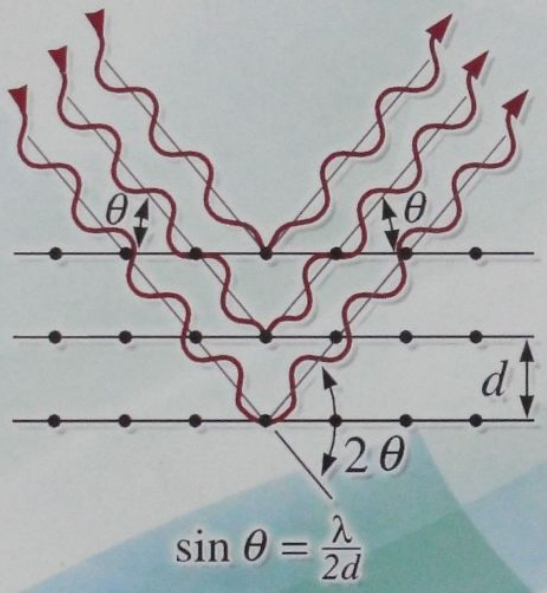
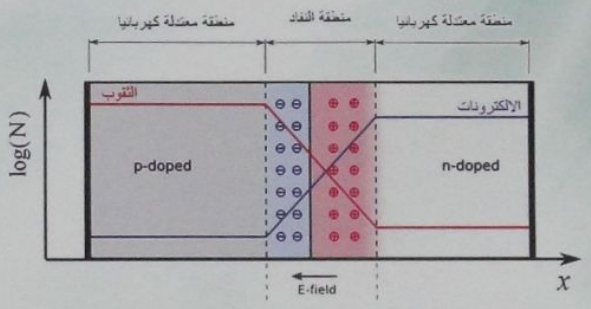
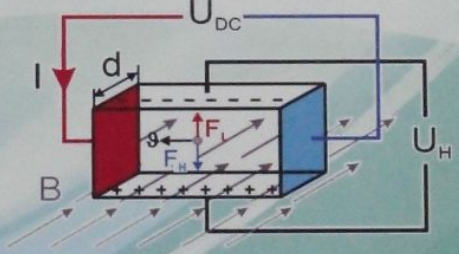
منشورات جامعة دمشق
كلية العلوم

الفيزياء العملية -7-

«فيزياء الجسم الصلب»







الدكتور فوزي عوض
أستاذ في قسم الفيزياء

الدكتور محمد عبد الحفيظ
أستاذ مساعد في قسم الفيزياء

الدكتور عبد العزيز الزغبي
مدرس في قسم الفيزياء

الدكتورة فاتن الفيل
مشرفة على الأعمال في قسم الفيزياء

مجد حماد
مشرفة على الأعمال في قسم الفيزياء

جامعة دمشق

١٤٣٥ - ١٤٣٦ هـ
٢٠١٣ - ٢٠١٤ م

الفيزياء العملية (7)

السنة الرابعة - مخبر الجسم الصلب .

منشورات جامعة دمشق

كلية العلوم

الفيزياء العملية (7)

فيزياء الجسم الصلب

ا.د فوزي عوض
أستاذ
في قسم الفيزياء

ا.د محمد عبد الحفيظ
أستاذ مساعد
في قسم الفيزياء

د. عبد العزيز الزغبي
مدرس
في قسم الفيزياء

م.ا فاتن الفيل
مشرفة على الأعمال
في قسم الفيزياء

م.ا مجد حماد
مشرفة على الأعمال
في قسم الفيزياء

جامعة دمشق

1435 - 1436 هـ

2013 - 2014 م

فـهـرس الـمـحـتـويـات

	الموضوع	الصفحة
	مقدمة وشرح عن برنامج Cassy Lab .	7
التجربة 1	النماذج البلورية .	27
التجربة 2	دراسة انعراج الأشعة السينية على بلورة وحيدة بطريقة براغ .	37
التجربة 3	دراسة انعراج الأمواج السنتمترية على نموذج بلورة مكعبة بسيطة .	51
التجربة 4	دراسة انعراج الأشعة السينية على بلورة وحيدة بطريقة لاو .	63
التجربة 5	دراسة انعراج الإلكترونات على عينة متعددة البلورات .	79
التجربة 6	أثر هول في المعادن .	89
التجربة 7	أثر هول في أنصاف النواقل .	97
التجربة 8	الناقلية الكهربائية للمعادن ولأنصاف النواقل باعتبارها تابعاً لدرجة الحرارة	109
التجربة 9	الإصدار الإلكتروني الحراري .	121
التجربة 10	الإصدار الإلكتروني الضوئي (الكهرضوئي) .	133
التجربة 11	تجارب في الخلية الشمسية .	141
التجربة 12	المنحنيات المميزة لمقاومة ضوئية من مادة CdS .	153
التجربة 13	قياس وسعية منطقة النفاد للوصلة p-n .	163
التجربة 14	قياس العمر الوسطي لحاملات الشحنة في الوصلة p-n .	173
التجربة 15	دراسة تأثير درجة الحرارة في المنحني المميز للوصلة p-n .	183
التجربة 16	قياس الطواعية المغنطيسية بطريقة غاي .	195
التجربة 17	التجاوب المغنطيسي النووي NMR .	209
التجربة 18	الناقلية الفائقة .	221
	ملحق بالثوابت والمقادير الفيزيائية والخصائص الفيزيائية للعناصر .	233
	المراجع .	241

بـــسـم الله الـرحـمـن الـرحـيـــم

الـمـقـدّمـة :

يُعدّ مقرّر الفيزياء العمليّة (7) والتخصّصي في مجال فيزياء الجسم الصلب ، أحد ركائز الفيزياء التجريبيّة في الخطّة الجديدة لبرامج قسم الفيزياء .

ويَهدف هذا المقرّر إلى إكساب الطلّاب مهارات عمليّة وخبرة علميّة في مجالات فيزياء الجسم الصلب ، فهو يواكب أو يتلو المقرّرات النظريّة الثلاثة : المدخل إلى فيزياء الجسم الصلب ، الجسم الصلب (1) ، الجسم الصلب (2) ، التي يدرسها طلّاب السنتين الثالثة والرابعة في قسم الفيزياء . تتضمّن مفردات المقرّر ثماني عشرة تجربة علميّة وفق المفردات المعتمدة للمقرّر .

في مجال أنصاف النواقل :

1. أثر هول في أنصاف النواقل .
2. قياس وسعيّة منطقة النفاد للوصلة p-n .
3. قياس العمر الوسطيّ لحاملات الشحنة في الوصلة p-n .
4. الناقليّة الكهربائيّة لأنصاف النواقل باعتبارها تابعاً لدرجة الحرارة .
5. دراسة تأثير درجة الحرارة في المنحني المميز للوصلة p-n .
6. الخلايا الشمسيّة .

في مجال المعادن :

1. أثر هول في المعادن .
2. الناقلية الكهربائيّة للمعادن باعتبارها تابعاً لدرجة الحرارة .
3. قياس تابع العمل للمعدن .

في مجال المغنطيسية :

1. التجاوب المغنطيسيّ النوويّ .
2. قياس الطواعيّة المغنطيسيّة بطريقة غاي .

في مجال الخصائص الضوئيّة للأجسام الصلبة :

1. المنحنيات المميّزة للمقاومة الضوئيّة لمادة CdS .
2. الإصدار الإلكترونيّ الضوئيّ .

في مجال البنية البلوريّة :

1. انعراج الإلكترونات على عيّنة متعدّدة البلورات .
2. انعراج الأمواج السنتيمتريّة على نموذج بلّورة مكعبة بسيطة .
3. انعراج الأشعة السينيّة على بلّورة وحيدة بطريقة براغ .
4. انعراج الأشعة السينيّة على بلّورة وحيدة بطريقة لاو .
5. النماذج البلوريّة .

بالإضافة إلى تجربة تتعلّق بالناقليّة الفائقة .

إنّ نصف تجارب مقرّر الفيزياء العمليّة (7) المتوفّرة في المخبر يجري العمل عليها يدويّاً ، إذ يقوم الطالب بإعداد التجارب ، وتسجيل النتائج ، ورسم المنحنيات المطلوبة يدويّاً . ويتميّز نصف التجارب الآخر بالأتمتة ، فيستطيع الطالب أن يدخل شروط التجربة عن طريق الحاسوب ، ويسجل النتائج بوساطته من خلال جهاز الوصلة البينيّة (Interface) ، ويعالجها بالبرمجيّات المناسبة والمثبّتة في الحواسيب .

لذلك زُوّد الكتاب بفصلٍ منفردٍ حول استخدام برنامج Cassy Lab المثبّت في معظم حواسيب مخبر الجسم الصلب واستثماره ، بالإضافة إلى برنامج X-Ray الذي يعالج معطيات تجربة انعراج الأشعّة السينيّة بطريقة براغ .

ولقد زُوّدت كل تجربة في الكتاب عند نهايتها بعدد من الأسئلة النموذجيّة التي تُلخّص الهدف من التجربة والطرائق التقنيّة المتّبعة ، ليتحقّق الطالب من القوانين التي درسها في المقرّرات النظريّة للجسم الصلب ، ضمن ارتيابات الأجهزة المتاحة

وليتمكّن من نقد عمله ومحاكمته ذاتياً . وكذلك زُوّدت كل تجربةٍ بقائمةٍ من المراجع المناسبة ولائحةٍ بالكلمات المفتاحية ، والمصطلحات العلميّة الخاصّة بها .
نأمل بهذا الكتاب أن نضيف قيمة علميّة جديدة للمكتبة العربيّة العلميّة ، تُمكّن طلابنا من القيام بالتجارب العلميّة مستندين إلى مرجع واضح .

ولا يفوتنا في هذا المجال أن نشكر المشرفين على الجوانب التطبيقيّة اللذين ساعدوا في إعداد هذا الكتاب ، ونَخصُّ بالذكر طالب الماجستير إيـاد عبد الرحمن على الجُهد المشكور الذي بذله ، بالإضافة إلى تنضيده للكتاب وإخراجه بالصورة المناسبة .
وفي الختام جَهِدْنا لنتفادى الأخطاء ما وسعنا ، فإن وُفِّقنا فبفضل الله ، وما لم ندركه فمن طبيعتنا ، والله وليّ التوفيق .

المؤلِّفون

تـــوجـــيـــهـــات عـــامـــة

لا بد لنا في البدء وقبل شروع الطالب في العمل المخبري من إسداء بعض النصائح والإرشادات التي توجه الطالب في هذا العمل ، حتى يحصل على أحسن الثمرات .

1 - على الطالب أن يدرس بإمعان التجربة المطلوبة منه قبل حضوره إلى المخبر وذلك لكي يفهم فكرتها النظرية وطريقة إجرائها ، ويحسن به لهذه الغاية أن يستعين بالمراجع العلمية ، ولذلك زُودت كل تجربة بقائمة بالمراجع المناسبة .

2 - قبل المباشرة بالعمل التجريبي ، على الطالب أن يتعرف على الأجهزة المستخدمة في التجربة ويتأكد من سلامة توصيلها ، وإذا وجد فيها نقصا أو خللا يطلب المساعدة من الأستاذ المشرف .

3 - تم تقسيم العمل التجريبي إلى أربعة أقسام :

1- الأجهزة والأدوات التجريبية : وفيها تعداد للأدوات والمقاييس التي سيتعامل معها الطالب ووظيفة كل منها .

2- الإعداد التجريبي : وهو يوضح كيفية إعداد وتجهيز وتوصيل التجربة لكي تكون جاهزة للعمل وإجراء القياسات ، وهنا ليس على الطالب أن يعيد التوصيل أو نحوه ، بل مهمته هي التأكد من أن التجربة جاهزة للعمل ، وإلا فعليه استدعاء الأستاذ المشرف .

3- ملاحظات مهمة : من الضروري قراءة التحذيرات والملاحظات قبل البدء بإجراء التجربة ، وأي خطأ ناتج عن الإهمال سيتحمل مسؤوليته الطالب .

4- الإجراء التجريبي : وفيه تعليمات إجراء التجربة والقياسات المطلوبة والمقادير المطلوب حسابها .

4 - يبدأ الطالب أولا بتجربة اختبارية سريعة يتأكد فيها عمليا من سلامة الأجهزة وتوصيلها ، بحيث تتحقق مما يتنبأ به التمهيد النظري من نتائج .

5 - بعد هذه الأعمال التمهيدية ، يشرع الطالب بتجربته ، ويدون النتائج في جداولها على دفتر المسودة ، مقرونة بالارتيابات التي تشوب عملية القياس ، ثم يرسم جميع الخطوط البيانية المطلوبة ، ويعرض نتائجه على الأستاذ المشرف ، وبعد التأكد من صحة عمله ووفائه بالغرض ، ينقل نتائجه إلى تقرير التجربة المُعدّ سلفا .

6 - على الطالب أن يتحرى الدقة والأمانة فيما يحصل عليه من نتائج القياس ، فالقياسات الدقيقة الموثوقة هي الأساس للوصول إلى نتائج صحيحة ، ولدى تسجيل النتائج في الجداول ، يحاول الطالب تعليل أي شذوذ تجريبي ، وعليه أن يعيد قياس المقدار الواحد عدة مرات إن أمكن للتأكد من صحة وتكرارية القياس ، ثم تؤخذ القيمة الوسطية .

7 - بما أنه لا وجود لتجربة فيزيائية معتمدة على القياس خالية من الارتيابات ، لا تقبل أية نتائج عددية غير مقرونة بتقدير الارتياب الذي يشوبها سواء أكان في القياس المباشر أو غير المباشر ، وعلى الطالب أن يتبع أنسب الطرق لتقدير الارتياب في كل مقدار يقيسه أو يحسبه .

8 - إن الرسم البياني هو أحد معايير الحكم على نجاح التجربة أو فشلها ، فيجب تحري الدقة عند الرسم ، وتمثيل مستطيل الارتياب على الورقة البيانية إن أمكن ذلك ، وفي حال كون التجارب مؤتمتة ، يفضل إظهار النقاط التجريبية دون الخطوط الواصلة بينها كما هو موضح في فقرة " شرح عن برنامج Cassy Lab " .

9 - أخيرا على الطالب الإجابة عن الأسئلة الواردة في فقرة تقييم العمل التجريبي .

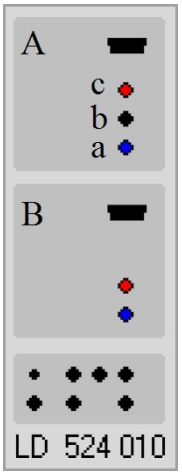
في النهاية تجدر الإشارة إلى أن هذا المخبر يحتوي على تجارب يجب التعامل معها بانتباه كبير ، فهنالك تجارب تتعامل فيها مع الجهد العالي (انعراج الإلكترونات) ، وهنالك تجارب تتعامل فيها مع تيارات عالية (أثر هول في المعادن) ، وهنالك أدوات شديدة الحساسية وسهلة العطب (مجس حقل التحريض المغنطيسي) .

شرح عن برنامج Cassy Lab

مقدمة :

نتعرض في هذا الفصل إلى شرح موجز لتجهيزات (Cassy Lab) لكي يكون الطالب قادرا على التعامل مع التجارب ومعالجة نتائجها باستخدام الحاسب .

أولاً : معدات القياس Hardware :



1- اللوحة الأساسية Interface :

وهي المكون الأساسي لتجهيزات Cassy Lab ، وتُعدّ صلة الوصل بين المقاييس والحاسب ، بالإضافة لاحتوائها على مقياسي تيار وكمون ، وتتصل بالحاسب عبر المنفذ (com) وتحتوي على مدخلين أساسيين :

1- Input (A) : وهو المدخل الأول ، ويوجد به ثلاثة مآخذ من الأسفل للأعلى :

a- المأخذ المشترك أو الأرضي .

b- مأخذ قياس الكمون ، و يلي الأرضي مباشرة .

c- مأخذ لقياس التيار ، وهو المأخذ العلوي .

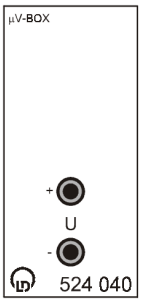
فإذا أردنا قياس التيار مثلا ، فعلينا وصل الطرف السالب بالمأخذ (a) والطرف الموجب بالمأخذ (c) .

2- Input (B) : ويوجد به مأخذان ، وهما لقياس الكمون فقط .

ويوجد في كل مدخل منفذ تسلسلي ، يمكن أن تثبت عليه القطع المساعدة (Box) .

2- القطع المساعدة Boxes :

وهي عبارة عن قطع تثبت على اللوحة الأساسية فوق أحد المدخلين (A أو B) ، نستخدمها لقياس مقادير فيزيائية أخرى غير التيار والكمون ، أو لقياس التيار والكمون لكن عند مجالات قياس مختلفة ، وأهم تلك القطع :



1- (µV-Box) : لقياس فروق الكمون من مرتبة الميكروفولت .

2- (A-Box 30) : لقياس التيارات العالية تصل إلى 30 أمبير.

3- (Current Source-Box) : لقياس المقاومة الكهربائية .

4- (B-Box) : و يوصل بها مجس حقل التحريض المغنطيسي.

5- (Temperature-Box) : ويوصل بها مجس قياس درجة الحرارة .

ثانيا : البرنامج (Cassy Lab Software) :

وهو الجزء البرمجي من التجهيز ، ويمكن من خلاله تعريف المقادير المُقاسة ومجالاتها ، والتحكم بشروط التجربة ، وأخذ القياسات بشكل تلقائي (أو يدوي) ومن ثم معالجة هذه البيانات ، ورسم الخطوط البيانية واستخلاص النتائج منها من خلال رسم أفضل منحني يمر من النقاط التجريبية المسجلة ، وسنتطرق هنا إلى الأجزاء المهمة من البرنامج .

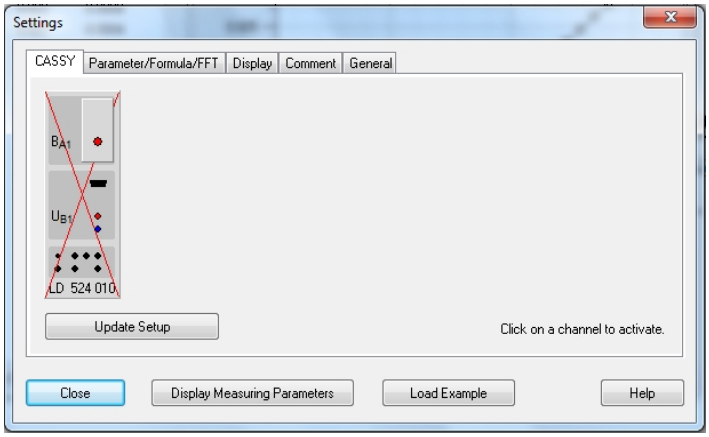
النوافذ Windows :

1) نافذة الإعدادات (Settings) :

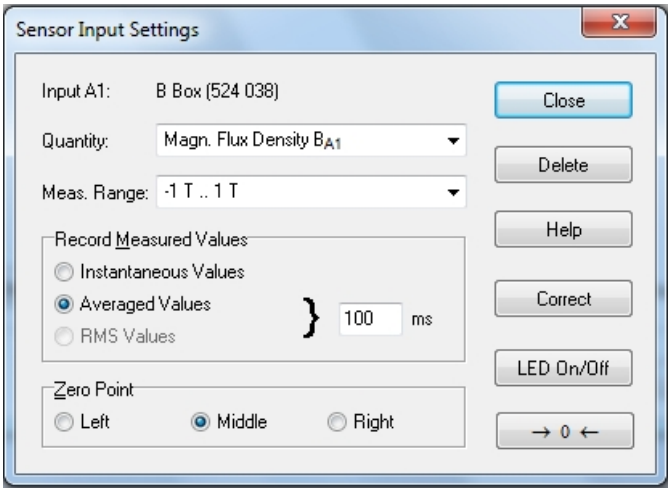
وهي النافذة التي يتم فيها تعريف المقاييس ، وتحديد مجال عملها المناسب ، وتحتوي على خمس علامات تبويب فرعية في السطر العلوي هي :

1. CASSY :

وفيها يظهر رسم للوحة الأساسية ومدخلاها Input(A) و Input(B) . ومن خلال علامة التبويب هذه نستطيع تفعيل المدخل ، وذلك بالنقر عليه بالزر الأيسر للماوس ، عندها تظهر نافذتان فرعيتان :



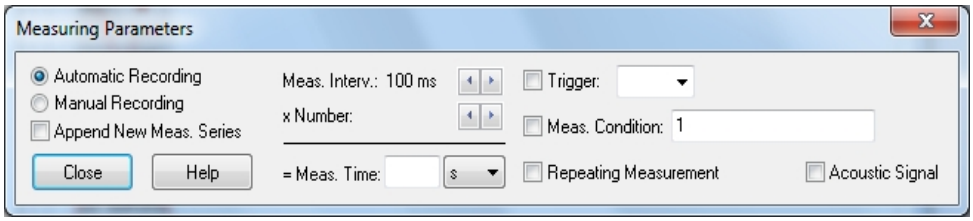
a) نافذة إعدادات المقياس Sensor Input Settings :



ومن هذه النافذة نحدد في أول سطرين المقدار الذي سنقيسه ومجال القياس على المدخل المحدد ، ويلي ذلك ثلاثة خيارات يمكن تفعيلها :

- Instantaneous Values : إظهار القيم الآنيّة للمقدار المقاس .
- Averaged Values : إظهار القيم الوسطية للمقدار الفيزيائي كل فترة معينة من الزمن يمكن ضبطها ، وهذا يعطي ثبات أكبر للقيم التي لا تستقر على قيمة محددة ، ويفضل انتقاء هذا الخيار في معظم التجارب .
- RMS Values : إظهار قيمة جذر القيمة الوسطى التربيعية للمقدار الفيزيائي كل فترة معينة من الزمن يمكن ضبطها .

b) نافذة ضبط متغيرات عملية القياس Measuring Parameters :

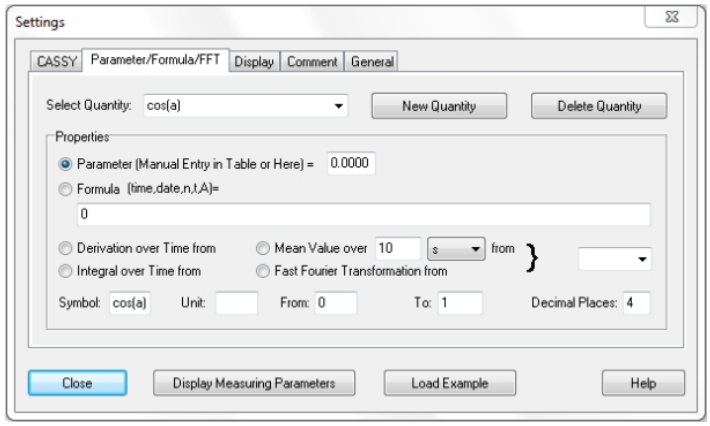


وتحتوي على ثلاث خيارات أساسية للتفعيل :

- Automatic Recording : لتسجيل القياسات بشكل تلقائي كل فترة معينة من الزمن يمكن ضبطها ووضع شروط معينة على أخذ القيم .
- Manual Recording : تسجيل القياسات بشكل يدوي .
- Append New Meas. Series : إلحاق سلسلة قياسات جديدة بالسلسلة الحالية .

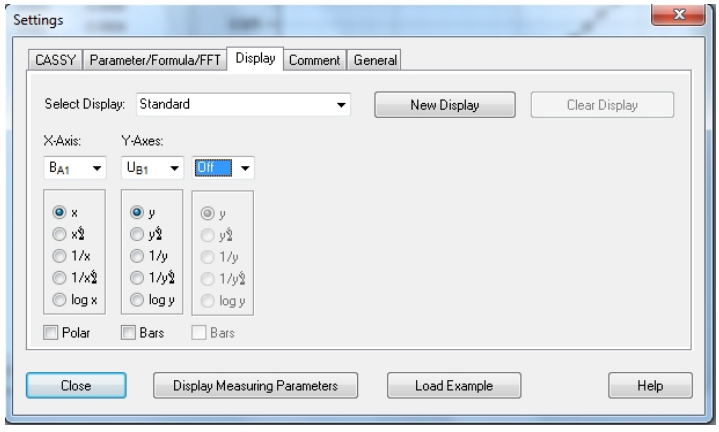
2. Parameter/Formula/FFT :

وتستخدم لإدخال مقادير فيزيائية للبرنامج بشكل يدوي .



3. Display :

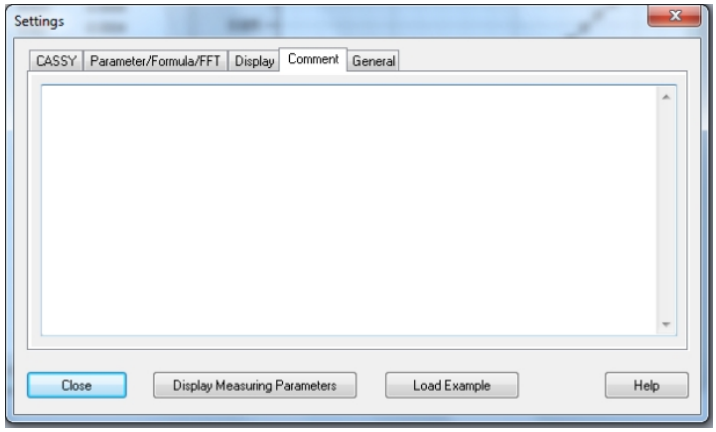
وفيها نتحكم بمنطقة الرسم من حيث تحديد المقدار الفيزيائي الذي يمثل



المتحول والآخر الذي يمثل التابع ، كما يمكن تمثيل اللُغارِتم العشري له على الورقة البيانية ، مما يعني عمليا تحويل الورقة البيانية إلى ورقة لُغارِتمية أو نصف لُغارِتمية .

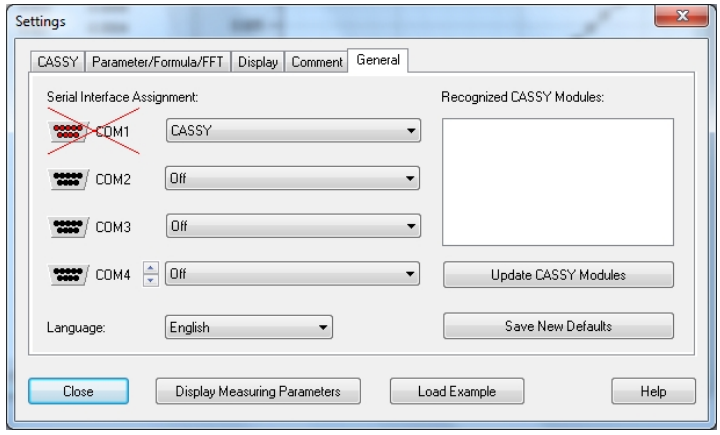
4. Comment :

وهي نافذة يمكن للمستخدم كتابة الملاحظات فيها وحفظها .



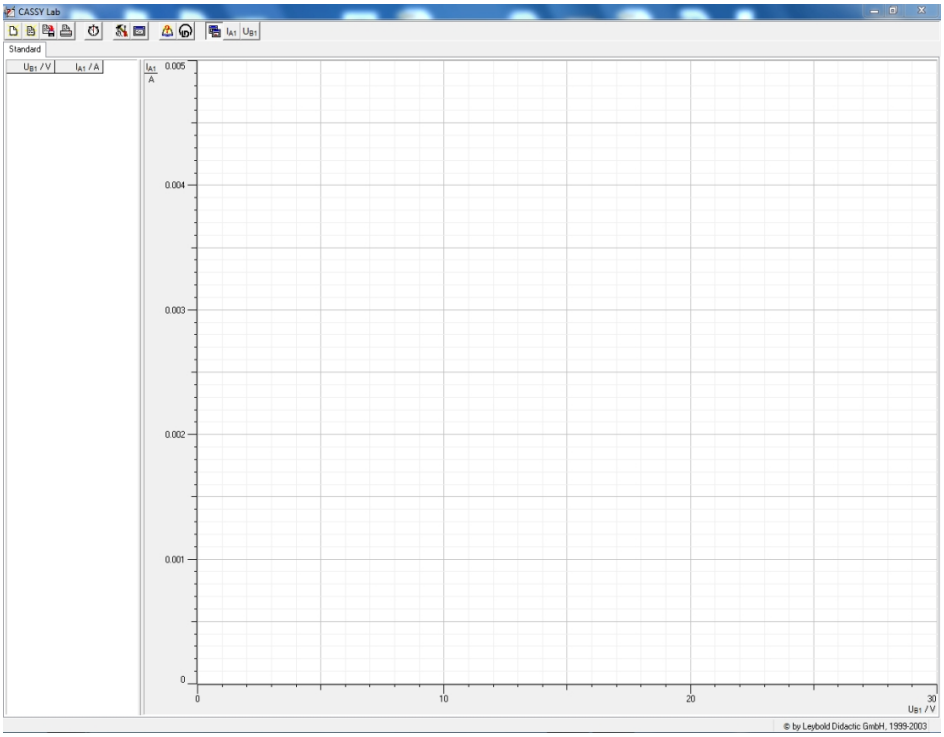
5. General :

وهي نافذة لتعريف اللوحة الأساسية على جهاز الحاسب ، وضبط الإعدادات العامة مثل اختيار اللغة وغيرها .



2) نافذة (Cassy Lab) :

بعد إغلاق نافذة (Settings) تظهر نافذة البرنامج الأساسية ، وتتكون من ثلاث مناطق أساسية : شريط الخيارات الأساسية ، وورقة العمل ، وجدول النتائج .



1- شريط الخيارات الأساسية :

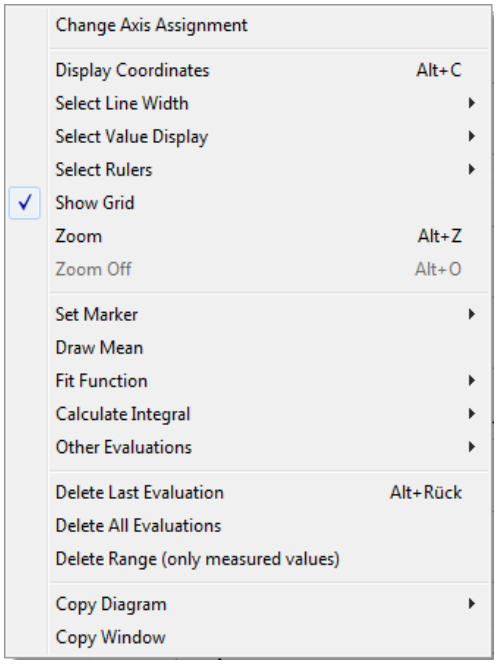
ويتضمن الأوامر الأساسية التالية بالترتيب من اليسار لليمين :

- حذف سلسلة القياسات الأخيرة ، والبدء بسلسلة جديدة
- فتح ملف يحوي سلسلة قياسات محفوظة
- حفظ سلسلة القياسات الأخيرة
- طباعة سلسلة القياسات الأخيرة

- زر بدء عملية القياس
- زر لفتح نافذة الإعدادات
- زر لفتح نافذة الملاحظات
- ثلاثة رموز لفتح نافذة المساعدة .
- رموز لفتح نافذة قراءة المقاييس .

2- خيارات ورقة العمل :

ورقة العمل هي ورقة بيانية يتم عليها تمثيل النقاط التجريبية بشكل تلقائي عند أخذ القياسات ، ومن ثم معالجة هذه القياسات ، واستخلاص النتائج منها ، ومن الممكن تغيير الورقة إلى ورقة نصف لُغارِتمية أو لُغارِتمية ، وإيجاد أفضل منحني يمر من هذه النقاط التجريبية ، والتحكم في طريقة عرض النتائج من خلال القائمة التي نحصل عليها عند الضغط بالزر الأيمن للماوس على الورقة البيانية ، وأهم هذه الخيارات :



- Select Value Display : وتحتوي على القائمة الفرعية :
  - Show Values : أظهر النقاط التجريبية على شكل رموز .
  - Show Connecting lines : أظهر الخطوط الواصلة بين النقاط التجريبية ، ويفضل **عدم إظهار هذه الخطوط** بإلغاء تفعيل هذا الخيار .
  - Show Axes : أظهر المحاور .
  - Show Bars : أظهر النقاط التجريبية على شكل أعمدة .
- Set Marker : لإدخال نص ، أو كتابة معادلة على ورقة العمل .
- Fit Function : مواءمة تابع ، وفيها قائمة فرعية لاختيار التابع وأهمها:
  - Free Fit : مواءمة تابع : أي إيجاد أفضل تابع يمر من النقاط التجريبية ويمكن تحديد شكل هذا التابع من قائمة منسدلة (خطي أو درجة ثانية أو جيبي أو أسي أو ...) ، ويعطي قيمة جودة المواءمة (r) لكل منها .
- Delete Last Evaluation : يمسح آخر عملية قمت بها .
- Delete all Evaluation : يمسح كل العمليات التي قمت بها .
- Copy Diagram : ينسخ ورقة العمل إلى الذاكرة المؤقتة .

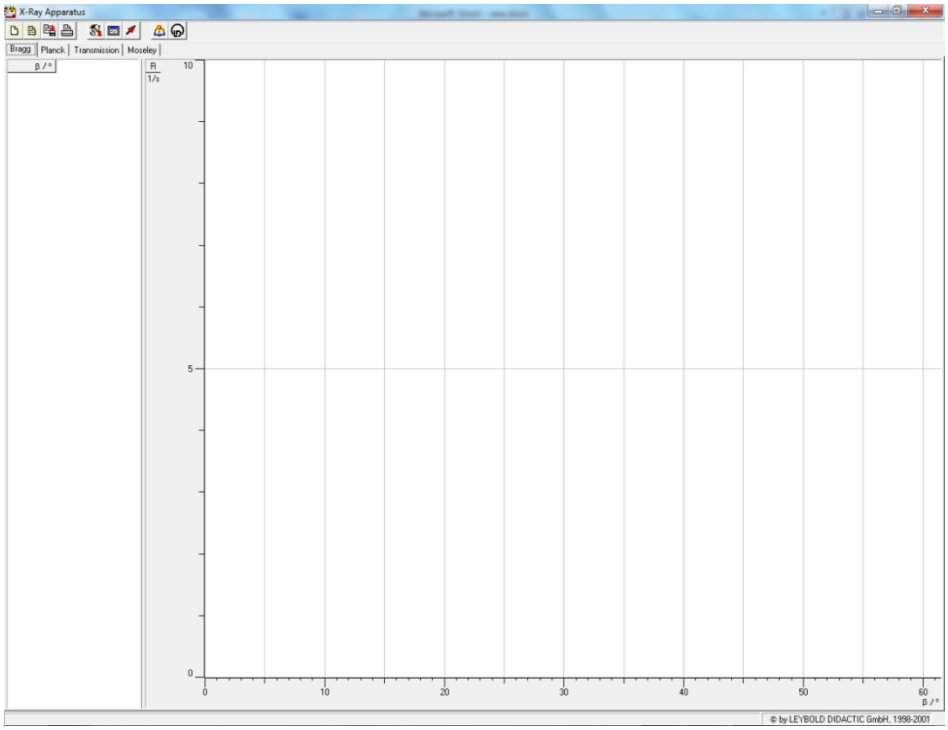
3- **جدول النتائج :**

ويقع على يسار النافذة ، ويتم فيه تسجيل المقادير المقاسة ، ويمكن نسخ الجدول أو حذف قيمة منه من خلال القائمة التي نحصل عليها عند الضغط بالزر الأيمن للماوس على الورقة البيانية ، وأهم هذه الخيارات :

- Delete Last Table Row : لمسح آخر قيمة مقيسة (آخر سطر) .
- Delete Last Measurement Series : لمسح سلسلة القياسات الأخيرة .
- Copy Table : لنسخ جدول النتائج .

شرح عن برنامج X-Ray Apparatus

وهو برنامج متخصص بمعالجة البيانات الواردة من أجهزة Leybold التي تتعامل مع الأشعة السينية ، كالجهاز (81 554) . يبين الشكل التالي النافذة الأساسية للبرنامج ، وتتكون من ثلاث مناطق أساسية : شريط الخيارات الأساسية و ورقة العمل وجدول النتائج .



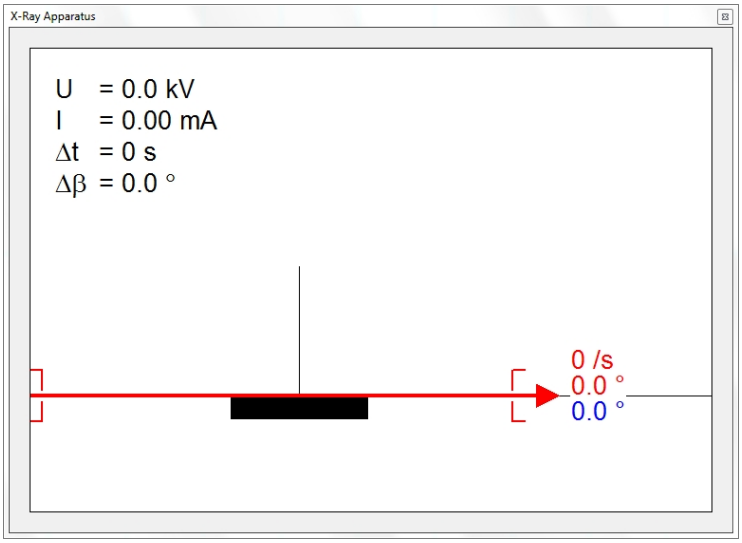
الشكل (1) : الواجهة الأساسية لبرنامج X-Ray Apparatus .

1 - شريط الخيارات الأساسية :

وتحتوي على الأوامر الأساسية التالية بالترتيب من اليسار لليمين :

- حذف سلسلة القياسات الأخيرة والبدء بسلسلة جديدة .
- فتح ملف يحوي سلسلة قياسات محفوظة .
- حفظ سلسلة القياسات الأخيرة .
- طباعة سلسلة القياسات الأخيرة
- زر لفتح نافذة الإعدادات
- زر لفتح نافذة الملاحظات
- زر لتبيان الزوايا والإعدادات .
- رموز لفتح المساعدة .

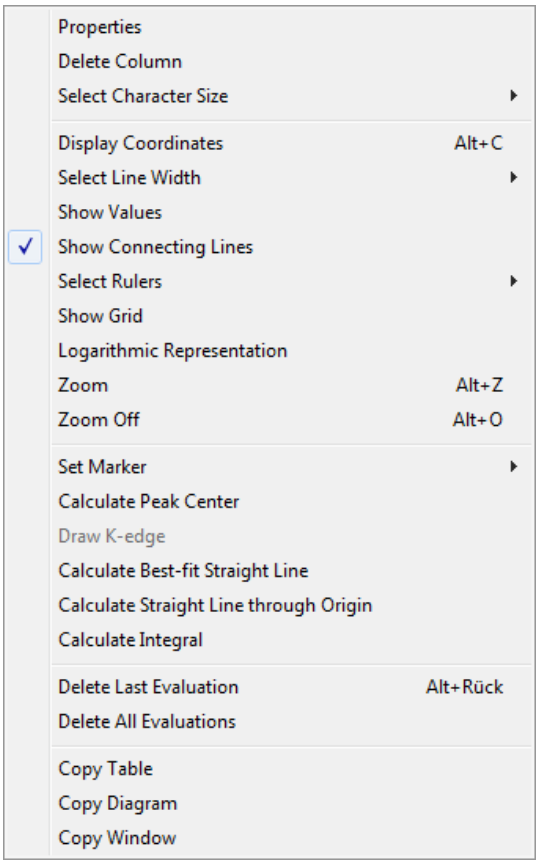
إن الضغط على زر تبيان الزوايا والإعدادات يفتح نافذة (الشكل 2) يبين فيها الزواية بين المنبع والعينة ، وبين المنبع والكاشف ، بالإضافة إلى إعدادات جهاز الأشعة السينية وإعدادات القياس :



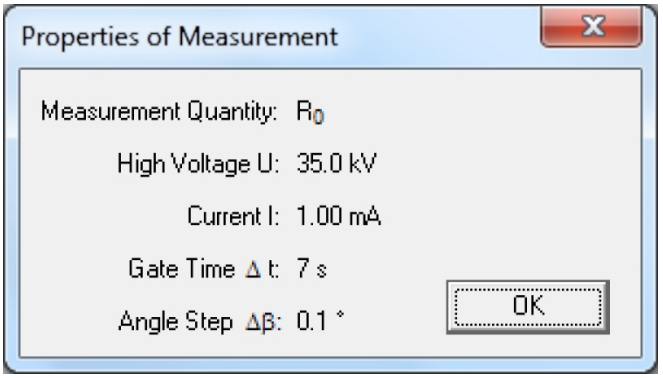
الشكل (2) : نافذة تبيان الزوايا والإعدادات .

