفائق

وفي نطاق الحرارة (245−260 k) تظهر مرة أخرى قيم سالبة كبيرة، وهي أيضًا ناتجة عن **انقلاب إشارة الجهد المقاس** حيث ترتبط الناقلية السطحية بالجهد المقاس من خلال علاقة (Van der Pauw)، $Gs = \frac{1}{R} = \frac{ln2}{\pi} * \frac{I}{V}$ حيث انه عندما تنقلب اشارة الجهد ويصبح ذو قيمة سالبة وبالتالي تصبح الناقلية سالبة لكن فعليا الناقلية ليست سالبة **ولكن وجود هذه الاشارة يدل غالبًا إلى تغيّر نمط الاستجابة الكهربائية للعينة والجهاز معًا عند هذه الحرارة. والتفسير الفيزيائي هو:**

- **ظواهر النقل الكمومية (Quantum Transport Phenomena)**: عند درجات الحرارة المنخفضة، تظهر تأثيرات مثل **الموضعية (Localization)** أو **تداخل الموجات الإلكترونية (Electron wave interference)**. هذه الظواهر تجعل سلوك الحاملات غير تقليدي، ويمكن أن تسبب انعكاسًا في إشارة هول. وهذا السلوك الكمي لا يظهر سوى في درجات الحرارة المنخفضة.

ملاحظة: لكن هذا السلوك الكمي ظهر في درجات حرارة ضمن المجال (200−260).

وهذه ملاحظة هامه تؤكد صحة اختيارنا لمركب كبريتيد المولبديوم حيث يتميز بخصائص فريدة نتيجة اطوار المتعددة من حيث ظهور خصائص لاتوجد في بقية انصاف النواقل الاخرى، حيث ان تداخل هذه الاطوار الثلاثة (3R,2H,1T) في كبريتيد المولبديوم (يسمى في الدراسات الأوروبية : بالمادة العجيبة) يمنحه خصائصه فريدة تختلف عن بقية كالكوجينات المعادن الانتقالية وتكسبه سلوك خاص به كما ذكرتم في ملاحظتكم ظهور السلوك الكمي في درجة حرارة (200 k − 260) وما نقوم به في هذا البحث هو رصد هذا السلوك المميز لكبريتيد المولبيديوم والتعرف عليه.

انعكاس إشارة تأثير هول يكون بسبب ظواهر النقل الكمومية ومساهمات ديناميكا الدوامات (Vortex motion).

وفي المجال عالي الحرارة ($T \geq 270\ K$)، تستعيد الناقلية السطحية قيمًا موجبة مرتفعة تصل إلى نحو ($G \approx (1.4) \times 10^8\ S$) مما يدل على استقرار آلية النق

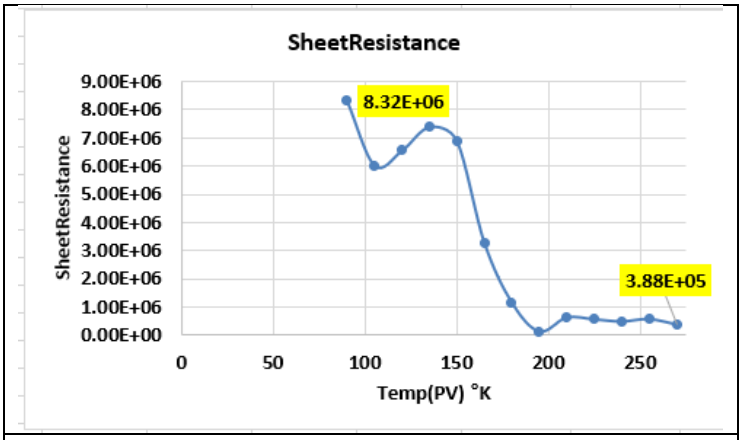
ل الكهربائي مما يعكس استقرار قياسات الجهد وعودة نظام النقل إلى سلوك شبه طبيعي مع زيادة الحاملات وسيطرة الحاملات العادية، مع اختفاء التأثيرات الشاذة التي تميز المجال الانتقالي.

4-7- دراسة مقاومة الصفائح او الطبقات ثنائية البعد (Sheet Resistance) لكبريتيد المولبديوم (MoS_2):

Sheet Resistance ويرمز لها بـ R هي مقاومة طبقة رقيقة أو نظام ثنائي الأبعاد، وتُعرَّف على أنها المقاومة المقاسة بين جانبين متقابلين من مربع افتراضي من العينة، وهي مستقلة عن الأبعاد الجانبية وتعتمد فقط على خصائص المادة وسُمكها. في قياسات هول، تُستخدم Sheet Resistance لوصف النقل الطولي (longitudinal transport)، أي الاستجابة الكهربائية على اتجاه التيار، في مقابل مقاومة هول التي تصف النقل العرضي. تعكس Sheet Resistance: كثافة الحاملات الشحنة، حركية الحاملات، آليات التشتت، جودة الفيلم الرقيق أو العينة، ولها دور كبير في التمييز بين أنظمة النقل:

- اذا كانت (R عالية $\Leftrightarrow$ نظام ضعيف التوصيل / شبه عازل) اما اذا كانت قيمتها صغيرة, ($R \to 0 \Leftrightarrow$ اقتراب من حالة فائقة التوصيل)
- تغيرها الحاد مع T $\Leftrightarrow$ انتقال طور أو تغير آلية النقل المسيطرة.

اما في حالة الناقلية الفائقة وتأثير هول: في الدرجات فوق درجة الحرارة الحرجة (Tc): R تعكس النقل العادي اما في الدرجات القريبة من درجة الحرارة الحرجة (Tc): تتأثر بتقلبات أزواج كوبر تحت Tc وبالتالي ($R \to 0$) نظريًا لكن عمليًا تظهر مساهمات من حركة الدوامات. لقد تم دراسة تغيرات مقاومة الصفائح مع تغير درجة الحرارة في مجال التبريد الفائق (k 270 – 90) كما هو موضح بالشكل (7).



الشكل (7): بين تغيرات المقاومة السطحية Sheet Resistance مع تغيرات الحرارة في التبريد الفائق T

نلاحظ من الشكل انخفاض أولي في قيمة Sheet Resistance (8.32E+06 - 6.02E+06) عند زيادة الحرارة من k 90 الى الدرجة k 105 وهذا يشير غالبًا إلى تحسن الناقلية حيث ان زيادة الحرارة تمنح الإلكترونات طاقة أكبر لتجاوز العوائق. وبعد ذلك ارتفاع في Sheet Resistance الى القيمة (8.32E+06) وهذا بسبب تأثير انتشار

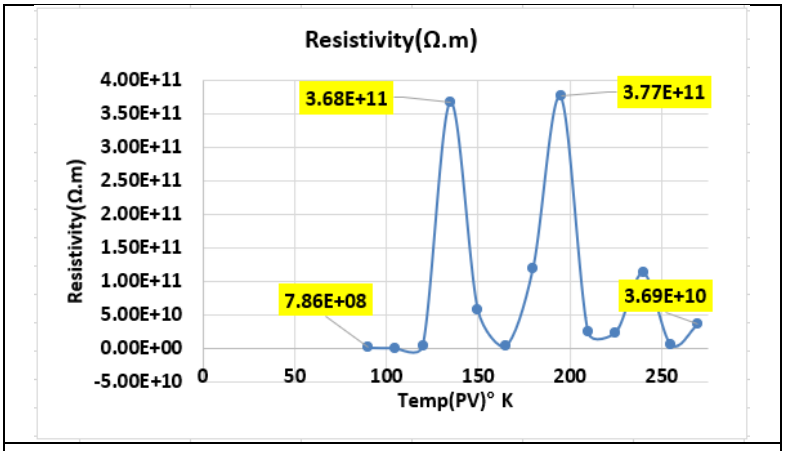
الفونونات. ثم نلاحظ انخفاض تدريجي في قيمة Sheet Resistance الى القيمة (1.39E+05) عند الدرج 195 k وهذا يشير عادة إلى تحول في المادة، مثل تغيّر في البنية البلورية أو ظهور حالة شبه معدنية/معدنية، حيث تصبح الإلكترونات أكثر حرية، كما نلاحظ استقرار جزئي عند(195–270 k) وهذا يشير إلى الوصول إلى توازن حراري حيث تأثير العيوب والفونونات يتوازن، فتثبت المقاومة. تم تلخيص النتائج بالجدول (4).

جدول (4) يبين تغييرات المقامة الحجمية (Resistivity) و(SheetResistance) للصفيحة مع تغييرات درجة الحرارة

Temp(PV)K	SheetResistance	Resistivity
90	8.32E+06	7.86E+08
105	6.02E+06	3.09E+08
120	6.56E+06	3.49E+09
135	7.40E+06	3.68E+11
150	6.90E+06	5.79E+10
165	3.29E+06	2.74E+09
180	1.17E+06	1.19E+11
195	1.39E+05	3.77E+11
210	6.34E+05	2.38E+10
225	5.71E+05	2.34E+10
240	4.94E+05	1.13E+11
255	5.79E+05	5.58E+09
270	3.88E+05	3.69E+10

4–8– دراسة المقاومة الحجمية (ρ – Resistivity) لكبريتيد المولبديوم (MoS_2) مع التبريد الفائق:

مقاومة المادة للتيار الكهربائي لكل وحدة طول ومساحة مقطع $\rho = \frac{RA}{L}$ حيث: R = المقاومة (Ω)، A = مساحة المقطع العرضي (m^2)، L = طول العينة (m) والوحدة: ($\rho: \Omega * m$) واستخدام قياس المقاومة الحجمية يعطي قياسًا حقيقيًا للمادة نفسها، مستقل عن شكل العينة أو أبعادها. تمت دراسة المقاومة الحجمية في مجال درجات حرارة (90–270 k) كما هو موضح بالشكل (8).



الشكل (8): بين تغيرات المقاومة الحجمية (ρ) مع تغيرات الحرارة في التبريد الفائق (T)

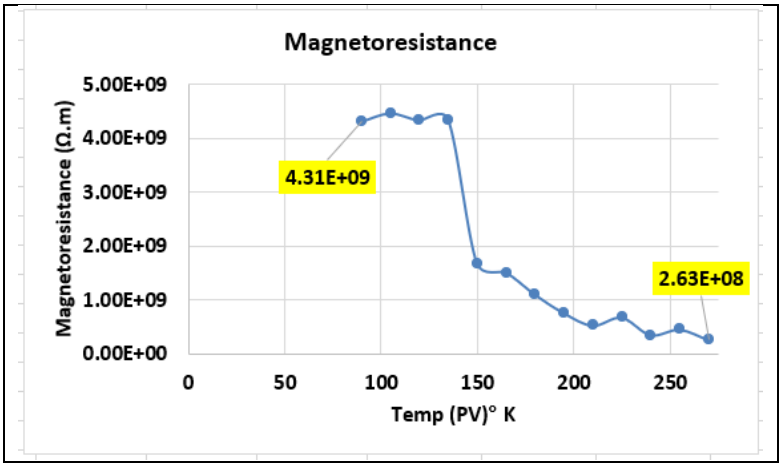
قيم المقاومة الحجمية لكبريتيد المولبديوم كما هو واضح من الشكل قيم صغيرة نسبياً عند (k 110– 90) من مرتبة (7.86E+08) ونلاحظ وجود قمتين حادات (3.68E+11, 3.77E+11) عند الدرجات (k 200 ,140)، وهي قيم كبيرة وهذا الارتفاع في المقاومة سببه **التبريد الفيزيائي:** حيث أن هذا السلوك متوقع في أنصاف النواقل ثنائية الأبعاد (2D Semiconductors) عند درجات الحرارة المنخفضة بسبب ظاهرة **تجمّد حوامل الشحنة (Carrier Freeze-out)**. عند خفض الحرارة، "تُسجن" الإلكترونات في مستويات الطاقة العميقة (Deep traps) ولا تملك طاقة حرارية للتحرر، مما يرفع المقاومة بشكل هائل.

اما وجود التذبذب (الارتفاع ثم الانخفاض ثم الارتفاع) فهو يعود الى:

- **آلية النقل (Hopping Conduction):** إن النقل في هذه الدرجات لا يتبع قانون أوم البسيط، بل يتبع "القفز بمدى متغير" (Variable Range Hopping – VRH). في هذا النمط، يمكن أن تتغير المقاومية بشكل غير رتيب نتيجة تغير المسارات المفضلة للإلكترونات بين مراكز التوضع (Localized states).
- **التداخل بين الأطوار (Phase Competition):** مادة MoS_2 معروفة بتعدد أطوارها (2H , 1T,3R). عند التبريد، قد يحدث انتقال طوري "موضعي" (Local Phase Transition) وتغير في المسافات بين الطبقات، مما يؤدي إلى تغير مفاجئ في فجوة الحزمة (Bandgap) وبالتالي تذبذب المقاومية.
- **بالنسبة للتيار الطفيلي:** لقد استخدمنا **منظومة قياس دقيقة** لقياس تاثير هول من الطراز (HMS-5000) وهو منظومة الكترونية وحاسوبية بالكامل، من حيث عملية القياس وعملية **المعايرة (Calibration)** وطرح تيار الخلفية (Background noise subtraction) ، وجميع العمليات تتم بشكل حاسوبي.
- **التحول الطوري المفاجئ:** إن القمم الظاهرة عند (k 140) و (k 200) تشير بالفعل إلى وجود تحولات طورية من الرتبة الثانية وإعادة ترتيب للشحنات(Charge ordering) ، وهو ما يتوافق مع الدراسات الحديثة على المواد ثنائية الأبعاد تحت التبريد.

4-9- دراسة المقاومة المغناطيسية Magnetoresistance لكبريتيد المولبديوم (MoS_2) مع التبريد الفائق:

Magnetoresistance: المقاومة المغناطيسية هي واحدة من أهم الكميات في قياسات هول وخاصة عند درجات الحرارة المنخفضة، هي تغير المقاومة الكهربائية للمادة عند تطبيق مجال مغناطيسي. تمت دراسة المقاومة Magnetoresistance في مجال درجات حرارة (k ° 270–90) كما هو موضح بالشكل (9).



الشكل (9): بين تغيرات المقاومة المغناطيسية (Magnetoresistance) مع تغيرات الحرارة في التبريد الفائق (T)

يتبين من الشكل (9) وجود قيم عالية (4.31E+09) عند درجات منخفضة (90–120 k~)، وسلوك المقاومة المغناطيسية لكبريتيد المولبديوم انخفاض حاد ابتداءً من (140-150 k)، وتكون قيم المقاومة المغناطيسية صغيرة نسبياً عند درجات أعلى (200–275 k~) من مرتبة 2.63E+08 والتفسير الفيزيائي:

في درجات الحرارة المنخفضة: طول المسار الحر للإلكترونات كبير، والمجال المغناطيسي يسبب انحناءً قوياً لمسارات الحوامل وبالتالي تزداد المقاومة المغناطيسية. ومع ارتفاع الحرارة: تزداد تصادمات الفونونات، أيضا يقل تأثير المجال المغناطيسي النسبي وبالتالي تنخفض magnetoresistance، الانخفاض الحاد قرب (140-150 k) قد يشير إلى: تغير آلية النقل نتيجة لبداية هيمنة تشتت الفونونات. **وقد تم توضيح التغيرات بالجدول (5)**

الجدول (5): يبين تغييرات (MagnetoRes) مع درجات الحرارة

Temp(PV)	MagnetoRes
90	4.31E+09
105	4.46E+09
120	4.33E+09
135	4.35E+09
150	1.68E+09
165	1.51E+09
180	1.11E+09
195	7.62E+08
210	5.29E+08
225	6.78E+08
240	3.55E+08
255	4.55E+08
270	2.63E+08

علاقة تربط المسار الحر الوسطي والمجال المغنطيسي ودرجة الحرارة:

نعم يوجد علاقة تربط بين هذه البارامترات لكننا لم نتطرق اليها في بحثنا هذا وقد تم التطرق اليها في أبحاث أخرى.

بالنسبة للعلاقة المطلوبة هي علاقة نصف قطر لارمور وتعطى بالعلاقة ($R_L = \frac{m*v}{g*B}$) حيث ان V هي سرعه الجسيمات وترتبط بدرجة الحرارة بتناسب وفق العلاقة ($V \propto \sqrt{T}$) اما (B) الحقل المغناطيسي فهو يحدد هندسة المسار للشحنات (R_L).

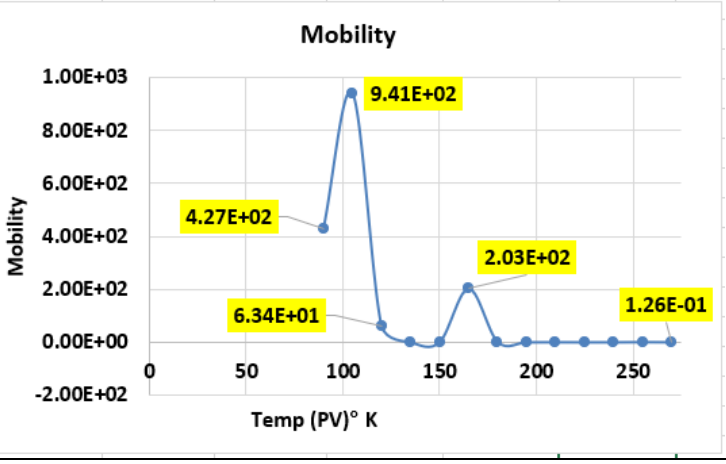
4-10- دراسة تغيرات معامل الحركية (Mobility) مع درجة الحرارة في التبريد الفائق:

الحركية (Mobility كفاءة حركة حوامل الشحنة): هي مقياس مدى سهولة حركة حاملات الشحنة (إلكترونات أو ثقوب) داخل المادة عند تطبيق مجال كهربائي او مغناطيسية ويعطى بالعلاقة: $\mu = \frac{dV}{E}$

حيث : dv :سرعة الانجراف : E المجال الكهربائي وفي قياسات هول: يتم حساب الحركية عادة من:

$$\mu = \frac{\sigma}{nq} = R_H * \sigma = \frac{R_H}{\rho}$$

حيث : R_H : معامل هول، : ρ المقاومية الكهربائية. حيث تمت دراسة تغيرات معامل الحركية (Mobility) في مجال درجات حرارة (90-270 ° k) كما هو موضح بالشكل (10).