2 - خيارات ورقة العمل :

ورقة العمل هي ورقة بيانية يتم عليها تمثيل النقاط التجريبية بشكل تلقائي عند أخذ القياسات ، ومن ثم معالجة هذه القياسات واستخلاص النتائج منها ، ومن الممكن التحكم في طريقة عرض النتائج من خلال القائمة التي نحصل عليها عند الضغط بالزر الأيمن للماوس على الورقة البيانية ، وأهم هذه الخيارات :



- Properties : يفتح نافذة تبين إعدادات الجهاز عند إجراء سلسلة القياسات المبينة في ورقة العمل (الشكل 3) .



الشكل (3) : نافذة (properties) .

- Show Values : أظهر النقاط التجريبية على شكل رموز .
- Show Connecting Lines : أظهر الخطوط الواصلة بين النقاط التجريبية .
- Logarithmic Representation : التمثيل اللُغارِتمي لمعدل العد ، وهذا الخيار يساعد في تحديد قمم الانعراج بشكل أكثر وضوحا .
- Set Marker : لإدخال نص على ورقة العمل .

وبالإمكان معرفة إحداثيات أي نقطة في ورقة العمل ، وذلك بالضغط بالزر الأيسر للماوس على النقطة المطلوبة ، فيتم تحديد إحداثيات هذه النقطة على الجدول في اليسار .

التجربة 1 :

الـنـمـاذج الـبـلـوريـة

1- الغاية من التجربة :

1- التعرف على خلايا الوحدة البسيطة والمركبة وفق نماذجها ، وعلى أنظمة الشبكات البلورية .

2- حساب قرائن ميلر للمستويات البلورية ، وللاتجاهات البلورية المختلفة .

3- تحديد عمليات التناظر لكل نظام ، والتعبير عنها ، والقيام بعمليات الإسقاط .

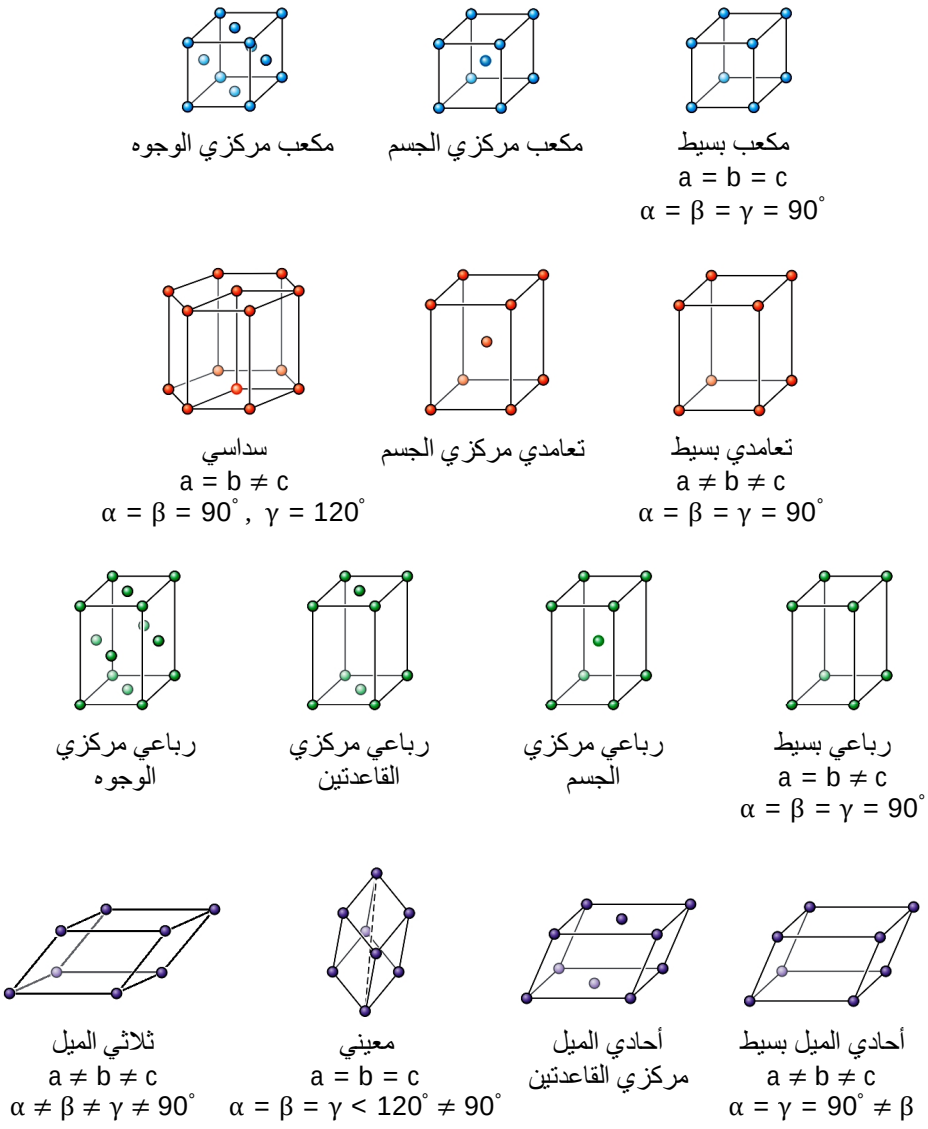
2- المبدأ النظري:

بدأت دراسة الخواص الفيزيائية للحالة الصلبة في ضوء مفاهيم الفيزياء الذرية في السنوات الأولى من القرن العشرين ، ففي عام 1910 اكتُشفَ انعراج الأشعة السينية على البلورات ، وبينت النتائج النظرية والتجريبية آنذاك بصورة واضحة أن البلورة تتشكل من ترتيب دوري للذرات ، وهذا ما جعل الفيزيائيين يهتمون بالنماذج البلورية ، وبتصنيف البلورات حسب خلية الوحدة (Unit Cell) .

يقصد بخلية الوحدة أبسط تركيبة ، التي إذا ما كُرّرت في الاتجاهات الثلاثة وفق متجهات الوحدة لكل منها تكونت البلورة ، ويجزّئ البعض التعرف على خلية الوحدة إلى جزأين : الشبكة الهندسية الممثلة بتقاطعات المستويات والخطوط الهندسية ، مضافا لها قاعدة أو أساس قد تكون مكونة من ذرة أو أيون أو جزيئة تتوضع في تلك التقاطعات فتُكتب العلاقة المنطقية التالية : خلية شبكة هندسية + قاعدة = خلية وحدة بلورية ، لذلك يتم التركيز عادة ، عند التعرف على النظام البلوري الذي يحوي عدة أنواع من الذرات ، على نوع واحد فقط .

ويعرف البعض الخلية البدائية (Primitive Cell) التي تحتوي على ذرة واحدة فقط ، والتي يمكن الحصول عليها بعدة طرق أهمها طريقة فيغنر - سايتز .

برهن عالم البلورات الفرنسي *براڤيه* في عام 1848 أنه لا توجد سوى أربعة عشر نوعا من الشبكات البلورية ، كما في الشكل (1) ، تندرج تحت سبعة أصناف أو **نُظُم بلورية** وهي المكعب (Cubic) ، والرباعي (Tetragonal) ، والتعامدي

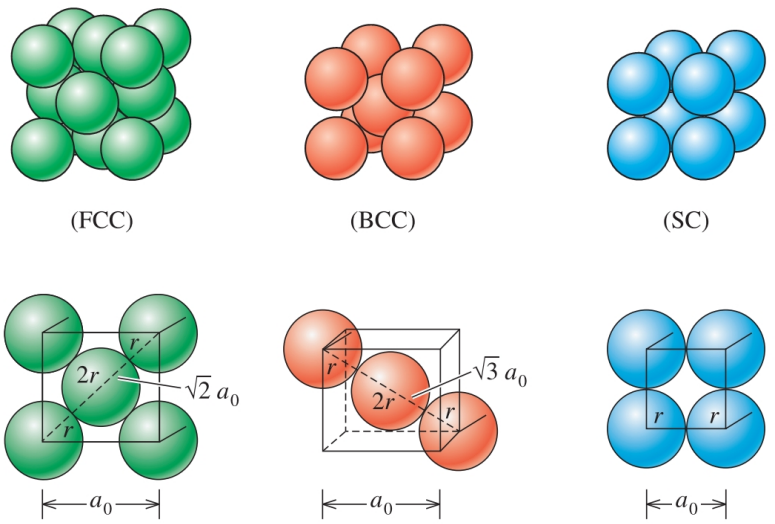


الشكل (1) : الأنواع الأربعة عشر للشبكات البلورية وفق *براڤيه* .

أو متوازي المستطيلات (Orthorhombic) ، وأحادي الميل (Monoclinic) والمعيني (Trigonal) وثلاثي الميل (Triclinic) والسداسي (Hexagonal) .
يمكن أن يضم كل نظام من النظم السابقة واحداً أو أكثر من **أنواع خلية الوحدة** وهذه الأنواع منها البسيطة و مركزية الجسم وغيرها .

يمكننا أن نعرّف **عدد العقد في الخلية الواحدة** ، وذلك تبعا لنصيب خلية الوحدة من العقد (أو الذرات) التي تتشارك بها مع الخلايا المجاورة ، فمثلا عندما تتشارك ثمانية خلايا متجاورة بنفس الذرة ، فيكون نصيب الخلية الواحدة هو ($\frac{1}{8}$) .

إن أحد أهم المعاملات التي تؤثر في الخواص الفيزيائية للجسم الصلب ، وخاصة الخواص الميكانيكية منها ، هو **نسبة الارتصاص** Packing Fraction ، والذي يمكن تعريفه على أنه نسبة حجم الذرات الواقع ضمن خلية الوحدة إلى حجم هذه الخلية ، ويتم حسابه عندما تكون هذه الكرات على تماس مباشر فيما بينها ، كما في الشكل (2) الذي يبين الارتصاص في النماذج المكعبة الثلاث .



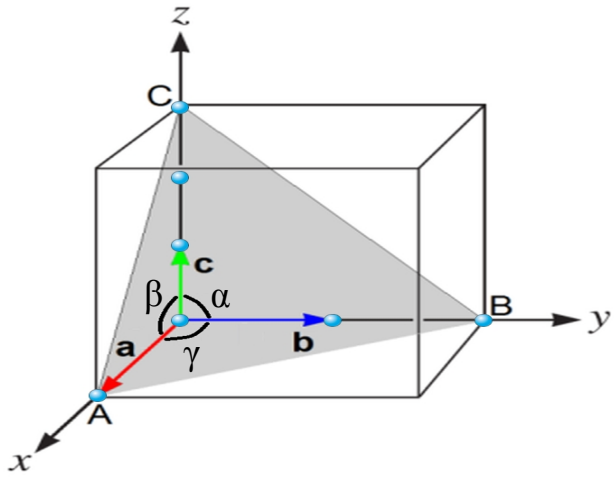
الشكل (2) : الارتصاص في النماذج المكعبة .

- قرائن ميلر :

لابد من التمييز عند الحديث عن قرائن ميلر بين المحاور الإحداثية والمحاور البلورية ، فالمحاور الإحداثية هي المحاور المتعامدة والمباشرة المعروفة (oxyz) والتي أشعة الواحدة لها هي ($\vec{i}$, $\vec{j}$, $\vec{k}$) ، في حين أن المحاور البلورية هي تلك المحاور المنطبقة على الأشعة الأولية للشبكة البلورية ($\vec{a}$, $\vec{b}$, $\vec{c}$) ، وتكون في نفس الوقت أشعة أولية لهذه المحاور ، والزوايا بين هذه المحاور هي (α , β , γ) وهذه الزوايا ليست قائمة بالضرورة ، لذلك من الطبيعي ألا تنطبق جميع المحاور البلورية على المحاور الإحداثية في الحالة العامة .

إن أي مستو في الشبكة البلورية الفراغية يمكن أن يحدد بثلاث نقاط ، هي نقاط تقاطع هذا المستوي مع المحاور البلورية . لنأخذ المثال في الشكل (3) والذي يمثل شبكة بلورية تعامدية . إن نقاط تقاطع المستوي المظلل مع المحاور البلورية مقدرة بأطوال الأشعة الأولية هي (3 , 2 , 1) أي أن :

$$\frac{OA}{a} = 1 \quad , \quad \frac{OB}{b} = 2 \quad , \quad \frac{OC}{c} = 3 \qquad (1)$$



الشكل (3) : نقاط تقاطع مستو بلوري مع المحاور البلورية لشبكة بلورية تعامدية .

إن مقلوب الأعداد السابقة هو ($\frac{1}{3}$ ، $\frac{1}{2}$ ، $\frac{1}{1}$) ، وعند توحيد المقامات نحصل على التناسب :

$$\frac{1}{1} \text{ ، } \frac{1}{2} \text{ ، } \frac{1}{3} \quad : \quad \frac{6}{6} \text{ ، } \frac{3}{6} \text{ ، } \frac{2}{6}$$

وبالتالي فإن ($h = 6 , k = 3 , l = 2$) هي قرائن ميلر لهذا المستوي ، والتي من المعتاد أن تكتب بالشكل ($h \ k \ l$) أي (6 3 2) .

إذا كان المستوي البلوري موازيا لأحد المحاور البلورية ، تكون قرينة ميلر الموافقة مساوية للصفر ، أما إذا قطع المستوي أحد المحاور في الجزء السالب منه ، توضع إشارة السالب فوق القرينة ($h \bar{k} l$) كما في المستوي ($1 \bar{2} 4$) .

- العمليات التناظرية :

تقسم عمليات التناظر التي يمكن تطبيقها على الشبكات البلورية إلى قسمين بسيطة ومركبة ، وأهم هذه العمليات هي الانسحاب والدوران حول محور مار من عقدة ما من الشبكة البلورية و الارتكاس (وهو التناظر بالنسبة إلى نقطة أو عقدة في البلورة تدعى بمركز الارتكاس) وأخيرا الانعكاس .

يُعرّف الانسحاب بالشعاع ($\overrightarrow{T}$) المرتبط بالأشعة الأولية للشبكة البلورية كالتالي :

$$\overrightarrow{T} = n_1 \overrightarrow{a} + n_2 \overrightarrow{b} + n_3 \overrightarrow{c} \qquad (2)$$

بينما تصنف محاور الدوران بحسب مرتبتها p والتي تقابل دورانا بالمقدار ($\frac{2\pi}{p}$) فالمحور من المرتبة الرابعة مثلا يوافق دورانا حوله بالمقدار ($\frac{2\pi}{4}$) أي ($\frac{\pi}{2}$) ، وبإمكاننا بسهولة البرهان أنه هناك خمسة دورانات فقط تتوافق مع الخواص الانسحابية للشبكات البلورية ، وهي التي توافق القيم ($p = 1 , 2 , 3 , 4 , 6$) .

يرمز لعملية الارتكاس بمركزها i ، ويعني وجود هذا المركز في بلورة ما أن لكل موقع شبكي معين بالشعاع ($\vec{r}$) مبدؤه المركز نفسه ، موقعا مناظرا يعين بالشعاع النظير ($-\vec{r}$) ، فعملية الارتكاس إذن تنقلنا من ($\vec{r}$) إلى ($-\vec{r}$) .

يرمز لعملية الانعكاس بالرمز m ، ويمكن أن نجد في الشبكات البلورية عمليات تناظر من الشكل (1m و 2mm و 3m و 4mm و 6mm) ، حيث يعني الرمز mm وجود تناظر بالنسبة إلى مستو عمودي على مستوي التناظر الأول m ، أما الرموز pm و pmm حيث (p = 1 , 2 , 3 , 4 , 6) ، فتعني أن هنالك محور دوران من المرتبة p ، وأن هناك p مستويا للانعكاس .

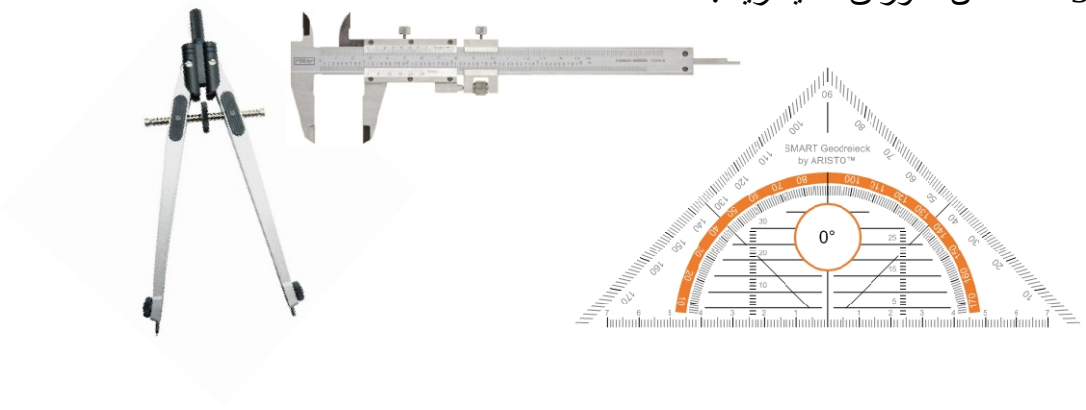
3- أدوات القياس و طرائق العمل :

☆ - الأجهزة و الأدوات التجريبية :

1 - نماذج بلورية مختلفة ، والتي سيتم إجراء الدراسة والقياسات عليها .

2 - أدوات هندسية (قدم قنوية ومسطرة مليمترية و مثلث قائم و منقلة و ...) .

3 - عدد من الأوراق المليمترية .

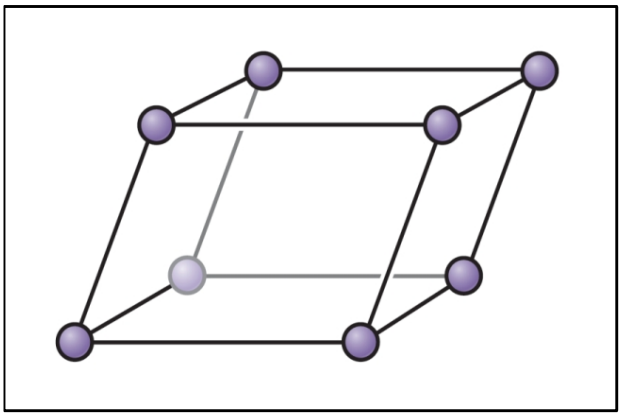


☆ - ملاحظات مهمة :

- تعامل برفق مع النماذج البلورية وتجنب الإهمال فهي سهلة الكسر .

☆ - الإجراء التجريبي :

1 - ابدأ بالنموذج رقم (1) ، ما النظام البلوري الذي يتبع له ؟ وما الشروط المطبقة على الأشعة الأولية (a , b , c) والزوايا (α , β , γ) في هذا النظام ؟ وما نوع خلية الوحدة ؟



النموذج (1)

2 - عيّن نقطة المبدأ ، وقِسْ أبعاد الخلية (a , b , c) بواحدة السنتمتر ، ثم قِسْ زواياها (α , β , γ) .

3 - ارسم على ورقة مليمترية جملة إحداثيات متعامدة كما في الشكل (3) ، ثم مثّل النموذج في هذه الجملة المتعامدة بأبسط تمثيل مع اتخاذ مقياس رسم مناسب .

4 - قس أقطار الكرات (المقابلة للذرات) بالقدم القنوية ، ثم أضف الكرات إلى الرسم على شكل دوائر مع الحفاظ على مقياس الرسم .

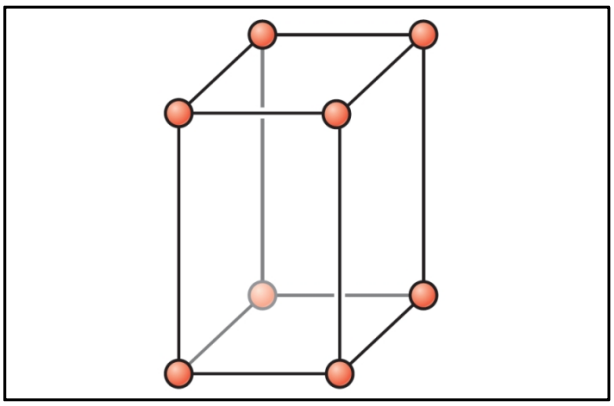
5 - اختر المستوي (XY) ، وظلل كرات هذا المستوي بدوائر غامقة ، ومثّل مساقط الكرات على هذا المستوي بدوائر منقطة .

6 - عين على الرسم الإحداثيات البلورية لذرات النموذج الثمانية ، وعين الإحداثيات الديكارتية لها .

7 - عين عدد العمليات التناظرية التي يتمتع بها هذا النموذج وارسمها .

8 - عين قرائن ميلر لأوجه النموذج الثلاثة المقابلة للمحاور البلورية ، ولمستويات التناظر لهذا النموذج .

9 - أعد الطلبات السابقة على النموذج رقم (2) .

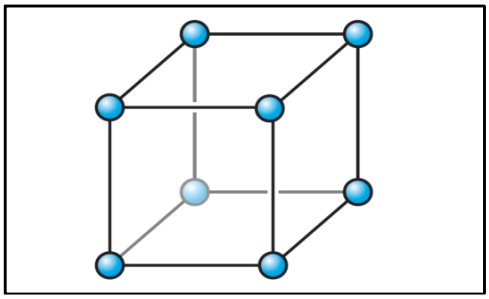


النموذج (2)

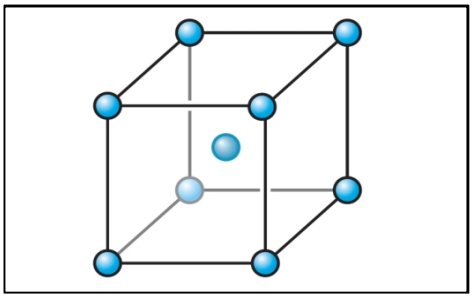
10 - عين أنواع خلية الوحدة ، والنظام البلوري الذي تتبع له ، ونسبة الارتصاص للنماذج البلورية (3 , 4 , 5 , 6) ، وضعها في الجدول التالي :

النموذج	نوع خلية الوحدة	النظام البلوري	عدد الذرات الواقعة في خلية الوحدة (n)	حجم الذرة الواحدة $v_1 = \frac{4}{3} \pi r^3$	حجم الذرات الواقع في خلية الوحدة $V = n v_1$	حجم خلية الوحدة V'	نسبة الارتصاص $\eta = \frac{V}{V'}$
3							
4							
5							
6							

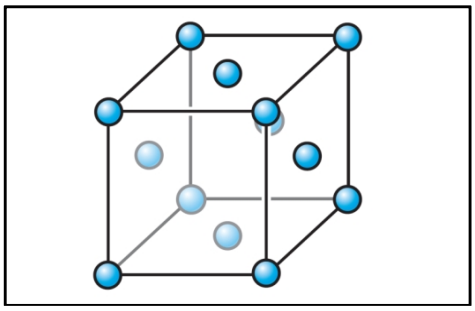
الجدول (1)



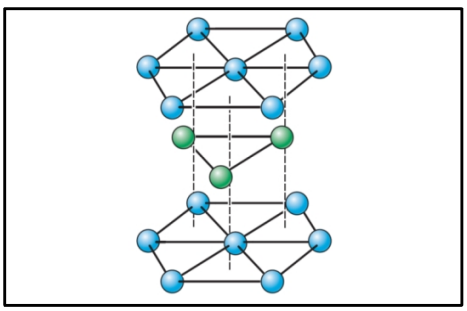
النموذج (3)



النموذج (4)



النموذج (5)



النموذج (6)

4- تقييم العمل التجريبي:

1 - احسب نسبة الارتصاص (Packing Fraction) في حال تماس الكرات في البنية (SC) والبنية (BCC) والبنية (FCC) كما هو موضح في الشكل (2) ثم قارنها بالقيمة التي حسبتها في الجدول (1) وانسبها إلى بعضها .

2 - ما الفروق الأساسية بين خلية الوحدة (Unit cell) والخلية البدائية (Primitive cell) ؟ وهل كل منهما وحيدة التعيين ؟ ارسم خلية وحدة للشبكة المكعبة (FCC) وارسم خلية بدائية لها .

3 - ما الفروق بين نسبة الارتصاص الحجمي ونسبة الارتصاص السطحي ؟

5 - الكلمات المرجعية :

- محاور إحداثية	- Co-ordinate Axes
- محاور بلورية	- Crystallographic Axes
- نظام بلوري	- Crystallographic System
- شبكة هندسية	- Geometric Lattice
- سداسي	- Hexagonal
- قرائن ميلر	- Miller Indices
- أحادي الميل	- Monoclinic
- تعامدي	- Orthorhombic
- نسبة الارتصاص	- Packing Fraction
- الخلية البدائية	- Primitive cell
- رباعي	- Tetragonal
- ثلاثي الميل	- Triclinic
- معيني	- Trigonal
- خلية الوحدة	- Unit cell

6 - المراجع :

1 - المرجع 1- الفصل الأول .

2 - المرجع 2 - الفصل الأول .

3 - المرجع 3 - الفصل الثالث .

4 - المرجع 4 - الفصلان الأول والثاني .

5 - المرجع 6 - الفصلان الثاني و الثالث .

التجربة 2 :

دراسة انعراج الأشعة السينية على بلورة وحيدة بطريقة براغ

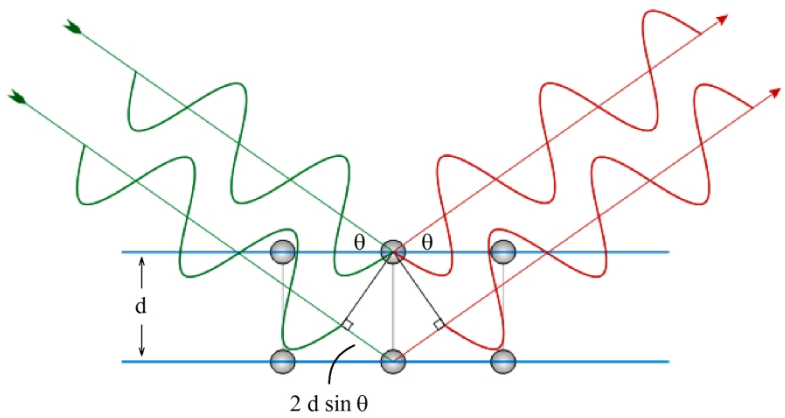
1- الغاية من التجربة :

1- التحقق من قانون انعراج براغ على بلورتي NaCl و LiF .

2- تحديد ثابت الشبكة a_0 لبلورتي NaCl و LiF .

2- المبدأ النظري :

يصف قانون براغ انعراج الأمواج المستوية على بلورة وحيدة بأنه انعكاس انتقائي للأمواج عن مجموعة من مستويات الشبكة البلورية ، وبسبب دورية الشبكة البلورية فإن كل مجموعة من المستويات البلورية المتوازية تتباعد فيما بينها بمسافة ثابتة d .



الشكل (1) : انعكاس الأشعة السينية عن المستويات البلورية .

لقد صاغ *براغ Bragg* شرطه بشكل هندسي دون الأخذ في الحسبان قوانين الضوء الفيزيائي ومع ذلك فإن فرضيته البسيطة ، التي استخدمها للوصول إلى قانونه ، تقود إلى نفس النتيجة التي توصل إليها *ڤون لاو* لاحقا عندما استخدم مفهوم الشبكة العكسية .

افترض *براغ* أن حزمة الأشعة السينية الواردة إلى البلورة ستنعكس عنها كانعكاسها عن مرآة مستوية (حيث زاوية الورود تساوي زاوية الانعكاس) وذلك بالنسبة لمختلف المستويات الذرية في البلورة . وعندئذ ستزداد شدة الأشعة المنعكسة عندما يكون فرق المسير بين شعاعين منعكسين عن مستويين بلوريين متوازيين متتاليين يساوي عدداً صحيحاً من طول موجة الأشعة المستعملة (الشكل 1) ، ومنه يأخذ شرط براغ الشكل التالي :

$$2d\sin\theta = n\lambda \qquad (1)$$

حيث:

n : رتبة الانعراج λ : طول موجة الشعاع الوارد d : التباعد بين مستويات الشبكة

θ: الزاوية بين شعاع الموجة الواردة و المستويات البلورية للشبكة .

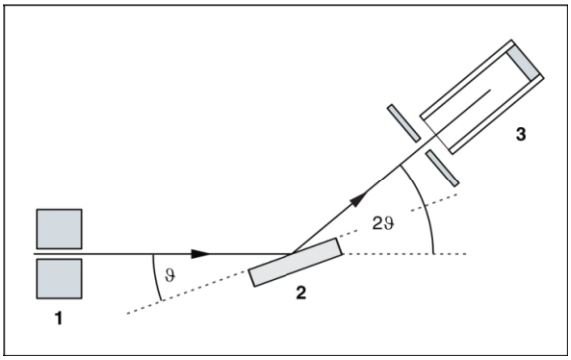
إن الطريقة المتبعة لدراسة البلورة هي طريقة الزاوية المضاعفة (2θ) شكل (2) حيث يدور كل من البلورة والكاشف بالنسبة للمنبع وفي كل لحظة تصنع فيها البلورة مع المنبع زاوية (θ) تكون الزاوية بين الكاشف والمنبع (2θ) . ومن الطبيعي عندئذ أن هذه الطريقة تُستخدم لدراسة مجموعة واحدة فقط من المستويات البلورية وهي تلك الموازية لسطح البلورة .

تستعمل في هذه التجربة عينات من مواد ذات بلورة وحيدة مكعبة ، لها بنية بلورة ملح الطعام (NaCl) ، ويكون سطح خلية الوحدة فيها موازياً لسطح البلورة وعندئذ تكون المستويات البلورية المدروسة (فقط في حال تقارب نصفي قطري الأيونين) هي المستويات الموضحة في الشكل (3) المحددة بالقرائن (200) ، والتي يكون التباعد بين مستوياتها البلورية مساوياً لنصف ثابت الشبكة البلورية :

$$d = \frac{a_0}{2} \qquad (2)$$

ومنه ، يمكن استخدام المعادلة (1) لحساب ثابت الشبكة البلورية a_0 :

$$n\lambda = a_0 \sin\theta \qquad (3)$$



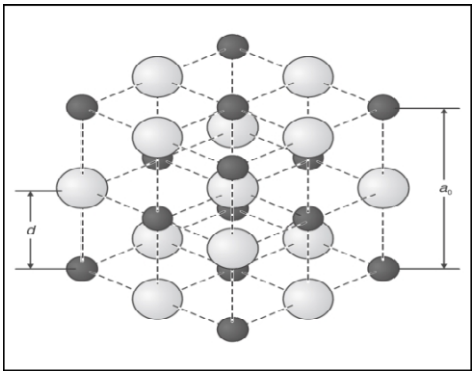
الشكل (2) : مخطط تمثيلي لانعراج أشعة -X على بلورة وحيدة .

1: منبع الأشعة السينية ، 2: البلورة الوحيدة ، 3: أنبوب عداد غايغر - مولر .

لحساب a_0 نحتاج لقياس الزاوية θ التي تكون عندها شدة الانعكاس (معدل العد) عظمى ، وذلك من أجل طول موجي معروف λ ورتبة الانعراج n .

تستخدم في هذه التجربة الأشعة السينية للانعراج على بلورة وحيدة من مادة NaCl و LiF ، ويستخدم للكشف عن الأشعة المنعرجة أنبوب عداد غايغر- مولر وهو عداد حساس بشكل أساسي لفوتونات الأشعة السينية وأشعة غاما .

إن كلاً من الأشعة المنعرجة (العداد) والبلورة والأشعة الواردة تقع في مستوٍ شاقولي واحد كما في الشكل (2).

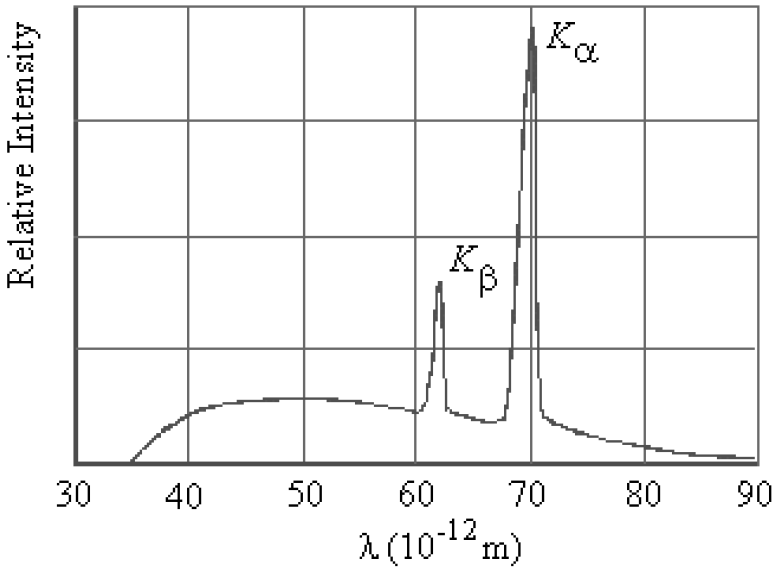


الشكل (3) : تمثيل ثلاثي الأبعاد لبنية بلورة NaCl

d: المسافة بين المستويات البلورية ، a_0 : ثابت الشبكة البلورية .

تتميز نقطة الصفر ($\theta = 0$) بأن مستويات الشبكة ومحور العداد متوازيان فيما بينهما ، وموازيان لحزمة الأشعة السينية الواردة ، وبما أن مستويات الشبكة نادراً ما تكون موازية بشكل دقيق لسطح البلورة ، فيجب أن تتم معايرة نقطة الصفر لكل بلورة على حدة .

يوضح الشكل (4) أشعة X- المستخدمة التي تصدر من مصعد المولبدن (Mo) وهي تتميز بخطين طيفيين أساسيين ($K_\beta = 63.09$, $K_\alpha = 71.08$) لذلك ستشاهد عند كل رتبة تداخل قمتين إحداهما أكبر من الأخرى ، تعودان للخطين الطيفيين المذكورين .

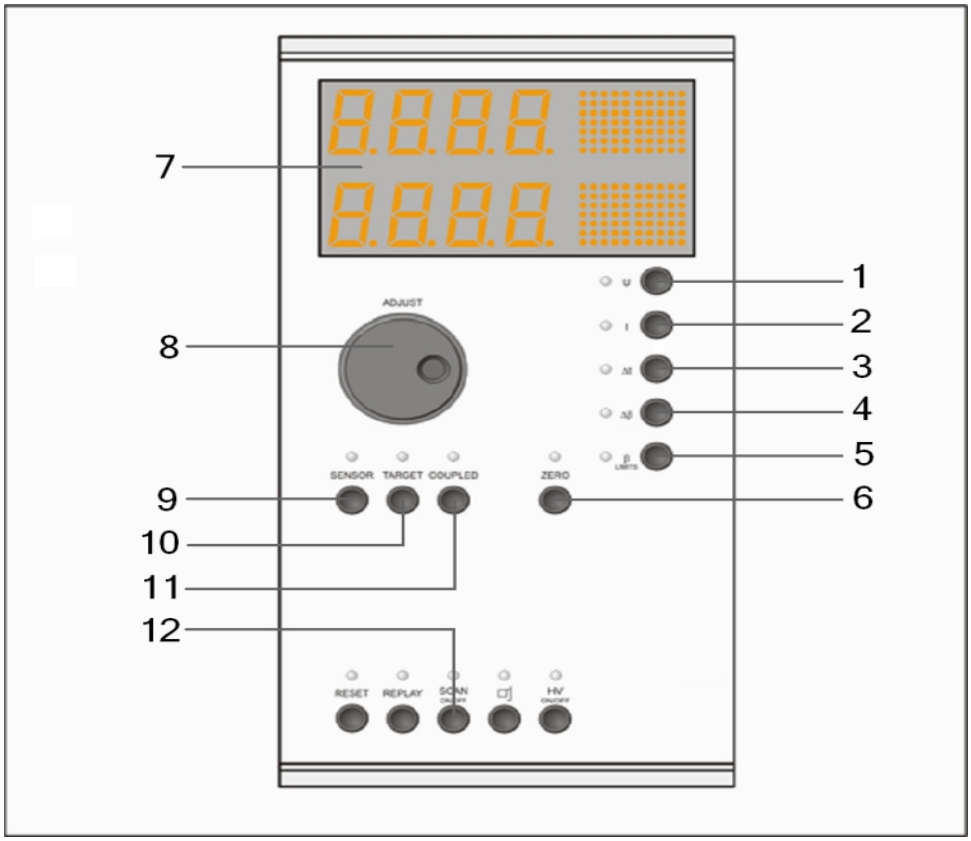


الشكل (4) : طيف مصعد المولبدن .

3- أدوات القياس و طرائق العمل :

☆ - الأجهزة و الأدوات التجريبية :

- منبع للأشعة السينية 81 554 .
- بلورة وحيدة من مادة NaCl .
- حاسب مجهز ببرنامج X-Ray .
- بلورة وحيدة من مادة LiF .



الشكل (5) : واجهة التحكم في منبع الأشعة السينية (X-Ray apparatus) .

1: ضبط الجهد العالي المطبق على صمام توليد الأشعة.

2: ضبط التيار المار بصمام توليد الأشعة (تيار الإصدار).

3: ضبط الفاصل الزمني بين قياسين متتاليين .

4: ضبط الفاصل الزاوي بين قياسين متتاليين .

5: ضبط الزاويتين الكبرى والصغرى لبدء وتوقف القياس .

6: زر التصفير . 7: شاشة العرض .

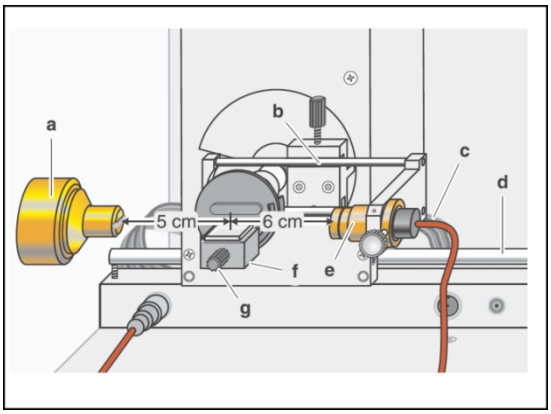
8: مفتاح تغيير المتحولات . 9: تفعيل حركة العداد .

10: تفعيل حركة العينة . 11: تفعيل حركة العينة مع الكاشف بطريقة 2θ .

12: زر بدء القياس .

☆ - الإعداد التجريبي:

- يتم إعداد جهاز أشعة -X في تشكيلة براغ كما هو موضح في الشكل (6) .



الشكل (6) الإعداد التجريبي لجهاز أشعة -X لاستخدامه بطريقة براغ .

1- ضع مسدّد الأشعة على المنصة الخاصة به (a) .
2- ثبت مقياس الزوايا إلى قضبان الدليل (d) بحيث تكون المسافة S_1 بين شق الحظار ومسدّد الأشعة ، وذراع حامل العينة بحدود 5cm . صل الكبل المطاطي (c) للتحكم بمقياس الزوايا .
3- ارفع غطاء الحماية لنافذة العداد ، ضع نهاية العداد في مكان المقياس (e) وأوصل كبل أنبوب العداد إلى المأخذ المكتوب عليه GM TUBE .
4- بتحريك حامل الحساس (b) اضبط المسافة S_2 بين ذراع حامل العينة وشق حظّار حامل العينة و العداد بحوالي 6cm .
5- ركب حامل منصة العينة (f) مع منصة العينة .
6- قم بضغط زر التصفير 6 (الشكل 5) وتأكد من أن كلاً من منبع الأشعة السينية والعينة والعداد على استقامة واحدة .
7- صل خرج RS-232 والمدخل التسلسلي في الحاسب (COM 1) .

☆ - ملاحظات مهمة :

1- يكون الجهاز موصولاً ومعداً مسبقاً ، فيطلب منك التأكد من الوصل والأوضاع وعدم تغييرها إلا بعد الرجوع إلى أحد المشرفين في المخبر .
2- بلورات NaCl و LiF هي بلورات تمتص الرطوبة وبغاية الهشاشة ، احتفظ بهذه البلورات في مكان جاف ، كما جنب البلورات الضغط الميكانيكي ويجب عدم لمس البلورات إلا من الجوانب فقط .
3- إذا كان معدل العد منخفضاً ، عندها يمكنك تصغير المسافة S_2 بين العينة والعداد ، على أي حال ، فالمسافة يجب ألا تكون صغيرة بشكل كبير ، وإلا لن تكون دقة قياس الزوايا كافية لتمييز خصائص الخطوط الطيفية K_α و K_β .