الشكل (10): بين تغيرات معامل الحركية (Mobility) مع تغيرات الحرارة في التبريد الفائق (T)

يتبين من الشكل (10) وجود ارتفاع ملحوظ حتى قيمة عظمى (9.41E+02) موافقة للدرجة (105 k)، بعدها نلاحظ انهيار حاد الى القيمة (6.34E+01) موافقة للدرجة (120° k)، وقيم الحركية تصبح اصغر عند درجات أعلى، مع وجود قمة صغيرة عند الدرجة (275 ° k)، والتفسير الفيزيائي: عند درجات منخفضة: اهتزازات الشبكة ضعيفة وبالتالي حركة الحوامل شبه حرة وبالتالي حركية عالية، القمة الحادة للحركية هي سمة مميزة للمواد القريبة من الفائقية. وبعد الدرجة (105 k) تزداد تصادمات الفونونات بسرعة وهذا يسبب تراجع الحركية، وعند درجات أعلى من الدرجة (180 k) تكون قيمة معامل الحركية صغيرة وهذا يغني

ملاحظة : لكن ماهو سبب تزايد الفونونات بسرعة بين(105 k-120) ألا يعزى لتغير الحالة الطورية

هذه الملاحظة هامه لكن من أجل تأكيدها نحتاج قياسات دقيقة (تشتت رامان، تشتت النترونات غير المرن، IXS) وفي الواقع اثناء عملية التبريد يصعب استخدام هذه القياسات، لكن يمكننا ملاحظة اثر تغير الحالة الطوريه من خلال قياس معامل الحركية او قياس السعة الحرارية (Heat Capacity)، وهذه فائدة قياسات تاثير هول (HALL-

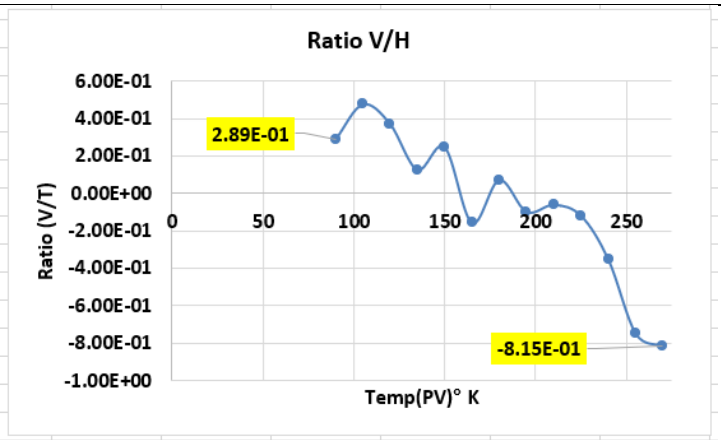
measurements) حيث توفر لنا إمكانية رصد عدة تغييرات معا (مغناطيسية، كهربائية ، طوريه) من خلال ملاحظة التغييرات مع درجة الحرارة.

وجود تشتت قوي لحوامل الشحنة وهذا يفسر تراجع قيم (μ) وانخفاضها. والقمة الحادة للحركية هي سمة مميزة للمواد القريبة من الفائقية أو الأنظمة المترابطة بقوة.

4-11- دراسة الاستجابة للمجال المغناطيسي (Ratio V/H) لكبريتيد المولبديوم (MoS_2):

ان (Ratio V/H) يمثل نسبة الجهد (كمون هول) إلى المجال المغناطيسي ويعبر عنه بالعلاقة $Ratio = \frac{V_H}{H}$

حيث : V_H : جهد هول المقاس : H شدة المجال المغناطيسي، مفيدة جداً عند القياس في درجات حرارة منخفضة حيث: الإشارات صغيرة، والحساسية عالية، وفي درجة الحرارة الحرجة (Tc) قد يظهر: تغير مفاجئ فيMobility ولاخطية في تغييرات V/H مع الحراره وذلك بسبب تشكل أزواج كوبر التي تسبب تقلبات الناقلية (Superconducting Fluctuations). حيث تمت دراسة تغيرات معامل الاستجابة المغناطيسية (Ratio V/H) مع تغيرات درجات حرارة (90-270 ° k) كما هو موضح بالشكل (11).



الشكل (11): بين تغيرات معامل الاستجابة المغناطيسية (Ratio V/H) مع تغيرات الحرارة في التبريد الفائق (T)

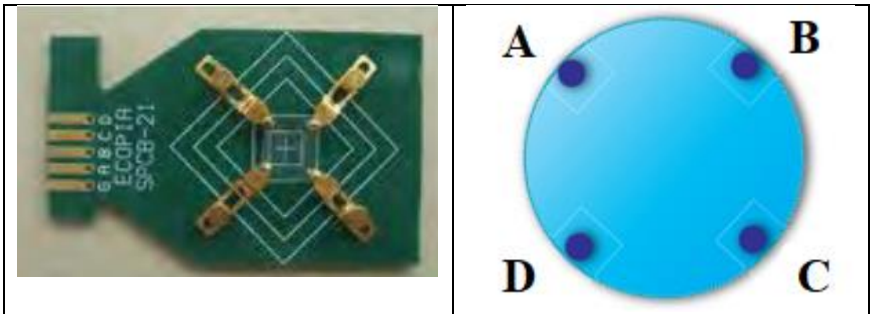
يتبين من الشكل (11) ان معدل الاستجابة المغناطيسية لكبريتيد المولبديوم يتعلق بالحرارة بشكل مباشر حيث تتراوح قيم الاستجابة المغناطيسية بين (2.89E-01)عند الدرجة (90 k) والقيمة (-8.15E-01) عند الدرجة (270 k) حيث يملك معدل الاستجابة لكبريتيد المولبديوم قيم موجبة عند درجات منخفضة(0.5 – 0.239~) ، مع ارتفاع درجة الحرارة نلاحظ تناقص تدريجي في قيم (Ratio V/H)، وانعكاس إشارة (Ratio V/H) إلى قيم سالبة بعد الدرجة (160 k)، كما نلاحظ تناقص قيم (Ratio V/H) الى قيم سالبة كبيرة (8.15E-01-) عند الدرجة (160 k)، والتفسير الفيزيائي: الإشارة الموجبة: تدل على حوامل موجبة (فجوات). وعند الاقتراب من الصفر يحدث توازن بين الالكترونات والفجوات. والإشارة السالبة: انتقال الهيمنة إلى إلكترونات نتيجة تغير في البنية الإلكترونية (Fermi surface). ان انعكاس الإشارة لمعدل الاستجابة المغناطيسية (Ratio V/H) مع الحرارة مؤشر قوي على انتقال في نوع حوامل الشحنة وبالتالي آلية النقل، تم توضيح تغيرات معدل الاستجابة المغناطيسية بالجدول (6).

جدول(6) تغيرات معدل الاستجابة المغناطيسية

Temp(PV)	Ratio V/H
90	2.89E-01
105	4.77E-01
120	3.74E-01
135	1.29E-01
150	2.50E-01
165	-1.55E-01
180	7.40E-02
195	-9.64E-02
210	-5.85E-02
225	-1.18E-01
240	-3.52E-01
255	-7.47E-01
270	-8.15E-01

4-12- دراسة تغييرات كمون هون لكبريتيد المولبديوم (MoS_2) مع تغيير درجة الحرارة في التبريد الفائق: كبريتيد المولبديوم MoS_2 مادة ثنائية الأبعاد ذو بنية طبقية(Layered 2D material) ، الروابط في هذه البنية الطبقية قوية داخل الطبقة افقياً (Mo–S) ، لكنها ضعيفة بين الطبقات (عمودياً) بسبب قوى فاندرفالس (Van der Waals) وبالتالي النقل الكهربائي يتعلق بهذه الروابط ويتمييز بانه أنيسوتروبي (غير متساوٍ اتجاهياً متباين المناحي) وحساس جداً إلى كل من : عدد الطبقات العيوب، التبريد ، المجال المغناطيسي، لذلك قياسات الكمون بين نقاط مختلفة لا تكون متطابقة.

لقد قمنا باخذ اربع اقطاب من سطح قرص كبيريتيد المولبديوم مشكلة اربع نقاط (A, B, C, D) بشكل مربع والبعد بين كل من النقاط (1cm) كما هو موضح بالشكل (12):

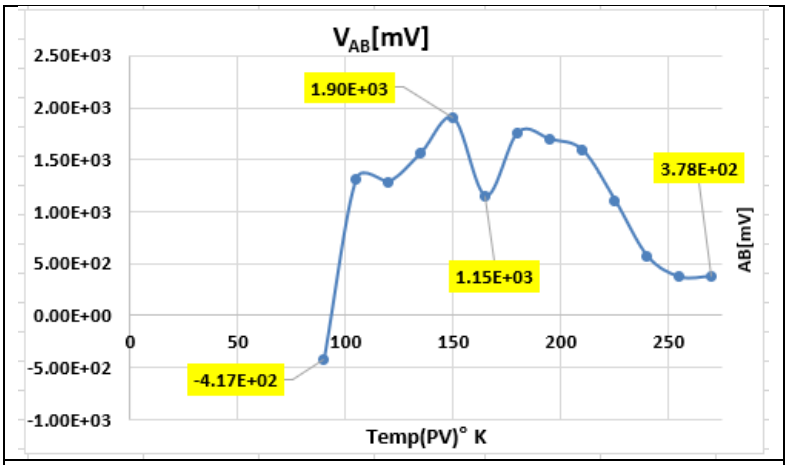


الشكل(12): يبين توضع الأقطاب الكهربائية لقياس الكمون الكهربائي

والهندسة الرباعية للنقاط (A, B, C, D): النقاط موزعة على محيط العينة كما هو موضح بالشكل (9). ويتم قياس كمون الكهربائي بين كل نقطتين بالشكل (V_{AB} , V_{AC}, V_{BC}, V_{CD}, $V_{BD}, V_{DA}, V_{HALL,average}$) وفي كل مرة يطبق تيار عمودي ويقاس الكمون العرضي، مثلاً: اذا كان التيار مطبق (A → C) فيكون كمون هول عرضيا أي كمون هول (B ↔ D).

4-12-1- كمون هول للنقطتين (A, B) V_{AB} مع تغييرات درجة الحرارة:

تمت دراسة تغيرات كمون هول (V_{AB}) مع تغيرات درجات حرارة (k 270-90) كما موضح بالشكل (13).