☆ - الإجراء التجريبي :

أولاً: انعكاس براغ على بلورة وحيدة LiF :

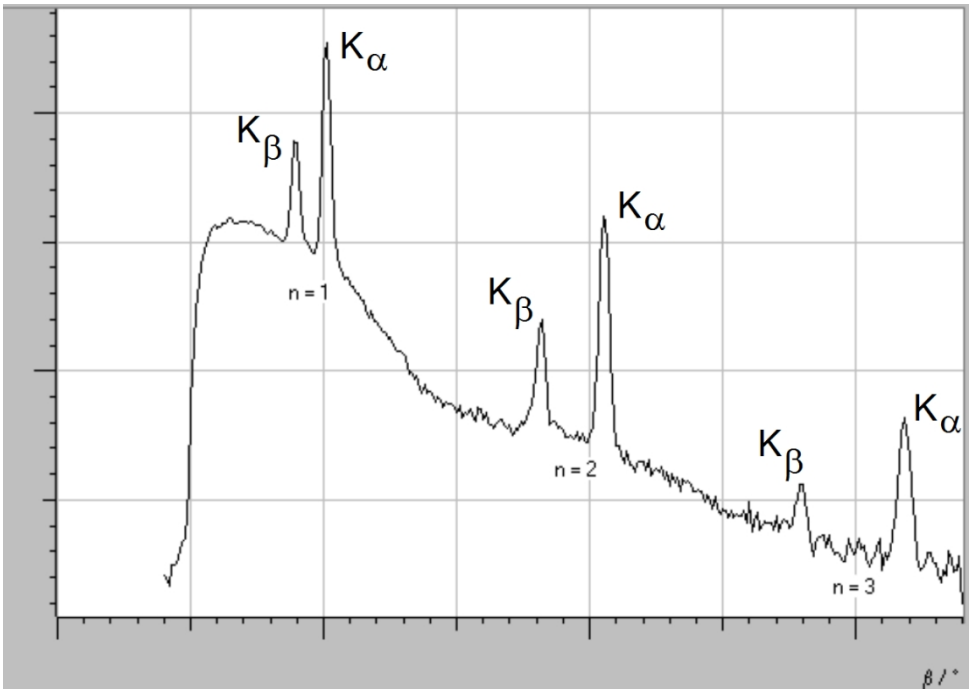
1- تأكد من أن كلاً من منبع الأشعة السينية والعينة والعداد على استقامة واحدة بالضغط على الزر Zero ، الزر رقم 6 (الشكل 5) .
2- شغل برنامج X-ray على الحاسب ، وفعل المقياس اللُغارِتمي للشدة R .
3- ضع الجهد العالي لأنبوب الأشعة السينية على القيمة 35 KV ، بالضغط على الزر 1 ثم تدوير المفتاح 8 حتى يظهر على الشاشة السوداء (35.0 KV) .
4- ضع تيار الإصدار على I = 1 mA ، وذلك بالضغط على الزر 2 ثم تدوير المفتاح 8 حتى يظهر على الشاشة السوداء 1.00 mA .
5- اجعل الفاصل الزمني بين كل قياسين متتاليين $\Delta t = 6$ s وذلك بالضغط على الزر 3 ثم تدوير المفتاح 8 حتى يظهر على الشاشة السوداء 6 s .
6- اجعل التغير في الزاوية $\Delta \beta = 0.1^o$ وذلك بالضغط على الزر 4 ثم تدوير المفتاح 8 حتى يظهر على الشاشة السوداء 0.1 .

7- اضغط زر COUPLED (الزر رقم 11) فتكون الزاوية التي يتحرك بها العداد هي ضعف الزاوية التي تتحرك بها البلورة المدروسة أي 2θ .

8- اجعل الحد الأدنى لزاوية بدء القياس $\downarrow \beta = 4^o$ ، وذلك بالضغط على الزر 5 ، ثم تدوير المفتاح 8 حتى يظهر على الشاشة السوداء ($\downarrow \beta = 4^0$) ، ثم اجعل الحد الأعلى لزاوية انتهاء القياس $\uparrow \beta = 34^o$ وذلك بالضغط على الزر 5 مرة أخرى ، ثم تدوير المفتاح 8 حتى يظهر على الشاشة السوداء $\uparrow \beta = 34^o$.

9- ابدأ عملية القياس بالضغط على زر SCAN ، الزر رقم 12 .

10- عند انتهاء الحاسب من أخذ القياسات ، حدد من الشكل الناتج القمم العظمى لمعدل العد لكل طول موجة (K_α , K_β) على حدة (الشكل 7) ، بالنقر عليها بالزر الأيمن للماوس ، وسجل قيمة الزاوية المقابلة لها في جدول كالتالي :



الشكل (7) : نموذج للقياسات

	θ	sin θ	n	n.λ (pm)
K_α			1	71.08
			2	142.16
			3	213.24
K_β			1	63.06
			2	126.12
			3	189.18

11- ارسم على نفس الورقة المليمترية المنحني البياني لتغيرات $n\lambda$ بدلالة $\sin\theta$ من أجل K_α و K_β ، واحسب ثابت الشبكة البلورية a_0 لبلورة LiF وفق العلاقة (3) ، وقدّر الارتياب فيه ، ثم قارنه بالقيمة المعروفة لهذا الثابت .

12- عند انتهاء الحاسب من القياسات ، احفظ المخطط البياني في ملف صوري باستخدام الأمر (copy diagram) .

ثانياً: انعكاس براغ على بلورة وحيدة NaCl:

1 - افتح النافذة الزجاجية للجهاز بلطف ، واستبدل بلورة NaCl ببلورة LiF ، وذلك بالتقاط كل بلورة من الجوانب فقط ، ثم أغلق النافذة .

2 - كرر الخطوات السابقة على بلورة كلوريد الصوديوم NaCl ، وانتبه إلى اختلاف بسيط في زاوية انتهاء القياس حيث يتم ضبطها على القيم التالية :

$$\uparrow \beta = 26^o \quad \text{و} \quad \downarrow \beta = 4^o$$

4 - تقييم العمل التجريبي :

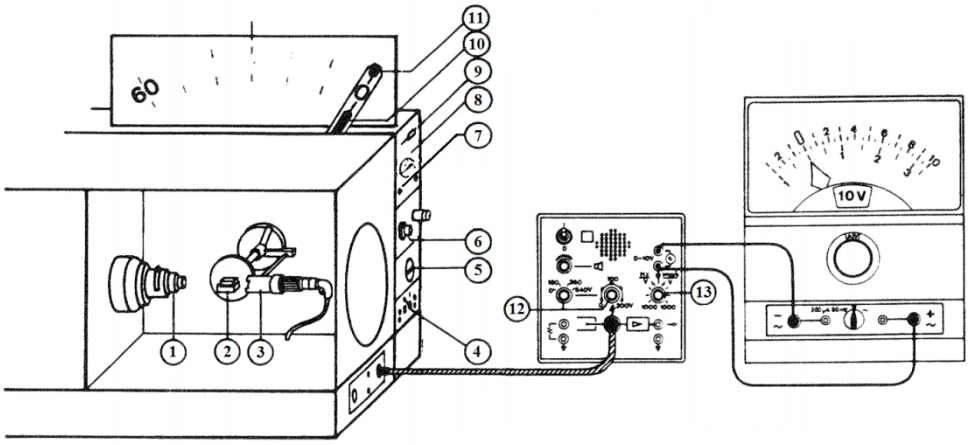
1 - ما مدى تطابق المنحنيين اللذين حصلت عليهما من سلسلة K_α و K_β من أجل كل بلورة ؟ تحقق من مدى الدقة التي حصلت عليها ، بمقارنة نتيجتك بالقيمة الحقيقية لثابت الشبكة البلورية لبلورتي (LiF) و (NaCl) .

2 - هل يمكنك الحصول على عدد أكبر من القمم ولماذا ؟ ناقش ذلك .

☆ - إجراء التجربة يدوياً :

☆ - الأجهزة و الأدوات التجريبية :

- مطياف للأشعة السينية 90 554 . - بلورة وحيدة من مادة NaCl و LiF .
- منبع للعداد مزود بمضخم إلكتروني .- مقياس فولط .



الشكل (8) : مطياف الأشعة السينية 90 554 وملحقاته

1: منبع الأشعة السينية ، 2: حامل البلورة ، 3: الكاشف (عداد غايغر - مولر)

4: مفتاح التشغيل الرئيسي ، 5: قاطعة زمنية لتحديد فترة التشغيل المطلوبة

6: مفتاح لتدوير البلورة والكاشف يدوياً ، 7: مفتاح وصل التوتر العالي ، وهو لا يعمل إلا عندما يكون المفتاح (8) في البداية اليسرى عند 21 KV

8: مفتاح لتغيير التوتر العالي المطبق من 21 KV وحتى 42 KV بخطوة 3KV

9: زالقة للتحكم بتيار الإصدار الذي يمكن تغييره من 0.5 mA وحتى 1mA

10: مؤشر زاوية البلورة مع المنبع ، 11: مؤشر زاوية الكاشف مع المنبع

12: ناخبة متدرجة ومفتاح تغيير مستمر لتزويد العداد بالتغذية اللازمة (التي يجب ألا تتجاوز 475 V) . 13: ناخب لانتقاء ثابت التناسب بين معدل العد وفرق الكمون المقروء على مقياس الفولط .

✯ - الإعداد التجريبي:

يبين الشكل (8) مخططاً للمطياف المستخدم الذي يحتوي على أنبوب أشعة سينية مصعده مصنوع من المولبدن . تخرج الأشعة من شق فيه حامل يوضع فيه مرشح من الزركونيوم (Zr) ، وذلك للحصول على أشعة سينية وحيدة اللون ، طولها الموجي ($\lambda = 71 \pm 0.5$ pm) . توضع العينة المراد دراستها على الحامل (2) القابل للدوران بوساطة المفتاح (6) .

✯ - الإجراء التجريبي :

1 - ضع بلورة كلور الصوديوم على حامل العينة وثبتها ثم أغلق الباب الزجاجي .

2 - ضع ناخب تغيير التوتر العالي (8) عند أخفض تدريجة ، ثم ضع القاطعة الزمنية (5) على الفترة التي يراد تشغيل الجهاز خلالها (20 أو 30 دقيقة) .

3 - اضغط على زر وصل التوتر العالي (7) فيضاء المؤشر الضوئي للجهاز دليلاً على بدء صدور الأشعة السينية .

4 - قم بعد ذلك بزيادة قيمة فرق التوتر العالي من خلال الناخب (8) تدريجياً حتى حوالي (36 KV) .

5 - قم بزيادة شدة تيار الإصدار بوساطة الزالقة (9) حتى القيمة (0.8 mA) .

6 - اضبط قيمة فرق الكمون المغذي لعداد غايغر - مولر على القيمة (420 V) ، ثم اضبط قيمة الحساسية المناسبة من الناخب (13) للحصول على انحرافات ملائمة على مقياس الفولط .

7 - غير الزاوية (θ) من خلال تدوير المفتاح (6) ، فتتحرك العينة والكاشف في آن واحد ، حيث تدور العينة بزاوية (θ) ، والكاشف بزاوية (2θ) بعد رص الصامولة البيضاء فوق المفتاح (6) .

8 - ابتداء من الزاوية (4^o) وحتى (30^o) ، قم بزيادة الزاوية بمقدار درجة واحدة ، وسجل عند كل زاوية قيمة فرق الكمون المقابلة (U) المقروءة ، ثم رتب نتائجك في جدول كالتالي :

θ (deg)	4	5	6	7	……...	27	28	29	30
U (V)					……...				

9 - ارسم على ورقة مليمترية تغيرات فرق الكمون بدلالة الزاوية ، فتحصل على شكل مشابه للشكل (7) ، لكن بقمم مفردة عند كل رتبة تداخل .

10 - تعالج النتائج كما ورد في القسم السابق المؤتمت من التجربة ، ويتم حساب ثابت الشبكة البلورية لبلورة (NaCl) .

11 - كرر الخطوات السابقة على بلورة (LiF) .

---

5 - الكلمات المرجعية :

- انعراج براغ	- Bragg diffraction
- انعكاس براغ	- Bragg reflection
- معدل العد	- Counting rate
- رتبة الانعراج	- Diffraction order
- ثابت الشبكة	- Lattice constant
- المستويات البلورية	- Lattice planes
- بلورة وحيدة	- Monocrystal
- قمة عظمى	- Peak
- دورية الشبكة البلورية	- Periodicity of the Crystal
- الأمواج المستوية	- Plane waves
- الانعكاس الانتقائي	- Selective reflection
- التباعد بين المستويات البلورية	- Spacing of lattice planes
- طول الموجة	- Wavelength
- جهاز الأشعة السينية .	- X-Ray Apparatus

★ - المراجع :

1 - المرجع 1 - الفصل الثاني .

2 - المرجع 2 - الفصلان الثاني و الثالث .

3 - المرجع 4 - الفصل الثالث .

4 - النشرتان التجريبيتان : (P7.1.2.1) & (554 800) من شركة ليبولد " LEYBOLD DIDACTIC " .

التجربة 3 :

دراسة انعرج الأمواج السنتمترية على نموذج بلورة مكعبة بسيطة

1- الغاية من التجربة :

1- دراسة انعراج الأمواج الكهرطيسية السنتمترية على نموذج لبلورة مكعبة بسيطة ثابت شبكتها من رتبة عدة سنتمترات .

2- إيجاد ثابت الشبكة البلورية a للنموذج بالاعتماد على قانون انعراج براغ .

2- المبدأ النظري :

إن انعراج الأمواج الكهرطيسية السنتمترية عن الكرات المعدنية مماثل لانعراج الأشعة السينية عن الذرات ، فهنالك انتثار في جميع الاتجاهات وتتداخل هذه الأمواج المنتثرة تداخلا بناءً عند تحقق علاقة براغ وهو شرط الحصول على النهايات العظمى للأشعة المنعرجة :

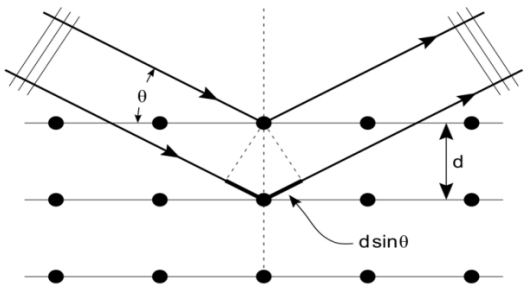
$$2d_{hkl}\ \sin\theta_{hkl} = n\lambda \qquad (1)$$

حيث:

d_{hkl} : التباعد بين المستويات البلورية المعينة بقرائن ميلر $h\ k\ l$.

θ_{hkl} : الزاوية بين الأشعة الواردة وهذه المستويات

λ : طول موجة الإشعاع ، n : رتبة التداخل .



الشكل (1) : انعراج براغ .

جرت العادة أن يتم الاستعاضة عن استخدام رتبة التداخل (n) باستخدام قرائن ميلر المضاعفة ، أي أنه إذا اصطلحنا وجود مستويات لها القرائن [222] مثلا بالإضافة إلى المستويات [111] كان ذلك مكافئا لاعتبارنا القرائن [111] والرتبة (n = 2) . وهناك علاقة بسيطة تربط بين ثابت الشبكة البلورية a للبنى المكعبة والبعد d_{hkl} :

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2+k^2+l^2}} \qquad (2)$$

فإذا وضعنا هذه القيمة في علاقة براغ (1) واعتبرنا قرائن ميلر المضاعفة بالإضافة إلى البسيطة لوجدنا :

$$\sin\theta_{hkl} = \left(\frac{\lambda}{2a}\right)\sqrt{h^2 + k^2 + l^2} \qquad (3)$$

حيث ترمز θ_{hkl} إلى الزاوية المقابلة للنهاية العظمى لشدة الإشعاع المنعرج على جملة المستويات الذرية المعينة بالقرائن (h , k , l) التي يمكن أن تكون مضاعفة. يمكن إذن من خلال قياس الزوايا θ_{hkl} المقابلة للنهايات العظمى التوصل إلى استنتاج قيمة ثابت الشبكة البلورية a إذا عرف طول موجة الإشعاع الوحيد اللون المستخدم λ ويتم ذلك بملاحظة أن :

$$\sin^2\theta_{hkl} = \left(\frac{\lambda^2}{4a^2}\right)(h^2 + k^2 + l^2) \qquad (4)$$

$$\sin^2\theta_{hkl} = A (h^2 + k^2 + l^2)$$

حيث : $A = \frac{\lambda^2}{4a^2}$ عامل مشترك من أجل كل النهايات العظمى ، وهو الذي ينبغي تعيينه للتوصل إلى الثابت a . إذا لا حظنا بعد ذلك أن المقدار ($h^2 + k^2 + l^2$) لا يأخذ سوى القيم التالية :

(1 , 2 , 3 , 4 , 5 , 6 , 8 , 9 , 10 , 11 , 12 , 13 , 14 , 16 , 17 , ...)

حيث تنقص الأعداد (23 , 15 , 7) ، وهذا عائد بالطبع لكون (h , k , l) تأخذ

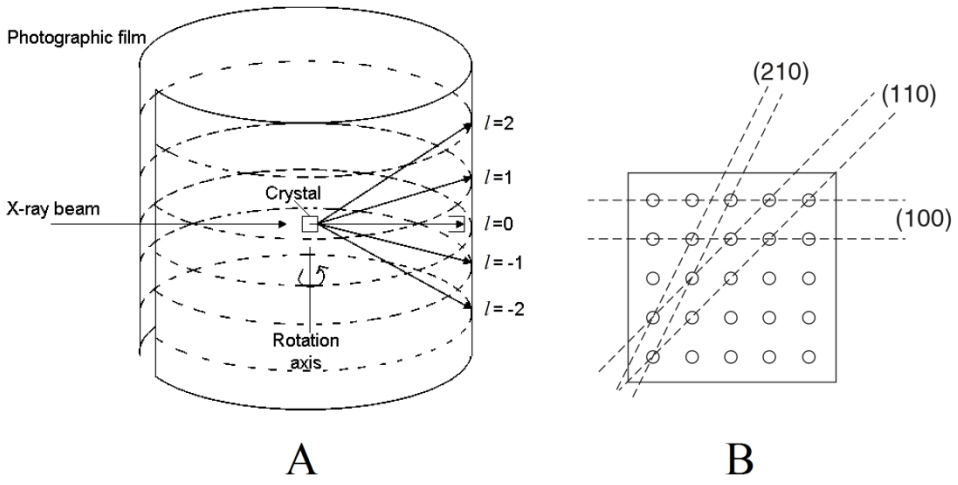
كل القيم الصحيحة الممكنة ، أمكن عندها من مقارنة قيم $\sin^2\theta_{hkl}$ فيما بينها استنتاج قيمة ($h^2 + k^2 + l^2$) الموافقة لكل نهاية عظمى ، وبالتالي تعيين العامل المشترك A ومنه ثابت الشبكة a بعد معرفة λ .

يمكن كذلك الحكم على نوع بنية البلورة المكعبة من تسلسل قيم ($h^2 + k^2 + l^2$) الموافقة للنهايات العظمى المتتالية ، فنقول أن البنية مكعبة بسيطة (SC) عندما تظهر كل النهايات العظمى المقابلة للقيم المذكورة أعلاه ، بينما تكون مكعبة مركزية (BCC) لدى ظهور النهايات العظمى المقابلة للقيم التي يكون من أجلها المجموع ($h + k + l$) زوجيا فقط ، وتكون البنية مركزية الوجوه (FCC) لدى ظهور النهايات العظمى المقابلة للقيم التي تكون فيها قرائن ميلر كلها زوجية أو كلها فردية ويبين الجدول (1) القمم السبعة الأولى من أجل أنظمة التبلور المكعبة الثلاثة .

ترتيب القمة	SC			BCC			FCC		
	$[h\ k\ l]$	$h^2 + k^2 + l^2$	$\frac{sin^2\theta_i}{sin^2\theta_1}$	$[h\ k\ l]$	$h^2 + k^2 + l^2$	$\frac{sin^2\theta_i}{sin^2\theta_1}$	$[h\ k\ l]$	$h^2 + k^2 + l^2$	$\frac{sin^2\theta_i}{sin^2\theta_1}$
1	[100]	1	1	[110]	2	1	[111]	3	1
2	[110]	2	2	[200]	4	2	[200]	4	$\frac{4}{3}$
3	[111]	3	3	[211]	6	3	[220]	8	$\frac{8}{3}$
4	[200]	4	4	[220]	8	4	[311]	11	$\frac{11}{3}$
5	[210]	5	5	[310]	10	5	[222]	12	4
6	[211]	6	6	[222]	12	6	[400]	16	$\frac{16}{3}$
7	[220]	8	8	[321]	14	7	[331]	25	$\frac{25}{3}$

الجدول (1)

يمكن دراسة بنية البلورة الوحيدة بعدة طرائق منها طريقة الزاوية المضاعفة* والبلورة الدوارة . ففي طريقة البلورة الدوارة (الشكل A - 2) ، تُعرَّض كل المستويات البلورية للأشعة السينية بوساطة تدوير البلورة المراد دراستها حول محور عمودي على منحى الأشعة وحيدة اللون الساقطة عليها ، وتكون البلورة محاطة بفيلم حساس للأشعة السينية على شكل أسطوانة ينطبق مولدها على محور الدوران . بهذا الشكل تتعرض مختلف مجموعات المستويات البلورية المتوازية للأشعة وتحدث انعكاسات عظمى في الاتجاهات التي تتحقق من أجلها علاقة براغ . تكون الانعكاسات العظمى على المستويات الموازية لمحور الدوران (الشاقولي) واقعة في المستوي الأفقي . أما تلك التي تحدث على المستويات الأخرى (المائلة بالنسبة إلى محور الدوران) فستكون فوق هذا المستوي الأفقي أو تحته .



الشكل (2) A: طريقة البلورة الدوّارة ، B: بعض المستويات البلورية المدروسة .

يُستعاض في تجربتنا هذه عن الفيلم الحساس ، لكشف مواضع النهايات العظمى للأشعة السينية ، بكاشف الأمواج السنتمترية الذي يعطينا شدة هذه الأمواج في النقاط

* : تم شرح هذه الطريقة في تجربة " دراسة انعراج الأشعة السينية على بلورة وحيدة بطريقة براغ " .

التي نضعه فيها . لذلك لإيجاد مواضع النهايات العظمى للانعكاس في أثناء دوران النموذج المكعب حول محور شاقولي ، ينبغي أن ننقل الكاشف من نقطة لأخرى في الفراغ المحيط بالنموذج ونسجل في كل موضع نضعه فيه الشدة العظمى التي يشير إليها أثناء تدوير النموذج ، مما يجعلنا نحصل في النهاية (بعد نقل الكاشف إلى مختلف نقاط الفراغ المحيطة بالنموذج) على توزع مواضع النهايات العظمى (وهذا يماثل النقاط المضيئة على الفيلم الحساس في طريقة البلورة الدوّارة) .

لكن هذا لا يتطلب جهدا كبيرا ووقتا طويلا فحسب ، بل كذلك قياس الزوايا المجسمة في مختلف الاتجاهات بالنسبة إلى منحى الأشعة الواردة ، وذلك لتحديد موضع الكاشف في كل نقطة . لذلك يُكتفى ، في هذه التجربة ، بدراسة توزع النهايات العظمى الناجمة عن المستويات الموازية لمحور الدوران ، أي نكتفي بالبحث عن النهايات العظمى في المستوى الأفقي فقط ، وذلك بنقل الكاشف في هذا المستوي حول النموذج ، وقياس الزاوية a بين منحى الأشعة الواردة ومنحى الأشعة التي يتلقاها الكاشف ، وهذا يعني أننا لا نبحث سوى عن الانعكاسات التي تحدث على مجموعات المستويات الشاقولية ، ولذلك ستكون إحدى قرائن ميلر لأية مجموعة متوازية من هذه المستويات صفراً ، وبالتالي ستكون قيم ($h^2 + k^2 + 0$) لهذه المستويات في حالة البنية المكعبة البسيطة هي إحدى القيم : (... , 5 , 4 , 2 , 1) وهي المقابلة للمستويات التالية على الترتيب (الشكل B - 2) :

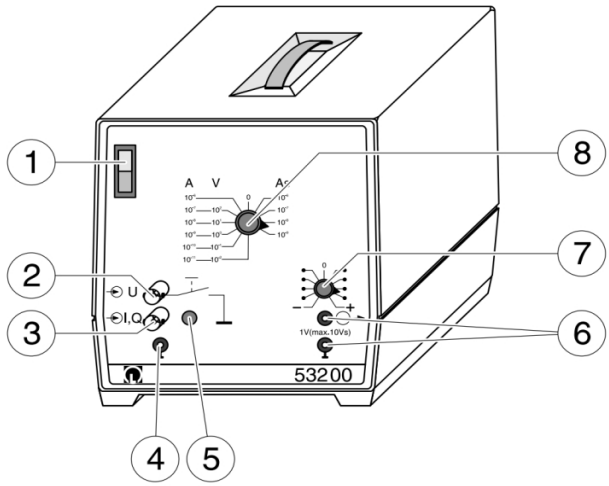
(100 , 110 , 200 , 120 , 220 , ...)

لمعرفة قيم ($h^2 + k^2$) المقابلة لكل النهايات العظمى المعينة تجريبياً نلجأ إلى مقارنة قيم $\sin^2\theta_{hkl}$ ببعضها ، وذلك بأخذ نسب مربعات جيوب الزوايا المقابلة للنهايات العظمى إلى مربع جيب الزاوية المقابلة للنهاية العظمى الأولى ، ثم مقارنة هذه النسب بالأعداد (... , 5 , 4 , 2 , 1) (العلاقة 3) . فإذا كان التقابل جيداً تأكدنا أن النهاية العظمى الأولى تقابل القيمة 1 ، وتقابل الثانية القيمة 2 ، والثالثة القيمة 4 ... ، أي نكون قد حددنا قرائن ميلر للمستويات التي يحدث الانعكاس عنها .

3- أدوات القياس و طرائق العمل :

✯ - الأجهزة والأدوات التجريبية :

- مرسل للأمواج الكهرطيسية السنتمترية بطول موجة $\lambda = 3.20 \pm 0.01$ cm .
- منبع 12 V لتيار مرسل الأمواج . - نموذج بلورة مكعبة بسيطة .
- كاشف أمواج كهرطيسية سنتمترية . - مضخم الإشارة 00 532 .
- قرص مدرج لقياس الزوايا . - تجهيزات Cassy lab .



الشكل (3) : مضخم الإشارة 00 532 : 1: زر التشغيل ، 2: مدخل الكمون
3: مدخل التيار ، 4: أرضي المدخل ، 5: زر وصل الكمون بالأرضي
6: مخرج الكمون ، 7: مفتاح تصفير الكمون ، 8: ناخب مجال إشارة الدخل .

✯ - الإعداد التجريبي:

يوضح الشكل (4) الإعداد العام للتجربة .

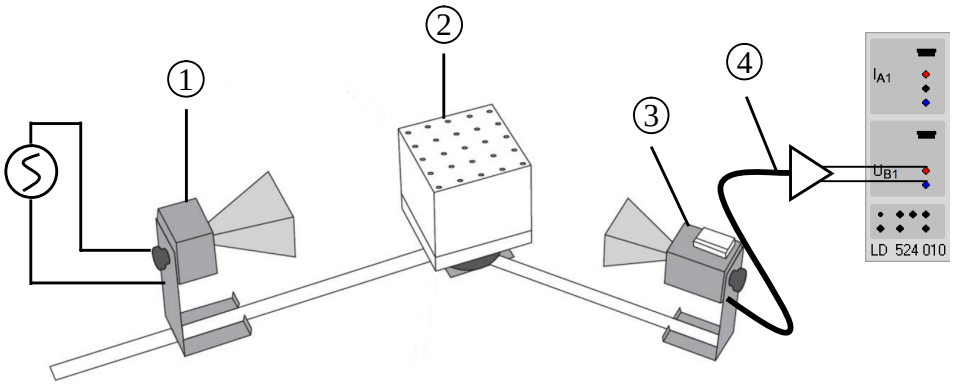
1 - ركب كلاً من المرسل والكاشف على ذراعي القرص المدرج بحيث يكون بعد المرسل والكاشف عن مركز القرص مساويا لـ (100 cm) تقريبا ، ثم حرك

الكاشف بحيث يكون على استقامة واحدة مع المرسل .

2 - ضع النموذج فوق القرص بحيث يكون أحد وجوهه موازيا لمستوى المرسل .

3 - صل طرفي مرسل الأمواج بمنبع تيار المرسل بفرق كمون متناوب 12 V .

4 - صل الكاشف بمدخل التيار (3) في المضخم ، واضبطه على قيمة تضخيم مناسبة (10^{-7} مثلا) ، ثم صل مخرج الكمون (6) بالمدخل (Input B) على وحدة الكاسي .



الشكل (4) : الإعداد العام للتجربة .

1: منبع الأشعة السنتمترية ، 2: النموذج المدروس

3: كاشف الأشعة السنتمترية ، 4: مضخم الإشارة .

☆ - ملاحظات مهمة :

1 - انتبه إلى النموذج البلوري ، فهو مصنوع من مادة سهلة التلف .

2 - لا تقم بوضع أي كتب أو حاجيات شخصية على الطاولة ، وتجنب الحركة الزائدة لأن كل ذلك يؤثر في مسار الأمواج السنتمترية ، وبالتالي في دقة التجربة ومن الأفضل الانتظار عدة ثوان قبل أخذ كل قراءة لفرق الكمون .

☆ - الإجراء التجريبي :

أولا : دراسة الخلفية :

هدف هذه الخطوة هو تأثير محاولة التخلص من ضجيج الخلفية على دقة القياس .

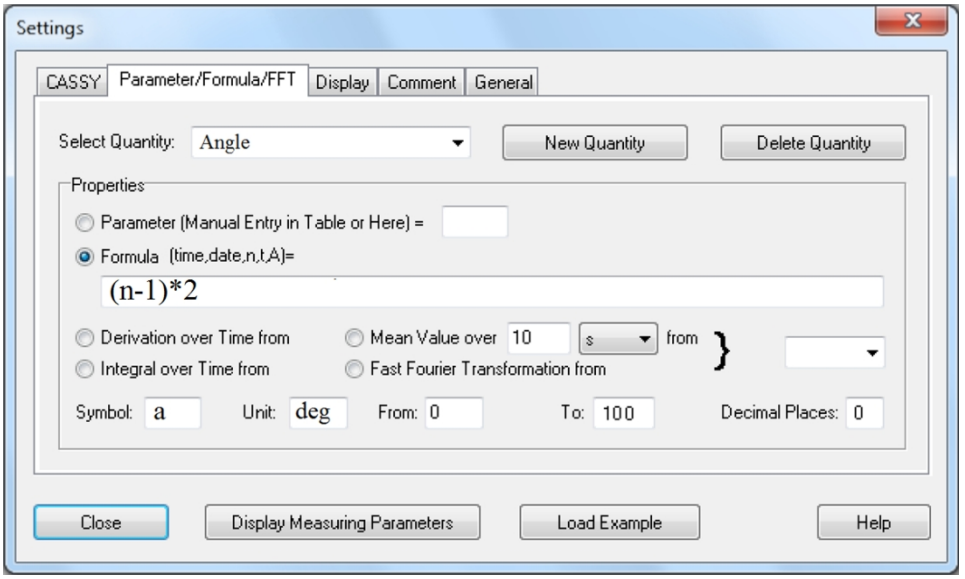
1 - شغل برنامج الكاسي من أيقونته على سطح المكتب ، واضبط الإعدادات التالية :

2 - انقر بالزر الأيسر الماوس على Input (B) واختر الخيارين التاليين :

Quantity: voltage U_{B1} , Meas. Range: -30 V .. +30 V

Record Measured Values : Averaged Values : 200 ms

3 - لتعريف الزاوية a انتقل إلى علامة التبويب Parameter/FFT ثم اضغط على (New Quantity) ، وأدخل المعطيات كما في الشكل التالي :



4 - انتقل إلى علامة التبويب Display واختر على المحور X تمثيل الزاوية a ثم اختر على المحور Y تمثيل الكمون U_{B1} .

5 - انتقل إلى النافذة الفرعية Measuring Parameters واختر تسجيل القيم يدوياً وذلك بتفعيل الخيار Manual Recording ، ثم عد إلى النافذة الأساسية .

6 - أزل النموذج البلوري برفق ، واضبط وضع القرص المدرج بحيث يكون صفره مقابلاً للوضع الذي يكون فيه المرسل والكاشف على استقامة واحدة . يمكن تدقيق ذلك بتشغيل الأجهزة واختيار الوضع الذي تكون فيه إشارة الكمون عظمى .

7 - سجل قيمة فرق الكمون المقابلة للوضع الابتدائي (الصفري) بالضغط على زر تسجيل القيم ( ) أو بالضغط على F9 .

8 - حرك الكاشف تدريجياً حتى الزاوية (90^o) وبخطوة (2^o) ، وسجل في كل خطوة قيمة فرق الكمون .

9 - انسخ جدول النتائج وذلك بالضغط بالزر الأيمن للماوس على الجدول ، و اختيار (Copy table) ، ثم انقله إلى ملف (Excel) واحفظ الملف .

ثانياً : دراسة الانعراج بطريقة الزاوية المضاعفة (2θ) :

1 - أعد النموذج إلى مكانه على القرص المدرج ، ثم اضغط على الزر F4 .

2 - اضبط وضع الكاشف والنموذج بحيث يصبحان على استقامة واحدة مع المنبع ، ثم سجل قيمة فرق الكمون المقابلة للوضع الابتدائي (الصفري) .

3 - حرك الكاشف بزاوية (2^o) بالنسبة إلى المنبع ، وحرك النموذج بنفس الاتجاه لكن بزاوية (1^o) بالنسبة إلى المنبع ، وابحث عن أعلى شدة للكمون بتحريك النموذج يمينا ويسارا ضمن مجال درجتين على الأكثر ، ثم سجل قيمة الكمون .

4 - حرك الكاشف تدريجياً حتى الزاوية (90^o) وبخطوة (2^o) ، مع تحريك النموذج بخطوة (1^o) بحيث تكون ، وفي كل خطوة ، الزاوية التي يصنعها الكاشف مع المنبع تساوي ضعف الزاوية التي يصنعها النموذج مع المنبع ، وسجل في كل مرة قيمة فرق الكمون .

5 - انسخ جدول النتائج إلى ملف (Excel) الذي أنشأته في الخطوة السابقة ، ثم قم بطرح الخلفية باستخدام أوامر (Excel) ، واحفظ التغييرات .

6 - ارسم المنحني البياني لتغيرات فرق الكمون المسجل بدلالة الزاوية ($\theta = \frac{a}{2}$) وحدد النهايات العظمى الواضحة ، ثم سجل نتائجك في جدول كالتالي :

القمة	θ	$\sin\theta$	$n.\lambda$
1			
2			
3			
4			
5			

7 – ارسم على ورق مليمتري تغيرات $\sin\theta$ بدلالة $n\lambda$ ، واستنتج من الرسم قيمة ثابت الشبكة البلورية a حسب العلاقة ($2a\sin\theta = n\lambda$) ، وقدّر الارتياب فيها ، ثم قارنها بالقيمة التي يمكن قياسها بالمسطرة مباشرة على النموذج .

ثالثاً : دراسة الانعراج بطريقة البلورة الدوّارة (θ) :

1 - اضبط وضعي الكاشف والبلورة بحيث يكونان على استقامة واحدة مع المنبع ، ثم اضغط على الزر F4 ، ثم سجل قيمة فرق الكمون المقابلة للوضع الابتدائي .

2 - اضبط الزاوية بين المنبع والكاشف على القيمة ($a = 2^o$) ، ثم دوّر النموذج يمينا ويسارا حتى تحصل على أعلى شدة ممكنة لفرق الكمون ثم سجلها . (يكفي البحث في مجال ربع دورة بسبب تناظر البنية المكعبة) .

3 - قم بتحريك الكاشف تدريجياً حتى ($a = 90^o$) وبخطوة (2^o) ، وسجل قيمة فرق الكمون المقابل لكل زاوية .

4 - انسخ جدول النتائج إلى ملف (Excel) الذي أنشأته في خطوة سابقة ، ثم قم بطرح الخلفية باستخدام أوامر (Excel) ، واحفظ التغييرات .

5 - ارسم المنحني البياني لتغيرات فرق الكمون المسجل بدلالة الزاوية ($\theta = a/2$) وحدد النهايات العظمى الواضحة ، ثم سجل نتائجك في جدول كالتالي :

القمة	a	θ	$\sin\theta$	$\sin^2\theta$	$(h^2 + k^2)$	$\frac{\sin^2\theta_i}{\sin^2\theta_1}$
1						
2						
3						
4						
5						

6 - تأكد من أن النموذج هو نموذج مكعب بسيط من خلال تتالي قيم ($h^2 + k^2$) المقابلة للنهايات العظمى ، ومقارنتها مع الأعداد (... , 5 , 4 , 2 , 1) .

7 - ارسم على ورق مليمتري المنحني البياني لـ ($\sin^2\theta$) بدلالة ($h^2 + k^2$) ، واستفد من الميل في حساب ثابت الشبكة البلورية (a) حسب العلاقة (4) ، وقدّر الارتياب فيها ، ثم قارنها بالقيمة التي يمكن قياسها بالمسطرة مباشرة على النموذج .

4- تقييم العمل التجريبي:

1 - هل يشترط في الأمواج المستخدمة في هذه التجربة أن تكون أمواجا وحيدة ؟

2 - هل يشترط أن تكون حزمة الأمواج مستوية ؟ وهل هي كذلك في التجربة ؟ ناقش دقة نتائجك في ضوء ما سبق .

5 - الكلمات المرجعية :

- Background effect	- تأثير الخلفية
- Centimeter waves	- أمواج سنتمترية
- Constructive interference	- تداخل بناء .
- Crystal sample	- نموذج بلوري
- Destructive interference	- تداخل هدام .
- Diffracted waves	- الأمواج المنعرجة
- Electromagnetic waves	- أمواج كهرطيسية
- Emitter	- المرسل
- Incoming waves	- الأمواج الواردة
- Microwaves	- أمواج مكروية
- Receiver	- المستقبل
- Reflected waves	- الأمواج المنعكسة
- Rotating crystal	- البلورة الدوراة
- Scattering	- انتثار

6 - المراجع :

1- المرجع 1 - الفصل الثاني .

2- المرجع 2 - الفصل الثاني .

3 - المرجع 4 - الفصل الثالث .

التجربة 4 :

دراسة انعراج الأشعة السينية على بلورة وحيدة بطريقة لاو

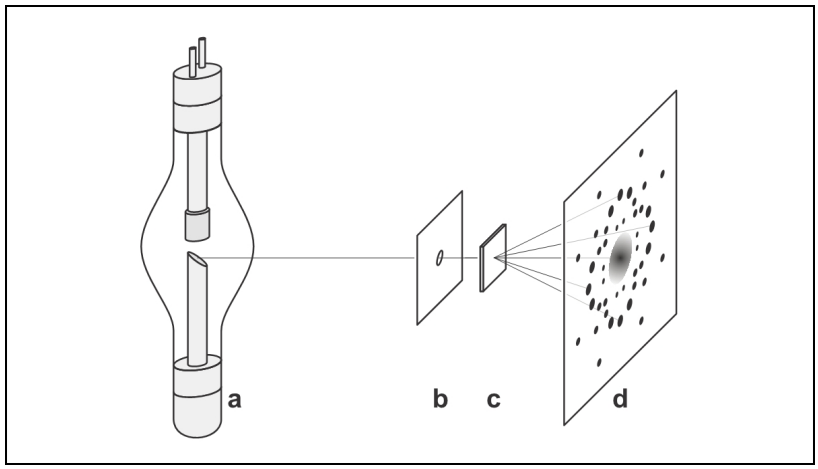
1- الغاية من التجربة :

1- دراسة مخططات لاو لبلورة وحيدة لمركب NaCl .

2- دراسة بنية الشبكة البلورية للمركب السابق .

2- المبدأ النظري:

اقترح *ماكس ڤون لاو* *Max von Laue* عام 1912 التحقق من شكل الموجة المفترض لأشعة X- عن طريق دراسة انعراجها على البلورات ، وقد عمل العالمان *فريدريك* و *نيبينج* باقتراحه ، وقاموا بتعريض بلورة لشعاع مركّز صادر عن منبع أشعة X- ، وشاهد العالمان على صفيحة تصوير موضوعة خلف البلورة ما كان متوقعاً من بقع وانعكاسات متمايزة ، وبذلك استطاع هذان العالمان التأكيد وللمرة الأولى حقيقة البنية الفراغية للشبكة البلورية في المواد المتبلورة .



الشكل (1) : مخطط يوضح الترتيب المستخدم للحصول على مخططات لاو .

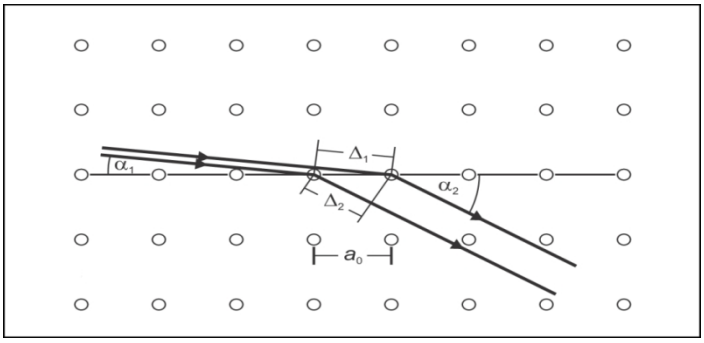
a: أنبوب أشعة X- ، b: مسدّد الأشعة ، c: البلورة d : فيلم لتصوير أشعة X- .

- شروط لاو:

اعتبر *لاو* في تفسيره لهذه النتائج أن البلورة تتكون من شبكة مؤلفة من ثلاث مجموعات من المستويات المحددة المتقاطعة ، وكل مجموعة تتباعد فيما بينها بمسافة ثابتة ، وعندما تنعرج أشعة X- عند أحد المستويات تتحقق العلاقة :

$$\Delta = \Delta_1 - \Delta_2 = a_0.\cos\alpha_1 - a_0.\cos\alpha_2 \qquad (1)$$

حيث a_0 : المسافة بين النقاط ، α_1 : الزاوية بين شعاع X- الوارد و المستوي البلوري ، α_2 : الزاوية بين شعاع X- المنعرج والمستوي البلوري ، Δ : هو فرق المسير بين شعاعين منعرجين على نقطتين متجاورتين (عناصر الشبكة الشكل 2).



الشكل (2) : تمثيل ثنائي البعد لفرق المسير بين شعاعين متجاورين من أشعة X- ينعرجان على مستوي يحوي صف من الذرات في بلورة مكعبة .

يكون التداخل بين الأشعة الجزئية بنّاءً إذا كان فرق المسير Δ يساوي عدداً صحيحاً من طول الموجة λ ويجب استيفاء هذا الشرط في الاتجاهات الفراغية الثلاثة.

في البلورات المكعبة تكون صفوف النقاط المتعلقة بالاتجاهات الفراغية الثلاث متعامدة فيما بينها والمسافة a_0 تكون نفسها بين جميع النقاط، ويكون عندها شرط لاو لحصول تداخل بناء على الشكل التالي :

$$\begin{cases} a_0\cos(\alpha_1) - a_0\cos(\alpha_2) = h\,\lambda \\ a_0\cos(\beta_1) - a_0\cos(\beta_2) = k\,\lambda \\ a_0\cos(\gamma_1) - a_0\cos(\gamma_2) = l\,\lambda \end{cases} \qquad (2)$$

حيث : h , k , l أعداد صحيحة .

تُعدّ ($\alpha_1 , \beta_1 , \gamma_1$) الزوايا بين الشعاع الوارد وصفوف النقاط (المستوي البلوري) بينما تُعدّ ($\alpha_2 , \beta_2 , \gamma_2$) الزوايا بين الشعاع المنعرج والمستوي البلوري . تدعى المقادير h , k , l قرائن لاو أو قرائن ميلر الموسعة ، وبما أن هذه المقادير أعداد صحيحة صغيرة فإن شرط لاو لا يمكن تحققه من أجل أي قيمة لطول الموجة λ ، بل فقط من أجل أطوال موجة مناسبة (خاصة) .

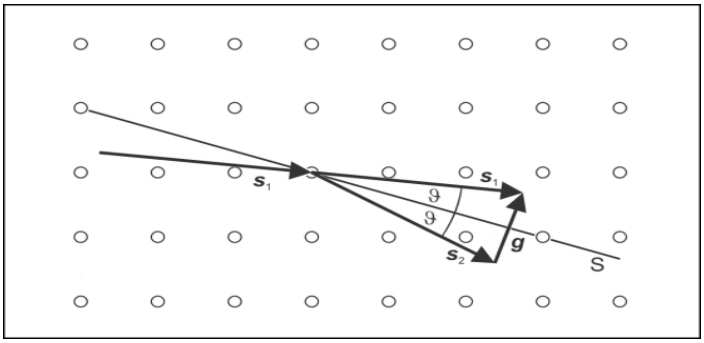
يتم غالباً استخدام شعاعي الواحدة التاليين :

$$S_1 = (\cos\alpha_1 , \cos\beta_1 , \cos\gamma_1)$$
$$S_2 = (\cos\alpha_2 , \cos\beta_2 , \cos\gamma_2) \qquad (3)$$

وهما شعاعان يتجهان في اتجاه كل من شعاع X- الوارد ، وشعاع X- البارز على التوالي . يصبح شرط لاو (2) على الشكل التالي :

$$S_1 - S_2 = \lambda G \quad , \quad G = \frac{1}{a_0}(h , k , l) \qquad (4)$$

يدعى G : شعاع الشبكة العكسية ويكون شرط لاو محققاً إذا كانت للأعداد h , k , l قيماً صحيحة.



الشكل (3): العلاقة الهندسية بين شعاعي الوحدة S_1 و S_2 ، والشعاع $\vec{G}$. $\vec{g} = \lambda$

- شرط براغ Bragg Condition :

بما أن S_1 و S_2 شعاعا واحدة فإن مطاليهما متساويان لذلك يكون الشعاع G عمودياً على منصف القطاع الزاوي بين الشعاع الوارد والشعاع البارز (أنظر الشكل 3) ومنه نكتب:

$$\lambda\,|G| = |S_1 - S_2| = 2\sin\theta \qquad (5)$$

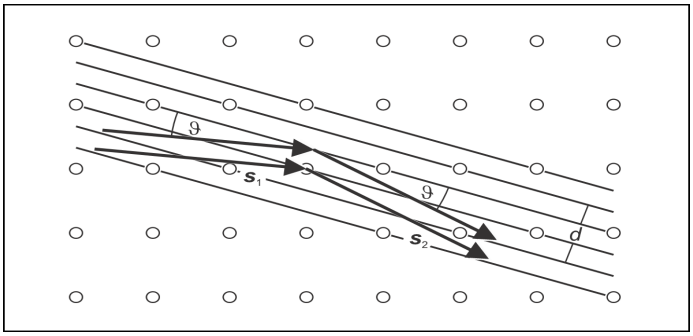
بتعويض قيمة مطال G نجد:

$$\lambda = 2\sin\theta.\frac{a_0}{\sqrt{h^2+k^2+l^2}} \qquad (6)$$

إن المعادلة (6) هي شرط براغ نفسه فيما إذا كان التباعد بين مستويات الشبكة هو:

$$d = \frac{a_0}{\sqrt{h^2+k^2+l^2}} \qquad (7)$$

من وجهة نظر *براغ* ، تتكون شبكة البلورة من مجموعة من مستويات الشبكة التباعد بينها d (أنظر الشكل 4) . وهذه المستويات موازية للمنصف S و معامدة لشعاع الشبكة العكسية G .



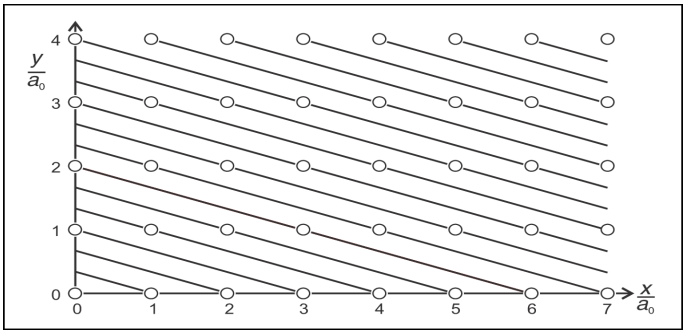
الشكل (4) : تمثيل ثنائي البعد وفق *براغ* لانعكاس أشعة X- على مجموعة من المستويات البلورية لبلورة مكعبة حيث المستويات البلورية موازية للمنصف S .

وتصبح المعادلة الشرطية في الإحداثيات المتعامدة لمجموعة مستويات الشبكة في نظام إحداثيات محاور البلورة على الشكل :

$$x.h + y.k + z.l = m.a_0 \qquad (8)$$

حيث m رقم دوري صحيح في مجموعة من مستويات الشبكة .

إن (h^{-1} , k^{-1} , l^{-1}) هي أجزاء محاور مستوي الشبكة البلورية الأول (m=1) مقاساً بوحدة قياس هي ثابت الشبكة البلورية a_0 (انظر الشكل 5) ، وبما أن المقادير h , k , l تمثل مجموعة وحيدة من مستويات الشبكة لذا تعطى المجموعة الرمز (h k l) .



الشكل (5): تمثيل ثنائي البعد لمجموعة المستويات البلورية (0 3 0) .

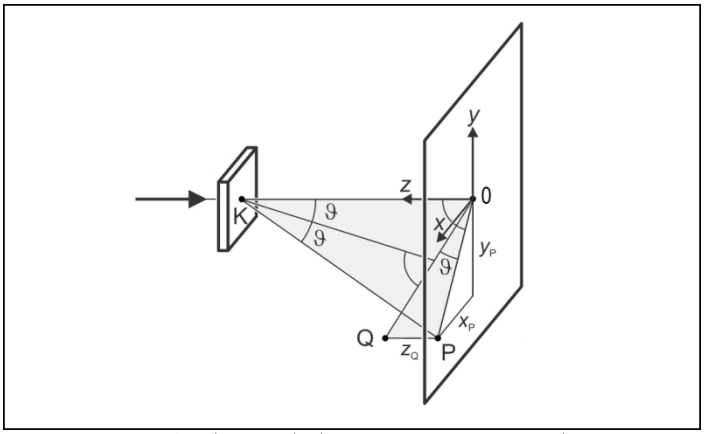
- دراسة مخطط لاو:

تتم دراسة مخطط لاو بإسناد مجموعة مستويات الشبكة التي تسبب التناثر إلى إحدى الانعكاسات المشاهدة على فيلم أشعة -X ، ولهذا يتم اختيار جملة الإحداثيات بحيث تكون نقطة المبدأ موافقة لنقطة الفراغ التي يرد فيها شعاع -X على الفيلم دون انعراج . يكون فيلم أشعة -X معامداً للشعاع الوارد ، أي يقع في المستوي (oxy) (انظر الشكل 6) ، ويكون توجيه المحور Z بحيث يكون معاكساً لاتجاه انتشار شعاع -X الوارد الذي يخترق سطح البلورة عند نقطة K . إن الجزء غير المنعرج من الشعاع يصطدم بفيلم الأشعة عند نقطة المبدأ 0 . إن جزء الشعاع المنعرج عند النقطة K الذي يحقق شرط لاو (2) يبرز من البلورة بزاوية 2θ بالنسبة إلى اتجاه الشعاع الأولي ويصطدم بفيلم أشعة -X عند النقطة (x_p , y_p , 0) P ، وبالتالي يكون :

$$\tan 2\theta = \frac{\sqrt{x_p^2 + y_p^2}}{L} \qquad (9)$$

حيث L: المسافة بين البلورة وفيلم أشعة -X .

الشكل (6): التمثيل الهندسي لشعاع -X المنعرج عند النقطة K من البلورة



والذي يخترق مستوي الفيلم في النقطة P .

في الشكل 6 ، تكون مجموعة مستويات الشبكة (h, k, l) ، التي تقود إلى الانعكاس بزاوية 2θ ، موازيةً لاتجاه منصف القطاع الزاوي 2θ . إن الزاوية بين المستقيم **OQ** العمود على المنصف ، والمستقيم **OP** هي θ ، وحيث إن Q هي نقطة تقاطع المستقيم **OQ** مع مواز للمحور Z من النقطة P ، تكون إحداثيات الشعاع **OQ** هي (x_Q , y_Q , z_Q) ومنه:

$$\tan \theta = \frac{z_Q}{\sqrt{x_Q^2 + y_Q^2}} \qquad (10)$$

ويكون **OQ** موازياً لشعاع البلورة العكسية **G** ، وبما أن $x_Q = x_P$ و $y_Q = y_P$ إضافة إلى المعادلة (15) نجد:

$$z_Q = \sqrt{x_Q^2 + y_Q^2 + L^2} - L \qquad (11)$$

إن البلورات المستخدمة في هذه التجربة قد تم قطعها موازية للمستوي (100) وبالتالي محاورها البلورية تتطابق مع نظام إحداثيات المخبر، وبما أن الشعاعين **OQ , G** متوازيان ينتج لدينا :

$$h : k : l = x_Q : y_Q : z_Q \qquad (12)$$

إن قيم h , k , l التي نبحث عنها هي أصغر ثلاثية من الأعداد الصحيحة تحقق المعادلة (12) وهي تسمح بحساب قيم جميع الثوابت التي تؤثر في عملية الانعراج . يتم الحصول على قيمة تباعد مستويات الشبكة d من المعادلة (7) وطول الموجة من المعادلة (6) ، وتصبح زاوية براغ θ وفقاً للمعادلتين (10 , 12) على الشكل:

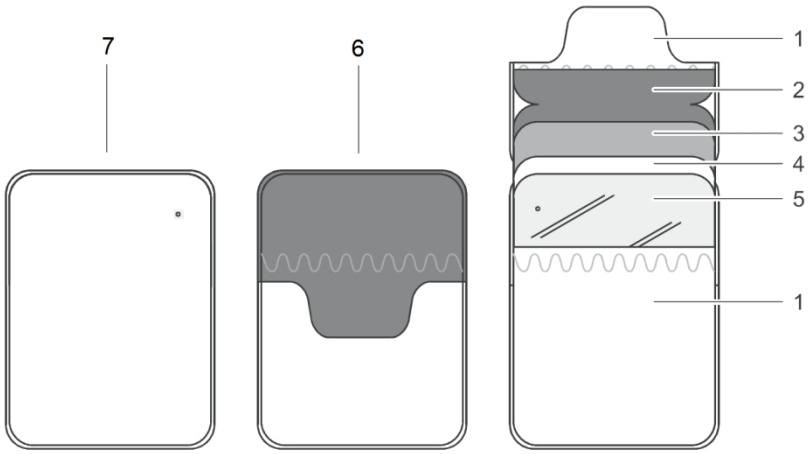
$$\theta = \arctan\left(\frac{l}{\sqrt{h^2 + k^2}}\right) \qquad (13)$$

يستخدم في هذه التجربة منبع من المولبدن الذي يعطي طيفاً مستمراً من الأشعة السينية كما في الشكل (8) . وعليه فإن كل مجموعة من المستويات البلورية المتوازية تنتقي من الطيف طول الموجة المناسب الذي يحقق شرط براغ . لهذا فكل نقطة ستظهر على الفيلم هي نتيجة انعراج طول موجة معين من الطيف على مستويات بلورية معينة .

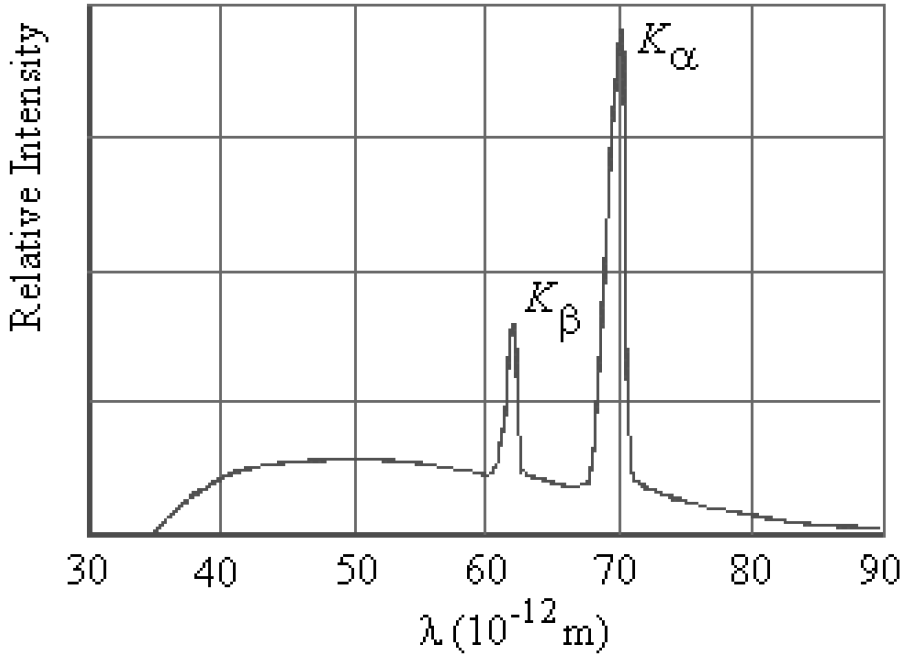
3 - أدوات القياس و طرائق العمل :

☆ - الأجهزة و الأدوات التجريبية :

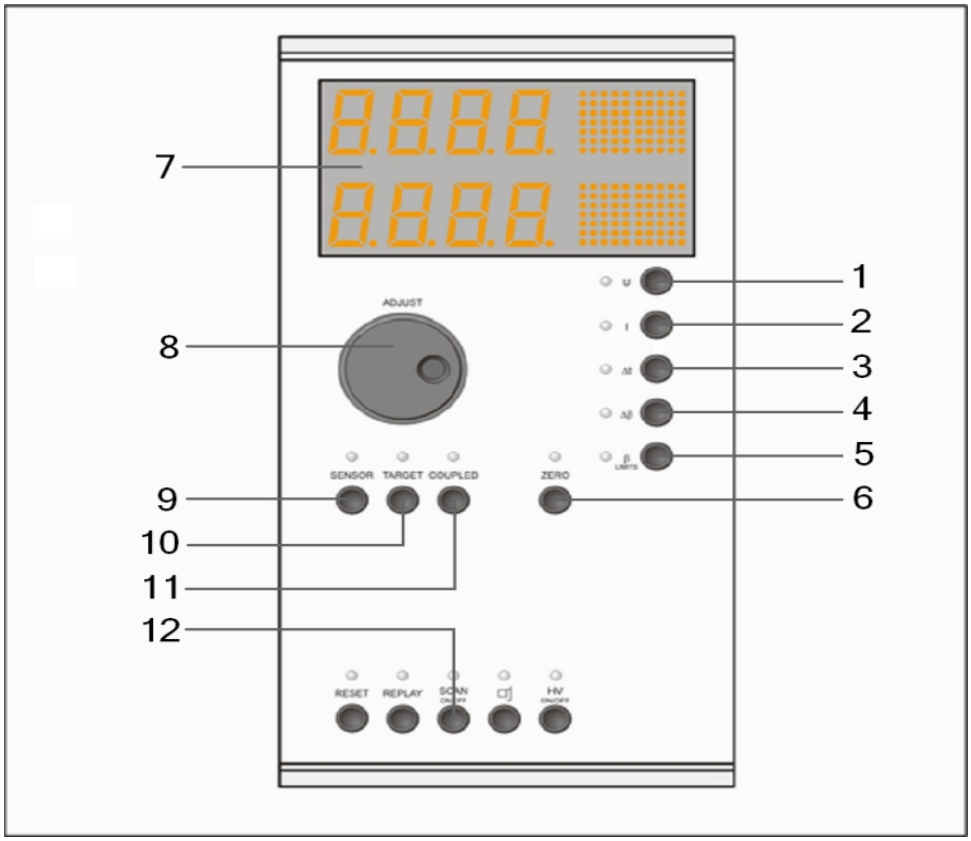
- منبع للأشعة السينية 81 554 .
- بلورة وحيدة من مادة NaCl .
- فيلم حساس للأشعة السينية (الشكل 7) .
- صندوق إظهار الفيلم .
- مُظهِر و مُثبِّت .
- ورق مليمتري شافّ .



الشكل (7): فيلم الأشعة السينية المستخدم في التجربة . 1: الغلاف الخارجي للفيلم
2: غلاف ورقي داخلي ، 3: الفيلم البلاستيكي ، 4: طبقة من الكرتون
5: طبقة من الرصاص ، 6: الوجه الخلفي للفيلم ، 7: الوجه الأمامي للفيلم



الشكل (8) : طيف مصعد المولبدن .



الشكل (9) : الأزرار الرئيسية في منبع الأشعة السينية (X-Ray apparatus) .

1: ضبط الجهد العالي المطبق على صمام توليد الأشعة.

2: ضبط التيار المار بصمام توليد الأشعة (تيار الإصدار).

3: ضبط الفاصل الزمني بين قياسين متتاليين .

4: ضبط الفاصل الزاوي بين قياسين متتاليين .

5: ضبط الزاويتين الكبرى والصغرى لبدء القياس وتوقفه .

6: زر التصفير . 7: شاشة العرض .

8: مفتاح تغيير المتحولات . 9: تفعيل حركة العداد .

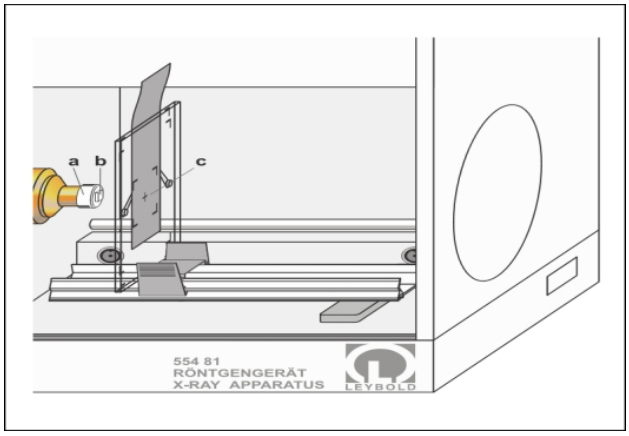
10: تفعيل حركة العينة . 11: تفعيل حركة العينة مع الكاشف بطريقة 2θ .

12: زر بدء القياس .

☆ - الإعداد التجريبي:

يوضح الشكل 10 كيفية إعداد التجربة :

1. ركب بلورة NaCl بعناية على ثقب الحظار (a) بوساطة لاصق شفاف.
2. علق مسدّد الحزمة ودوّره بحذر بحيث تكون أطراف البلورة الخارجية مستقيمة بشكل أفقي (أو عمودي) قدر الإمكان.



الشكل (10) الإعداد التجريبي : a: الحظار ، b: البلورة المدروسة ، c: الفيلم

☆ - ملاحظات مهمة :

1 - يحفظ الفيلم عادة ضمن مغلف داخله أسود ، ويوضع عادة عند أحد وجهي المغلف رقاقة معدنية ويبقى الوجه الآخر مغطى بورق المغلف فقط ، لذلك يجب وضع الوجه الأبيض من المغلف (الوجه الأمامي شكل (7-7)) مقابلاً لورود الأشعة السينية .

2 - عند التحميض عليك تمييز الفيلم عن الطبقة الكرتونية أو الطبقة المعدنية من خلال الملمس البلاستيكي للفيلم .

☆ - الإجراء التجريبي :

1- ثبت فيلم أشعة -X في منتصف حامل الفيلم ، وتأكد من أن سطح الفيلم مستو بشكل كامل ، وأن وجهه الأمامي (الشكل 7-7) هو المقابل للبلورة .

2- ثبت حامل الفيلم على سكة التجربة ، وركِّب سكة التجربة في حجرة التجربة لأنبوب أشعة -X .

3- قم بتحريك حامل الفيلم بحيث تكون المسافة بين البلورة و سطح الفيلم 15 mm أو 20 mm (تتغير المساحة التي يغطيها المخطط على الفيلم بتغيير المسافة بين البلورة والفيلم).

4- اضبط الجهد العالي لأنبوب الأشعة السينية على القيمة U = 35 KV وذلك بالضغط على الزر 1 ، ثم تدوير المفتاح 8 حتى يظهر على شاشة العرض السوداء " 35.0KV " ، الشكل (9) .

5- اضبط تيار الإصدار على القيمة I = 1.00 mA وذلك بالضغط على الزر 2 ثم تدوير المفتاح 8 حتى يظهر على الشاشة السوداء " 1.00 mA " .

6- اجعل زمن القياس $\Delta t = 2400$ s وذلك بالضغط على الزر 3 ، ثم تدوير المفتاح 8 حتى يظهر على الشاشة السوداء " 2400 s " ، تستغرق هذه العملية بعض الوقت * .

7- اجعل التغير في الزاوية $\Delta\beta = 0^o$ ، وذلك بالضغط على الزر 4 ، ثم تدوير المفتاح 6 ليظهر على الشاشة السوداء "0" .

8- ابدأ عملية تعريض الفيلم للأشعة المنعرجة عن البلورة بالضغط على زر SCAN ، الزر رقم 12 .

9- عند انتهاء زمن التعريض قم بإخراج حامل الفيلم من على سكة التجربة .

10- قم بتظهير فيلم أشعة -X وفقاً للتعليمات المرفقة بالفيلم .

---

* : إذا كان زمن التعريض أطول فإن النقاط بجوار المركز ستختفي بسبب إشعاعات x غير المنتثرة بينما تبقى النقاط الأبعد عن المركز قابلة للتمييز.

- طريقة تظهير فلم أشعة -X :

1- قم بتحضير محلولَي الـمُظهِر والمثبِّت حسب التعليمات المذكورة على علبتهما ، وضعهما في الوعائين المخصصين لكل منهما ، ثم أدخل الوعائين في صندوق التحميض في الموقع المخصص لكل وعاء ، واحذر من الخلط بينهما .

2- أخرج الفيلم من جهاز أشعة -X وأدخله في صندوق التحميض ، ثم افتحه هناك في الداخل بعد التأكد من إغلاق الصندوق بإحكام منعا لتعرض الفيلم للضوء .

3- ضع الفيلم في محلول الـمُظهِر أولا لمدة 3 دقائق (تأكد أنك تمسك الفيلم من طرفه بالملقط وأنك تضعه في الـمُظهِر أولاً حتى لا تتلفه) . حركه بلطف داخل المحلول ، واقلبه ، وتأكد من تعرض الوجهين مدة كافية للمُظهِر.

4- أخرج الفيلم من الـمُظهِر ثم جففه داخل الصندوق بتحريكه دقيقة بلطف بالهواء ثم ضعه في المثبِّت لمدة دقيقة .

5- أخرج الفيلم خارج الصندوق واغسله بالماء ، ثم اتركه ليجف مدة 10 دقائق .

6- ثبت قطعة من الورق الشافّ المدرج مليمترياً على فيلم أشعة -X بحيث يقع المركزان الإحداثيان فوق البقعة المركزية للفيلم ، كما في الشكل (C - 11) .

7- عين التناظرات التي تتمتع بها البقع المختلفة التي لها نفس الشدة تقريبا .

8- اختر إحدى النقاط واقرأ إحداثييها x_Q , y_Q بواحدة المليمتر ، وقم بحساب المركبة z_Q وفقاً للمعادلة (11).

9- حدد قيم المقادير h , k , l انطلاقا من العلاقة (12) بالاعتماد على التناسب ، كما يمكنك تحديد القرائن بالاستفادة من الجدول (2) .

10- احسب زاوية براغ θ من المعادلة (10) وقدّر الارتياب فيها ، واحسب تباعد مستويات الشبكة d من المعادلة (7) ، ثم احسب طول الموجة المنعرج λ من المعادلة (6) وقدّر الارتياب فيه .

11- كرر العمل السابق من أجل 5 نقاط أخرى على الأقل .

12- رتب نتائجك في الجدول التالي :

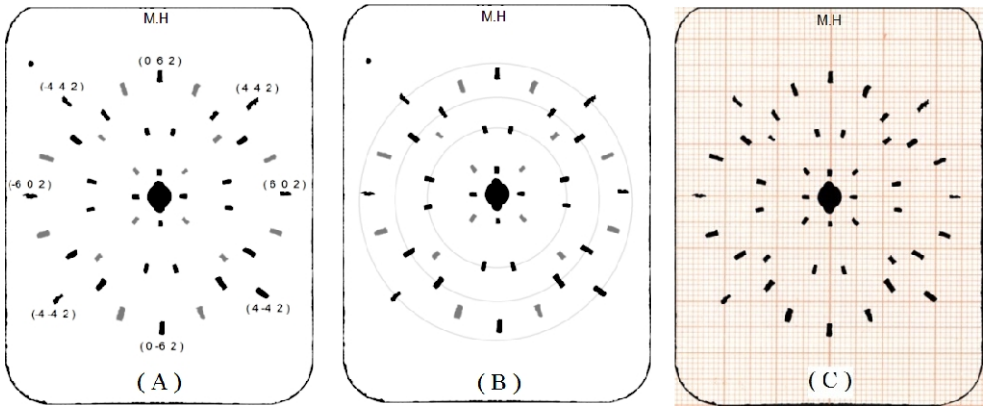
For NaCl : a_0 = 564.02 pm								
x_Q(mm)	y_Q(mm)	z_Q(mm)	*h*	*k*	*l*	d (pm)	θ^0	λ (pm)

4 – تقييم العمل التجريبي :

1 - كيف سيكون شكل الفيلم لو استخدمنا عينة متعددة البلورات بدلا من البلورة الأحادية ؟ وهل للشكل الناتج علاقة بقرائن ميلر ؟

2 - ما هي أوجه الشبه والاختلاف بين تجربتي براغ و لاو ؟

- نموذج للقياسات :



الشكل (11) : مخطط لاو لانعراج الأشعة السينية على بلورة NaCl .

(U = 35 KV , I = 1 mA , L = 30 mm , Δt = 4500 s)

(A) : مخطط لاو ، وتظهر عليه قرائن ميلر لبعض النقاط (لاحظ التناظر ، وعلاقة ذلك بقرائن ميلر) ، (B) : مخطط لاو وتظهر عليه رتب الانعراج .

(C) : الفيلم والورقة المليمترية الشافة .

	$\frac{X_Q}{mm}$	$\frac{Y_Q}{mm}$	$\frac{Z_Q}{mm}$	h	k	l	$\frac{X}{mm}$	$\frac{Y}{mm}$
1	17.2	8.4	9.3	4	2	2	15.0	7.5
	-7.8	-15.2	7.7	-2	-4	2	-7.5	-15.0
	7.8	-15.2	7.7	2	-4	2	7.5	-15.0
	15.8	-8.0	8.2	4	-2	2	15.0	-7.5
2	12.6	-0.4	4.6	6	0	2	11.2	0.0
	0.2	14.5	5.9	0	6	2	0.0	11.2
	-13.2	-0.1	5.0	-6	0	2	-11.2	0.0
	0.0	-11.2	3.7	0	-6	2	0.0	-11.2
3	11.5	3.6	4.2	6	2	2	10.0	3.3
	4.2	12.4	4.9	2	6	2	3.3	10.0
	-4.3	13.0	5.3	-2	6	2	-3.3	10.0
	-12.2	4.0	4.7	-6	2	2	-10.0	3.3
	-11.2	-3.9	4.1	-6	-2	2	-10.0	-3.3
	-3.3	-10.2	3.4	-2	-6	2	-3.3	-10.0
	3.2	-10.0	3.3	2	-6	2	3.3	-10.0
	10.5	-3.9	3.7	6	-2	2	10.0	-3.3
4	9.0	9.2	4.8	4	4	2	8.6	8.6
	-11.0	11.0	6.6	-4	4	2	-8.6	8.6
	-9.0	-9.2	4.8	-4	-4	2	-8.6	-8.6
	9.0	-9.0	4.7	4	-4	2	8.6	-8.6
5	9.0	5.8	3.4	6	4	2	7.5	5.0
	6.3	9.2	3.7	4	6	2	5.0	7.5
	-6.5	9.8	4.1	-4	6	2	-5.0	7.5
	-9.5	6.2	3.8	-6	4	2	-7.5	5.0
	-8.2	-5.5	3.0	-6	-4	2	-7.5	-5.0
	-5.2	-8.0	2.8	-4	-6	2	-50	-7.5
6	6.4	6.2	2.4	3	3	1	5.3	5.3
	-6.8	6.8	2.8	-3	3	1	-5.3	5.3
	-5.8	-5.8	2.1	-3	-3	1	-5.3	-5.3
	5.3	-5.3	1.8	3	-3	1	5.3	-5.3
7	6.8	1.3	1.5	5	1	1	6.0	1.2
	1.8	7.8	2.0	1	5	1	1.2	6.0
	-1.2	8.0	2.0	-1	5	1	-1.2	6.0
	-7.2	1.2	1.7	-5	1	1	-6.0	1.2
	-7.0	-1.5	1.6	-5	-1	1	-6.0	-1.2

الجدول (1) : إحداثيات النقاط وقرائن ميلر المقابلة (L = 15 mm) حيث تتغير الإحداثيات بتغير L

5 - الكلمات المرجعية :

- محاور بلورية	- Crystal axes
- مُظهِر	- Developer
- قرائن ميلر الموسعة	- Extended Miller indices
- إظهار الفيلم	- Film developing
- مثبِّت	- Fixer
- شرط لاو	- Laue Condition
- مخططات لاو	- Laue diagrams
- انعراج لاو	- Laue diffraction
- قرائن لاو	- Laue indices
- الشبكة العكسية	- Reciprocal lattice
- أشعة الشبكة العكسية	- Reciprocal lattice vectors
- البنية الفراغية للشبكة	- Spatial lattice structure
- انعراج بالنفاذ	- Transmission diffraction
- متجهات الواحدة	- Unit vectors

6 - المراجع :

1- المرجع 1 - الفصل الثاني .

2 - المرجع 2 - الفصلان الثاني و الثالث .

3 - المرجع 4 - الفصل الثالث .

4 - النشرتان التجريبيتان (P7.1.2.2 & 800 554) من شركة ليبولد " LEYBOLD DIDACTIC " .

التجربة 5 :

دراسة انعرج الإلكترونات على عينة متعددة البلورات

1- الغاية من التجربة :

1- إظهار الخواص الموجية للإلكترونات بدراسة انعراجها على عينة متعددة البلورات .

2- قياس التباعد بين المستويات البلورية لعينة متعددة البلورات من الغرافيت اعتماداً على انعراج الإلكترونات .

2- المبدأ النظري:

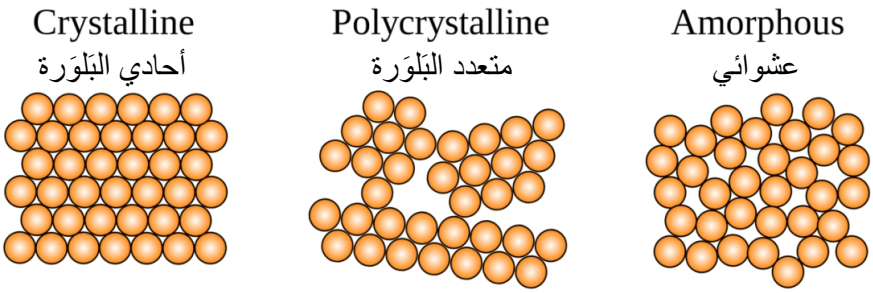
كان العالم الفرنسي *لوي دوبروي* *Louis de Broglie* أول من اقترح الخواص الموجية للجسيمات في العام 1924 ، فافترض أن طول الموجة المادّي لجسيم يتحرك باندفاع P يعطى بالعلاقة :

$$\lambda = \frac{h}{P} \qquad (1)$$

حيث:

λ : طول موجة دوبروي ، h : ثابتة بلانك ، P : اندفاع الجسيم .

وقدمت التجربة التي أجراها *دافيسون* و جيرمر عام 1927 الدليل على الطبيعة الموجية للالكترونات المتحركة ، عندما قاما بدراسة انعراجها على النيكل المتبلور . إذا سقطت حزمة من الإلكترونات على عينة متعددة البلورات (الشكل 1) أو مسحوق مادة بلورية ، وكان طول موجة الإلكترونات من رتبة المسافة بين الذرات (من رتبة الأنغستروم) ، فستجد هذه الحزمة دوماً عدداً كافياً من البلورات الصغيرة المتجهة بالنسبة إلى منحى الحزمة الواردة بشكل يحقق شرط براغ ، وهذا الانعراج شبيه بانعراج الأشعة السينية على البنى البلورية .



الشكل (1)

إن أسهل طريقة للحصول على حزمة من الإلكترونات والتحكم بطاقتها هي توليد هذه الإلكترونات حرارياً ، ومن ثم تسريعها بتطبيق فرق كمون عالٍ ، وعندها يمكن حساب طاقة الإلكترونات من العلاقة :

$$E = e\,U \qquad (2)$$

حيث:

E : طاقة الإلكترون المُسرَّع ، e : شحنة الإلكترون ، U : فرق الكمون المطبق .

بالتعويض في العلاقة (1) نحصل على علاقة طول موجة الإلكترون بدلالة الكمون المطبق U :

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2\,e\,m_e\,U}} \qquad (3)$$

حيث : m_e : كتلة الإلكترون .

تبين هذه العلاقة أنه بإمكاننا التحكم بطول موجة الإلكترون عن طريق تغيير فرق كمون التسريع الذي يخضع له . نذكر أن شرط انعراج براغ هو :

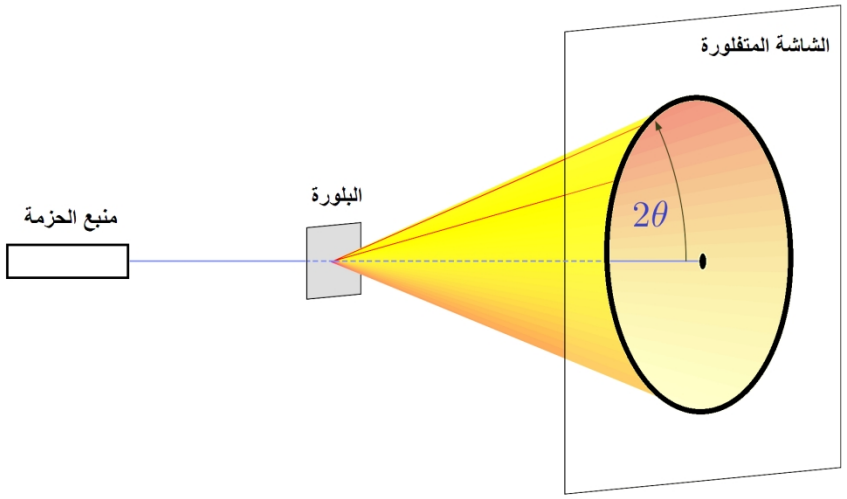
$$2\,d\sin\theta = n\,\lambda \qquad (4)$$

حيث :

d: التباعد بين المستويات البلورية θ: زاوية براغ

n: رتبة التداخل λ: طول الموجة .

تبرز الحزم المنعرجة بشدة عالية (أهداب التداخل البناء) وفق مولدات مخروط دوراني رأسه البلورة وينطبق محوره على محور الحزمة الواردة ، بينما تكون الزاوية التي تشكلها مولدات هذا المخروط مع محور الحزمة الأصلية هي 2θ ، حيث θ هي زاوية براغ (الشكل 2) .

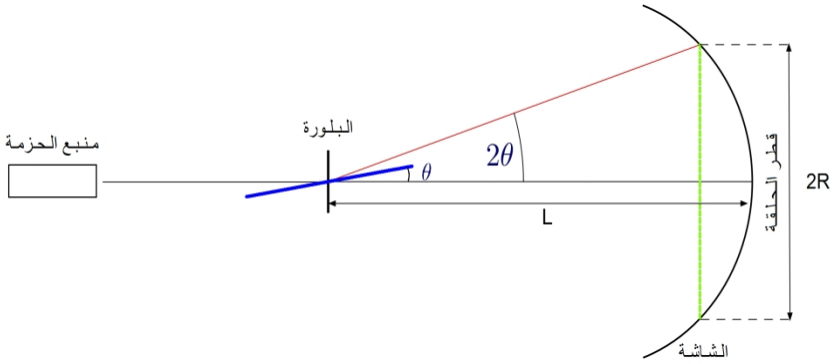


الشكل (2)

وبما أنه توجد في كل بلورة مجموعات كثيرة من المستويات البلورية المتوازية التي يتميز كل منها بقيمة معينة للمسافة d الفاصلة بين مستويين متتاليين منها ، فستشاهد عدة مخاريط متمحورة ومختلفة في قياس زاوية الرأس .