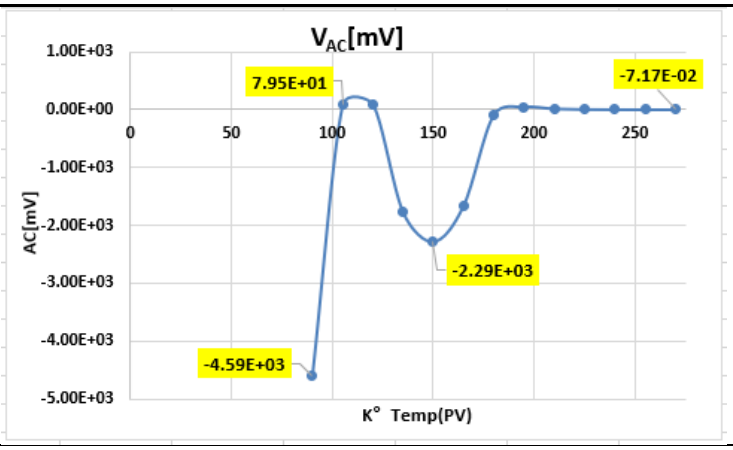
الشكل (13): بين تغيرات كمون هول (V_{AB}) مع تغيرات الحرارة في التبريد الفائق (T)

نلاحظ من الشكل ان قيمة V_{AB} سالبة (-4.17E+02 mV) عند درجات منخفضة(k 90~) ، وارتفاع حاد موجب بعد الدرجة (k 100) مع وجود قمة كبيرة (1.90E+03 mV) موافقة للدرجة (k 150)، ونلاحظ هبوط جزئي ثم تناقص تدريجي عند درجات أعلى وصولا للقيمة (3.78E+02 mV) عند الدرجة (k 170). والتفسير الفيزيائي: عند درجات منخفضة: يكون النقل محكوم بحالات موضعية أو طبقات ضعيفة التوصيل. وعند الدرجات بعد (k 100): تفعيل حراري لحوامل الشحنة وبالتالي فتح قنوات نقل داخل طبقات MoS_2. وجود القمة في قيم V_{AB}: تعكس إعادة توزيع التيار بين الطبقات، وتحرر المزيد حوامل الشحنة من المصائد.

4-12-2- كمون هول للنقطتين (A, C) V_{AC} مع تغييرات درجة الحرارة:

تمت دراسة تغيرات كمون هول (V_{AC}) مع تغيرات درجات حرارة (k 270-90) كما هو موضح بالشكل (14).

نلاحظ من الشكل (14) قيمة سالبة (-4.59E+03 mV) عند درجات منخفضة(k 90~) وارتفاع حاد موجب بعد (k 100)، والقمة الكبرى (7.95E+01) موجودة عند الدرجة (k 105)، ثم هبوط جزئي ثم تناقص تدريجي الى القيمة (-2.29E+03) عند الدرجة (k 150)،

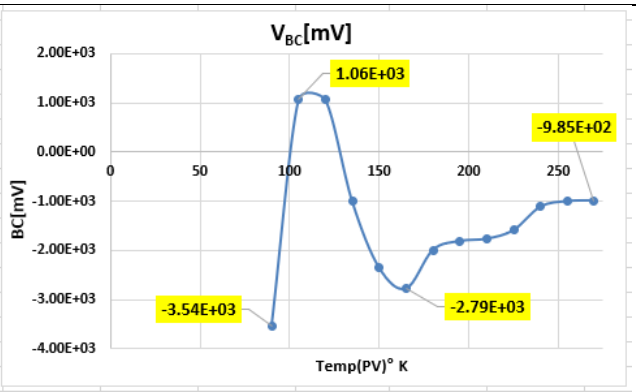


الشكل (14): بين تغيرات كمون هول (V_{AC}) مع تغيرات الحرارة في التبريد الفائق (T)

والتفسير الفيزيائي: إشارة موجبة صغيرة يليها انهيار حاد إلى قيم سالبة كبيرة هذا يمثل انتقالاً بين مسارات ناقلة مختلفة وطبقات ذات كثافات مختلفة.و الانخفاض الحاد: يدل على تغير مفاجئ في نوع الحوامل أو بداية هيمنة النقل بين الطبقات (interlayer).

4-12-3- كمون هول للنقطتين (B, C) V_{BC} مع تغييرات درجة الحرارة:

تمت دراسة تغيرات كمون هول (V_{BC}) مع تغيرات درجات حرارة (90-270 k) كما هو موضح بالشكل (15).



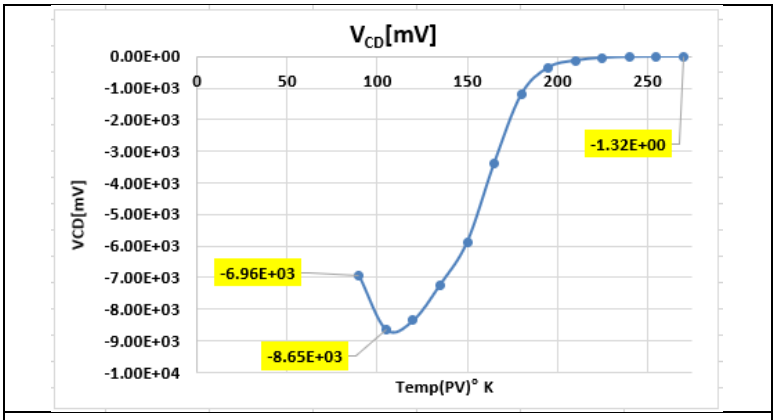
الشكل (15): بين تغيرات كمون هول (V_{BC}) مع تغيرات الحرارة في التبريد الفائق (T)

نلاحظ من الشكل (15) قيمة سالبة (-3.54 E+03 mV) عند درجات منخفضة(~90 k) وارتفاع حاد موجب عند الدرجة (105 k) يمثل القمة الكبرى (1.06E+03 mV) موجودة عند الدرجة (105 k)، ثم هبوط جزئي ثم تناقص تدريجي الى القيمة (-2.79E+03 mV) عند الدرجة (165 k)، ثم تزايد تدريجي الى القيمة (-9.85E+02 mV) عند الدرجة (170 k). والتفسير الفيزيائي: قيم سالبة كبيرة عند درجات منخفضة، وقمة موجبة حادة (~1.06×10³ mV) ثم عودة إلى القيم السالبة هذه التغييرات تعكس منطقة: أو سماكة طبقية مختلفة وهذا دليل على تشكل اطوار متعددة (3R/2H)، اما القمة الحادة: تشير إلى تحول موضعي في النقل

وفتح قناة نقل جديدة مع ارتفاع درجات الحرارة هذا يبين ان الكمون عند نقاط التلامس في النقاط (B, C) حساس للحدود بين الحبيبات أو الطبقات.

4-12-4-كمون هول للنقطتين (C, D) V_{BC} مع تغييرات درجة الحرارة:

تمت دراسة تغيرات كمون هول (V_{CD}) مع تغيرات درجات حرارة (90-270 k) كما هو موضح بالشكل (16).



الشكل (16): بين تغيرات كمون هول (V_{CD}) مع تغيرات الحرارة في التبريد الفائق (T)

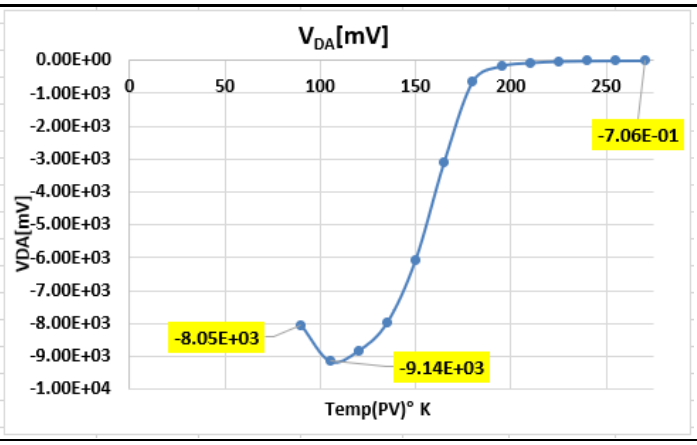
نلاحظ من الشكل (16) ان جميع قيم (V_{CD}) هي قيم سالبة في مجال درجات الحرارة (90-270 k) وقيمة (V_{CD}) قيمة سالبة (-6.96 E+03 mV) عند درجات منخفضة(~90 k) تنخفض قيمة (V_{CD}) عند الدرجة (105 k) الى القيمة (-8.65E+03 mV)، ثم ارتفاع تدريجي الى القيمة (-1.32E+03 mV) عند الدرجة (270 k)، والتفسير الفيزيائي: قيم سالبة كبيرة جداً عند درجات منخفضة وتحسن تدريجي مع الحرارة مع اقتراب من الصفر، وعند درجات أعلى عند الدرجة (270 k): هذا يفسر يمثل النقل العمودي نسبياً بين الطبقات وهي المناطق ضعيفة التوصيل وذلك لان: التبريد يقمع النقل العمودي بشدة، اما التسخين: يفعّل القفز بين الطبقات (Hopping / Thermally activated)وهذا أكبر دليل على أنيسوتروبية MoS_2 . ويمكننا الربط بين الكمونات السابقة والناقلية الكهربائية من خلال الجدول التالي الذي يبين تغير الناقلية بين الأقطاب السابقة

الجدول (7): يبين الربط بين القياس وتوزع الطبقات

الثنائية	ماذا يمثل
V_{AB}	نقل داخل الطبقات العليا
V_{AC}	انتقال بين مناطق مختلفة
V_{BC}	حدود طبقية / عيوب
V_{CD}	نقل بين الطبقات(out-of-plane)

5-12-4-كمون هول للنقطتين (D, A) V_{DA} مع تغييرات درجة الحرارة:

تمت دراسة تغيرات كمون هول (V_{DA}) مع تغيرات درجات حرارة (90-270 k) كما موضح بالشكل (17).