واضح أن زوايا رؤوس المخاريط تتزايد مع تناقص d (وفق العلاقة 4) ، فإذا وضع في طريق الحزم الإلكترونية المنعرجة شاشة متفلورة ، ظهرت عليها حلقات متمركزة هي أثر لمخاريط الانعراج على مستوي الشاشة .

إذا كانت L المسافة بين الشاشة والبلورة وكان R نصف قطر حلقة الانعراج بسبب المستويات البلورية التي تفصل بينها المسافة d ، فإنه من الممكن استخلاص علاقة تربط بين طول موجة الإلكترونات المنعرجة والتباعد بين المستويات البلورية .



الشكل (3)

فبملاحظة الشكل (3) وبسبب كون θ صغيرة ، يمكننا أن نكتب :

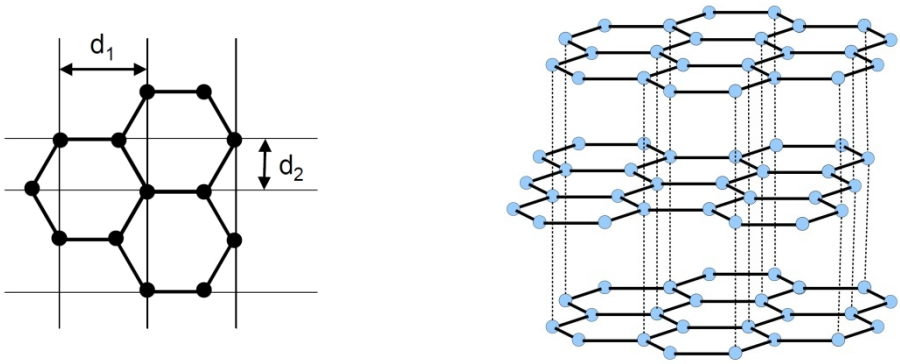
$$\tan 2\theta = \frac{R}{L} \approx \sin 2\theta = 2\sin\theta\cos\theta \approx 2\sin\theta \quad (5)$$

فإذا عوضنا ما سبق في علاقة براغ (4) لوجدنا :

$$R = \frac{n\,L}{d}\,\lambda \qquad (6)$$

وهي العلاقة التي تسمح بإيجاد التباعد بين المستويات البلورية d لعينة الغرافيت متعددة البلورات ، وذلك بدراسة تغيرات أنصاف أقطار حلقات الانعراج R بدلالة الطول الموجي λ للإلكترونات المنعرجة .

تُستخدم في هذه التجربة عينة متعددة البلورات من الغرافيت الذي يتميز ببنية بلورية سداسية في طبقات متتالية (الشكل 4) ، موضوعة في حبابة زجاجية مفرغة من الهواء تحوي أيضا مدفعاً إلكترونياً يولد حزمة الإلكترونات التي تسقط على البلورة و تنعرج مولدةً حزماً مخروطية . تم طلاء جزء من سطح الحبابة الزجاجية الداخلي بمادة متفلورة تضيء لدى اصطدام الإلكترونات بها ، فتتشكل عليها حلقات الانعراج التي يمكن قياس أنصاف أقطارها . تظهر عادة حلقتان فقط ، هما اللتان تقابلان أصغر قيمتين للزاوية θ ، أي تقابلان أكبر قيمتين للمسافة d ، وأصغر قيمة لرتبة التداخل n . إن قيمتي d اللتين يتم تعيينهما في هذه التجربة هما d_1 ، d_2 المبينتان في الشكل (4) ، وتكون رتبة التداخل لهاتين الحلقتين تساوي الواحد .



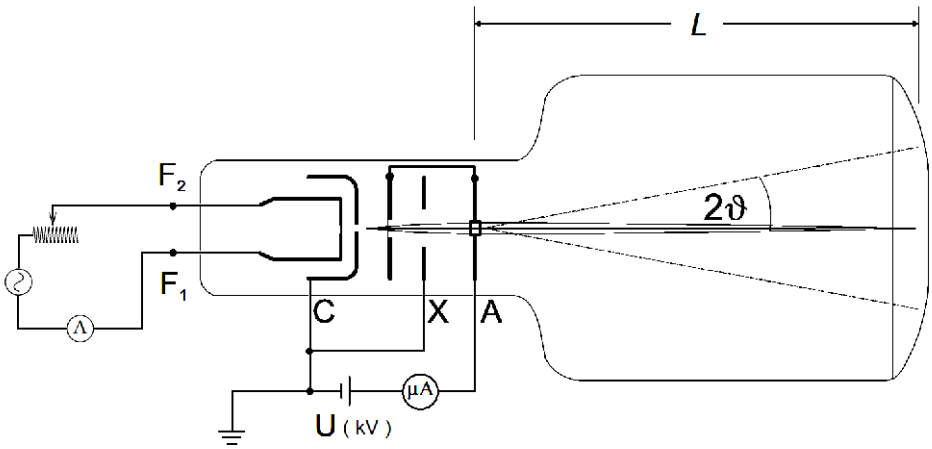
الشكل (4)

يتألف المدفع الإلكتروني (الشكل 5) من دارتين أساسيتين ، هما دارة التسخين و دارة التسريع . تتألف دارة التسخين من سلك عادة ما يكون من مادة التنغستين ، يتم تسخينه بتمرير تيار كهربائي متناوب فيه مما يؤدي إلى إصدار الإلكترونات حراريا ومن ثم يأتي دور دارة التسريع حيث يتم تطبيق فرق عال في الكمون بين قطبي كل منهما على شكل قرص مثقوب المركز لتحريك الإلكترونات وتسريعها .

3- أدوات القياس و طرائق العمل :

☆ - الأجهزة والأدوات التجريبية :

- أنبوب انعراج الإلكترونات ، المسافة بين البلورة والشاشة $L = 13.5 \pm 0.1$ cm
- منبع تغذية فرق الكمون العالي 0 - 10 KV .
- مقياس فرق الكمون العالي حتى 6 KV .
- مقياس تيار متناوب .
- - مقياس تيار من مرتبة الميكروأمبير .
- معدلة 11 Ω .
- منبع تيار متناوب 6 V .
- قدم قنوية بلاستيكية .



الشكل (5) : أنبوب انعراج الإلكترونات مع توصيل الدارة .

F_1 ، F_2 : مربطا دارة التسخين ، C: المهبط ، X: عدسة مغنطيسية لتركيز الحزمة

A: المصعد ، وتثبت عليه البلورة في المركز .

الشكل (6) : منبع تغذية فرق الكمون العالي :

1: زر التشغيل ، 2: مفتاح لضبط فرق الكمون ، 3: أرضي أول .

4: القطب الصفري ، 5: القطب السالب ، 6: القطب الموجب 7 - أرضي ثانٍ .

☆ - الإعداد التجريبي:

يبين الشكل (5) التوصيل العام للتجربة :

1- صل المربطين (F_1 ، F_2) بمنبع تيار التسخين ومقياس تيار التسخين والمعدلة التي سنستخدمها للتحكم بتيار التسخين ، على التسلسل واضعاً مقاومة المعدلة عند أكبر قيمة .

2- تأكد من وصل المهبط (C) لأنبوب الانعراج والمربط (X) بالقطب السالب لمنبع الكمون العالي (الشكل 6) ، ثم صل المصعد (A) لأنبوب الانعراج بمقياس التيار الميكروي ، ومنه إلى القطب الموجب لمنبع الكمون العالي .

3- تأكد من وصل القطب السالب في منبع الكمون العالي بالأرضي الأول (3) شكل 6 .

4- تأكد من وصل مقياس الكمون العالي على التفرع بين قطبي منبع الكمون .

☆ - ملاحظات مهمة :

1- يجب الحذر لدى التعامل مع أجهزة الكمون العالي تجنباً لحدوث صدمة كهربائية.

2- قبل تشغيل الجهاز ، تأكد من أن مفتاح التحكم بالكمون عند الصفر قبل زيادة قيمة الكمون إلى القيمة المرغوبة ولا تلمس المرابط العارية .

3- أبعد علبة التغذية بعيداً عن أنبوب الانعراج كي لا يؤثر الحقل المغنطيسي المتولد عنها في حزمة الإلكترونات ، واستخدم أيضا القدم القنوية البلاستيكية .

4- لا تتجاوز القيم العظمى للتيارات كي لا تتلف البلورة (50 µA لتيار حزمة الإلكترونات و 1 A لتيار التسخين) .

✯ - الإجراء التجريبي :

1- شغل منبع تيار التسخين ، واضبط التيار على القيمة (0.8 A) .

2- شغل منبع الكمون العالي ، واضبط الكمون على القيمة (3 KV)، مراعياً عدم تجاوز تيار الإلكترونات قيمة (40 µA) . لاحظ ظهور نقطة مركزية وحلقتي انعراج مضيئتين على الشاشة المتفلورة .

3- قم بقياس قطري الحلقتين الأولى و الثانية (D_1 , D_2) بالقدم القنوية .

4- قم بزيادة الكمون تدريجيا من القيمة (3 KV) إلى (5 KV) وبخطوة (0.5 KV) ، وقس في كل خطوة القطرين (D_1 , D_2) .

5- أعد التجربة مرتين على الأقل ، ثم رتب نتائجك في جدول كالتالي :

U (V)	λ (m)	D_1 (m) 1	D_1 (m) 2	D_1 (m) 3	$\overline{R_1}$ (m)	D_2 (m) 1	D_2 (m) 2	D_2 (m) 3	$\overline{R_2}$ (m)
3000									
3500									
4000									
4500									
5000									

6- ارسم على ورق مليمتري تغيرات نصفي القطرين $\overline{R_1}$ و $\overline{R_2}$ بدلالة طول موجة الإلكترونات λ واستفد من الميل في حساب d_1 و d_2 من العلاقة (6) ، وقدّر الارتياب فيهما .

4- تقييم العمل التجريبي:

1 - ما شكل العلاقة بين فرق الكمون المطبق ونصف قطر الحلقة التي تدرسها ؟

2 - لماذا لا يظهر لديك على الشاشة المتفلورة إلا حلقتان ؟ هل يمكن رصد أكثر من هاتين الحلقتين ؟ في حال إمكانية رصد أكثر من حلقتين بأقطار أكبر ، هل يصح

تلقيها على حاجز مستوي ؟ ناقش ذلك .

5 - الكلمات المرجعية :

- دارة تسريع - Accelerating circuit
- مخروط - Cone
- متبلور - Crystalline
- فرضية دوبروي - De Broglie conjecture
- حلقة انعراج - Diffraction ring
- أنبوب الانعراج - Diffraction tube
- حزمة إلكترونات - Electron beam
- مدفع إلكتروني - Electron gun
- شاشة متفلورة - Fluorescent screen
- دارة تسخين - Heating circuit
- عينة أحادية البلورة - Monocrystal sample
- خواص جسيمية - Particle properties
- عينة متعددة البلورات - Polycrystal sample
- خواص موجية - Wave properties

6 - المراجع :

1- المرجع 1 - الفصلان الأول و الثاني .
2- المرجع 2 - الفصلان الثاني و الثالث .
3 - المرجع 6 - الفصل الثالث .
4- النشرة التجريبية (P6.1.5.1) من شركة ليبولد " Leybold didactic " .

التجربة 6 :

أثـر هـول فـي الـمـعـادن

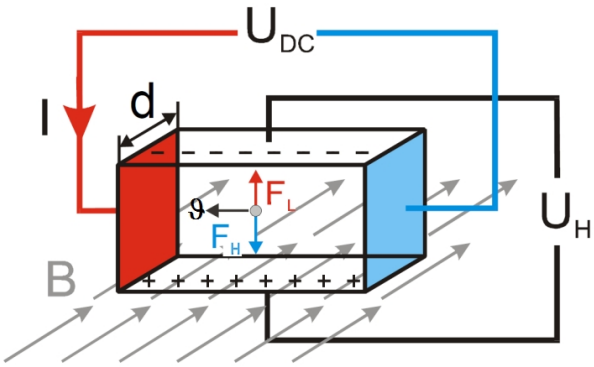
1- الغاية من التجربة :

1- دراسة كمون هول U_H باعتباره تابعا لحقل التحريض المغنطيسي B عند تيار عينة I ثابت .

2- تحديد قطبية حاملات الشحنة المسؤولة عن تيار النقل في المعدن و حساب كثافتها .

2- المبدأ النظري :

إذا وضعت عينة من ناقل معدني على شكل شريحة متوازية الوجوه يمر فيها تيار كهربائي I في الاتجاه ox ، في حقل تحريض مغنطيسي B في الاتجاه oz ، ينشأ في العينة حقل كهربائي في الاتجاه oy يسمى حقل هول E_H ، وبالتالي يلاحظ نشوء فرق في الكمون يسمى كمون هول U_H . إن السبب في ظهور كمون هول هو انحراف حاملات الشحنة المتحركة الخاضعة للحقل المغنطيسي تحت تأثير قوة لورنتز ($\overrightarrow{F_L} = -e\overrightarrow{\vartheta} \times \overrightarrow{B}$) التي يمكن التنبؤ باتجاهها وفقاً لقاعدة اليد اليمنى.



الشكل (1): شكل توضيحي يبين أثر هول في المعادن .

يؤدي انحراف حاملات الشحنة إلى أن تتوضع ، بصورة وسطية ، الشحنات السالبة على أحد وجهي العينة ، و الشحنات الموجبة على الوجه المقابل ، فيتولد عن توزع الشحنات هذا قوة كهربائية ($\overrightarrow{F_H} = -e\overrightarrow{E_H}$) معاكسة لقوة لورنتز . في الحالة المستقرة ، تتساوى القوتان الكهربائية والمغنطيسية بالشدة وتتعاكسان بالاتجاه :

$$-e\overrightarrow{E_y} = e\overrightarrow{\vartheta_x} \times \overrightarrow{B_z} \qquad (1)$$

باستعمال شعاع كثافة تيار الإلكترونات :

$$\overrightarrow{J_x} = -e\, n\, \overrightarrow{\vartheta_x} \quad , \quad J_x = \frac{I_x}{A} = \frac{I_x}{w\, d} \qquad (2)$$

وبالإسقاط على المحاور الإحداثية والتعويض عن الحقل بالكمون ($E_H = \frac{U_H}{w}$):

$$-e\, n\, \frac{U_H}{w} = \frac{I\, B}{w\, d} \qquad (3)$$

$$U_H = -\frac{I\, B}{e\, n\, d} = R_H \frac{I\, B}{d} \qquad (4)$$

$$R_H = \frac{-1}{en} \qquad (5)$$

حيث :

U_H : كمون هول .
n : كثافة الإلكترونات في المادة .
I : التيار المار في العينة .
d : سماكة العينة .
B : حقل التحريض المغنطيسي
w : عرض العينة .
e : شحنة الإلكترون .
R_H : معامل هول .

تبين المعادلة (4) أنه يمكن تحديد قطبية حاملات الشحنة المسؤولة بشكل رئيسي عن التيار المار في المعدن من إشارة كمون هول U_H ، وتظهر المعادلة (5) أن معامل هول للمعادن هو سالب دوما ، وهذا صحيح في المعادن التي يكون سطح فيرمي لها كروي الشكل كما في المعادن النبيلة ، إلا أن لبعض المعادن (مثل التنغستين W) معامل هول موجب ، ويعود ذلك إلى التعقيد في سطح فيرمي لها .

يمكن حساب تركيز حاملات الشحنة ومعامل هول تجريبياً عن طريق قياس كمون هول باعتباره تابعاً لحقل التحريض المغنطيسي من أجل تيار عينة ثابت أو من قياس كمون هول باعتباره تابعاً لتيار العينة من أجل حقل تحريض مغنطيسي ثابت .
ويمكن من حساب تركيز الإلكترونات ، في المعادن التي يكون سطح فيرمي لها كروي الشكل ، معرفة عدد إلكترونات النقل Z التي تسهم بها الذرة الواحدة من ذرات المعدن * ، وذلك بقسمة تركيز الإلكترونات n على تركيز ذرات المعدن N :

$$Z = \frac{n}{N} \quad ; \quad N = \frac{m}{V} \qquad (6)$$

حيث:
m : عدد الذرات في خلية الوحدة . V : حجم خلية الوحدة .

ويمكن حساب N من عدد أفوكادرو N_A ، والكتلة المولية M ، والكثافة الحجمية ρ :

$$N = \frac{\rho}{M} N_A \qquad (7)$$

3- أدوات القياس و طرائق العمل :

☆ - الأجهزة والأدوات التجريبية :

- عينة من معدن الفضة بسماكة $d = 50 \pm 1\ \mu m$.
- وشيعتان كل منهما ذات 250 لفة . - علبة لمجس حقل التحريض المغنطيسي
- منبع لتيار العينة حتى 20 A . - حاسب مجهز ببرنامج Cassy Lab .
- منبع لتيار الوشائع حتى 10 A . - وحدة كاسي .
- مقياس للتيار حتى 30 أمبير . - علبة (30 A) لقياس التيارات العالية .
- نواة حديدية على شكل حرف U . - أسلاك توصيل تتحمل تيارات عالية .
- مجس حقل التحريض المغنطيسي . - (μV-Box) لقياس الكمونات المنخفضة.

* العدد Z لا يعبر بالضرورة عن تكافؤ المعدن ، حيث أنه يوجد لأغلب المعادن أكثر من تكافؤ .

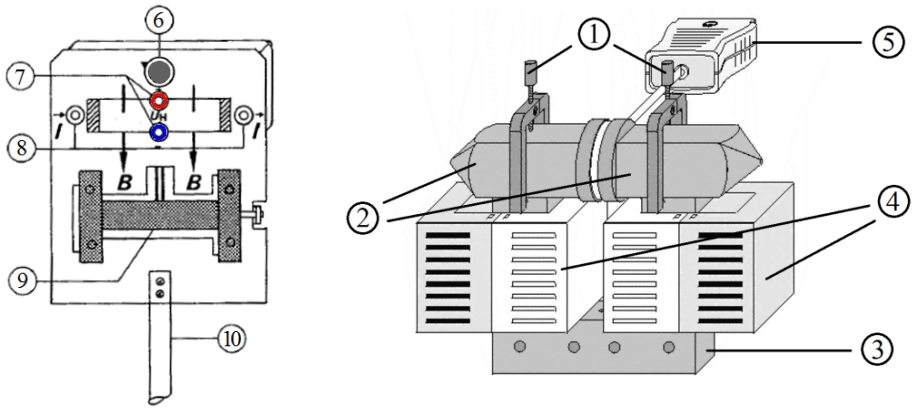
☆ - الإعداد التجريبي:

1 - تحقق من تركيب الوشيعتين والنواة الحديدية والقطبين كما في الشكل (2) .

2 - تأكد من توازي سطحي قطبي المغنطيس الكهربائي ومن تركيب العينة مع الحامل في المنتصف بين القطبين بحيث تكون المسافة بين القطبين حوالي 0.5 سم ، وبإمكانك تعديل المسافة من خلال حلّ براغي التثبيت (1) المبينة في الشكل (2) ، ودفع الأقطاب باتجاه العينة ، ثم تثبيت البراغي من جديد .

3 - ركب مجس حقل التحريض المغنطيسي (5) على الحامل ، ثم أدخل رأس المجس بعناية بين قطبي المغنطيس بحيث يكون أقرب للعينة .

4 - قم بتمرير تيار متناوب قيمته 5 A في الملفات لفترة قصيرة ، ثم أنقصه تدريجياً حتى يقوم التيار بإزالة مغنطة الحديد المكوِّن للنواة والقطبين .



الشكل (2) : إعداد تجربة أثر هول .

1: براغي التثبيت 2: القطبين المغنطيسيين 3: النواة الحديدية ، 4: الوشائع 5: مجس الحقل المغنطيسي ، 6: مفتاح تصفير الكمون ، 7: مأخذان لقياس كمون هول ، 8: مأخذان لتيار العينة ، 9: العينة المعدنية ، 10: حامل العينة .

إن الغاية من مفتاح تصفير الكمون هو ضمان قياس كمون هول بين نقطتين متناظرتين من طرفي العينة وذلك كي لا يؤثر تغيير تيار العينة على كمون هول .

☆ - ملاحظات مهمة :

1 - لا تدع منابع التيار تعمل لوقت طويل ، وذلك لتجنب سخونة العينة والأسلاك .
2 - لا تغير الأسلاك في التجربة ، فالأسلاك فيها مصنوعة لتتحمل تيارات عالية .
3 - لا تتجاوز حدود التيار القصوى (18A لتيار العينة و 8A لتيار الوشائع) .
4 - اجعل شاشة الحاسب بعيدة عن الوشائع كي لا تتأثر بالحقل المغنطيسي .

☆ - الإجراء التجريبي :

أولاً: معايرة الحقل المغنطيسي :

1 - ثبِّت علبة قياس التيارات العالية على المدخل Input (A) في جهاز الكاسي ثم صل منبع تيار الوشائع مع الوشيعتين والمدخل Input (A) على التسلسل .
2 - قم بتثبيت العلبة الموصولة بمجس حقل التحريض المغنطيسي على المدخل Input (B) في جهاز الكاسي .
3 - شغل برنامج الكاسي من أيقونته على سطح المكتب ، واضبط الإعدادات التالية :
4 - انقر بالزر الأيسر للماوس على Input (A) واختر :

Quantity: current I_{A1} , Meas. Range: -10 .. +10 A

5 - انقر بالزر الأيسر للماوس على Input (B) واختر :

Quantity: Magn. Flux Density B_{B1} , Meas. Range: -1 T .. +1 T

6 - انتقل إلى علامة التبويب Display واختر على المحور X تمثيل التيار I_{A1} ، ثم اختر على المحور Y تمثيل حقل التحريض المغنطيسي B_{B1} .
7 - انتقل إلى النافذة الفرعية Measuring Parameters واختر تسجيل القيم يدوياً وذلك بتفعيل الخيار Manual Recording ، ثم عد إلى النافذة الأساسية .
8 - مرر في الوشائع تيارا قيمته I = 1A ، وسجل قيمة حقل التحريض المغنطيسي المقابل بالضغط على زر تسجيل القيم ( ) أو بالضغط على F9 .
9 - قم بزيادة تيار الوشائع تدريجياً بخطوة 0.5A حتى القيمة 7A وسجل في كل

خطوة قيمة الحقل المقابلة ، ثم أطفئ المنبع فور انتهائك من القياس .

10 - احفظ الورقة البيانية لسلسلة نتائجك في ملف صوري ، وذلك بالضغط على الخيار (Copy Diagram : Bitmap) ، ثم لصقها في برنامج الرسام .

ثانياً: دراسة كمون هول باعتباره تابعاً للحقل المغنطيسي عند تيار عينة ثابت :

1 - استبدل بعلبة قياس التيارات العالية على المدخل (A) Input علبة قياس الكمونات الصغيرة (µV-box) ، وصل منبع تيار الوشائع إلى الوشيعتين مباشرة.

2 - قم بوصل طرفي العينة الشاقوليين (7) في الشكل (2) بالعلبة (µV-box) .

3 - صل منبع تيار العينة مع طرفي العينة الأفقيين (8) ومقياس التيار على التسلسل.

4 - شغل برنامج الكاسي من أيقونته على سطح المكتب ، واضبط الإعدادات التالية :

5 - انقر بيسار الماوس على (A) Input واختر :

Quantity: voltage U_{A1} , Meas. Range: -1 mV .. +1 mV

وانتبه إلى تفعيل خيار القيم الوسطية (Averaged Values) .

6 - انقر بيسار الماوس على (B) Input واختر :

Quantity: Magn. Flux Density B_{B1} , Meas. Range: -1 T .. +1 T

7 - انتقل إلى علامة التبويب Display واختر على المحور X تمثيل حقل التحريض المغنطيسي B_{B1} ، وعلى المحور Y تمثيل الكمون U_{A1} .

8 - انتقل إلى النافذة الفرعية Measuring Parameters ، واختر تسجيل القيم يدوياً وذلك بتفعيل الخيار Manual Recording ، ثم عد إلى النافذة الأساسية .

9 - مرر في العينة تيارا قيمته (I = 10A) ، ثم حرك مفتاح التصفير (6) في الشكل (2) حتى ينعدم فرق كمون هول تماما .

10 - سجل قيمة كمون هول بالضغط على زر تسجيل القيم ( ) أو بالضغط على F9 .

11 - شغل منبع تيار الوشائع ، وابدأ بزيادة شدة حقل التحريض تدريجياً من الصفر

وحتى القيمة (0.5 T) بخطوة (0.1 T)، وسجل في كل خطوة قيمة فرق الكمون.

12 - قم بإيجاد أفضل خط مستقيم يمر من نقاطك التجريبية بالنقر بالزر الأيمن للماوس على الورقة البيانية واختيار (Fit Function: Free Fit , A*x+B) ، ثم تحديد جميع النقاط التجريبية .

13 - استفد من ميل المستقيم السابق في حساب معامل هول R_H و تركيز الإلكترونات n وفق العلاقة (4) و (5) ، وقدّر الارتياب فيهما .

14 - سجل على المنحني قيمة الميل وتيار العينة الذي تم عنده القياس و معامل جودة المواءمة (r) ، وذلك من الخيار (Set Marker : Text) .

15 - أعد التجربة مرة ثانية من أجل الحالة نفسها والشروط نفسها ، وذلك بالضغط على الزر ( ) والذهاب للنافذة (Measuring Parameters) وتفعيل الخيار (Append new meas. Series) ، ثم كرر سلسلة القياسات واختبر مدى التكرارية ، ثم قارن بين معامل جودة المواءمة (r) في الحالتين .

16 - ابدأ سلسلة بيانات جديدة من أجل تيار عينة (I = 15 A) ، وقم بإجراء سلسلة القياسات والحسابات مرتين أيضا .

17 - احفظ الورقة البيانية لسلسلة نتائجك في ملف صوري وذلك بالضغط على الخيار (Copy Diagram : Bitmap) ، ثم لصقها في برنامج الرسام .

4- تقييم العمل التجريبي:

1 - احسب تركيز ذرات المعدن N مرة باستخدام كتلته المولية وكثافته ، ومرة بمعرفة نمط تبلوره وثابت شبكته البلورية * وقارنهما بتركيز الالكترونات n الذي حصلت عليه ، ثم استنتج قيمة (Z) ، وقارنه بالتكافؤ المعروف لهذا المعدن .

2 - أي التقديرين أفضل لمعامل هول ، وبالتالي لحساب تركيز الإلكترونات ، في حال التيار (10 A) أم التيار (15 A) ، ولماذا ؟

* يمكنك الاستعانة بملحق الكتاب .

5 - الكلمات المرجعية :

- منحني معايرة	- Calibration Curve
- تركيز الإلكترونات	- Concentration of electrons
- تيار	- Current
- انحراف الإلكترونات	- Deflection of electrons
- إزالة المغنطة	- Demagnetize
- مغنطيس كهربائي	- Electro-magnet
- أثر هول	- Hall Effect
- حقل هول	- Hall Field
- فرق كمون هول	- Hall Voltage
- قوة لورنتز	- Lorentz Force
- حقل التحريض المغنطيسي	- Magnetic Flux Density
- قطبية	- Polarity
- سمَاكة	- Thickness
- فرق الكمون	- Voltage

6 - المراجع :

1- المرجع 1- الفصل الخامس .

2- المرجع 2 - الفصل السادس .

3- النشرتان التجريبيتان (P7.2.1.1) و (P7.2.1.2) من شركة ليبولد " Leybold Didactic " .

التجربة 7 :

أثر هول في أنصاف النواقل

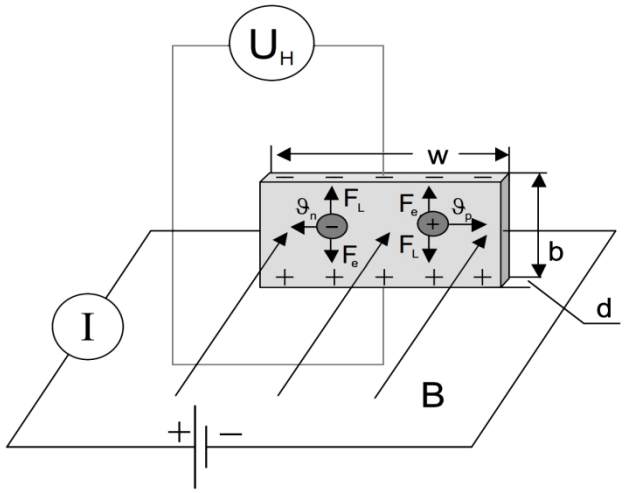
1- الغاية من التجربة :

1- دراسة كمون هول U_H باعتباره تابعاً لحقل التحريض المغنطيسي B عند تيار عينة I ثابت .

2- دراسة كمون هول باعتباره تابعاً للتيار الكهربائي المار في عينة نصف ناقلة عند حقل تحريض مغنطيسي ثابت .

2- المبدأ النظري :

يُعدّ أثر هول أحد أهم طرق البحث التجريبية لتحديد المعاملات المجهرية لانتقال الشحنة في المعادن ، وفي أنصاف النواقل المشوبة .



الشكل (1) :أثر هول في عينة مستطيلة .

في شروط التوازن ، تتساوى قوة لورنتز F_L المؤثرة في حاملات الشحنة المتحركة مع القوة الكهربائية F_e الناتجة عن الحقل الكهربائي لهول .

لدراسة أثر هول في هذه التجربة يتم وضع عينة نصف ناقلة متوازية الوجوه من مادة الجرمانيوم نوع -n (أي المشوب بشائبة مانحة) ضمن حقل مغنطيسي منتظم وفقاً للشكل (1) ، فإذا مر تيار خلال العينة نصف الناقلة باتجاه لا يوازي اتجاه الحقل المغنطيسي ، ستنحرف حاملات الشحنة نتيجة خضوعها لقوة لورنتز ، مسببة نشوء فرق في الكمون (كمون هول) بشكل عمودي على اتجاه كل من الحقل المغنطيسي B والتيار I . يعطى أثر هول (بشكل مشابه لحالة المعادن) بالعلاقة :

$$U_H = R_H \frac{I \cdot B}{d} \qquad (1)$$

حيث:

U_H : كمون هول . I : شدة التيار المار في نصف الناقل .

B : الحقل المغنطيسي . d : سماكة العينة .

R_H : ثابت هول ويتعلق بالمادة ودرجة الحرارة .

إن التيار المار في عينة نصف ناقلة طولها b هو مجموع تياري الإلكترونات والثقوب ، ويكتب عادة بدلالة حركية وتركيز كل منهما ، بالعلاقة :

$$I = b\ d\ (p\ \mu_p + n\ \mu_n) \qquad (2)$$

حيث :

p : كثافة الثقوب و μ_p: حركيتها ، n : كثافة الإلكترونات و μ_n: حركيتها .

تُعرّف حركية الثقوب بالعلاقة :

$$\mu_p = \frac{\vartheta_p}{E_A} \qquad (3)$$

حيث :

ϑ_p : سرعة انجراف الثقوب الوسطية ، E_A : الحقل الناتج عن تطبيق الكمون U_A .

وكذلك فإن حركية الإلكترونات معرفة بالعلاقة :

$$\mu_n = -\frac{\vartheta_n}{E_A} \qquad (4)$$

يُعدّ هذا التيار أو كثافته هو التيار المعرف لمعامل هول في الاتجاه ox ، ويجب حساب التيار الناتج عن تطبيق الحقل المغنطيسي للإلكترونات وللثقوب كلٍ على حدة في الاتجاه المعامد oy ، أي المسبب لكمون هول ، ثم جعله مساوياً للصفر .
عند تحقق شرط التوازن ، في الحقول المغنطيسية الضعيفة ، يمكن التعبير عن معامل هول باعتباره تابعاً لكثافة الشحنة (تركيز الحاملات) وحركية الثقوب والإلكترونات وفقاً للعلاقة :

$$R_H = \frac{1}{e} \frac{p \cdot \mu_p^2 - n \cdot \mu_n^2}{(p\ \mu_p + n\ \mu_n)^2} \qquad (5)$$

حيث:

e : شحنة الإلكترون — n : الكثافة الكلية للإلكترونات.

p : الكثافة الكلية للثقوب . — μ_p : حركية الثقوب

μ_n : حركية الإلكترونات.

من المعادلة (5) نجد أنه يمكن تحديد طبيعة حاملات الشحنة المسيطرة من إشارة معامل هول R_H ، وذلك إذا كانت اتجاهات التيار I والحقل المغنطيسي B معروفة ، ففي حال كانت العينة نصف الناقلة مشوبة بشائبة مانحة (نصف ناقل من النوع -n) تكون تراكيز الإلكترونات والثقوب الكلية كالتالي :

$$n = n_i + n_s \qquad (6)$$

$$p = p_i$$

حيث :

n_i : تركيز الإلكترونات الأصيلة . — p_i : تركيز الثقوب الأصيلة .

n_s : تركيز إلكترونات الشائبة .

في درجة الحرارة العادية يكون ($n_s \gg n_i$) و ($n_i \approx p_i$) ، وباستخدام هذين التقريبين ، تصبح العلاقة (1) على الشكل :

$$U_H = -\frac{I\,B}{e\,n_s\,d} \qquad (7)$$

وهي علاقة مشابهة للعلاقة التي حصلنا عليها في حال المعادن ، غير أن الإلكترونات هنا عائدة بمعظمها للمادة الشائبة ، ومنه يمكن حساب حركية الإلكترونات من العلاقة :

$$\mu_n = \frac{w}{b\,U_A}\,\frac{U_H}{B} \qquad (8)$$

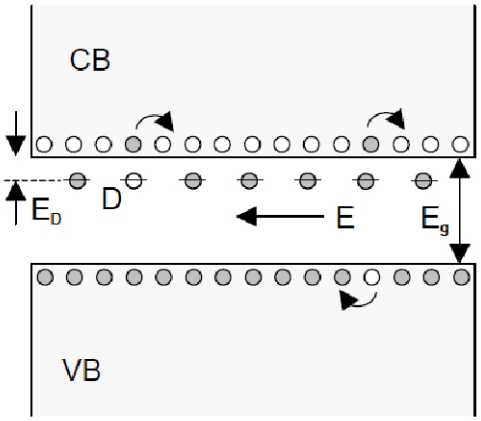
حيث w : عرض العينة .

وبالمثل في حال مادة نصف ناقلة مشوبة بشائبة آخذة ، تصبح العلاقة على الشكل :

$$U_H = +\frac{I \cdot B}{e\,p_s\,d} \qquad (9)$$

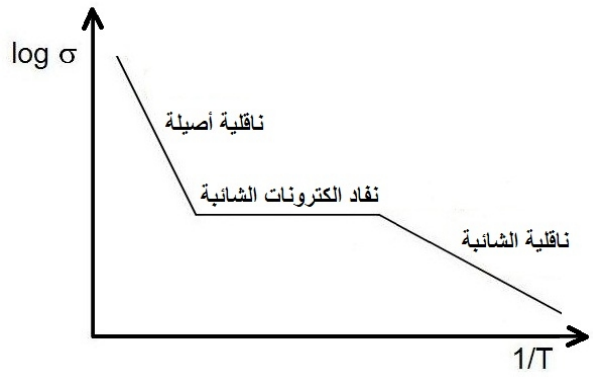
يتم إشابة شبكة بلورة الجرمانيوم بأحد عناصر المجموعة الخامسة مثل As, P, Sb وهذا يضيف إلكترونات جديدة إلى عصابة النقل (انظر الشكل 2) .

إن الطاقة E_D اللازمة لإلكترونات الذرة المانحة للانتقال إلى عصابة النقل هي بحدود 0.01ev وهي أصغر بكثير من فاصل طاقة نصف الناقل E_g ، مما يجعل انتقال إلكترونات الذرات المانحة لعصابة النقل تاركة وراءها الثقوب أمراً سهلاً .



الشكل (2) : مخطط مبسط لسويات الطاقة وانتقال حاملات الشحنة .

يمكن تمييز ثلاثة مجالات لدرجات الحرارة ، كما هو موضح بالشكل (3) :
عند درجات حرارة منخفضة : يكون إثارة الإلكترونات من مستويات المادة المانحة إلى عصابة النقل هو المصدر الوحيد لحاملات الشحنة ، وتزداد كثافة إلكترونات المادة المانحة مع ازدياد درجة الحرارة .
عند درجة حرارة حدية بالقرب من درجة الحرارة الغرفة : تكون إلكترونات المانحة الحرة قد نفدت ، وبالتالي جميع مستويات المادة المانحة تكون غير مشغولة (الناقلية الظاهرية) ، في هذه الحالة يكون التيار الناتج عن حاملات الشحنة الأصيلة مهمل القيمة .
مع ازدياد درجة الحرارة أكثر من ذلك : يؤدي إلى إثارة حرارية مباشرة للإلكترونات من عصابة التكافؤ إلى عصابة النقل ، وتزداد الناقلية الناتجة عن الأصيلة وتصبح هي المسيطرة . هذه الانتقالات من ناقلية أصيلة مهملة إلى ناقلية أصيلة مسيطرة يمكن ملاحظتها بقياس كمون هول U_H باعتباره تابعاً للدرجة الحرارة .



الشكل (3) : يبين تغيرات لُغارِتم الناقلية بدلالة مقلوب درجة الحرارة .

3 - أدوات القياس و طرائق العمل :

✯ - الأجهزة و الأدوات التجريبية :

- عينة من الجرمانيوم نوع -n أبعادها :

$d = 1.00 \pm 0.05$ mm , $b = 20 \pm 0.1$ mm , $w = 10 \pm 0.1$ mm

- وشيعتان كل منهما ذات 250 لفة . - مجس حقل التحريض المغنطيسي .
- منبع لتيار الوشائع . - علبة لمجس حقل التحريض المغنطيسي .
- نواة حديدية على شكل حرف U . - وحدة كاسي .
- منبع لتيار العينة مجهز بمقاييس . - حاسب مجهز ببرنامج Cassy Lab .

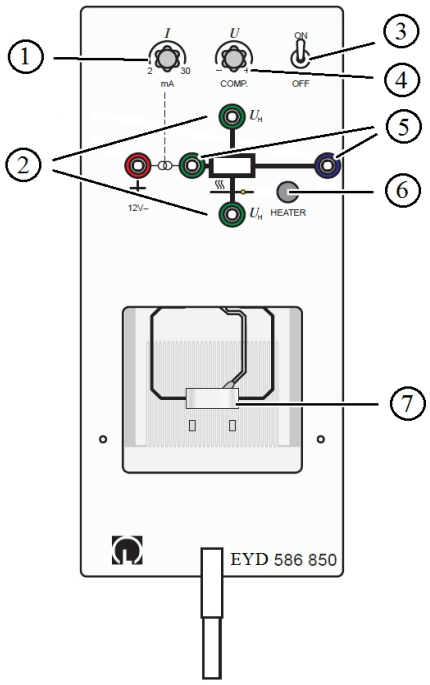
✯ - الإعداد التجريبي:

1 - ركب الوشيعتين والنواة الحديدية والقطبين كما هو موضح بالشكل (5) .

2 - ركب العينة مع الحامل في المنتصف بين قطبي المغنطيس الكهربائي ، ثم اضبط المسافة بينهما بحيث تكون حوالي 1 سم ، ولعمل هذا ، قم بحلّ براغي التثبيت (1) المبينة في الشكل (5) ، وقم بدفع الأقطاب باتجاه العينة ، مع التأكد من توازي سطحي القطبين ، ثم قم بتثبيت البراغي من جديد .

3 - ركب مجس حقل التحريض المغنطيسي على الحامل ، ثم أدخل رأس المجس بعناية بين قطبي المغنطيس بحيث يكون أقرب للعينة .

4 - قم بتمرير تيار متناوب قيمته 5 A في الملفات لفترة قصيرة ثم خفضه تدريجياً إلى الصفر من أجل إزالة مغنطة الحديد المكوِّن للنواة والقطبين .



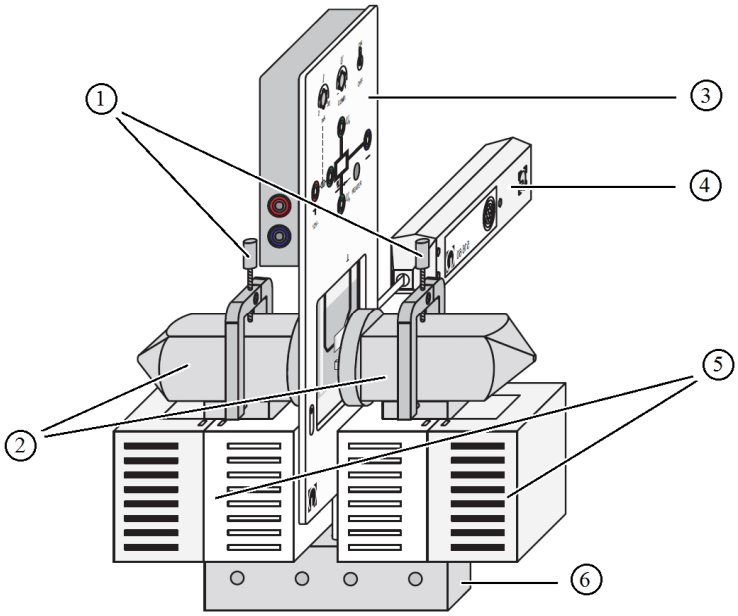
الشكل (4) : أجزاء حامل عينة نصف الناقل . 1: مفتاح تغيير تيار العينة 2: مأخذان لقياس كمون هول ، 3: تفعيل مفتاح التصفير ، 4: مفتاح تصفير الكمون 5: مأخذان لتيار العينة ، 6: زر تشغيل التسخين 7: عينة الجرمانيوم المشوب .

إن الغاية من مفتاح تصفير الكمون هو ضمان قياس كمون هول بين نقطتين متناظرتين من طرفي العينة وذلك كي لا يؤثر تغيير تيار العينة على كمون هول .

☆ - ملاحظات مهمة :

1 - إن العينة المدروسة تسخن عند مرور تيار كبير فيها مما يؤدي إلى تغير تركيز حاملات الشحنة فيها ، وبالتالي تغير كمون هول ، لذلك يجب ألا تتجاوز حدود التيار القصوى (100 mA لتيار العينة و 5A بالنسبة لتيار الوشائع) .

2 - كن حذرا في التعامل مع مجس حقل التحريض المغنطيسي فهو سهل العطب .



الشكل (5) : إعداد تجربة أثر هول في أنصاف النواقل

1: براغي التثبيت ، 2: القطبان المغنطيسيان ، 3: حامل عينة نصف الناقل

4: مجس الحقل المغنطيسي ، 5: الوشائع ، 6: النواة الحديدية .

☆ - الإجراء التجريبي :

أولاً: دراسة كمون هول باعتباره تابعاً لحقل التحريض المغنطيسي عند تيار عينة ثابت:

1 - صل منبع تيار العينة مباشرة مع طرفي العينة الأفقيين (5) الشكل (4) .

2 - قم بتثبيت العلبة الموصولة بمجس حقل التحريض المغنطيسي على المدخل Input (A) في جهاز الكاسي .

3 - قم بوصل طرفي العينة الشاقوليين (2) بالمدخل Input (B) في جهاز الكاسي .

4 - شغل برنامج الكاسي من أيقونته على سطح المكتب ، واضبط الإعدادات التالية :

5 - انقر بالزر الأيسر للماوس على Input (A) واختر :

Quantity: Magn. Flux Density B_{A1} , Meas. Range: -1 T .. +1 T

6 - انقر بالزر الأيسر للماوس على INPUT (B) واختر :

Quantity: voltage U_{B1} , Meas. Range: -0.3 V .. +0.3 V

7 - انتقل إلى علامة التبويب Display ، واختر على المحور X تمثيل حقل التحريض المغنطيسي B_{A1} ، ثم اختر على المحور Y تمثيل الكمون U_{B1} .

8 - انتقل إلى النافذة الفرعية Measuring Parameters واختر تسجيل القيم يدوياً وذلك بتفعيل الخيار Manual Recording ، ثم عد إلى النافذة الأساسية .

9 - مرر في العينة تيارا قيمته I = 0.03 A ، وسجل قيمة الكمون المطبق على العينة من المنبع (U_A) ، ثم حرك المفتاح 4 حتى ينعدم فرق كمون هول تماما .

10 - سجل قيمة كمون هول بالضغط على زر تسجيل القيم ( ) أو بالضغط على F9 .

11 - شغل منبع تيار الوشائع ، وابدأ بزيادة شدة الحقل تدريجياً من الصفر وحتى القيمة (0.15 T) بخطوة (0.01 T) وسجل في كل خطوة قيمة فرق كمون هول.

12 - قم بإيجاد أفضل خط مستقيم يمر من نقاطك التجريبية بالنقر بالزر الأيمن للماوس على الورقة البيانية واختيار (Fit Function: Free Fit , A*x+B) ، ثم تحديد جميع النقاط التجريبية .

13 - استفد من ميل المستقيم السابق في حساب معامل هول R_H وتركيز الإلكترونات n_s وفق العلاقة (7) ، وحركية الإلكترونات μ_n من العلاقة (8) ، وقدّر الارتيابات فيها .

14 - سجل على المنحني قيمة الميل وتيار العينة الذي تم عنده القياس و معامل جودة المواءمة (r) ، وذلك من الخيار (Set Marker : Text) .

15 - كرر سلسلة القياسات من أجل تيار عينة I = 0.05 A بالذهاب للنافذة الفرعية (Measuring Parameters) وتفعيل الخيار (Append new meas. Series).

16 - احفظ الورقة البيانية لسلسة نتائجك في ملف صوري ، وذلك بالضغط على الخيار (Copy Diagram : Bitmap) ، ثم لصقها في برنامج الرسام .

ثانياً: دراسة كمون هول باعتباره تابعاً لتيار العينة عند حقل مغنطيسي ثابت :

1 - ثبت شدة حقل التحريض المغنطيسي عند قيمة معينة (ولتكن 0.075 T مثلا) بالمحافظة على تيار الوشائع ، ثابتا ثم أغلق برنامج (Cassy Lab) .

2 - افصل العلبة الموصولة بمجس حقل التحريض المغنطيسي من على المدخل Input (A) في جهاز الكاسي .

3 - صل منبع تيار العينة مع طرفي العينة الأفقيين والمدخل Input (A) في جهاز الكاسي على التسلسل .

4 - شغل برنامج الكاسي من أيقونته على سطح المكتب ، واضبط الإعدادات التالية :

5 - انقر بالزر الأيسر للماوس على Input (A) واختر :

Quantity: current I_{A1} , Meas. Range: -1 .. +1 A

6 - انقر بالزر الأيسر للماوس على Input (B) واختر :

Quantity: voltage U_{B1} , Meas. Range: -0.3 V .. +0.3 V

7 - انتقل إلى علامة التبويب Display ، ثم اختر على المحور X تمثيل التيار المار في العينة I_{A1} ، ثم اختر على المحور Y تمثيل الكمون U_{B1} .

8 - انتقل إلى النافذة الفرعية Measuring Parameters واختر تسجيل القيم يدوياً وذلك بتفعيل الخيار Manual Recording ، ثم عد إلى النافذة الأساسية .

9 - حرك المفتاح 4 شكل (5) حتى ينعدم فرق الكمون تماما ، ثم سجل قيمة كمون هول بالضغط على زر تسجيل القيم ( ) أو بالضغط على F9 .

10 - شغل منبع تيار العينة وابدأ بزيادة شدة التيار تدريجياً بخطوة (5 mA) من الصفر وحتى القيمة (50 mA) وسجل في كل خطوة قيمة الكمون .

11 - قم بإيجاد أفضل خط مستقيم يمر من نقاطك التجريبية بالنقر بالزر الأيمن للماوس على الورقة البيانية واختيار (Fit Function: Free Fit , A*x+B) ، ثم تحديد جميع النقاط التجريبية .

12 - استفد من ميل المستقيم السابق في حساب معامل هول R_H و تركيز الإلكترونات n_s وفق العلاقة (4) ، وقدّر الارتيابات فيهما .

13 - سجل على المنحني قيمة الميل وشدة حقل التحريض المغنطيسي الذي تم عنده القياس و معامل جودة المواءمة (r) ، وذلك من الخيار (Set Marker : Text).

14 - كرر سلسلة القياسات من أجل شدة أخرى لحقل التحريض المغنطيسي* وذلك بالذهاب للنافذة الفرعية (Measuring Parameters) ، ثم تفعيل الخيار (Append new meas. Series) .

15 - احفظ الورقة البيانية لسلسة نتائجك في ملف صوري وذلك بالضغط على الخيار (Copy Diagram : Bitmap) ، ثم لصقها في برنامج الرسام .

4- تقييم العمل التجريبي:

1 - ينبغي على الطالب أن يلاحظ الفرق بالدقة بين الحصول على معامل هول من أي من التجربتين (بثبات الحقل وبثبات التيار) ، وكيف يمكن أن يفسر أي من التجربتين أدق ، وما هي الآليات والخطوات التي ينبغي اتباعها لتسجيل أو تعيين الفرق بين الدقتين في كلتا التجربتين (استفد من تقدير الارتيابات ومن حساب r) .

2 - كيف يمكن تحديد نوع الحاملات الأكثرية للشحنة في نصف الناقل اعتمادا على كمون هول ؟

* يمكنك زيادة تيار الوشائع بمقدار بسيط وبعد الانتهاء من سلسلة القياسات ، إعادة علبة مجس حقل التحريض المغناطيسي إلى المدخل Input (A) وقياس شدته .

5 - الكلمات المرجعية :

- ذرات آخذة	- Acceptor Atoms
- ذرات مانحة	- Donor Atoms
- شائبة	- Dopant
- مشوب	- Doped
- سرعة الانجراف	- Drift Velocity
- حركية الإلكترون	- Electron Mobility
- فاصل الطاقة	- Energy Gap
- ثابت هول	- Hall Coefficient
- أثر هول	- Hall Effect
- كمون هول	- Hall Voltage
- ناقلية أصيلة	- Intrinsic Conductivity
- نصف ناقل أصيل	- Intrinsic Semiconductor
- نصف ناقل	- Semiconductor
- إشابة نصف الناقل	- Semiconductor Doping

6 - المراجع :

1 - المرجع 1- الفصل الثامن .

2 - المرجع 2 - الفصل السادس .

3- النشرة التجريبية (P7.2.1.3) من شركة ليبولد " Leybold Didactic " .

التجربة 8 :

الناقلية الكهربائية للمعادن ولأنصاف النواقل باعتبارها تابعاً لدرجة الحرارة

1- الغاية من التجربة :

1- دراسة المقاومة الكهربائية لمعدن باعتبارها تابعاً لدرجة الحرارة ، وتحديد المعامل الحراري له .

2- دراسة المقاومة الكهربائية لنصف ناقل باعتبارها تابعاً لدرجة الحرارة ، وتعيين فاصل الطاقة له .

2- المبدأ النظري :

☆ - المعادن :

تُدرس عادة المقاومة الكهربائية للمادة R بدراسة ناقليتها الكهربائية σ التي هي في الحالة العامة تنسور يربط بين كثافة التيار $\overrightarrow{J}$ والحقل الكهربائي $\overrightarrow{E}$ بالعلاقة :

$$\overrightarrow{J} = \sigma \overrightarrow{E} \qquad (1)$$

يُمثّل هذا التنسور (أو الممتد) بمقدار عددي في المواد متماثلة المناحي أو في العينة التي تحتوي على العديد من البلورات الصغيرة (بلورات متعددة) . ويمكن دراسة مقلوب الناقلية ، وهو ما يدعى بالمقاومة الكهربائية النوعية أو المقاومية (ρ) والتي تقدر بواحدة ($\Omega.m$) .

تتحرك الإلكترونات تحت تأثير حقل كهربائي في بلورة معدنية مثالية دون مقاومة تذكر ، وذلك نظراً لما تتمتع به الإلكترونات من طبيعة موجية ، حيث تتداخل الأمواج الإلكترونية المتبعثرة على الكمون الدوري للشبكة البلورية تداخلا بناءً في اتجاه الحقل .

تنشأ المقاومية الكهربائية عند اختلال هذه الحركة ، وذلك عند ابتعاد البلورة عن الشروط المثالية وأهم تلك الأسباب :

1- اهتزازات الشبكة البلورية (الفونونات) بأنواعها المختلفة .
2- العيوب في الانتظام البلوري للذرات مثل العيوب النقطية و الخطية والخلوع وكذلك تُعدّ حدود البلورة نوعا من أنواع العيوب .
3- وجود شوائب من ذرات تختلف عن ذرات البلورة الأصلية .

يتعلق الإسهام الأول بدرجة الحرارة ، بينما لا يتغير الإسهامان الأخيران بشكل كبير مع تغير درجة الحرارة ، كما يمكن خفض إسهامهما بأخذ بلورة وحيدة ذات نقاوة عالية ، ولذلك يمكن كتابة المقاومة النوعية (المقاومية) للمادة (T) ρ على شكل مجموع حدين ، الأول مستقل عن درجة الحرارة ρ_i وهو يميز الإسهامين الأخيرين والثاني ρ_o (T) الذي يميز تابعية مقاومية المعدن النقي لدرجة الحرارة ، أي نكتب :

$$\rho\ (T) = \rho_i + \rho_0\ (T) \qquad (2)$$

يسمى هذا التقسيم بقاعدة ماتيسن ، وهي تتحقق بصورة جيدة في المعادن النبيلة نظرا لإمكانية الحصول عليها بنقاء عالٍ جداً ، أما في المعادن الأخرى والسبائك فقد لا يتحقق بسبب وجود تفاعل كبير نسبيا بين الإلكترونات مع العيوب والشوائب من جهة ومع الفونونات من جهة أخرى .

تكون المقاومية ρ_i ، في حالة المعادن النبيلة ، صغيرة إذا ما قورنت بمقاومة المعدن النقي ρ_o (T) في درجة حرارة الغرفة ، أما في درجات الحرارة المنخفضة فتنخفض قيمة ρ_o (T) كثيراً لتصبح ρ_i هي المهيمنة .

إن زيادة اهتزاز الذرات يجعل احتمال تصادم الإلكترون معها أكبر ، وبالتالي فإن المقاومية متناسبة مع المقطع العرضي للتصادم الذي يصادفه الإلكترون أي متناسبة مع $< X^2 >$. إن الطاقة الاهتزازية الوسطية لمهتز كمومي متناسبة مع $< X^2 >$ أيضاً ، ويمكن حسابها استناداً إلى نموذج ديباي باستخدام تواتر ديباي ω_D :

$$\frac{1}{2} M \omega^2 < X^2 > = \frac{\hbar\omega_D}{e^{\frac{\hbar\omega_D}{kT}} - 1} \qquad (3)$$

حيث:

M : كتلة المهتز ω : تواتر الاهتزاز $\hbar$: ثابتة بلانك المشطوبة

ω_D : تواتر ديباي k : ثابت بولتزمان T : درجة الحرارة المطلقة .

وباستخدام درجة حرارة ديباي θ_D المعرّفة بالعلاقة ($\hbar\omega_D = k\theta_D$) نجد :

$$< X^2 > = \frac{2\theta_D}{e^{\frac{\theta_D}{T}} - 1} \qquad (4)$$

وبما أن المقاومية متناسبة مع $< X^2 >$ ، يمكن كتابة :

$$\rho\,(T) \propto \frac{1}{e^{\frac{\theta_D}{T}} - 1} \qquad (5)$$

عند درجات حرارة أصغر بكثير من درجة حرارة ديباي $T \ll \theta_D$ فإن :

$$\rho\,(T) \propto e^{-\frac{\theta_D}{T}} \qquad (6)$$

أما في حالة كون $T \gg \theta_D$ فإن :

$$\rho\,(T) \propto \frac{1}{\left(1+\frac{\theta_D}{T}\right)-1} = \frac{T}{\theta_D} \qquad (7)$$

أي تكون $\rho\,(T)$ متناسبة خطياً مع T في هذا المجال من درجات الحرارة . يتطلب التقريب الخطي إهمال ρ_i بالمقارنة مع $\rho_o\,(T)$ ، ويتطلب كذلك أن تكون درجة الحرارة $T \gg \theta_D$ ، ويتحقق هذان الشرطان بالنسبة للعديد من المعادن بالقرب من درجة حرارة الغرفة ، وهذا ما يتفق مع العلاقة التجريبية البسيطة التي تحدد ما يسمى بالمعامل الحراري a للمقاومة المعرف بالعلاقة :

$$\frac{R_t - R_0}{R_0} = at \qquad (8)$$

حيث:

R_t : المقاومة في الدرجة t المئوية ، R_0 : المقاومة في درجة الصفر المئوية

يختلف الثابت a من معدن لآخر ، فهو بالنسبة لبعض المعادن قريب من الثابت المعروف ($a = \frac{1}{273}\ {}^{0}C^{-1}$) ، لكنه يختلف عن هذه القيمة كثيرا بالنسبة لبعض المعادن الأخرى ، وعلى هذا نجد أنه بالنسبة للمعادن التي يكون من أجلها a قريبة من القيمة السابقة ، تعطى المقاومة بالعلاقة :

$$R_t = aR_0T + R_0 \qquad (9)$$

بينما بالنسبة للمعادن الأخرى تكون العلاقات التجريبية أكثر تعقيداً، مثل :

$$R_t = R_0(1 + at + bt^2 + \dots) \qquad (10)$$

☆ - أنصاف النواقل :

تبدي أنصاف النواقل مقاومة عالية جداً قرب درجة حرارة الصفر المطلق بسبب عدم توفر إلكترونات أو حاملات شحنة حرة قادرة على الحركة في البلورة عند تطبيق حقل كهربائي ، أما عندما ترتفع درجة الحرارة وبسبب كون فاصل الطاقة صغيراً نسبياً ، يمكن لبعض الإلكترونات أن تنتقل من عصابة التكافؤ إلى عصابة النقل مما يجعلها قادرة على الحركة فتسهم هي والثقوب التي تركتها في عصابة التكافؤ في التيار الكهربائي عند تطبيق حقل كهربائي عليها عندها تعطى الناقلية الذاتية بالعلاقة:

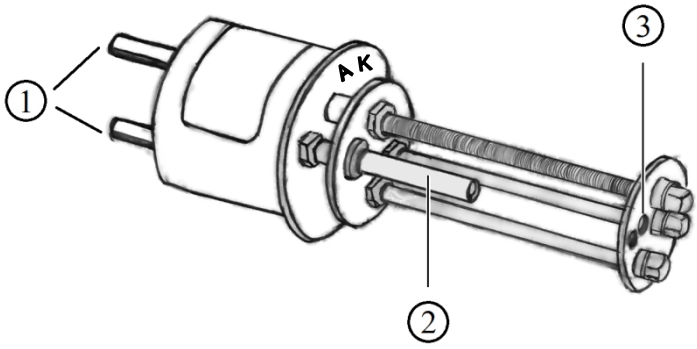
$$\sigma = f(T)\ e^{-\frac{E_g}{2kT}} \qquad (11)$$

حيث $f(T)$ تابع يعتمد قليلاً على درجة الحرارة ، وهو يتضمن تغير حركية الإلكترونات وحركية الثقوب ومستوى فيرمي مع تغير درجة الحرارة . ويمكن أن تستعمل هذه العلاقة لحساب فاصل الطاقة عند إهمال تغيرات $f(T)$ مع درجة الحرارة . تُدرس آثار الشوائب في أنصاف النواقل بدراسة مستويات الطاقة الإضافية التي تقع في الفاصل المحظور بالقرب من نهايتي عصابتي النقل و التكافؤ مما يؤدي إلى انتقالات جديدة للإلكترونات و الثقوب وبالتالي إسهامات إضافية في الناقلية .

3- أدوات القياس و طرائق العمل :

✯ - الأجهزة و الأدوات التجريبية :

- فرن التسخين عدد (2) .
- علبة مقياس درجة حرارة .
- المقاومة المعدنية مع حاملها .
- علبة قياس المقاومة .
- المقاومة نصف الناقلة مع حاملها .
- جهاز الكاسي .
- حساس درجة الحرارة .
- حاسوب مع برنامج Cassy .



الشكل (1) : العينة المدروسة . 1: مربطا العينة ، 2: أسطوانة تحوي العينة 3: فجوة لإدخال حساس درجة الحرارة .

✯ - الإعداد التجريبي:

يبين الشكل (2) التوصيل العام للتجربة :

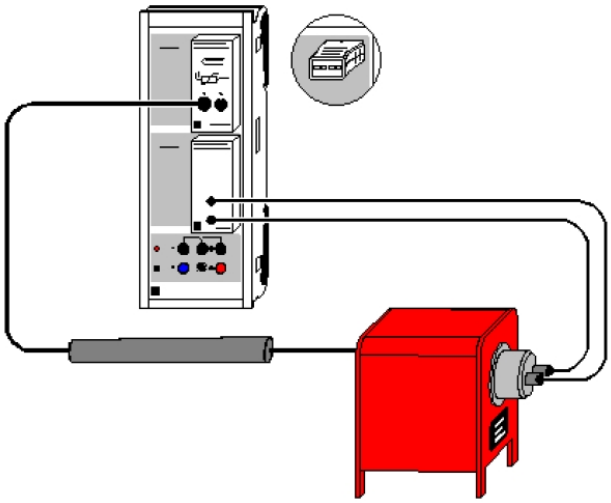
1- صل مجس قياس درجة الحرارة بالمدخل الأيسر (T_1) لعلبة قياس درجة الحرارة ، ثم ثبت العلبة على المدخل Input (A) .

2- صل طرفي المقاومة المعدنية بعلبة قياس المقاومة مباشرة ، ثم ثبت العلبة على المدخل Input (B) .

☆ - ملاحظات مهمة :

1 - انتبه إلى اختيار درجة الحرارة المئوية في حالة المعدن ، والدرجة المطلقة في حالة نصف الناقل .

2 - لا تتجاوز حدود درجة الحرارة القصوى للعينات (للمعدن $120\ ^{o}C$ ولنصف الناقل $400\ K$) .



الشكل (2) : الإعداد التجريبي للتجربة .

☆ - الإجراء التجريبي :

أولاً: دراسة المقاومة الكهربائية لمعدن باعتبارها تابعاً لدرجة الحرارة المئوية t :

1 - أدخل العينة المعدنية في الفتحة المخصصة في الفرن ، ثم أدخل حساس درجة الحرارة في الفتحة المقابلة كما هو موضح في الشكل (2) .

2 - شغل برنامج الكاسي من أيقونته على سطح المكتب ، واضبط الإعدادات التالية

3 - انقر بالزر الأيسر للماوس على Input (A) واختر :

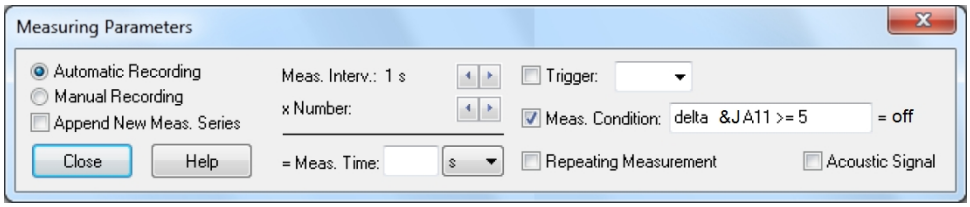
Quantity: Temperature ϑ_{A1} , Meas. Range: $0\ ^{o}C$ .. $120\ ^{o}C$

4 - انقر بالزر الأيسر للماوس على Input (B) واختر :

Quantity: Resistance R_{B1} , Meas. Range: $0\ \Omega$ .. $300\ \Omega$

5 - انتقل إلى علامة التبويب Display ، واختر على المحور X تمثيل درجة الحرارة ϑ_{A11} (وليس ϑ_{A12}) ، ثم اختر على المحور Y تمثيل المقاومة R_{B1} .

6 - انتقل إلى النافذة الفرعية Measuring Parameters واختر تسجيل القيم بشكل تلقائي كل 5 درجات ، وذلك بتفعيل الخيار Automatic Recording ، ثم ضبط الإعدادات الموضحة في الشكل التالي ، ثم عد إلى النافذة الأساسية .



7 - ابدأ القياس بالضغط على زر تسجيل القيم ( ) أو بالضغط على F9 .

8 - راقب درجة الحرارة ، ثم قم بإيقاف عملية القياس عندما تبلغ درجة حرارة المقاومة (120 ^{o}C) ، بالضغط ثانيةً على زر تسجيل القيم ، و قم بإطفاء الفرن .

9 - قم بإخراج العينة المعدنية من الفرن وافصلها عن علبة قياس المقاومة ، ثم افصل الفرن عن قابس الكهرباء وضعه جانبا لكي يبرد .

10 - قم بإيجاد أفضل خط مستقيم يمر من نقاطك التجريبية بالنقر بالزر الأيمن للماوس على الورقة البيانية واختيار (Fit Function: Free Fit , A*x+B) ، ثم تحديد جميع النقاط التجريبية .

11 - استفد من نقطة تقاطع المستقيم مع المحور (oy) في تقدير (R_0) ، ومن ميل المستقيم السابق في حساب المعامل الحراري (a) ، وفق العلاقة (9) ، وقدّر الارتياب فيهما .

12 - سجل على المنحني قيمة الميل ونقطة التقاطع التي تمثل المقاومة في الدرجة صفر مئوية ، و معامل المواءمة (r) وذلك من الخيار (Set Marker : Text).

13 - احفظ الشكل البياني الذي حصلت عليه في ملف صوري بالنقر بيمين الماوس على الورقة البيانية واختيار (Copy Diagram : Bitmap) .

ثانياً: دراسة المقاومة الكهربائية لنصف ناقل باعتبارها تابعاً لدرجة الحرارة المطلقة T :

1- صل المقاومة نصف الناقلة مع علبة قياس المقاومة ، وأدخلها في الفرن الثاني ثم صل الفرن بالكهرباء .

2 - أعد تشغيل برنامج الكاسي ، واضبط الإعدادات التالية :

3 - انقر بالزر الأيسر للماوس على Input (A) واختر :

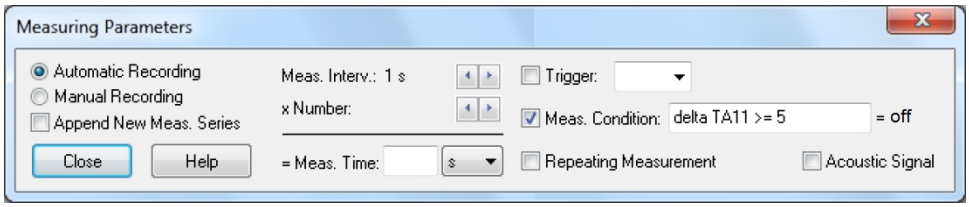
Quantity: Temperature T_{A1} , Meas. Range: 170 K .. 470 K

4 - انقر بالزر الأيسر للماوس على Input (B) واختر :

Quantity: Resistance R_{B1} , Meas. Range: 0 Ω .. 300 Ω

5 - انتقل إلى علامة التبويب Display واختر على المحور X تمثيل درجة الحرارة T_{A11} (وليس T_{A12}) ثم اختر على المحور Y تمثيل المقاومة R_{B1} .

6 - انتقل إلى النافذة الفرعية Measuring Parameters واختر تسجيل القيم بشكل تلقائي كل 5 درجات ، وذلك بتفعيل الخيار Automatic Recording ، وضبط الإعدادات الموضحة في الشكل التالي ، ثم عد إلى النافذة الأساسية .



7 - ابدأ عملية القياس وراقب درجة الحرارة ، ثم قم بإيقاف عملية القياس عندما تبلغ درجة الحرارة (400 K) ، وقم بإطفاء الفرن .

8 - قم بإخراج العينة من الفرن وافصلها عن علبة قياس المقاومة ، ثم افصل الفرن عن قابس الكهرباء وضعه جانبا لكي يبرد .

9 - انقر بالزر الأيمن للماوس على المحور X ، وفعّل الخيار (1/x) ، ثم على المحور Y ، وفعل الخيار (log y) .

10 - قم بإيجاد أفضل خط مستقيم يمر من نقاطك التجريبية بالنقر بالزر الأيمن للماوس على الورقة البيانية واختيار (Fit Function: Best-fit Straight Line) ، ثم تحديد جميع النقاط التجريبية .

11 - استفد من ميل المستقيم السابق في حساب فاصل الطاقة لنصف الناقل E_g ، وفق العلاقة (11) ، وقدّر الارتياب فيه ، ومع الانتباه إلى أن البرنامج يعطي اللُغارِتم العشري ، يجب الضرب بلُغارِتم العدد النيبري ، وباستخدام المقاومة بدلا من الناقلية ، تصبح العلاقة (11) على الشكل التالي :

$$\log(R) = \frac{E_g}{2k} \log(e) \cdot \frac{1}{T} + \log(f`(T))$$

12 - سجل على المنحني السابق قيمة الميل وقيمة فاصل الطاقة المحسوب ، وذلك من الخيار (Set Marker : Text) .

13 - احفظ الشكل البياني الذي حصلت عليه في ملف صوري بالنقر بالزر الأيمن للماوس على الورقة البيانية واختيار (Copy Diagram : Bitmap) .

☆ - طريقة بديلة :

يمكن الاستعاضة عن علبة قياس المقاومة (Current Source Box) ، باستخدام منبع التيار المستمر المتوفر في المخبر والذي يعطي تيارا (1.00 ± 0.05 mA) فتكون قيمة المقاومة عندها ، حسب قانون أوم ، مساوية لقيمة فرق الكمون بين طرفيها بعد الضرب بـ (1000) وتُضبَط الإعدادات كالتالي :

1 - صل مجس قياس درجة الحرارة بالمدخل الأيسر (T_1) لعلبة قياس درجة الحرارة ، ثم ثبت العلبة على المدخل (Input (A .

2 - صل طرفي منبع التيار بالمقاومة المدروسة ، ثم صل طرفي المقاومة بمأخذي قياس الكمون على المدخل (Input B) على التفرع .

3 - أدخل العينة المعدنية في الفتحة المخصصة في الفرن ، ثم أدخل حساس درجة الحرارة في الفتحة المقابلة كما هو موضح في الشكل (2) .

4 - شغل برنامج الكاسي من أيقونته على سطح المكتب ، واضبط الإعدادات التالية :

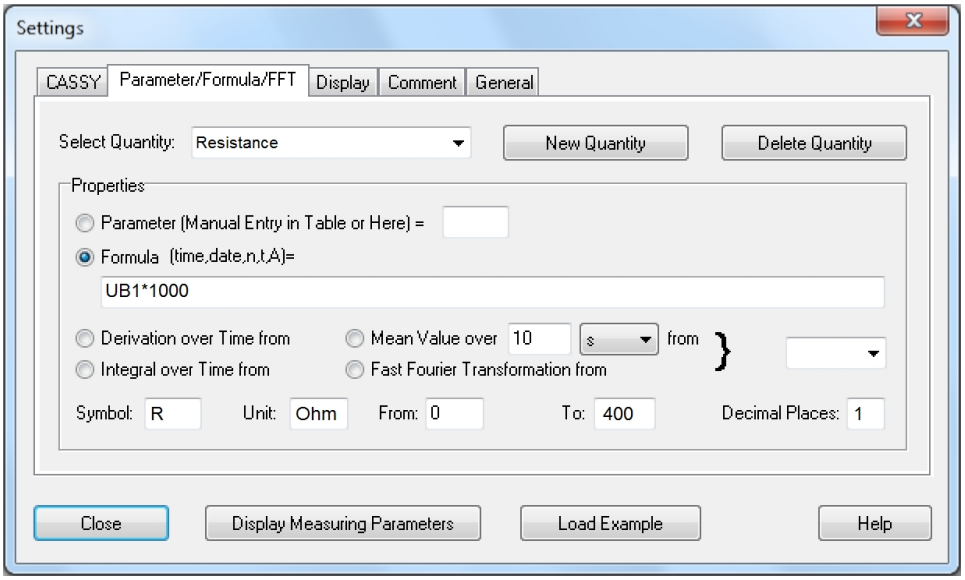
5 - انقر بالزر الأيسر للماوس على Input (A) واختر :

Quantity: Temperature ϑ_{A1} , Meas. Range: -20 °C .. 120 °C

6 - انقر بالزر الأيسر للماوس على Input (B) واختر :

Quantity: Resistance U_{B1} , Meas. Range: -1 V .. +1 V

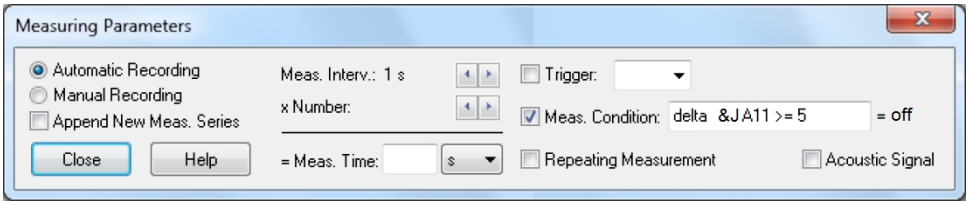
7 - لتعريف المقاومة انتقل إلى النافذة علامة التبويب Parameter/FFT ثم اضغط على (New Quantity) ، وأدخل المعطيات كما في الشكل (3) .



الشكل (3) : إعدادات إدخال المقاومة R .

8 - انتقل إلى علامة التبويب Display واختر على المحور X تمثيل درجة الحرارة ϑ_{A11} (وليس ϑ_{A12}) ثم اختر على المحور Y تمثيل المقاومة R .

9 - انتقل إلى النافذة الفرعية Measuring Parameters واختر تسجيل القيم بشكل تلقائي كل 5 درجات ، وذلك بتفعيل الخيار Automatic Recording ، وضبط الإعدادات الموضحة في الشكل التالي ، ثم عد إلى النافذة الأساسية .



10 - أجر القياسات والحسابات كما هو موضح في الفقرات السابقة (أولاً و ثانياً) .

4- تقييم العمل التجريبي:

1 - في حالة المعادن : يلاحظ انخفاض المقاومة مع انخفاض درجة الحرارة بشكل خطي ، لكن هل سيستمر هذا الانخفاض مهما انخفضت درجة الحرارة ؟ .

2 - في حالة أنصاف النواقل : يلاحظ انخفاض المقاومة مع زيادة درجة الحرارة ، لكن هل سيستمر هذا الانخفاض مهما ارتفعت درجة الحرارة ؟ وكيف سيكون تغير المقاومة لو كان نصف الناقل مشوبا ؟

5 - الكلمات المرجعية :

- سبيكة . - Alloy
- الناقلية . - Conductivity
- حدود البلورة . - Crystal Boundaries
- الخلوع . - Dislocations
- نقاوة عالية . - High Purity
- متجانس . - Homogeneous
- متماثل المناحي . - Isotropic
- العيوب الخطية . - Line Defects
- الفونونات . - Phonons
- العيوب النقطية . - Point Defects
- المقاومة . - Resistance
- المقاومية (المقاومة النوعية) . - Resistivity
- المعامل الحراري . - Temperature Coefficient
- التنسور (الممتد - الموتِّر) . - Tensor

6 - المراجع :

1- المرجع 1- الفصلان الخامس والثامن .

2- المرجع 2 - الفصل السادس .

3- النشرة التجريبية (P7.2.1.1) و (P7.2.1.2) من شركة ليبولد " Leybold Didactic " .

التجربة 9 :

الإصدار الإلكتروني الحراري

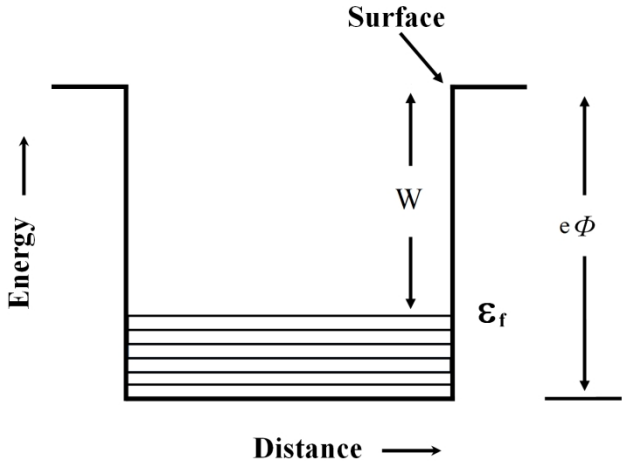
1- الغاية من التجربة :

1- دراسة تغيرات تيار الإصدار الحراري باعتباره تابعاً الحقل الكهربائي الخارجي المطبق (إصدار شوتكي) .

2- تعيين تابع العمل لمادة مهبط صمام ثنائي المساري .

2- المبدأ النظري:

توجد الإلكترونات في المعدن حسب نموذج الإلكترونات الحرة في بئر كمون يجبرها على البقاء داخل المعدن . ففي الدرجة $T = 0$ تكون كل سويات الطاقة حتى سوية فيرمي ε_f مشغولة . بينما تكون السويات الأعلى كلها فارغة . لا يستطيع الإلكترون أن يخرج من المعدن بسبب وجود حاجز كمون عند سطح المعدن يدعى بتابع العمل .



الشكل (1) .

يعرف تابع العمل الفعلي W لسطح مستو لمعدن على أنه الفرق بين سوية فرمي ε_f وبين كمون مستوي في الخلاء قرب السطح Φ ، (تكون عند هذا السطح القوى الكهربائية الناتجة عن خيال الإلكترون مهملة) ، مضروباً بشحنة الإلكترون ، وبصورة أدق علينا استخدام الكمون الكيميائي μ مكان ε_f ، أي أن :

$$W = \varepsilon_\infty - \mu \approx \varepsilon_\infty - \varepsilon_f = e\Phi - \varepsilon_f \qquad (1)$$

تُعرَّف للمعدن في بعض الأحيان خاصة مستمدة من الخواص الذرية لذرات المعدن الحرة مثل ألفة الإلكترون ، وهي تعبر عن مدى ارتباط الإلكترون بذرات المعدن فهي تقاس بدءاً من قمة عصابة النقل وحتى ε_∞ ، غير أنها هي وتابع العمل يعتمدان على انتظام الذرات والأيونات عند سطح المعدن ، فهما يتغيران عند وجود أيونات غريبة عند السطح كما يتغيران عملياً بحسب الاتجاه البلوري للسطح . لذلك فإن بعض القياسات الدقيقة تحدد تابع العمل في اتجاهات بلورية مختلفة لبلورة نظيفة ، ومن ثم يؤخذ الوسطي عند استخدام تابع العمل في قطعة متعددة البلورات .

كما هو واضح من الشكل (1) ، يجب أن تكون للإلكترون طاقة حركية مساوية على الأقل ($W + \varepsilon_f$) لكي يكون مرشحا للخروج من المعدن ، وإحدى طرائق إعطاء الإلكترون هذه الطاقة هي الطريقة الحرارية ، وتدعى العملية بالإصدار الإلكتروني الحراري .

يعطي قانون ريتشاردسون - دشمان عدد الإلكترونات الصادرة من سطح ما في درجة حرارة معينة استناداً إلى نموذج الإلكترونات الحرة التي تصادف عتبة كمون قيمتها ($\frac{W}{e}$) انظر الشكل (1). فبإدخال توزع الإلكترونات على مجالات الطاقة وحساب عدد الإلكترونات التي تتجاوز طاقتها تابع العمل ، بصورة كمومية ، آخذين في الحسبان اتجاه ورودها على السطح وإمكانية انعكاسها عن السطح ، وذلك بإدخال معامل الانعكاس r على الشكل ($\delta = 1 - r$) ، فنجد أن تيار الإصدار في الدرجة T وفي حقل كهربائي معدوم معطى بالعلاقة :

$$j(T) = A_0 \, \delta \, T^2 \, e^{-\frac{W}{kT}} \qquad (2)$$

حيث : $A_0 = \frac{e\, m\, k^2}{2\, \pi^2\, h^2} = 1.2 \times 10^6 \, \frac{A}{m^2 \, {}^oC^2}$ ، T درجة الحرارة المطلقة .

وهذا ما يعرف باسم علاقة ريتشاردسون - دشمان المستنتجة اعتماداً على إحصاء ماكسويل - بولتزمان دون ظهور المعامل δ . افتُرض عند استنتاج العلاقة السابقة عدم تبعية W لدرجة الحرارة رغم أن الكمون الكيميائي μ يتغير بتغير درجة الحرارة ، وهو لا يساوي طاقة فرمي إلا في درجات الحرارة المنخفضة. فإذا افترضنا أن هناك تبعية من الشكل :

$$W(T) = W_0 \pm aT \qquad (3)$$

حيث a ثابت من المرتبة ($10^{-4} \ \frac{eV}{{}^oC}$) . تصبح علاقة ريتشاردسون على الشكل :

$$j(T,0) = A_0 \, \delta \, T^2 \, e^{\mp \frac{a}{k}} \, e^{-\frac{W_0}{kT}} \qquad (4)$$

يفسر وجود المعامل الأسي ، المستقل عن درجة الحرارة ، اختلاف الأمثال الثابتة الواردة في المعادلة (2) عن قيمها المتوقعة نظرياً والمستندة إلى حساب r كمومياً .