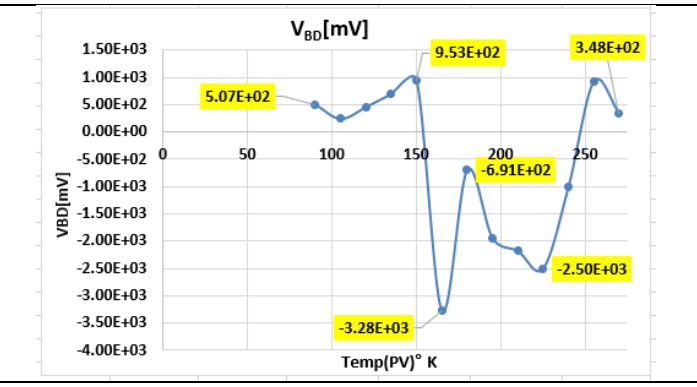


الشكل (17): بين تغيرات كمون هول (V_{DA}) مع تغيرات الحرارة في التبريد الفائق (T)

نلاحظ من الشكل (17) ان جميع قيم (V_{DA}) هي قيم سالبة في مجال درجات الحرارة (k 270–90) وقيمة (V_{CD}) قيمة سالبة (-8.05 E+03 mV) عند درجات منخفضة(k 90~) تنخفض قيمة (V_{CD}) عند الدرجة (k 105) الى القيمة (-9.14 E+03 mV)، ثم ارتفاع تدريجي الى القيمة (-7.01 E+03 mV) عند الدرجة (k 270)، وسلوك تغيرات (V_{CD}) لكبريتيد المولبديوم: قيم سالبة كبيرة جداً عند درجات منخفضة وارتفاع حاد بدءاً من (k 150–130) واقتراب من الصفر عند درجات أعلى(k 275–200~) ، والتفسير الفيزيائي: عند درجات منخفضة: كثافة الحوامل الحرة قليلة جداً، النقل محكوم بـ حالات موضعية ، قفز حراري ضعيف وبالتالي كمون هول كبير بالقيمة المطلقة. ومع ارتفاع الحرارة: يتم تفعيل حراري للإلكترونات إلى حزمة التوصيل وبالتالي زيادة عدد حاملات الشحنة n وبالتالي تناقص VH وهذا السلوك نموذجي لشبه موصل طبقي n-type تحت التبريد.

4-12-6-كمون هول للنقطتين (B, D) V_{BD} مع تغييرات درجة الحرارة:

تمت دراسة تغيرات كمون هول (V_{BD}) مع تغيرات درجات حرارة (k 270–90) كما موضح بالشكل (18).



الشكل (18): بين تغيرات كمون هول (V_{DA}) مع تغيرات الحرارة في التبريد الفائق (T)

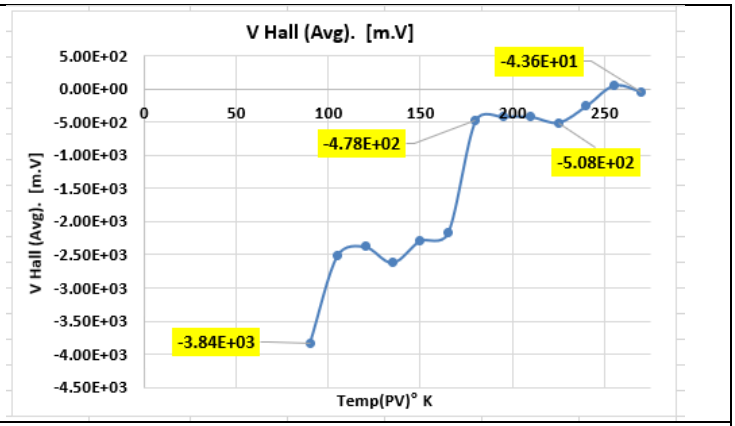
نلاحظ من الشكل (18) ان قيم (V_{BD}) هي قيم موجبة في مجال درجات الحرارة (k 150–90) وقيمة (V_{BD}) تساوي الى (5.07 E+02 mV) عند درجات منخفضة(k 90~) وتزداد قيمة (V_{BD}) تدريجيا حتى الدرجة (k 150) الى

القيمة (9.53 E+02 mV)، ثم انخفاض حاد الى القيمة (−3.28 E+03 mV) عند الدرجة (165 k)، ثم تزداد قيمة V_{BD} الى القيمة (−6.91 E+02 mV) ثم تتناقص(V_{BD}) لكبريتيد المولبديوم الى القيمة (−2.50 E+02 mV) ثم تزداد تدريجيا الى القيمة (9.27E+02 mV) عند درجة الحرارة (255 k)، ثم تتناقص الى القيمة (3.48 E+02 mV) عند الدرجة (270 k). أي ان تغييرات (V_{BD}) في كبريتيد المولبديوم قيم موجبة صغيرة عند درجات منخفضة تليها تقلبات واضحة مع قمم وقيعان، قيم سالبة كبيرة عند (100−200 k) والتفسير الفيزيائي: الكمون في هذه الثنائية حساس جداً إلى يتجلى ذلك من خلال تقلبات منحني التغيرات وذلك بسبب: عدم تجانس العينة واختلاف عدد الطبقات موضعياً وتأثير العيوب. أيضا التقلبات تعكس: منافسة بين مسارات نقل متعددة وهذا يعني انتقال التيار بين طبقات ذات خصائص مختلفة.

- وجود تغيرات الإشارة لا يعني تغير نوع المادة، بل تغير الهيمنة الموضعية لحوامل الشحنة.

4-12-7-تغييرات كمون هول المتوسط $V_{HALL\ average}$ لكبريتيد المولبديوم (MoS_2) مع تغييرات درجة الحرارة:

تمت دراسة تغيرات كمون هول ($V_{HALL\ average}$) مع تغيرات درجات حرارة (90−270 k) كما موضح بالشكل (19).



الشكل (19): بين تغيرات كمون هول ($V_{HALL\ average}$) مع تغيرات الحرارة في التبريد الفائق (T)

نلاحظ من الشكل (19) ان قيم ($V_{HALL\ average}$) لكبريتيد المولبديوم هي قيم سالبة في مجال درجات الحرارة (90− 150 k) وقيمة ($V_{HALL\ average}$) تساوي الى (−3.84 E+03 mV) عند درجات منخفضة(90~ k) وتزداد قيمة ($V_{HALL\ average}$) تدريجيا حتى الدرجة (180 k) الى القيمة (-4.78 E+02 mV)، ثم ثبات في قيم كمون هول في مجال درجات الحرارة (180 – 225 k) ثم تزداد قيمة ($V_{HALL\ average}$) الى القيمة (−4.36 E+01 mV) عند الدرجة (270 k)، وهذا يعني ان السلوك العام يتميز بوجود قيم سالبة كبيرة عند درجات منخفضة وازدياد تدريجي مع الحرارة، كذلك اقتراب من الصفر عند درجات عالية، كما انه لا يظهر انعكاس إشارة واضح و التفسير الفيزيائي:

(a) الإشارة السالبة: تؤكد أن:

- حوامل الشحنة السائدة هي **الإلكترونات**
- العينة من نوع(n-type) كما هو متوقع لـ(MoS_2)

(b) التغير مع الحرارة:

- عند درجات منخفضة: عدد الحوامل قليل، $V_H(T)$ كبير.
- مع ارتفاع الحرارة تفعيل حراري للإلكترونات وزيادة كثافة الحالات المتاحة وبالتالي انخفاض $V_H(T)$ وهذا السلوك يتوافق تماماً مع العلاقة: $n(t) \propto -(\frac{Ea}{k.t})$

والسؤال المطروح هنا لماذا تختلف الكمونات الموضعية عن المتوسط لكبريتيد المولبديوم (MoS_2) ؟

- الأسباب الفيزيائية تتعلق في بنية ثنائي كبريتيد المولبديوم MoS_2 فهو غير متجانس سماكياً نتيجة تشكل الاطوار(3R/2H) ويحتوي على: شواغر كبريت، حدود حبيبات، مناطق متعددة الطبقات.
- القياس الرباعي(A,B,C,D) يكشف الفروق الموضعية، المتوسط يلغي التشوهات المحلية.

الربط مع التبريد الفائق:

- عند التبريد تقل كثافة الحوامل وبالتالي يزداد تأثير الحقول وهذا يؤدي الى ظهور لاخطية في $V_H(T)$
- ومع التسخين يتحول النقل إلى (Band conduction) وسلوك شبه كلاسيكي.
- لقد تم ترتيب نتائج قياسات الكمون (V) بين الأقطاب المختلفة كما هو موضح في الجدول (8)

جدول (8) يبين تغييرات الكمون الكهربائي بين الأقطاب المختلفة $V_{AB}, V_{AC}, V_{BC}, V_{CD}$, $V_{BD}, V_{DA}, V_{HALL,average}$

4-13- دراسة تغييرات كثافة حاملات الشحنة لكبريتيد المولبديوم (MoS_2) مع تغير درجات الحرارة في التبريد الفائق (90-270 k):

دراسة كثافة حاملات الشحنة في طبقات كبريتيد المولبديوم (MoS_2) ذات أهمية علمية وتطبيقية كبيرة، خاصة في فيزياء

Temp(PV)	AB[mV]	BC[mV]	AC[mV]	CD[mV]	DA[mV]	BD[mV]	V Hall (Avg). [m.V]
90	-4.17E+02	-3.54E+03	-4.59E+03	-6.96E+03	-8.05E+03	5.07E+02	-3.84E+03
105	1.32E+03	1.06E+03	7.95E+01	-8.65E+03	-9.14E+03	2.44E+02	-2.52E+03
120	1.29E+03	1.07E+03	9.45E+01	-8.36E+03	-8.83E+03	4.60E+02	-2.38E+03
135	1.57E+03	-1.01E+03	-1.77E+03	-7.22E+03	-7.97E+03	6.98E+02	-2.62E+03
150	1.90E+03	-2.36E+03	-2.29E+03	-5.87E+03	-6.06E+03	9.53E+02	-2.29E+03
165	1.15E+03	-2.79E+03	-1.67E+03	-3.38E+03	-3.08E+03	-3.28E+03	-2.17E+03
180	1.76E+03	-2.00E+03	-9.70E+01	-1.21E+03	-6.35E+02	-6.91E+02	-4.78E+02
195	1.69E+03	-1.81E+03	4.71E+01	-3.56E+02	-1.69E+02	-1.94E+03	-4.24E+02
210	1.59E+03	-1.77E+03	1.47E+01	-1.33E+02	-6.79E+01	-2.18E+03	-4.24E+02
225	1.11E+03	-1.59E+03	3.72E+00	-4.36E+01	-2.40E+01	-2.50E+03	-5.08E+02
240	5.73E+02	-1.11E+03	1.04E+00	-1.30E+01	-9.21E+00	-9.99E+02	-2.60E+02
255	3.72E+02	-9.99E+02	1.92E-01	-3.65E+00	-2.86E+00	9.27E+02	4.89E+01
270	3.78E+02	-9.85E+02	-7.17E-02	-1.32E+00	-7.06E-01	3.48E+02	-4.36E+01