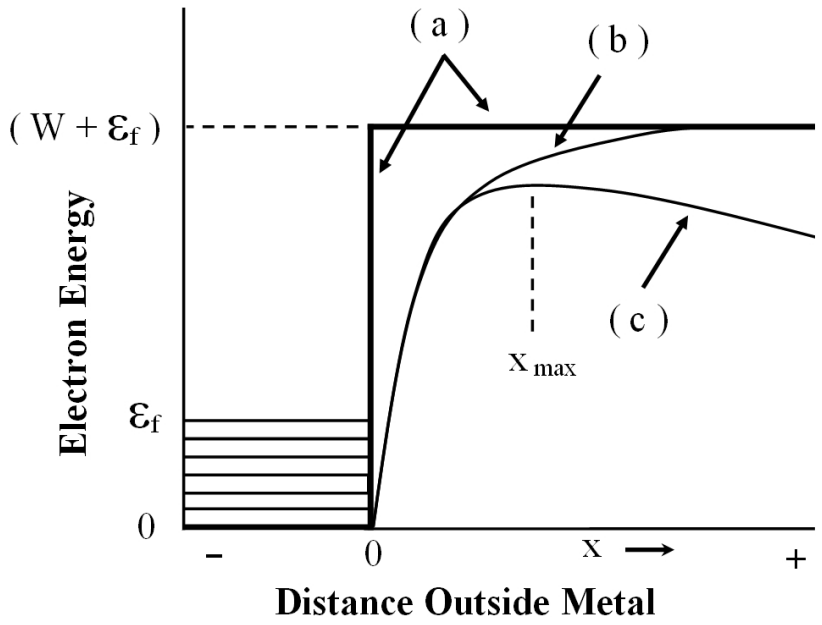
لقد بين شوتكي عام 1914 أن حاجز الكمون الذي يلاقيه الإلكترون يجب أن يكون متدرجا ، وليس حادا . فيمكن أن نفترض أن الطاقة الكامنة U(x) تزداد خطيا في البداية مع (x) (حيث المحور (ox) عمودي على سطح البلورة) ، إلا أنه بمجرد أن يصبح الإلكترون على بعد عدة أنغستروmات خلف السطح فإنه يخضع إلى القوة الجاذبة الناشئة عن خيال الشحنة بالنسبة إلى سطح ناقل مستو ، مما يؤدي إلى الطاقة الكامنة (من أجل قيم x الكبيرة) :

$$U(x) = (W + \varepsilon_f) - \frac{e^2}{16 \, \pi \, \varepsilon_0 \, x} \qquad (5)$$

وهو ما يوضحه المنحني (b) من الشكل (2) ، و يدعى " أثر خيال الشحنة " .

لنفترض الآن وجود حقل كهربائي E في الاتجاه ox في الخلاء خارج بلورة معدنية مسخنة . سيؤدي هذا إلى تغير تابع الطاقة الكامنة بحيث تصبح :

$$U(x) = (W + \varepsilon_f) - \frac{e^2}{16 \pi \varepsilon_0 x} - e x E_x \quad (6)$$



الشكل (2) .

إن وجود حقل كهربائي خارجي سوف ينقص من تابع العمل الفعلي ، وهذه الظاهرة تدعى " إصدار شوتكي " ، أو ظاهرة الإصدار الحراري بمساعدة الحقل الكهربائي. يمثل الجزء (c) من الشكل (2) شكل الطاقة الكامنة بوجود حقل كهربائي خارجي . باشتقاق العلاقة (6) بالنسبة للموضع لتعيين x عند النهاية العظمى في الجزء (c). يمكن أن نكتب عبارة تابع العمل في حال وجود حقل كهربائي بالشكل:

$$W(E) = W - \Delta W = W - \left(\frac{e^3 E_x}{4 \pi \varepsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

$$\Delta W = \left(\frac{e^3 E_x}{4 \pi \varepsilon_0}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (8)$$

بتعويض هذه القيمة في المعادلة (2) نجد أن :

$$j_x(T,E) = A_0 \delta T^2 e^{-\frac{W}{kT}} . e^{\frac{1}{kT}\left(\frac{e^3 E_x}{4 \pi \varepsilon_0}\right)^{\frac{1}{2}}} \qquad (9)$$

ومنه :

$$I(T,U) = I(T) e^{\left(\frac{e^3}{4 k^2 T^2 \pi \varepsilon_0 b}\right)^{\frac{1}{2}} U^{\frac{1}{2}}} \qquad (10)$$

أو بترميز آخر :

$$I = I_0 . f\left(U^{\frac{1}{2}}\right) \qquad (11)$$

أي أن تيار الإصدار الإلكتروني الحراري يزداد مع ازدياد U حتى عند درجة حرارة ثابتة ، وهذا ما يفسر عدم التوصل إلى تيار الإشباع في المنحني المميز لتيار المصعد بدلالة فرق الكمون المطبق عند درجة حرارة ثابتة .

سنعين في هذه التجربة تابع العمل لمادة مهبط ثنائي المساري القابل للتسخين ، وعادة ما يصنع المهبط من مادة التنغستين (W) تابع عملها (4.55 eV) تقريبا ، إلا أنه في أغلب الثنائيات ، يتم طلاء المهبط بمواد معينة (كالمعادن القلوية أو أكاسيدها) ، مما يخفض تابع العمل الفعلي إلى حدود (1.2 eV) .

يتم تعيين تابع العمل بقياس التيار المار بين المصعد والمهبط الناتج عن الإلكترونات التي يصدرها المهبط المسخَّن ، والمسرعة نتيجة تطبيق فرق في الكمون بين المصعد والمهبط .

يُجعل كمون المصعد موجباً بالنسبة إلى المهبط ، وتُرفع قيمته بالتدريج حتى يجمع كل الإلكترونات الصادرة عن المهبط مهما كانت طاقة صدورها ، وذلك لتلافي أثر

شحنة الفضاء (الموصوفة بعلاقة تشايلد - لانغمويـر) ، أي سنهتم حسابيا بالجزء الثاني فقط من المنحني المميز(I-U) للصمام ثنائي المساري ، والذي يمكن التعبير عنه بالعلاقة (10) * .

بسبب أثر شوتكي يستمر تيار المصعد عند درجة حرارة ثابتة في التزايد مع ازدياد الكمون المطبق ، أي يتناسب طرديا $e^{U^{\frac{1}{2}}}$ لذلك نقوم من أجل درجة حرارة معينة T بقياس تغيرات I مع $e^{U^{\frac{1}{2}}}$ لتحديد I_0 من نقطة التقاطع مع محور التيار ، ثم بالاستفادة من العلاقة (2) نقوم برسم $\frac{I_0}{T^2}$ بدلالة $\frac{1}{T}$ من أجل قيم مختلفة لـ T كي نحصل على تابع العمل W .

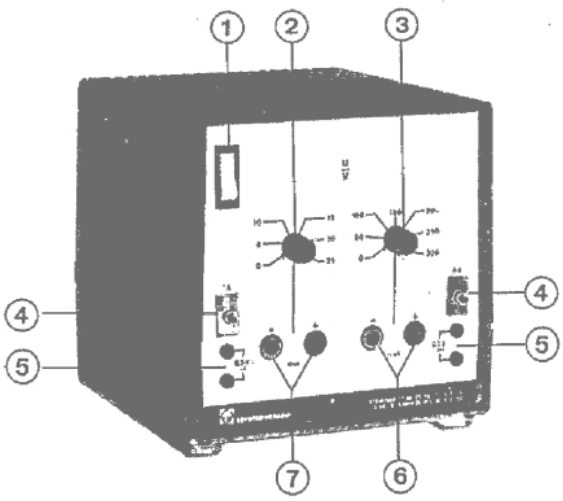
3- أدوات القياس و طرائق العمل :

✯ - الأجهزة و الأدوات التجريبية :

- مصباح ثنائي المساري من نوع 5Y3GT .
- منبع تيار مستمر متغير (0 - 325 V) - منبع تيار متناوب ثابت (6.3 V) .
- مقياس فولت بمقاومة داخلية كبيرة جدا ($\sim$ 20 MΩ) .**
- مقياس ميكروأمبير مستمر . - معدّلة 100 Ω .
- مقياس فولت متناوب . - مقياس تيار متناوب .

* : راجع كتاب الفيزياء العملية 2 - التجربة 18 .

** : المقاومة العالية لكي لا يؤثر مقياس الكمون على التيار والكمون المقاسين .



الشكل (3) : منبع تغذية يحتوي منبعي تيار مستمر و منبعي تيار متناوب .

1: زر التشغيل . 2: مفتاح تغيير فرق الكمون للمنبع المستمر الأول .

3: مفتاح تغيير فرق الكمون للمنبع المستمر الثاني .

4: قاطعة تفتح عند تجاوز التيار المتناوب من المأخذ (5) قيمة (1A) .

5: مأخذ لتيار متناوب كمونه ثابت 6.3 V ، 6: مربطا منبع الكمون الأول

7: مربطا منبع الكمون الثاني .

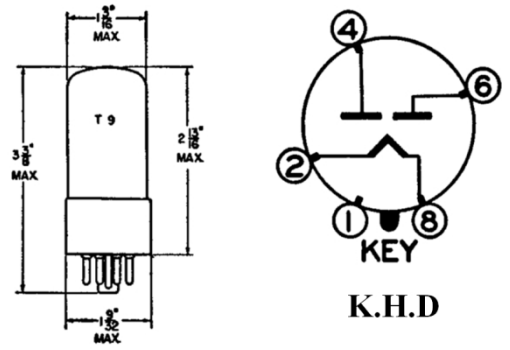
☆ - الإعداد التجريبي:

يوضح الشكل (3) مرابط ثنائي المساري ، ويبين الشكل (4) التوصيل العام للتجربة :

1 - ثبت ثنائي المساري على قاعدته ، وانتبه إلى ترتيب المرابط .

2 - صل منبع التيار المتناوب بمقياس التيار ومربطي التسخين (F_1 , F_2) على التسلسل شكل (4) ، ثم صل مقياس فرق الكمون على التفرع بين طرفي التسخين.

3 - صل منبع التيار المستمر ومقياس الميكروأمبير ومربطي المصعد (P) والمهبط (C) على التسلسل شكل (4) ، ثم صل مقياس فرق الكمون المستمر على التفرع بين المهبط والمصعد .

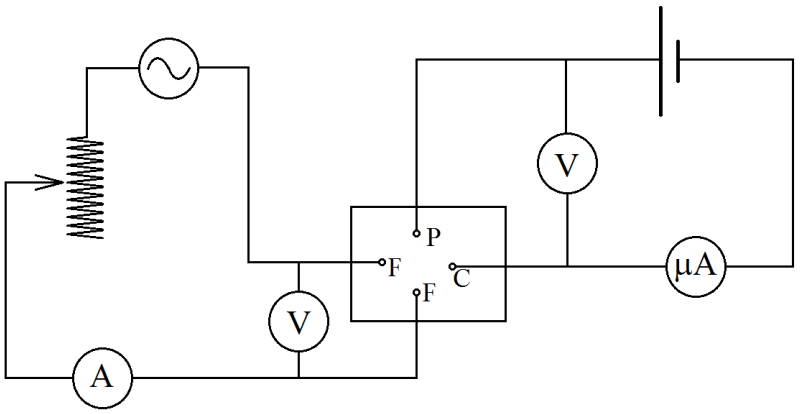


الشكل (3) : أجزاء الصمام الثنائي المؤلف من مصعدين (صمام مزدوج) .

1: غير متصل . 2: طرف التسخين الأول (المهبط) .

4: الصفيحة الأولى (المصعد الأول) 6: الصفيحة الثانية (المصعد الثاني)

8: طرف التسخين الثاني (المهبط) .



الشكل (4) : توصيل التجربة .

☆ - ملاحظات مهمة :

1 - لا تنزع الصمام عن قاعدته .

2 - انتبه إلى عدم تجاوز قيمة تيار التسخين (1.5 A) كي لا يتلف الصمام .

3 - انتبه إلى عدم تجاوز قيمة تيار الإصدار القيمة (50 mA) .

☆ - الإجراء التجريبي :

1 - شغل منبع التيار ومرر تيار تسخين متناوب في مهبط الصمام ثنائي المساري قيمته (0.8 A) من خلال التحكم بالمعدلة .

2 - قس فرق الكمون U بين طرفي سلك التنغستين واحسب مقاومته R_t من علاقة أوم ($U = I R_t$) .

3 - قم بحساب درجة حرارة المهبط ، بالاعتماد على العلاقة التجريبية التالية من أجل سلك التنغستين ، حيث ($R_0 = 0.38 \pm 0.01\ \Omega$) :

$$T = \frac{R_t - R_0}{0.00524 \times R_0} + 273 \qquad (12)$$

4 - طبق فرقا في الكمون بين المصعد والمهبط قيمته (2 V) ، وسجل قيمة تيار الإصدار المقابل (I) .

5 - قم بزيادة فرق الكمون المطبق تدريجياً أولا حتى (10 V) ، وبخطوة (2 V) ثم إلى (100 V) بخطوة (20 V) ، ثم إلى (300 V) بخطوة (40 V) .

6 - كرر الخطوات السابقة من أجل تيارات التسخين التالية (0.9 - 1.0 - 1.1) ، ورتب نتائجك في جدول كالتالي :

T = ……... K		T = ……... K		T = ……... K		T = ……... K	
U (V)	I (µA)	U (V)	I (µA)	U (V)	I (µA)	U (V)	I (µA)
2		2		2		2	
4		4		4		4	
6		6		6		6	
8		8		8		8	
10		10		10		10	
20		20		20		20	
40		40		40		40	
60		60		60		60	
80		80		80		80	
100		100		100		100	
140		140		140		140	
180		180		180		180	
220		220		220		220	
260		260		260		260	
300		300		300		300	

7 - ارسم على ورق مليمتري المنحنيات المميزة (I - U) ، من أجل درجات حرارة مختلفة (تيارات التسخين المختلفة) .

8 - ارسم على ورق نصف لغارتمي تحولات (I)ln بدلالة $U^{\frac{1}{2}}$ ، وحدد قيم تيارات الإشباع I_0 من نقطة التقاطع مع المحور (oy) من أجل درجات الحرارة المختلفة وفق العلاقة (10) ، وقدّر الارتياب في تحديده .

9 - بعد تحديد تيارات الإشباع I_0 من أجل كل تيار تسخين (أي عند كل درجة حرارة) ، قم بحساب ($\frac{1}{T}$) و ($\frac{I_0}{T^2}$) ورتب نتائجك في جدول كالتالي :

$T\ (K)$	$I_0\ (\mu A)$	$\frac{1}{T}\ (K^{-1})$	$\frac{I_0}{T^2}\ (\mu A.K^{-1})$

10 – ارسم على ورق نصف لغارتمي ، الخط البياني لتحولات $\ln\left(\frac{I_0}{T^2}\right)$ بدلالة $\left(\frac{1}{T}\right)$ ، مستفيدا من العلاقة (2) التي يمكن كتابتها على الشكل :

$$\ln\left(\frac{I_0}{T^2}\right) = \ln(S\,A_0\,\delta) - \frac{W}{k}\cdot\frac{1}{T} \qquad (13)$$

ثم عيّن من الميل قيمة تابع العمل W ، وقدّر الارتياب فيه .

4- تقييم العمل التجريبي:

1 - عند رسم تحولات $\ln(I)$ بدلالة $U^{\frac{1}{2}}$ ، يظهر في البداية عند الكمونات المنخفضة جزء غير خطي ، ما سببه ؟

2 - ناقش مدى الدقة في حساب تابع العمل التي يمكن التوصل إليها في هذه التجربة ، وهل تعد طريقة جيدة لتحديد تابع العمل ؟ ناقش ذلك في ضوء تقدير الارتياب .

5 - الكلمات المرجعية :

- Alloy	- سبيكة
- Crystal boundaries	- حدود البلورة
- Electrical conductivity	- الناقلية الكهربائية
- Electrical resistance	- المقاومة الكهربائية
- High Purity	- نقاوة عالية
- Homogeneous	- متجانس
- Isotropic	- متماثل المناحي
- Linear defects	- العيوب الخطية
- Noble metals	- معادن نبيلة
- Phonons	- الفونونات
- Point defects	- العيوب النقطية
- Specific resistance	- المقاومة النوعية
- Temperature coefficient	- المعامل الحراري
- Tensor	- التنسور (الممتد) .

6 - المراجع :

1- المرجع 1

2- المرجع 2 .

3- النشرة " Thermionic emission , Marjan Grilj , 2008 " .

التجربة 10 :

الإصدار الإلكتروني الضوئي

1- الغاية من التجربة :

1- قياس كمون الإيقاف U_0 باعتباره تابعاً لتردد الضوء الوارد على الخلية الكهرضوئية ν .

2- تحديد ثابتة بلانك وتابع العمل لمادة مهبط الخلية الكهرضوئية .

2- المبدأ النظري:

تدعى حادثة إصدار الإلكترونات من سطح المعدن لدى تعرضه للضوء بالأثر الكهرضوئي الخارجي (External Photo-electric Effect) تمييزا لها عن الأثر الكهرضوئي الداخلي ، أو الناقلية الكهرضوئية ، التي لا تخرج فيها الإلكترونات من المادة المعرضة للضوء ، وإنما تتهيج وتسهم في زيادة الناقلية الكهربائية . أما الحادثة التي نحن بصددها فيتم فيها اقتلاع الإلكترونات من السطح المعرض للضوء ، فإذا شكل هذا السطح مهبطا ووضع أمامه مصعد ، يمر تيار الإصدار الإلكتروني بينهما .

وقد لوحظ أن لكل معدن عتبة تواتر دنيا للضوء الذي يستطيع اقتلاع الإلكترونات من سطحه بغض النظر عن شدة هذا الضوء ، ولا يمكن تفسير هذا الأمر إلا بأخذ الخواص الجسيمية للضوء في الحسبان واعتباره فوتونات ، طاقة كل فوتون ($h\nu$) حيث (h) ثابتة بلانك و (ν) تواتر الضوء (حسب فرضية آينشتاين 1905) .

بما أن الإلكترونات في المعدن محتجزة داخله ولا تستطيع مغادرته إلا إذا اكتسبت طاقة إضافية تسمح لها بتجاوز حاجز الكمون الذي يفصل بين سطح المعدن والخلاء وهي الطاقة التي يعبر عنها بتابع العمل (W) ، فإن الطاقة الدنيا للفوتون القادر على إصدار الإلكترون هي ($h\nu = W$) .

فلو سقط فوتون طاقته (hν) أعلى من الطاقة الدنيا (W) لاكتسب الإلكترون الصادر من المعدن طاقة حركية إضافية (E_k) ، ويكون :

$$h\nu = W + E_k \qquad (1)$$

لحساب تابع العمل يلزم معرفة (ν) وتعيين (E_k) ، يمكن التحكم بتواتر الضوء الوارد على المعدن ، أما (E_k) فيمكن تعيينها بتطبيق فرق كمون معاكس بين المصعد والمهبط ، بحيث يتم قياس القيمة (U_0) المسمى كمون الإيقاف والذي ينعدم من أجله تيار الإلكترونات الصادرة ويكون عندئذ ($E_k = eU_0$) أي :

$$h\nu = W + eU_0 \qquad (2)$$

حيث: e: شحنة الإلكترون . ويتم بذلك حساب تابع العمل (W) من العلاقة :

$$U_0 = \frac{h}{e}\nu - \frac{W}{e} \qquad (3)$$

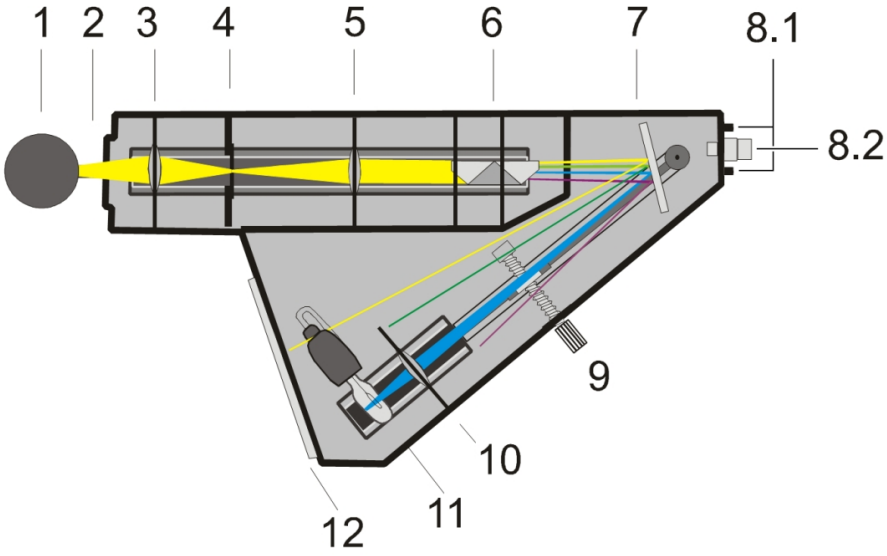
يمكن إذن باستخدام أطوال موجية (أو تواترات) مختلفة معينة وقياس كمون الإيقاف المقابل لكل منها ، تحديد تابع العمل ببساطة .

يشكل معدن البوتاسيوم مادة المهبط المراد دراسته في الخلية الكهرضوئية التي هي عبارة عن زجاجة مخلاة من الهواء تحتوي على المهبط المذكور ومصعدٍ مقابلٍ له من البلاتين . نجعل الخلية الكهرضوئية تتلقى ضوءاً وحيد اللون من مطياف يحلل الضوء الوارد إليه من المنبع الضوئي إلى خطوطه الطيفية المركبة له بوساطة موشور (أو باستخدام مرشحات مناسبة) ويسقط أحد هذه الألوان على مهبط الخلية. يقاس تيار الإصدار الإلكتروني الضوئي بين المصعد والمهبط (من رتبة μA) ، ثم يُخفّض هذا التيار حتى الصفر عن طريق رفع الكمون المعاكس المطبق بين المصعد والمهبط ويعين بذلك كمون الإيقاف (U_0) لكل لون من ألوان طيف المصباح وباستخدام العلاقة (3) يتم تعيين تابع العمل لمعدن المهبط .

3- أدوات القياس و طرائق العمل :

★ - الأجهزة و الأدوات التجريبية :

- المطياف والحجرة الكهرضوئية .
- منبع كمون مستمر (5 V - 0) .
- مضخم الإشارة 532 00
- معدلة (320 Ω) .
- مصباح زئبقي .
- مقياسا كمون .



الشكل (1): المطياف والحجرة الكهرضوئية .

1: مصباح زئبق عالي الضغط ، 2: نافذة تمرير الضوء قابلة للإغلاق 3: عدسة محدبة ، 4: شق ضيق ، 5: عدسة محدبة لتحديد الضوء إلى الموشور

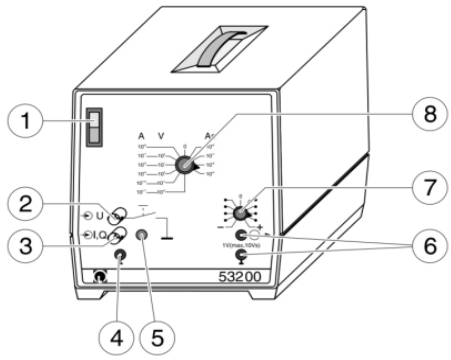
6: موشور لتحليل الضوء ، 7: مرآة لعكس الخطوط الطيفية قابلة للدوران

8.1: مربطان موصولان بطرفي حلقة البلاتين ، 8.2 مربط موصول بالمهبط

9: مفتاح يُدوَّر لتحريك الخلية وضبط سقوط الضوء عليها

10: عدسة محدبة مع غطاء وشق مؤشر ، 11: الحجيرة الكهرضوئية

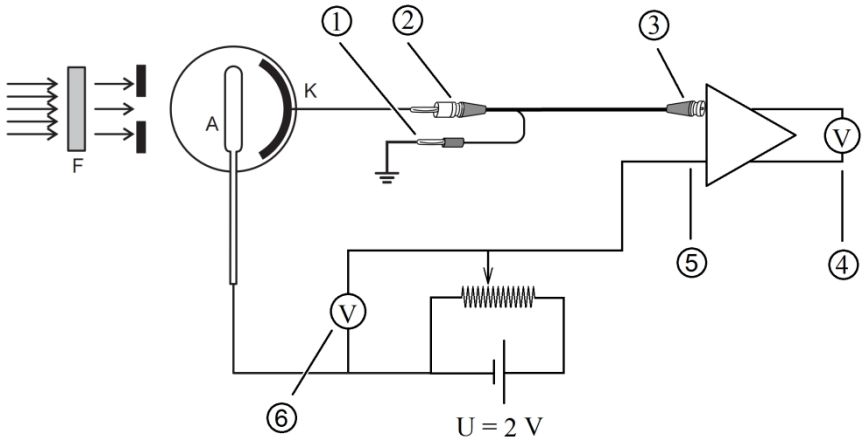
12: نافذة لمراقبة الخط الوارد إلى الخلية قابلة للإغلاق.



الشكل (2) : مضخم الإشارة 00 532 : 1: زر التشغيل ، 2: مدخل إشارة الكمون
3: مدخل إشارة التيار ، 4: أرضي المدخل ، 5: زر وصل الكمون بالأرضي
6: مخرج الكمون ، 7: كمون يستخدم للتصفير ، 8: ناخب مجال إشارة الدخل .

★ - الإعداد التجريبي :

يوضح الشكل (3) توصيل التجربة .



الشكل (3) F: اللون المنتقى ، A: حلقة البلاتين ، K: مهبط البوتاسيوم .
1: أرضي الإشارة ويوصل مع أرضي المخبر ، أو يوصل بجسم الجهاز
2: قطب الإشارة ، ويوصل مع مهبط الحجيرة الكهرضوئية
3: يوصل إلى مدخل الإشارة في المضخم ، 4: كمون الخرج
5: يوصل إلى أرضي الإشارة في المضخم ، 6: الكمون المطبق .

★ - ملاحظات مهمة :

1 - يجب التأكد من تأريض الإشارة وإلا لن تستقر قيمة كمون الخرج .

2 - يجب الحذر من لمس مصباح بخار الزئبق ، فقد تصل درجة حرارته بعد التشغيل لفترة إلى أكثر من $100\ ^{o}C$.

★ - الإجراء التجريبي :

1 - شغل مصباح الزئبق ، وانتظر فترة دقيقتين حتى تستقر إضاءته .

2 - شغل مضخم الإشارة ومقاييس الكمون ومنبع كمون الإيقاف ، واضبطه على القيمة (2 V) ، ثم حرك زالقة المعدلة (مجزئ الكمون) بحيث يكون الكمون المطبق يساوي الصفر .

3 - ضع ناخب المجال في المضخم (الناخب 8) على القيمة (10^{-10} A) .

4 - افتح النافذة (2) والنافذة (12) ، وتأكد من وجود أربعة خطوط طيفية على الأقل ضمن مجال النافذة (12) .

5 - حرك الخلية الكهرضوئية باستخدام المفتاح (9) بحيث يسقط على الخلية أحد الخطوط الطيفية (الأصفر مثلا) .

6 - أغلق النافذتين (2) و (12) ، ثم قم بتصفير كمون الإشارة الذي يعطيه المضخم باستخدام المفتاح (7) .

7 - افتح النافذة (2) ، فينحرف مؤشر مقياس كمون الإشارة دليلاً على مرور تيار من الإلكترونات من مهبط البوتاسيوم إلى حلقة البلاتين .

8 - طبق كموناً معاكساً ، وذلك بتحريك زالقة مجزئ الكمون حتى تنعدم قراءة كمون الإشارة ، ثم سجل قيمة كمون الإيقاف (U_0) المقابل .

9 - أعد كمون الإيقاف إلى القيمة (0 V) بإعادة زالقة مجزئ الكمون إلى الطرف .

10 - افتح النافذة (12) وحرك الخلية الكهرضوئية بحيث يسقط عليها الخط الطيفي التالي .

11 - أغلق النافذتين (2) و (12) ، ثم تأكد ثانية من تصفير كمون الإشارة الذي يعطيه المضخم باستخدام المفتاح (7) .

12 - أعد الخطوات السابقة وسجل كمون الإيقاف من أجل أربعة خطوط طيفية على الأقل .

13 - كرر سلسلة القياسات السابقة مرتين على الأقل ، واختبر مدى التكرارية التي حصلت عليها . ثم رتب نتائجك في جدول كالتالي :

اللون	λ (nm)	ν (THz)	U_0 (V) 1	U_0 (V) 2	U_0 (V) 3	$\overline{U_0}$ (V)
أحمر	630	476				
أصفر برتقالي	578	519				
أخضر	546	549				
أزرق مخضر	486	617				
أزرق نيلي	436	688				
بنفسجي	405	741				
ملاحظة : الارتياب النسبي المئوي في الأطوال الموجية المعطاة هي (1%) كحد أعلى .						

14 - ارسم الخط البياني الذي يعبّر عن تغيرات كمون الإيقاف بدلالة تواتر الضوء الوارد إلى الخلية ، واستفد من الميل في العلاقة (3) في حساب ثابتة بلانك h ، ومن نقطة التقاطع مع المحور U في تعيين تابع العمل W لمادة المهبط ، ومن نقطة التقاطع مع المحور ν في تعيين تواتر العتبة ν_0 لمادة المهبط ، وقدّر الارتياب فيها .

4- تقييم العمل التجريبي:

1 - هل تؤثر شدة الضوء (عدد الفوتونات الواردة إلى المهبط) في كمون الإيقاف ؟ ولماذا ؟ وما الاختلاف بين الحجيرة الكهرضوئية والمقاومة الضوئية ؟

2 - ما الخصائص الواجب توفرها في مادتي المصعد والمهبط (كل على حدة) ؟

5 - الكلمات المرجعية :

- مضخم	- Amplifier
- كمون معاكس	- Counter voltage
- تحرير الإلكترونات	- Electrons liberating
- طاقة حركية	- Kinetic energy
- طيف المصباح	- Lamp spectrum
- تواتر الضوء	- Light frequency
- حجيرة كهرضوئية	- Photo cell
- تيار كهرضوئي	- Photoelectric current
- أثر كهرضوئي	- Photoelectric effect
- إصدار إلكتروني ضوئي	- Photoelectric emission
- موشور	- Prism
- مطياف	- Spectrometer
- خط طيفي	- Spectrum Line
- تابع العمل	- Work function

6 - المراجع :

1- المرجع 1 - الفصل السادس .

2 - المرجع 2 - الفصلان السادس والسابع .

3- النشرة التجريبية (P6.1.4.5) & (77 558) من شركة ليبولد " LEYBOLD DIDACTIC " .

التجربة 11 :

تجارب في الخلية الشمسية

1- الغاية من التجربة :

1- دراسة سلوك الخلية الشمسية في حالة الظلام باعتباره ثنائياً .

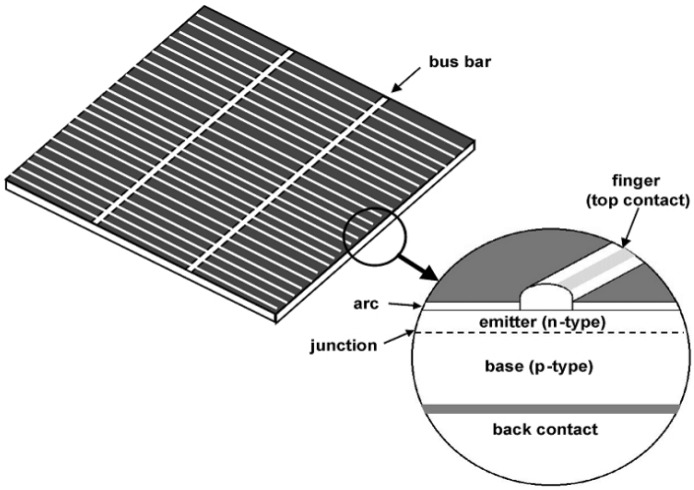
2- دراسة المنحنيات المميزة (I-U) للخلية الشمسية عند شدات إضاءة مختلفة وحساب المردود ومعامل الملء لها .

3- دراسة استطاعة الخلية الشمسية باعتبارها تابعاً لدرجة الحرارة .

4- دراسة سلوك الخلية الشمسية في الإظلام والإضاءة في حالتي الوصل الأمامي والعكسي .

2- المبدأ النظري :

الخلية الشمسية أداة تحول الطاقة الضوئية بشكل مباشر إلى كهرباء وفق المفعول الكهرضوئي . يمكن تلخيص المفاعيل الأساسية التي تحدث في الخلية كالتالي :



الشكل (1) : بنية الخلية الشمسية .

1 - امتصاص الفوتونات من قبل مادة نصف ناقلة .

2 - توليد أزواج إلكترون- ثقب .

3 - انفصال الشحنات المتخالفة وخروجها إلى الدارة .

تُصنع الخلية الشمسية عادة من وصلة (p-n) تتمتع بالخصائص الضوئية المناسبة ويرسّب على طرفيها شبكتان معدنيتان لجمع الشحنات الكهربائية المتولدة من الخلية ووصلها بالدارات الخارجية شكل (1) . تُجعل سماكة المنطقة (n) رقيقة لينفذ الضوء الساقط عليها إلى منطقة الوصلة (p - n) ، فتتولد أزواج الإلكترونات والثقوب ويتحرك كلٍ منها في اتجاه معاكس للآخر تحت تأثير الحقل الكهربائي الداخلي المتولد في منطقة النفاد . وعند وصل قطبي الخلية بدارة خارجية يمر تيار كهربائي فيها .

من الناحية الهندسية ، يمكن اعتبار الخلية الشمسية كثنائي نصف ناقل موصول على التفرع مع منبع للتيار يولد التيار(I_1) ضوئيا شكل (2) ، وهذه الفرضية تقودنا إلى معادلة الخلية الشمسية المثالية لـ " شوكلي " التي تحدد التيار الذي تعطيه الخلية الشمسية :

$$I = I_1 - I_0\left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1\right) \qquad (1)$$

حيث :

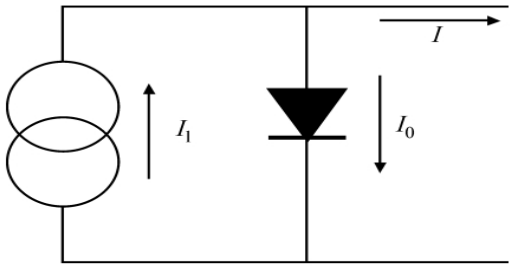
I_0 : تيار الإشباع المعتم (dark saturation current)

U : فرق الكمون بين طرفي الخلية الشمسية

k : ثابت بولتزمان ، T: درجة الحرارة المطلقة .

في هذه الدارة المثالية ، يكون تيار الدارة القصيرة I_{SC} لهذه الخلية الشمسية يساوي التيار المولد ضوئيا (I_1) ، أما كمون الدارة المفتوحة U_{OC} فيعطى بالعلاقة :

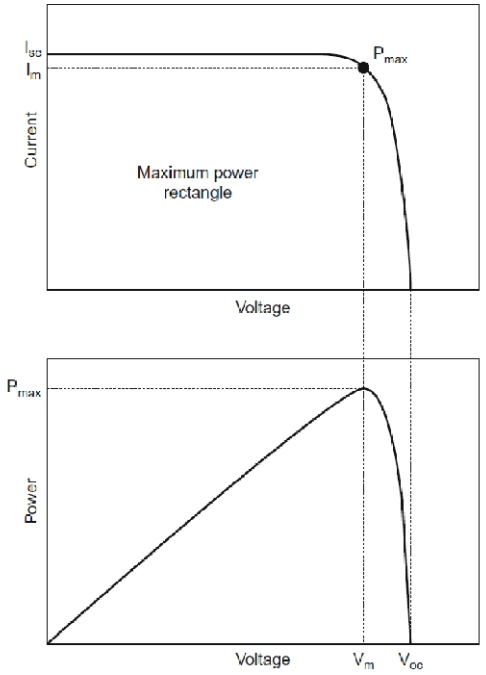
$$U_{oc} = \frac{kT}{e} \ln\left(1 + \frac{I_1}{I_0}\right) \qquad (2)$$



الشكل (2) : الدارة المكافئة للخلية الشمسية المثالية .

تحدد الاستطاعة العظمى P_{max} التي تنتجها الخلية الشمسية من أجل شدة إضاءة معينة من منحني (I - U) للخلية الشكل (3) ، ومنه تتحدد كفاءة الخلية الشمسية بمعامل الملء FF والذي يعرف على الشكل التالي :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{sc}\, U_{oc}} = \frac{I_{max}\, U_{max}}{I_{sc}\, U_{oc}} \qquad (3)$$



الشكل (3) : المنحني المميز للخلية الشمسية والاستطاعة العظمى التي تنتجها .

- مردود الخلية الكهرضوئية :

وهي نسبة الاستطاعة الكهربائية التي تولدها إلى الاستطاعة الضوئية الواردة إليها ، وتعود محدودية كفاءة الخلايا الشمسية إلى عدة أسباب منها :

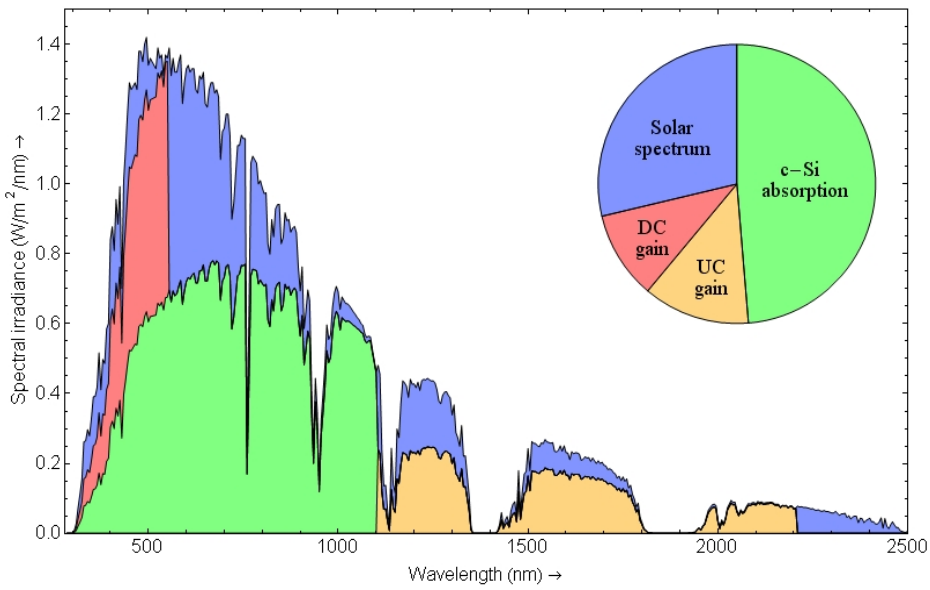
1 - الانعكاسات عن الشبكة المعدنية أو سطح نصف الناقل أو الطبقة الخلفية .

2 - المفاعيل الترموديناميكية ، بسبب إعاقة حركة الشحنات حراريا .

3 - عملية إعادة الاتحاد بين الإلكترونات والثقوب .

4 - جودة الناقلية الكهربائية العائدة إلى نصف الناقل المصنوعة منه ، والطبقة المعدنية .

كما تتعلق كفاءة الخلية الشمسية بطيف الإشعاع الوارد إليها وطيف الامتصاص للمادة المصنوعة منها ، ويبين الشكل (4) طيف الاشعاع الشمسي وطيف امتصاص السيلكون :



الشكل (4) : طيف الإشعاع الشمسي وطيف امتصاص السيلكون

لعل أبسط القوانين التي يحسب منها عادة مردود الخلية الشمسية هي العلاقة التالية :

$$\eta = \frac{P_{max}}{\Phi \ A} \qquad (4)$$

حيث P_{max} : الاستطاعة العظمى للخلية الشمسية

Φ : كثافة التدفق الإشعاعي ، وهي الاستطاعة الشمسية الواردة على واحدة السطوح وتقدر بـ (W/m^2)

A : مساحة سطح الخلية الشمسية .

يشكل السيلكون بأنواعه الثلاثة (المتبلور ومتعدد البلورات واللابلوري) المادة الأساسية لأكثر من 90% من الخلايا الشمسية في العالم وذلك يعود إلى :

1 - طيف الامتصاص الواسع الذي يشمل جزءا كبيرا من طيف الإشعاع الشمسي.

2 - فاصل الطاقة المنخفض ، حيث يقدر بنحو (1.12 eV) .

3 - عمق الاختراق الكبير نسبيا .