الحالة الصلبة وتقانة المواد ثنائية الأبعاد. فيما يلي عرض أكاديمي منظم يوضح أهم فوائد هذه الدراسة:

- فهم آلية النقل الكهربائي(Charge Transport Mechanism) .
- تحديد نوع الحوامل وانقلابات كمون هول.
- دراسة تأثير التبريد الفائق والحالات الموضعية.
- فهم بنية نطاق الطاقة (Band Structure) .
- تقييم جودة العينة والعيوب البلورية.
- استكشاف الظواهر الفيزيائية المتقدمة: مثل (التفاعلات الإلكترونية القوية، الانتقالات الطورية الإلكترونية، السلوك شبه الفلزي عند التطعيم العالي، إمكانية الظهور الفائق (Superconductivity) عند التطعيم أو الضغط).

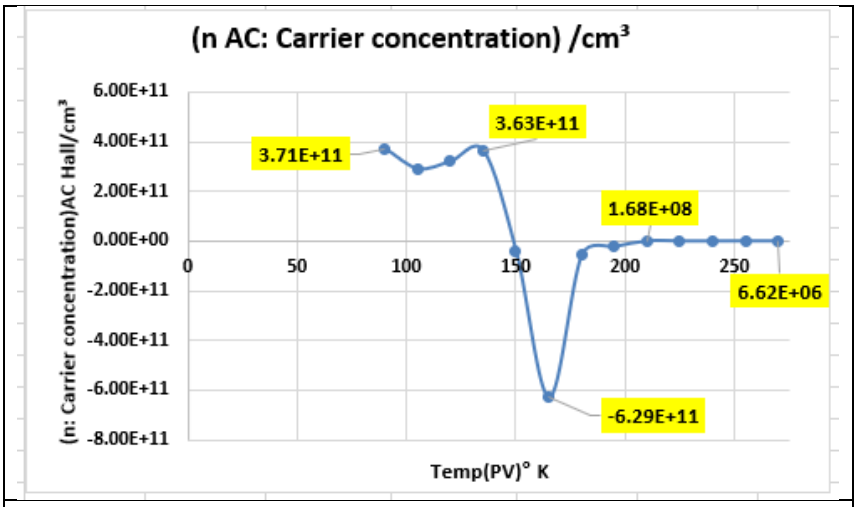
في قياسات تأثير هول (Hall Effect)، تعتمد الإشارة (موجبة أو سالبة) لتركيز الحاملات على نوع الحاملة المسيطرة:

- قيمة موجبة: تعني أن الحاملات المسيطرة هي فجوات (Holes)، وهي حاملات شحنة موجبة.
- قيمة سالبة: تعني أن الحاملات المسيطرة هي إلكترونات (Electrons)، وهي حاملات شحنة سالبة.

تم ترتيب نتائج قياسات الكمون بين الاقطاب المختلفة

4-13-1- دراسة تغييرات كثافة حاملات الشحنة للثنائية (n AC: Carrier concentration) لكبريتيد المولبديوم (MoS_2) مع تغير درجات الحرارة في التبريد الفائق (90-270 k):

تمت دراسة تغييرات كثافة حاملات الشحنة للثنائية (n AC: Carrier concentration) مع تغيرات درجات حرارة (90-270 k) كما هو موضح بالشكل (20).



الشكل (20): بين تغيرات كثافة حاملات الشحنه للثنائية (n AC: Carrier concentration) مع تغيرات الحرارة في التبريد الفائق (*T*)

يتبين من الشكل (20) تغير كثافة حاملات الشحنة المستخلصة من استجابة التيار المتناوب (n:AC) مع درجة الحرارة.

- عند درجات الحرارة المنخفضة (90–135 k~) تظهر قيم موجبة وكبيرة نسبيًا لكثافة الحوامل (3.6 /cm□³ E+11)، ما يشير إلى سيطرة حاملات من نوع واحد (غالبًا إلكترونات) مع توصيل شبه موصل ضعيف التأثر بالحرارة.
- مع الاقتراب من (150 k) نلاحظ انخفاضًا حادًا وتحول الإشارة إلى سالبة بقيمة كبيرة (-6.29E+11/ cm□³)، وهو سلوك غير كلاسيكي يدل على: انتقال في آلية التوصيل، ومنافسة بين إلكترونات وثقوب نتيجة تأثير حالات موضعية.
- بعد هذا الحد الأدنى، ومع زيادة درجة الحرارة اعلى من (180 k) تعود كثافة الحوامل إلى قيم صغيرة جدًا (10□–10□ cm□³~)، ما يشير إلى: إعادة تجمّد بعض الحوامل، أو توازن جزئي بين مساهمات متعددة تقلل الإشارة الصافية لكمون هول.

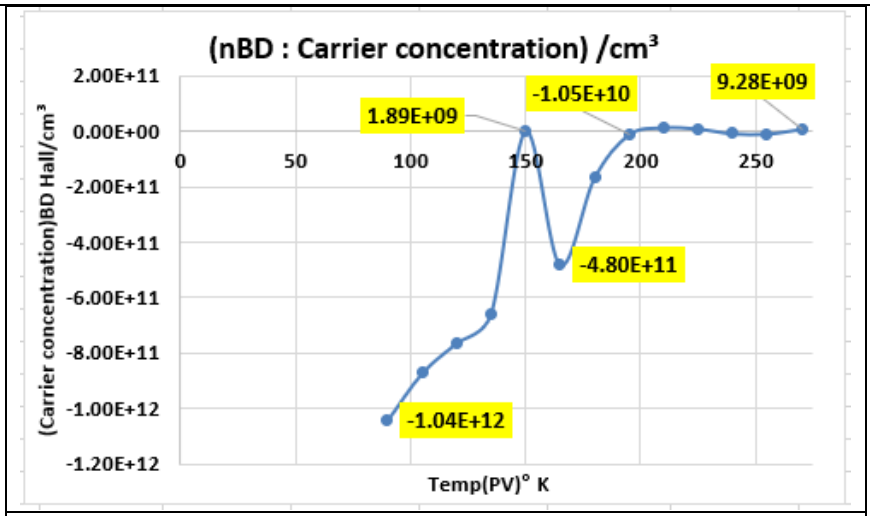
- **التفسير الفيزيائي: لحاملات الأساسية عند درجات الحرارة المنخفضة: تشير القيمة الموجبة للحاملات في البداية إلى أن المادة من نوع p (حاملات موجبة، أي فجوات).**
- **الانتقال الحاد عند (k 165 –135): هذا هو الجزء الأكثر إثارة للاهتمام والذي يحتاج لتوضيح. يمكن تفسير هذا التحول الحاد لعدة أسباب:**
- **تغير آلية النقل: يتغير النقل من سلوك يعتمد على الفجوات إلى سلوك يعتمد على الإلكترونات بسبب آليات معقدة مثل تغير في تركيز الشوائب أو العيوب مع ارتفاع درجة الحرارة.**
- **تعدد الأطوار (Phase Transition): كما ذكرنا سابقاً، قد يكون هناك انتقال طوري يؤثر على نطاق الطاقة (Band structure) وبالتالي يغير نوع وكثافة الحاملات.**
- **الحاملات عند درجات الحرارة الأعلى: القيمة الموجبة الصغيرة تعني أن المادة لا تزال من نوع p، ولكن تركيز حاملات الشحنة أقل بكثير. هذا يتفق مع ما ذكرناه سابقاً عن تجمّد الحاملات (Freeze–out)، حيث أن معظم الحوامل (الفجوات) تكون مقيدة أو غير حرة للحركة عند درجات الحرارة المنخفضة.**
- **هذا الانخفاض الحاد والتحول بين القيم الموجبة والسالبة في تركيز الحاملات (مقاساً بتأثير هول) يعكس تغيرًا معقدًا في آلية النقل وتوزيع الحاملات مع درجة الحرارة، ومرتبطًا بـ:**
- **تغير في دور الشوائب والعيوب مع ارتفاع درجة الحرارة.**
- **حدوث انتقال طوري يؤثر على السويات الطاقية.**
- **ازدياد ظاهرة تجمّد الحوامل (Freeze–out) عند درجات الحرارة المنخفضة، مما يجعل القياس حساسًا لأي تغير طفيف**

4–13–2– دراسة تغييرات كثافة حاملات الشحنة للثنائية (n BD: Carrier concentration) لكبريتيد المولبديوم (MoS_2) مع تغير درجات الحرارة في التبريد الفائق (k 270–90):

في قياسات تأثير هول (Hall Effect)، **تعتمد الإشارة (موجبة أو سالبة)** لتركيز الحاملات على **نوع الحاملة المسيطرة:**

- **قيمة موجبة:** تعني أن الحاملات المسيطرة هي **فجوات (Holes)**، وهي حاملات شحنة موجبة.
- **قيمة سالبة:** تعني أن الحاملات المسيطرة هي **إلكترونات (Electrons)**، وهي حاملات شحنة سالبة.

تمت دراسة تغييرات كثافة حاملات الشحنة للثنائية (n BD: Carrier concentration) مع تغيرات درجات حرارة (k 270–90) كما هو موضح بالشكل (21).



الشكل (21): بين تغيرات كثافة حاملات الشحنه للثنائية (n BD: Carrier concentration) مع تغيرات الحرارة في التبريد الفائق (*T*)

يتبين من الشكل (21) تغير كثافة حاملات الشحنة المستخلصة من استجابة التيار المتناوب (n:BD) مع درجة الحرارة. حيث يمكن تفسير سلوك كثافة الحوامل المستخلصة من القياس المباشر (bulk-dominated).

- عند درجات الحرارة المنخفضة (90 k) تكون الكثافة سالبة وكبيرة($\sim 10^{12}$ cm^{-3}) ، ما يشير إلى سيطرة واضحة لحوامل من نوع معين (غالبًا إلكترونات مرتبطة بحالات شوائب).
- قرب (150 k) حدثت قفزة في قيمة n تفسيرها بالشكل التالي

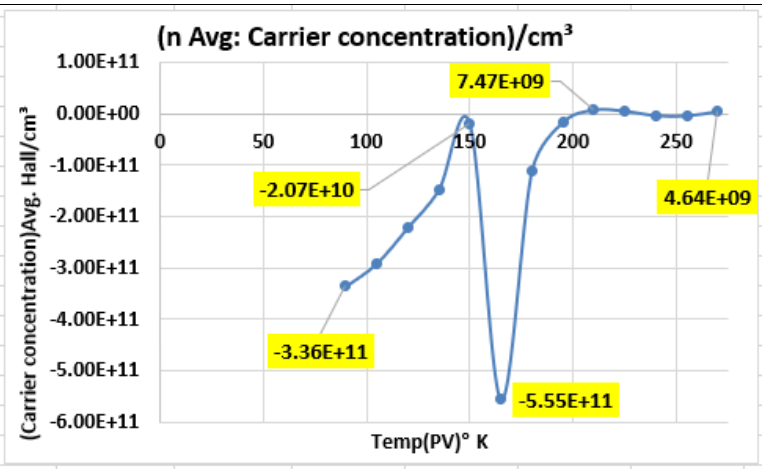
1. **تغير دور الحاملات:** عند هذه الدرجة الحرارية (150 k) ، يحدث تغير جذري في كيفية مساهمة الإلكترونات والفجوات في التوصيل الكهربائي.
   - **قبل** (150 k): الإلكترونات هي الحاملات المسيطرة (تركيز سالب).
   - **عند** (150 k): تصبح مساهمة الفجوات موجبة جدًا بحيث تطغى على قيمة الإلكترونات السالبة (يحدث تعويض أو **Compensation**).
   - **بعد** (150 k) **(لفترة وجيزة):** تعود الإلكترونات لتصبح المسيطرة ولكن بقيم سالبة أقل، ثم تبدأ الفجوات بالتغلب مرة أخرى.
2. **آليات التغير (لماذا يحدث هذا؟):**
   - **تعدد الأطوار (Phase Transition):** هذا هو التفسير الأقوى. مادة MoS_2 توجد في أطوار مختلفة (مثل 2H, 1T). عند درجة حرارة (150 k) تحدث ظاهرة **تحول طوري (Phase transition)** أو تغير في ترتيب العيوب البلورية (Defect ordering). هذا التحول يغير **نطاق الطاقة (Band structure)** للمادة، مما يؤثر على نوع وكثافة الحاملات المسيطرة.
   - **ظواهر النقل الكمومية (Quantum Transport Phenomena):** عند درجات الحرارة المنخفضة، قد تظهر تأثيرات مثل **الموضعية (Localization)** أو **تداخل الموجات الإلكترونية (Electron wave interference)**. هذه الظواهر تجعل سلوك الحاملات غير تقليدي، ويمكن أن تسبب انعكاسًا في إشارة هول.

- **تأثير العيوب والشوائب (Defect/Impurity Effects):** قد تتغير حالة تأين العيوب أو الشوائب الموجودة في المادة مع درجة الحرارة، مما يؤثر على تركيز الحاملات.

بعد ذلك، عند درجات الحرارة الأعلى من (180 k) تستقر الكثافة عند قيم موجبة صغيرة ($\sim 10^{9}$ /cm^{-3})، ما يعكس: توصيلًا أكثر انتظامًا، وتوازنًا بين آليات التشتت والانتشار.

4-13-3- دراسة تغييرات كثافة حاملات الشحنة للثنائية (n Avg: Carrier concentration) لكبريتيد المولبديوم (MoS_2) مع تغير درجات الحرارة في التبريد الفائق (90-270 k):

- تمت دراسة تغييرات كثافة حاملات الشحنة للثنائية (n Avg) مع تغيرات درجات حرارة (90-270 k) كما هو موضح بالشكل (22).



الشكل (22): بين تغيرات كثافة حاملات الشحنه للثنائية (n avg: Carrier concentration) مع تغيرات الحرارة في التبريد الفائق (*T*)

يتبين من الشكل (22) تغييرات (n Avg) المتوسط الفعّال لكثافة الحوامل الناتج عن دمج استجابات AC و BD.

- عند درجات الحرارة المنخفضة نلاحظ وجود **(القيم الموجبة) في درجات الحرارة** (90-140 k) تعني أن الحاملات الغالبة هي **فجوات (Holes)** أي أن المادة تسلك سلوك شبه موصل من النوع **p-typ**.
- **القيم السالبة** (140-180 k) تعني حدوث **انعكاس في إشارة هول(Hall Sign Inversion)** ، حيث تصبح **الإلكترونات** هي الحاملات.
- يؤكد سيطرة الحالات الموضعية وعند (140-160 k) يظهر انخفاض حاد جدًا إلى قيمة دنيا ($\sim -5.5\times10^{11}$/ cm^{-3})، وهو مؤشر قوي على انتقال إلكتروني وإعادة تنظيم بنية نطاق الطاقة.

مع ارتفاع درجة الحرارة (180 k) تعود الكثافة إلى قيم موجبة صغيرة ($\sim 10^{9}$/ cm^{-3}) ، ما يدل على: سيطرة الحوامل الحرة المحفزة حراريًا، وبالتالي واستقرار نسبي في آلية التوصيل.

(n Avg) يعطي صورة شاملة لسلوك النظام، ويؤكد وجود منطقة حرجة حراريًا في MoS_2 حيث تتغير طبيعة الحوامل وآلية النقل بشكل جذري.

تم ترتيب نتائج قياس كثافة حاملات الشحنة في الجدول (7).

جدول (7) يبين تغيرات حاملات الشحنة (n) مع درجات الحرارة

Temp (PV)	(Carrier concentration) Avg. Hall/cm³	(Carrier concentration) AC Hall/cm³	(Carrier concentration) BD Hall/cm³
90	-3.36E+11	3.71E+11	-1.04E+12
105	-2.91E+11	2.91E+11	-8.72E+11
120	-2.21E+11	3.20E+11	-7.63E+11
135	-1.47E+11	3.63E+11	-6.58E+11
150	-2.07E+10	-4.33E+10	1.89E+09
165	-5.55E+11	-6.29E+11	-4.80E+11
180	-1.11E+11	-5.49E+10	-1.67E+11
195	-1.67E+10	-2.30E+10	-1.05E+10
210	7.47E+09	1.68E+08	1.48E+10
225	5.18E+09	-2.80E+08	1.06E+10
240	-3.46E+09	-2.81E+08	-6.64E+09
255	-3.98E+09	-1.24E+06	-7.96E+09
270	4.64E+09	6.62E+06	9.28E+09

5- المناقشة

تشير النتائج إلى أن النقل الكهربائي في طبقات (MoS_2) ضمن المجال الحراري (90–270 k) لا يتبع سلوكًا شبه موصلًا كلاسيكيًا بسيطًا، بل يتأثر بعدة آليات نقل متداخلة. فعند درجات الحرارة المنخفضة يزداد تأثير الحالات الموضعية والعيوب البنيوية، مما يؤدي إلى احتجاز جزء من الحاملات وانخفاض عدد الحاملات الحرة المشاركة في التوصيل، وهو ما يفسر ازدياد المقاومية وارتفاع المقاومة المغناطيسية في هذا المجال الحراري.

ومن النتائج المهمة في هذه الدراسة انعكاس إشارة هول قرب (150 k) ، والمتزامن مع تغير ملحوظ في المقاومية وكثافة الحاملات، مما يشير إلى تحول في آلية النقل المسيطرة أو إلى تغير في نوع الحاملات السائدة.

كذلك فإن السلوك غير الرتيب للمقاومية والتغير الواضح في المقاومة المغناطيسية عند درجات الحرارة المنخفضة قد يرتبط بتأثيرات الموضعية الإلكترونية أو تداخل المسارات الإلكترونية، وهي ظواهر تظهر غالبًا في المواد الطبقية وثنائية الأبعاد. ومع ارتفاع درجة الحرارة، تتحرر الحاملات تدريجيًا من المستويات الموضعية بفعل الإثارة الحرارية، مما يؤدي إلى اقتراب السلوك من النقل شبه الموصل التقليدي. وبصورة عامة تعكس هذه النتائج الطبيعة المعقدة لآليات النقل في MoS_2 ودور العيوب والحالات الموضعية في تحديد خصائصه الكهربائية.

6 - الاستنتاجات:

1. سلوك نقل إلكتروني غير تقليدي في طبقات MoS_2 أظهرت القياسات أن النقل الإلكتروني في طبقات كبريتيد المولبديوم ينحرف عن السلوك شبه الموصل الكلاسيكي، خصوصًا عند درجات الحرارة المنخفضة، ما يعكس الطبيعة ثنائية الأبعاد للمادة وتأثير الحالات الموضعية والعيوب البنيوية.

2. إن انعكاس إشارة هول الملحوظ عند k 150، والذي يتزامن مع تغير حاد في المقاومية، هو دليل قوي على حدوث انتقال طوري إلكتروني (Electronic Phase Transition) ، وليس مجرد تغير في تركيز الحاملات. هذا الانعكاس يمكن تفسيره بتغير في طوبولوجيا السويات الالكترونية وبالتالي سطح فيرمي، وهو مفهوم كمومي أساسي.
3. سيطرة الحالات الموضعية والشوائب العميقة لكبريتيد المولبديوم (MoS_2) عند التبريد الفائق في مجال التبريد الفائق، تحكم النقل حالات موضعية مرتبطة بشوائب وعيوب (مثل فجوات الكبريت)، ويظهر ذلك من القيم الكبيرة لكمون هول وكثافة الحوامل، وكذلك من التعزيز الملحوظ للمقاومة المغناطيسية.
4. السلوك غير الرتيب للمقاومة الحجمية، مع وجود قمم مميزة عند درجات حرارة منخفضة، لا يمكن تفسيره بالكامل بالنماذج الكلاسيكية. هذه الظاهرة قد تكون مؤشراً على تأثيرات الموضعية الكمومية (Quantum Localization Effects)أو التداخل الضعيف(Weak Localization) ، وهي ظواهر شائعة في المواد ثنائية الأبعاد.
5. تحرير حراري تدريجي للحوامل مع ارتفاع درجة الحرارة مع زيادة درجة الحرارة في كبريتيد المولبديوم (MoS_2)، تتحرر الحوامل من مستويات الشوائب إلى نطاقات النقل الحرة، ما يؤدي إلى استقرار كثافة الحوامل، وانخفاض تأثيرات التداخل الكمومي، وانتقال النظام إلى نقل أقرب للسلوك الجوهري.
6. تعدد قنوات النقل واختلاف الاستجابة بين تقنيات القياس الفروقات بين نتائج القياسات (n AC) و (n BD) تؤكد وجود قنوات نقل متعددة (سطحية وحجمية) ذات ديناميكيات مختلفة، في حين يوفر المتوسط بينهما توصيفًا فيزيائيًا أدق للسلوك الفعلي للنقل.
7. ارتباط وثيق بين كمون هول والمقاومة المغناطيسية التوافق بين انقلاب إشارة كمون هول والتغيرات اللاخطية في المقاومة المغناطيسية يؤكد أن كلا الظاهرتين ناتجتان عن نفس التحولات في آلية النقل والتبعثر الإلكتروني تحت تأثير الحرارة والمجال المغناطيسي.
8. دور الحالات الموضعية في تعزيز المقاومة المغناطيسية لكبريتيد المولبديوم (MoS_2) حيث الارتفاع الكبير في MR عند درجات الحرارة المنخفضة يعكس وجود نقل عبر حالات موضعية، حيث يؤدي المجال المغناطيسي إلى تقليل التداخل الكمومي وزيادة المقاومة ونلاحظ أيضا تراجع المقاومة المغناطيسية مع ارتفاع درجة الحرارة مع زيادة درجة الحرارة، تنخفض MR تدريجيًا نتيجة زيادة تبعثر الفونونات، فقدان التماسك الطوري للإلكترونات وبالتالي سيطرة النقل الكلاسيكي على السلوك الكمومي.
9. كمون هول يمثل انعكاس مباشر لبنية نطاق الطاقة والعيوب البلورية حيث إن السلوك الحراري لكثافة الحوامل يعكس بوضوح تأثير فجوة الطاقة الفعالة في MoS_2 ودور مستويات المانحات العميقة، وتاثير التفاعلات الإلكترونية مما يجعل قياسات هول أداة قوية لاستقصاء بنية النطاقات والعيوب.

6- التوصيات:

نوصي بدراسة تاثير هول المغناطيسي على كبريتيد المولبديوم في درجات الحرارة الطبيعية (درجة حرارة المختبر) وكذلك في ظروف تشغيل طبيعية او قاسية للأجهزة الالكترونية عند درجات حرارة تتراوح (0- 100 °C).

"بناءً على النتائج التجريبية، وخاصةً:

1. **انعكاس إشارة هول (Hall Sign Inversion)** بشكل حاد عند k 150.
2. **التزامن بين هذا الانعكاس وقمة المقاومية** في نفس درجة الحرارة.
3. **السلوك غير الرتيب للمقاومية** عند درجات الحرارة المنخفضة.

نعتقد أن هذه الظواهر لا يمكن تفسيرها بالكامل بالنماذج الكلاسيكية. إنها تشير إلى وجود **ظواهر كمومية (Quantum Phenomena)** تلعب دوراً مهماً في الناقلية في طبقات MoS_2 تحت هذه الظروف، مثل:

- **تأثيرات الحالات الموضعية الكمومية (Quantum Localization).**
- **تعدد قنوات النقل (Multi-band/Multi-channel Transport)** المتأثرة بالبنية الكمومية للمادة.

هذه الظواهر تتطلب دراسة أعمق باستخدام تقنيات متقدمة، ولكن النتائج الأولية تشير إلى مجال بحث مثير للاهتمام في فيزياء المواد الكمومية.

References:

1. Neal, A. T., Liu, H., Gu, J., & Ye, P. D. (2013). **Magneto transport in MoS□: Phase coherence, spin–orbit scattering, and the Hall factor**. *ACS Nano, 7*(8), 7077–7082**.** https://doi.org/10.1021/nn4027734.
2. Radisavljevic, B., & Kis, A. (2013). **Mobility engineering and metal–insulator transition in monolayer MoS□.** *arXiv*. https://arxiv.org/abs/1301.4947
3. Cui, X., Lee, G. H., Kim, Y. D., et al. (2014). Multi-terminal electrical transport measurements of MoS□ using van der Waals heterostructure. *arXiv*. https://arxiv.org/abs/1412.5977
4. Ko, T. S., Huang, C. C., & Lin, D. Y. (2016). **Optical and transport properties of Ni–MoS□ films: Temperature-dependent Hall effect**. *ResearchGate Dataset*. http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.2825.8166
5. Du, L., Yu, H., Xie, L., et al. (2016). **The effect of twin grain boundary tuned by temperature on the electrical transport properties of monolayer MoS□.** *Crystals, 6*(9), 115. https://doi.org/10.3390/cryst6090115
6. Jeong, S. H., Liu, N., Park, H., et al. (2018). **Temperature-dependent electrical properties of Al□O□-passivated multilayer MoS□ thin-film transistors**. *Applied Sciences, 8*(3), 424. https://doi.org/10.3390/app8030424
7. Wu, Z., Zhou, B. T., Cai, X., et al. (2019). **Intrinsic valley Hall transport in atomically thin MoS□**. *Nature Communications, 10*, 611. https://doi.org/10.1038/s41467-019-08573-0
8. Brumme, T., Calandra, M., & Mauri, F. (2015). **First-principles theory of field-effect doping in TMDCs: Hall coefficient and electrical conductivity**. *Physical Review B, 91*, 115301. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.91.115301
9. Baugher, B. W. H., Churchill, H. O. H., Yang, Y., & Jarillo-Herrero, P. (2014). **Optoelectronic devices based on electrically tunable p–n diodes in a monolayer dichalcogenide**. *Nano Letters*. https://doi.org/10.1021/nl5019109
10. Kayyalha, M., Maassen, J., Lundstrom, M., Shi, L., & Chen, Y. P. (2016). **Gate-tunable and thickness-dependent electronic and thermoelectric transport in**

few-layer MoS□. *Journal of Applied Physics, 120*(13), 134302. https://doi.org/10.1063/1.4963879

11. Chao, J., Han, X., Sun, H., et al. (2016). **Platinum nanoparticles supported MoS□ nanosheet for simultaneous detection of dopamine and uric acid**. *Science China Chemistry, 59*, 332–337. https://doi.org/10.1007/s11426-015-5492-9
12. Kochat, V., Apte, A., Hachtel, J. A., Kumazoe, H., Krishnamoorthy, A., Susarla, S., Vashishta, P., Kalia, R., Nakano, A., Tiwary, C. S., & Ajayan, P. M. (2017). **Re doping in 2D transition metal dichalcogenides as a new route to tailor structural phases and induced magnetism.** *Advanced Materials, 29*(43), 1703754. https://doi.org/10.1002/adma.201703754
13. Zhou, K. G., Mao, N. N., Wang, H. X., Peng, Y., & Zhang, H. L. (2011). **A mixed-solvent strategy for efficient exfoliation of inorganic graphene analogues**. *Angewandte Chemie International Edition, 50*(46), 10839–10842. https://doi.org/10.1002/anie.201105364
14. Marks, R., Schranck, A., Stillwell, R., & Doudrick, K. (2020). **Stability of 2H- and 1T-MoS□ in the presence of aqueous oxidants and its protection by a carbon shell**. *RSC Advances, 10*, 9324–9334. https://doi.org/10.1039/D0RA00788A
15. Li, X., Li, T. C., Huang, S., & Zhang, J. (2020). **Controllable synthesis of two-dimensional molybdenum disulfide (MoS□) for energy-storage applications**. *ChemSusChem, 13*(6). https://doi.org/10.1002/cssc.201902706
16. Al-Hussein, H., Al-Shar, J., Othman, S., & Al-Khamisy, H. (2023). **Studying the electronic (structural and optical) properties of molybdenum disulfide (MoS□) nanostructures**. *Aleppo University Journal of Research (Basic Sciences Series)*, (170). *(No DOI available).*
17. Alhussein, H., AlSharr, J. Q., Othman, S., & AlKhamisy, H. (2023). **Study of the electrical and electronic properties of crystalline molybdenum disulfide (MoS□-3R) semiconductor nano using alternating current (AC) measurements.** *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics, 14*(6), 633–643. https://doi.org/10.17586/2220-8054-2023-14-6-633-643
18. Wei, H., Tan, A., et al. (2022). **Interface engineering-induced 1T-MoS□/NiS heterostructure for efficient hydrogen evolution reaction.** *Catalysts, 12*(9), 947. https://doi.org/10.3390/catal12090947