كما أن السيلكون هو ثاني أكثر العناصر وفرة في القشرة الأرضية ، وهو ليس ساما على عكس العناصر الأخرى مثل الكادميوم و الزرنيخ ، بالإضافة إلى أن استخدامه في صناعة الخلايا الشمسية قديم ، مما جعله عالي الوثوقية ومدروساً بشكل جيد .

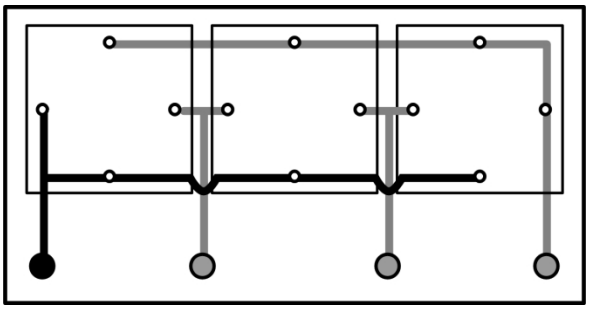
يقع مردود الخلايا الشمسية المصنوعة من السيلكون البلوري ومتعدد البلورات عادة بين (10% - 20 %) ، وينخفض المردود بارتفاع درجة الحرارة .

في هذه التجربة سندرس الخصائص الأساسية للخلية الشمسية ، حيث سنقوم بداية بالتحقق من أن الخلية مصنوعة من وصلة (p - n) ، وذلك بتطبيق كمون بين طرفيها بعد تغطيتها وتسجيل منحنيات التيار المار فيها بدلالة الكمون (I - U) في حالة التغذية الأمامية الخلية الشمسية ومقارنتها بمنحنيات الثنائي ، ثم سنقوم في الخطوة التالية بدراسة الاستطاعة العظمى التي تنتجها الخلية و حساب مردودها من أجل شدات ضوئية مختلفة ، ثم سندرس أثر درجة حرارة الخلية الشمسية على استطاعتها ، وأخيرا سنقوم بدراسة أثر الوصل العكسي والأمامي في حالتي الإظلام والإضاءة على مجموعة ثلاث خلايا شمسية .

3- أدوات القياس و طرائق العمل :

✯ - الأجهزة والأدوات التجريبية :

- اللوحة الأساسية Lexsolar .
- خلية شمسية من السيلكون متعدد التبلور مساحتها $36.0 \pm 0.2\ cm^2$.
- 3 خلايا شمسية من السيلكون متعدد التبلور مساحة كل منها $18.0 \pm 0.2\ cm^2$.
- مقاومة متغيرة Ω 1100 - 0 .
- مقاومة ثابتة Ω 33 .
- ميزان حرارة ^0C 100 - 0 .
- منبع تيار مستمر V 12 - 9 - 6 - 3 .
- علبة مصابيح A 0.33 , V 12 .
- مقياس فرق كمون مستمر .
- مقياس تيار مستمر .
- غطاء للخلية الشمسية .



الشكل (5) : شكل اللوحة الأساسية Lexsolar

✯ - الإعداد التجريبي:

لكل تجربة توصيلها الخاص بها ، ومن الضروري جدا الالتزام بالقيم المعطاة .

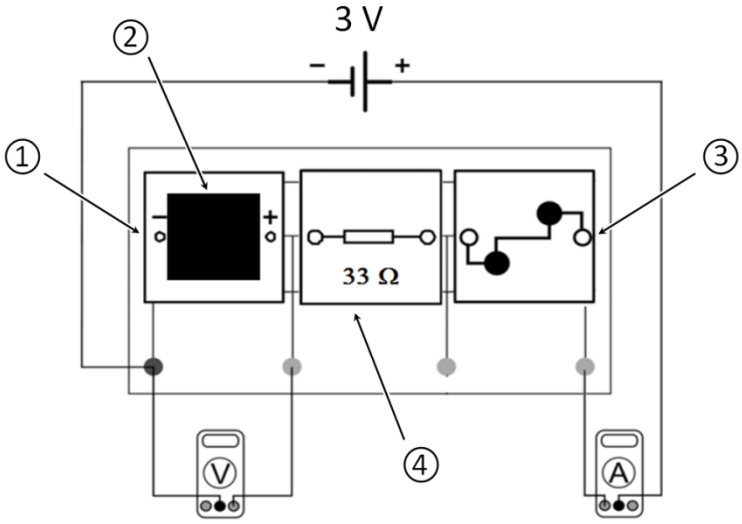
✯ - ملاحظات مهمة :

1 - تعامل مع الأدوات بعناية وخاصة ميزان الحرارة .

☆ - **الإجراء التجريبي :**

أولاً : دراسة سلوك الخلية الشمسية في حالة الظلام كثنائي :

1 - ركب الدارة كما هو مبين بالشكل (6) مع الانتباه إلى تغطية الخلية .



الشكل (6) : توصيل التجربة الأولى .

1: الخلية الشمسية ، 2: غطاء ، 3: المقاومة المتغيرة ، 4: مقاومة ثابتة 33 Ω .

2 - ضع المقاومة المتغيرة على أكبر قيمة لها ، ثم طبق من المنبع فرقا في الكمون قيمته (3 V) ، و**احذر تجاوز هذه القيمة** .

3 - مرر تيارا في الخلية قيمته (5 mA) من خلال تدوير مفتاح المقاومة المتغيرة وسجل فرق الكمون بين طرفيها .

4 - قم بزيادة التيار تدريجياً حتى (40 mA) وبخطوة (5 mA) ، وسجل في كل مرة قيمة الكمون ، ورتب نتائجك في جدول كالتالي :

U (mV)								
I (mA)	5	10	15	20	25	30	35	40

5 - ارسم المنحني المميز I بدلالة U للخلية ، وقارنه بالمنحني المميز للثنائي .

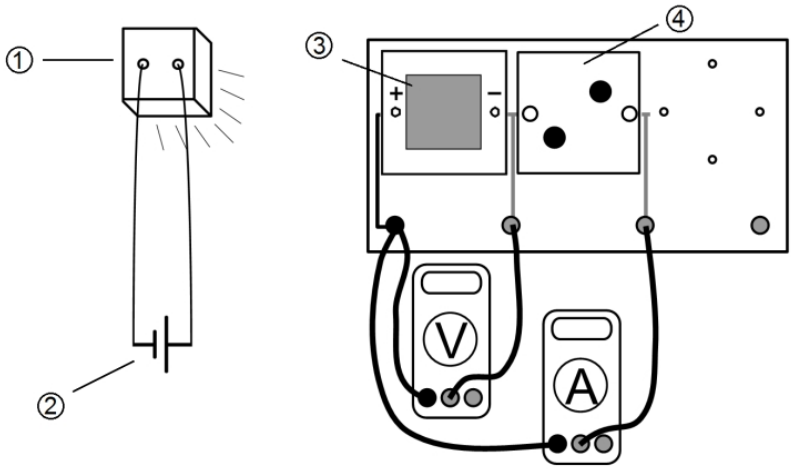
ثانياً: دراسة المنحنيات المميزة (I - U) للخلية الشمسية عند شدات إضاءة مختلفة ، وحساب المردود ومعامل الملء لها :

1 - ضع علبة المصابيح (1) فوق الخلية الشمسية ، وشغل منبع كمون المصابيح واضبطه على القيمة (6 V) .

2 - صل الخلية الشمسية على التفرع مع مقياس الكمون فقط ، وسجل قيمة فرق كمون الدارة المفتوحة U_{oc} .

3 - صل الخلية الشمسية على التسلسل مع مقياس التيار فقط ، وسجل قيمة تيار الدارة القصيرة I_{sc} .

4 - ركب الدارة كما هو مبين بالشكل التالي :



الشكل (7) : توصيل التجربة الثانية . 1: علبة المصابيح ، 2: منبع كمون المصابيح 3: الخلية الشمسية ، 4: المقاومة المتغيرة والتي تمثل مقاومة الحمولة .

5 - ضع قيمة فرق كمون المطبق على المقاومة على القيمة (150 mV) وسجل قيمة التيار المقابل .

6 - قم بزيادة الكمون تدريجياً حتى (475 mV) وبخطوة (25 mV) ، وذلك من خلال تدوير مفتاح المقاومة المتغيرة ، وسجل في كل مرة قيمة التيار المار .

7 - أطفئ المنبع ثم قم بفك أحد المصابيح الأربعة من علبة المصابيح ، وضعه جانبا في مكان آمن في العلبة المخصصة للتجربة ، ثم أعد علبة المصابيح فوق الخلية وشغل المنبع .

8 - أعد قياس U_{oc} و I_{sc} وكرر سلسلة القياسات من أجل ثلاثة مصابيح ، ثم من أجل مصباحين ، فمصباح واحد ، ورتب نتائجك في جدول كالتالي :

4 Lamps $\Phi = 140 \pm 2$ W/m^2			3 Lamps $\Phi = 110 \pm 2$ W/m^2			2 Lamps $\Phi = 75 \pm 1$ W/m^2			1 Lamp $\Phi = 40 \pm 1$ W/m^2		
U_{oc} =			U_{oc} =			U_{oc} =			U_{oc} =		
I_{sc} =			I_{sc} =			I_{sc} =			I_{sc} =		
I_L (mA)	U_L (V)	P_L (mW)	I_L (mA)	U_L (V)	P_L (mW)	I_L (mA)	U_L (V)	P_L (mW)	I_L (mA)	U_L (V)	P_L (mW)
P_{max} =			P_{max} =			P_{max} =			P_{max} =		
FF =			FF =			FF =			FF =		
η =			η =			η =			η =		
R_S =			R_S =			R_S =			R_S =		

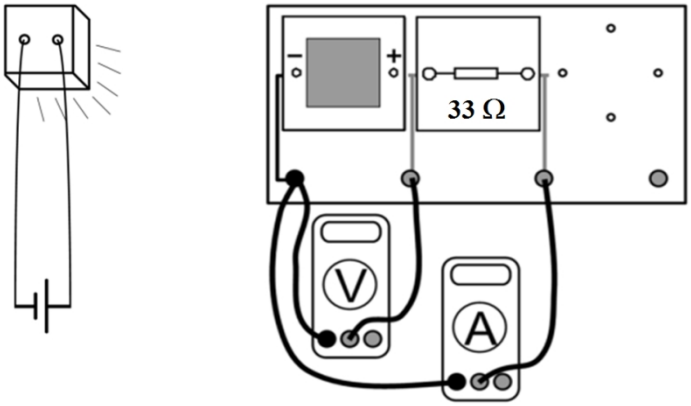
9 - ارسم على نفس الورقة المليمترية تغيرات (I_L) بدلالة (U_L) من أجل شدات الإضاءة المختلفة .

10 - ارسم على ورقة مليمترية أخرى تغيرات (P_L) بدلالة (U_L) من أجل شدات الإضاءة المختلفة ، وحدد من الرسم قيمة (P_{max}) من أجل كل شدة ، ثم حدد قيمة المقاومة الداخلية للخلية R_S من أجل كل شدة ، وقدّر الارتياب فيهما .

11 - استفد مما سبق في تحديد معامل الملء (FF) من العلاقة (3) ومردود الخلية الشمسية (η) من العلاقة (4) من أجل كل شدة ، وقدّر الارتياب فيهما .

ثالثاً: دراسة استطاعة الخلية الشمسية باعتبارها تابعاً لدرجة الحرارة :

1 - ركب الدارة كما هو مبين بالشكل التالي :



الشكل (8) : توصيل التجربة الثالثة .

2 - ضع الميزان في الفجوة العلوية المخصصة في علبة المصابيح بحيث يكون على تماس مباشر مع الخلية الشمسية .

3 - طبق على المصابيح فرقا في الكمون قيمته (12 V) ، وراقب ميزان الحرارة.

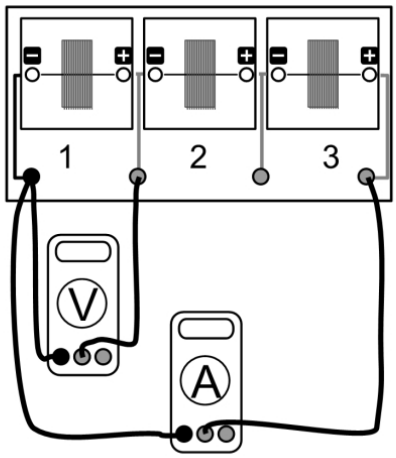
4 - سجل قيمة فرق الكمون والتيار المار في الحمولة R عند درجة قريبة من درجة حرارة الغرفة (25 أو 30) .

5 - مع ارتفاع درجة الحرارة سجل قيم الكمون والتيار كل خمس درجات حتى الدرجة (55 ^oC) واحسب في كل مرة الاستطاعة الناتجة ورتب نتائجك في جدول.

6 - ارسم على ورقة مليمترية تحولات استطاعة الخلية بدلالة درجة حرارتها .

رابعاً: دراسة سلوك الخلية الشمسية في الإظلام و الإضاءة في حالتي الوصل الأمامي والعكسي :

1 - ركب الدارة كما هو مبين بالشكل التالي :

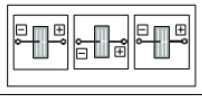
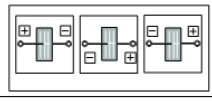
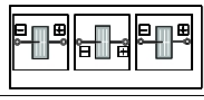
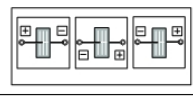


الشكل (9) : توصيل التجربة الرابعة .

2 - سجل قيمة فرق الكمون و التيار المار في الخلية (1) في حالة الإضاءة ، ثم في حالة الإظلام بعد أن تقوم بتغطيتها .

3 - قم بعكس قطبي الخلية (1) بحيث تكون في الوصل العكسي وأعد الخطوتين السابقتين .

4 - احسب في كل حالة من الحالات الأربع قيمة مقاومة الخلية الشمسية ، ثم رتب نتائجك في جدول كالتالي :

	without cover		with cover	
				
V (V)				
I (mA)				
R=V/I (Ω)				

4- تقييم العمل التجريبي:

1- هل تختلف الاستطاعة الكلية لمجموعة خلايا شمسية إذا وصلت على التسلسل أو على التفرع ؟ ناقش حالة بسيطة وهي حالة ثلاث خلايا شمسية متشابهة .

2- ما الفرق بين الخلية الشمسية وكل من المقاومة الضوئية والحجيرة الكهرضوئية؟

5 - الكلمات المرجعية :

- منحنيات - Curves
- مردود - كفاءة - Efficiency
- معامل الملء - Fill Factor
- وصل أمامي - Forward Connection
- كثافة التدفق الإشعاعي - Irradiance
- حمولة - Load
- استطاعة عظمى - Maximum Power
- دارة مفتوحة - Open circuit
- تفرع - توازي - Parallel
- طاقة ضوئية - Photo Energy
- وصل عكسي - Reverse Connection
- تسلسل - Series
- دارة قصيرة - Short circuit
- خلية شمسية - Solar Cell

6 - المراجع :

1- المرجع 1 - الفصل الثامن .

2- المرجع 2 - الفصلان الثامن والخامس عشر .

3 - المرجع 7 .

التجربة 12 :

المنحنيات المميزة لمقاومة ضوئية من مادة CdS

1- الغاية من التجربة :

1- دراسة التيار الكهرضوئي I_{ph} * باعتباره تابعاً لفرق الكمون U المطبق على مقاومة ضوئية عند كثافة تدفق إشعاعي Φ ثابت وحساب مقاومتها الكهربائية .

2- دراسة التيار الكهرضوئي باعتباره تابعاً لكثافة التدفق الإشعاعي عند فرق كمون مطبق ثابت .

2- المبدأ النظري:

تدعى الزيادة في الناقلية الكهربائية للجسم الصلب (وبالتالي النقصان في مقاوميته) نتيجة امتصاصه للضوء بظاهرة الناقلية الكهرضوئية Photo-conductivity ، حيث تمتص الإلكترونات طاقة الفوتونات الواردة إليها عندما تكون طاقتها مناسبة للانتقال ، فتصبح مثارة ، وتنتقل إلى عصابة النقل تاركةً خلفها ثقوباً في عصابة التكافؤ تسهم هي الأخرى في عملية النقل ، محدثةً بذلك ما يدعى بالمفعول الكهرضوئي الداخلي Internal Photo-electric الذي يختلف عن المفعول الكهرضوئي الخارجي (العادي) . يسبب ذلك زيادة عدد حاملات الشحنة وبالتالي تزداد الناقلية بالمقدار :

$$\Delta\sigma = \Delta p \, e \, \mu_p + \Delta n \, e \, \mu_n \qquad (1)$$

حيث:

$\Delta\sigma$: تغير الناقلية الكهربائية — e : شحنة الإلكترون

Δp : التغير في تركيز الثقوب — Δn : التغير في تركيز الإلكترونات

μ_p : حركية الثقوب — μ_n : حركية الإلكترونات.

---

* I_{ph} : التيار الإلكتروني الناتج عن ظاهرة المفعول الكهرضوئي الداخلي .

إذا طبقنا فرقاً في الكمون U على عينة صلبة ، فإن التيار الكهربائي الناتج عن الإثارة الضوئية يساوي:

$$I_{ph} = \frac{A}{d} \Delta\sigma U \qquad (2)$$

حيث :

A : المقطع العرضي لمسار التيار ، d : المسافة بين مربطي المقاومة .

تعتمد المقاومة الضوئية لأنصاف النواقل على المبدأ السابق ، وهي بذلك تمتلك مجالاً واسعاً من التطبيقات في مجالات عدة وخاصة في المجال الضوئي كالمقاييس الضوئية والقواطع الضوئية ... وتُعدّ مركبات عنصر الكادميوم وبالأخص كبريت الكادميوم CdS الأكثر شيوعا في الاستخدام لهذا الغرض بين أنصاف النواقل .

تتعرض مقاومة ضوئية من مادة CdS ، في تجربتنا ، إلى الضوء من المصباح . تتغير كثافة التدفق الإشعاعي Φ الوارد إلى المقاومة الضوئية بوساطة مقطبين يتلو أحدهما الآخر (عادة ما يدعى الأول بالمقطب و الثاني بالمحلل) . فإذا دُوِّر مستويا الاستقطاب لهذين المقطبين باتجاهين متعاكسين وكانت الزاوية a بينهما فعندها تكون كثافة التدفق الإشعاعي الوارد إلى المقاومة الضوئية :

$$\Phi = \Phi_0 D \cos^2 a \qquad (3)$$

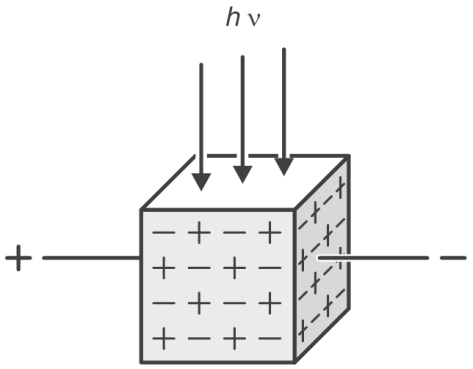
حيث:

Φ_0 : كثافة التدفق الإشعاعي الأساسي بدون وجود المقطبين .

D : معامل النفاذية (نفوذية الضوء عند توازي مستويي الاستقطاب للمقطبين) .

سندرس في تجربتنا التيار الكهربائي I_{ph} باعتباره تابعاً لفرق الكمون المطبق على المقاومة الضوئية مع تثبيت كثافة التدفق الإشعاعي Φ (المنحني المميز $I_{ph} - U$) كما سندرس التيار الكهربائي I_{ph} باعتباره تابعاً لكثافة التدفق الإشعاعي Φ المسلط على المقاومة الضوئية مع تثبيت فرق الكمون المطبق (المنحني المميز $I_{ph} - \Phi$) .

يتم توليد الأزواج (إلكترون - ثقب) في بلورة نصف الناقل بوساطة منبع ضوئي خارجي . تغادر الإلكترونات البلورة عند القطب الموجب (+) وتدخل عند القطب السالب (-) كما يبين الشكل (1) .



الشكل (1) : نموذج لمقاومة ضوئية مثالية

3- أدوات القياس و طرائق العمل :

★ - الأجهزة و الأدوات التجريبية :

- مقاومة ضوئية (Light Dependent Resistor) LDR .
- حوامل لتثبيت العناصر .
- منبع تيار متناوب (6V) للمصباح .
- شق متغير العرض .
- مصباح 30w / 6V .
- زوج من المقطبات .
- مكثف كروي للضوء (عدسة كروية) .
- عدسة بعدها المحرقي 150 mm+ .
- منبع تيار مستمر 0-15V للمقاومة .
- جسر ضوئي عياري طوله 1m .
- حاسب مجهز ببرنامج Cassy Lab .

★ - الإعداد التجريبي :

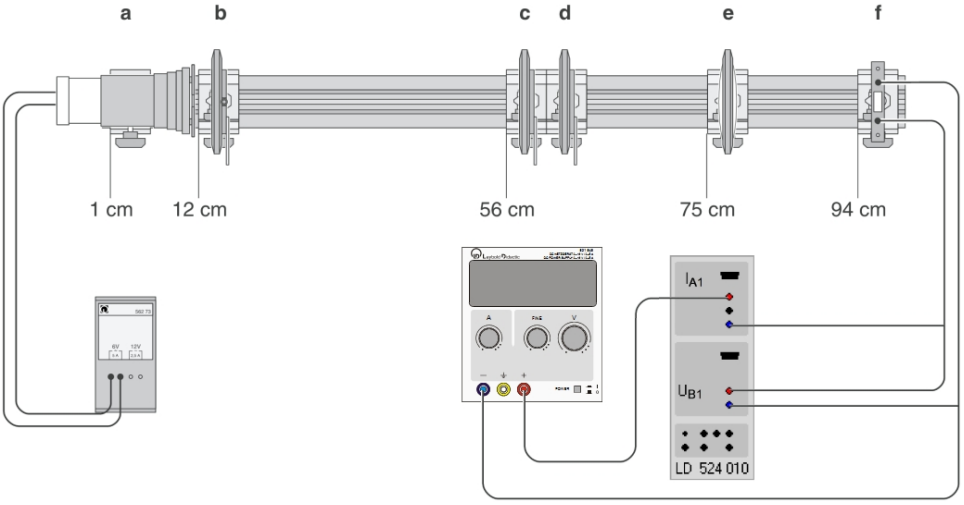
يوضح الشكل (2) الإعداد التجريبي للتجربة ، وقد أعطيت مواضع حوامل القطع الضوئية على الجسر الضوئي بالسنتمتر.

1 - تحقق من أن المصباح (مع مكثف الضوء الكروي) على طرف الجسر الضوئي ، ومضبوط على الارتفاع المناسب ، يليهما الشق المتغير، وكل من المقطب والمحلل ثم العدسة المحدبة بحيث تكون الجهة المحدبة للعدسة باتجاه المصباح .

2 - تأكد من أن المقاومة الضوئية مثبتة على الطرف المقابل من الجسر الضوئي على ارتفاع مناسب ، بحيث يكون محرق أشعة الضوء على المقاومة الضوئية .

3 - صل المصباح بمنبع تيار المصباح ، ثم اضبط فتحة الشق المتغير 1.2 mm .

4 - تأكد من وصل منبع التغذية DC والمقاومة الضوئية والمدخل Input (A) في جهاز الكاسي على التسلسل لقياس التيار ، ومن وصل المدخل Input (B) على التوازي بين طرفي المقاومة الضوئية لقياس فرق الكمون .



الشكل (2) : الإعداد التجريبي لتسجيل المنحنيات المميزة (I-U) للمقاومة الضوئية

a: المصباح ، b: الشق متغير العرض ، c , d : المقطب و المحلل .

e: عدسة مقربة f = +150 mm ، f: الحامل مع المقاومة الضوئية .

★ - ملاحظات مهمة :

1. تتخرب المقاومة الضوئية عند مرور تيارات كهربائية كبيرة فيها ، لذلك احذر من تجاوز القيمة $P = 0.45\ W$ للاستطاعة العظمى المبددة ، أي مثلا عند قيمة الكمون $U = 15\ V$ فالتيار الأقصى هو $I = 30\ mA$.
2. تتحسس المقاومة الضوئية للضوء الخافت ، لذلك ينبغي تعتيم غرفة التجربة قدر الإمكان ، والتأكد من ثبات شروط الإضاءة ، غير أنه من الممكن الحصول على نتائج جيدة بالاكتفاء بتعتيم المنطقة بين العدسة و المقاومة الضوئية .
3. عندما تتغير الإضاءة تكون استجابة المقاومة الضوئية بطيئة فهي تأخذ بعض الوقت (بضع ثوانٍ) لتبلغ القيمة الجديدة للمقاومة ، لذلك انتظر فترة كافية قبل أخذ القياسات حتى تصل إلى حالة مستقرة .

★ - الإجراء التجريبي :

أولاً: قياس التيار الكهرضوئي I_{ph} باعتباره تابعاً للكمون U عند قيمة ثابتة لكثافة التدفق الإشعاعي Φ :

1 - اضبط الزاوية a بين مستويي الاستقطاب للمقطب والمحلل على القيمة $a = 0$ وتأكد من ورود الأشعة الضوئية إلى المقاومة الضوئية بشكل صحيح .

2 - شغل برنامج الكاسي من أيقونته على سطح المكتب ، واضبط الإعدادات التالية :

3 - انقر بالزر الأيسر الماوس على Input (A) واختر :

Quantity: current I_{A1} , Meas. Range: -0.1 .. +0.1 A

4 - انقر بالزر الأيسر الماوس على INPUT (B) واختر :

Quantity: voltage U_{B1} , Meas. Range: -30 V .. +30 V

5 - انتقل إلى علامة التبويب Display واختر على المحور X تمثيل الكمون U_{B1} ثم اختر على المحور Y تمثيل التيار I_{A1} .

6 - انتقل إلى النافذة الفرعية Measuring Parameters واختر تسجيل القيم يدوياً

وذلك بتفعيل الخيار Manual Recording ، ثم عد إلى النافذة الأساسية .

7 - سجل قيمة التيار المقابلة للكمون المطبق (U = 0V) بالضغط على زر تسجيل القيم ( ) أو بالضغط على F9 .

8 - زد قيمة فرق الكمون تدريجياً بخطوة 2V حتى (U = 14 V) ، وسجل في كل خطوة قيمة التيار المقابلة ، واحفظ نتائجك في جدول .

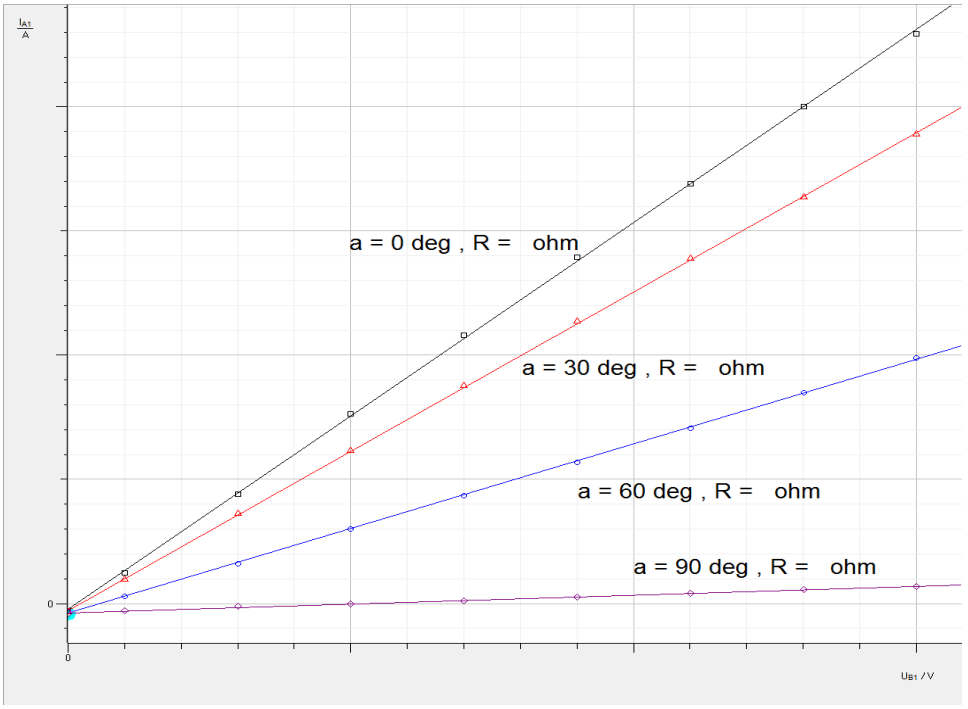
$\frac{U}{V}$	$\frac{I_{ph}}{mA}$ (0^o)	$\frac{I_{ph}}{mA}$ (30^o)	$\frac{I_{ph}}{mA}$ (60^o)	$\frac{I_{ph}}{mA}$ (90^o)
0				
2				
4				
6				
8				
10				
12				
14				
R =				

9 - جِد أفضل خط مستقيم يمر من نقاطك التجريبية بالنقر بالزر الأيمن للماوس على الورقة البيانية واختيار (Fit Function: Free Fit , A*x+B) ، ثم تحديد جميع النقاط التجريبية ، واحسب المقاومة (R) من علاقة أوم ، وقدر الارتياب فيها .

10 - أعد التجربة مرة ثانية من أجل الحالة نفسها و نفس الشروط ، وذلك بالضغط على الزر ( ) والذهاب للنافذة (Measuring Parameters) وتفعيل الخيار (Append new meas. Series) ، ثم كرر سلسلة القياسات واختبر مدى التكرارية ، وجودة المواءمة لكل خط .

11 - ابدأ سلسلة بيانات جديدة ، من أجل القيم التالية للزاوية بين مستويي الاستقطاب للمقطب و المحلل ($a = 30°, 60°, 90°$) ، وقم بإجراء سلسلة القياسات مرتين من أجل كل زاوية .

12 - سجل على كل منحنٍ الزاوية التي تم عندها القياس ، وقيمة المقاومة الكهربائية وعامل جودة المواءمة r ، وذلك من الخيار (Set Marker : Text) (الشكل 3) واحفظ الشكل البياني في ملف صوري من الخيار (Copy Diagram : Bitmap)



الشكل (3) : نموذج للمنحنيات (I_{ph} - U) من أجل قيم مختلفة لشدة الضوء الوارد.

ثانياً: قياس التيار الكهرضوئي I_{ph} باعتباره تابعاً لكثافة التدفق الإشعاعي Φ عند كمون ثابت U :

1 - ابدأ سلسلة قياس جديدة بالضغط على الرمز ( ) أو بالضغط على F4.

2 - ثبت قيمة فرق الكمون عند القيمة U = 15V .

3 - زد الزاوية a بين مستويي الاستقطاب للمقطب والمحلل تدريجياً من الصفر حتى 90^o وبخطوة عشر درجات ، وقس التيار I_{ph} وسجله عند كل خطوة .

4 - ابدأ سلسلة بيانات جديدة بالذهاب للنافذة الفرعية (Measuring Parameters) وتفعيل الخيار (Append new meas. Series) ، ثم كرر سلسلة القياسات من أجل القيم التالية لفرق الكمون المطبق : (U = 10 , 5 V) .

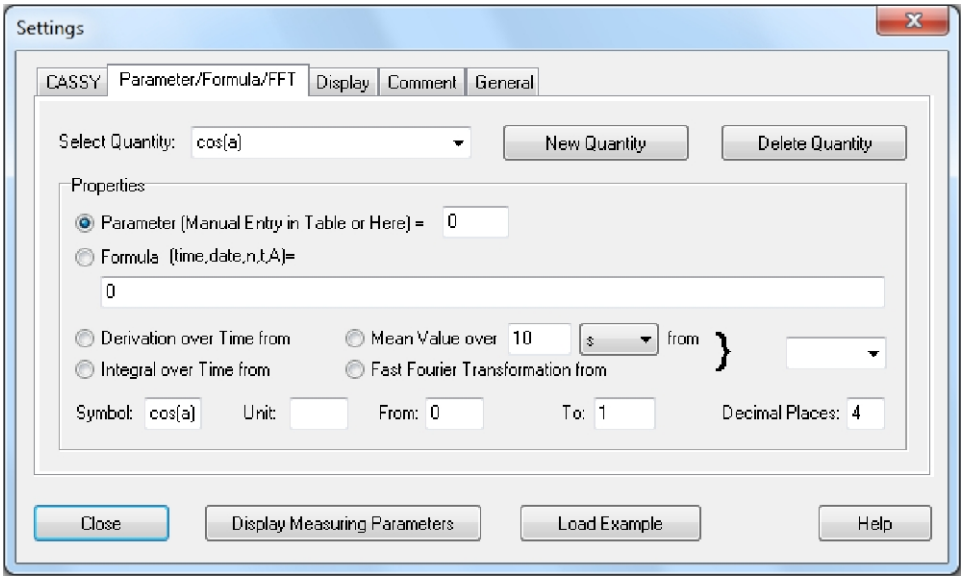
5 - أدخل قيم $\cos^2(a)$ بدلا من قيم فرق الكمون وذلك باتباع الخطوات التالية :

a - اضغط على الرمز ( ) واختر علامة التبويب Parameter/FFT.

b - اضغط على (New Quantity) ، ثم أدخل المعطيات كما في الشكل (4).

c - انتقل إلى علامة التبويب Display واختر على المحور X تمثيل cos (a) ثم اختر على المحور Y تمثيل التيار I .

d - عد إلى النافذة الأساسية وأدخل قيم cos (a) في الجدول بشكل يدوي لكل من السلاسل الثلاث ، وذلك بالنقر المزدوج بالزر الأيسر للماوس على الجدول ، بعد ذلك انقر بالزر الأيمن للماوس على المحور X ، وفعّل الخيار (x^2) .



الشكل (4) : القيم من أجل إدخال قيم cos (a) .

6 - سجل على كل منحنٍ قيمة فرق الكمون التي تم عندها القياس ، وذلك من الخيار (Set Marker : Text) ، ثم احفظ الشكل البياني الذي حصلت عليه في ملف صوري من الخيار (Copy Diagram : Bitmap) .

a	cos (a)	$\cos^2$ (a)	$\frac{I_{ph}}{mA}$ (5V)	$\frac{I_{ph}}{mA}$ (10V)	$\frac{I_{ph}}{mA}$ (15V)
0	1				
10	0.9848				
20	0.9397				
30	0.866				
40	0.766				
50	0.6428				
60	0.5				
70	0.342				
80	0.1737				
90	0				

4- تقييم العمل التجريبي :

1 - في الجزء الأول : ما شكل تبعية التيار للكمون ؟ وما تفسير مرور تيار من أجل الزاوية $a = 90^0$ بين مستويي الاستقطاب للمقطبين مع العلم أنه من أجل هذه الزاوية لا تمرر مرشحات الاستقطاب الأشعة الضوئية نهائياً ؟

2 - في الجزء الثاني : ما شكل تبعيّة التيار الكهرضوئي I_{ph} للشدة الضوئية Φ ؟ أجرِ مواءمة خطية وتربيعية وعين التبعية الأفضل من خلال قيمة r ؟

3 - هل هنالك حدّ لتزايد التيار مع تزايد كثافة التدفق الإشعاعي أم لا ؟ ناقش ذلك .

5 - الكلمات المرجعية :

- Charge Carriers	- حاملات الشحنة
- Conduction Band	- عصابة النقل
- Electrical Conductivity	- الناقلية الكهربائية
- Holes	- الثقوب
- Irradiance	- كثافة التدفق الإشعاعي
- Mobility	- الحركية
- Photo-conductivity	- الناقلية الكهرضوئية
- Photo-current	- التيار الكهرضوئي
- Photo-electric Effect	- الأثر الكهرضوئي
- Photo-excitation	- إثارة ضوئية
- Photo-resistor	- مقاومة ضوئية
- Polarizer	- المقطب
- Transparency	- الشفافية
- Valence Band	- عصابة التكافؤ

6 - المراجع :

1- المرجع 1 - الفصل الثامن .

2- المرجع 2 - الفصلان الثامن والخامس عشر .

3- النشرة التجريبية (P7.2.3.1) من شركة ليبولد " Leybold Didactic " .

التجربة 13 :

قياس وسعية منطقة النفاد في الوصلة p - n

1- الغاية من التجربة :

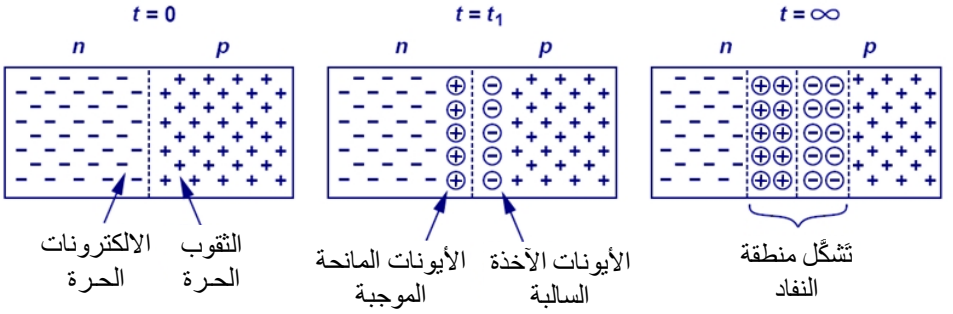
1- دراسة تغير وسعية منطقة النفاد للوصلة (p-n) بدلالة فرق الكمون العكسي المطبق عليها .

2- تعيين قيمة التركيز المختزل للشوائب N^* في هذه الوصلة .

3- تعيين فرق كمون التماس U_0 بين طرفي الوصلة .

2- المبدأ النظري :

يطلق اسم الوصلة (p - n) على عينة نصف ناقلة من بلورة وحيدة جعلت فيها منطقتان متصلتان ، إحداهما من النوع (p) والأخرى من النوع (n) ، وهي عبارة عن قطعة بلورية واحدة طُعّم جانباها بشكلين مختلفين ، فهي ليست مؤلفة من قطعتين مختلفتين على اتصال فيما بينهما كما قد توحي التسمية بذلك ، إذ أنه من المستحيل الحصول على استمرار في البنية البلورية ابتداء من قطعتين منفصلتين .

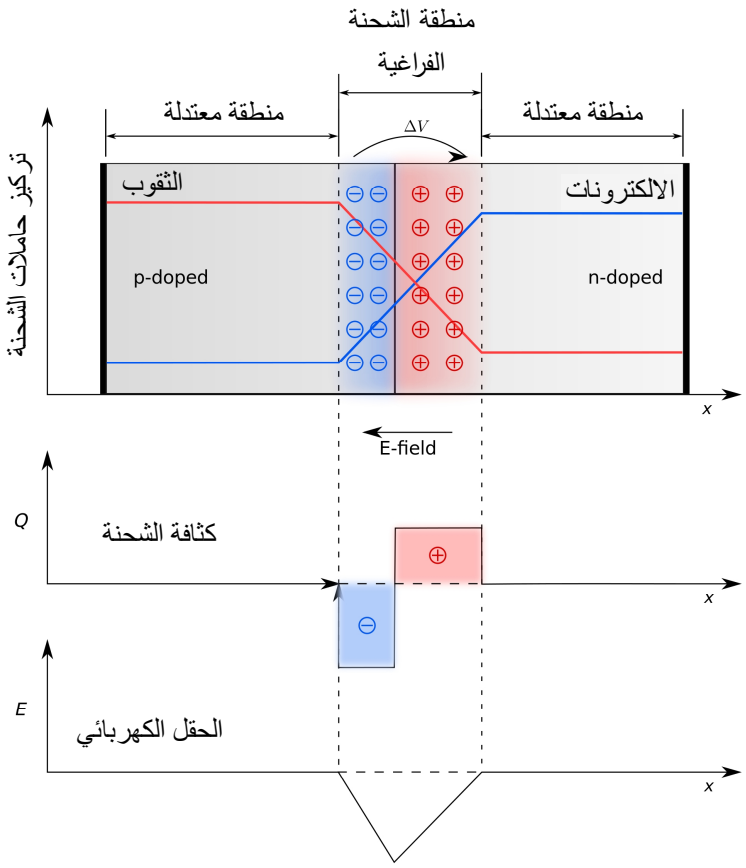


الشكل (1) : بدء تشكل منطقة النفاد .

في اللحظات الأولى لتشكل الوصلة ، تبدأ الإلكترونات الحرة بالانتشار عبر الوصلة من المنطقة (n) إلى المنطقة (p) ، وبالمثل تنتشر الثقوب من (p) إلى (n) ، وذلك بسبب وجود تدرج كبير في التركيز عند الوصلة بالنسبة لكل من الإلكترونات و الثقوب ، شكل (1) .

يؤدي هذا التدرج إلى تياري انتشار في اتجاه تناقص التركيز إلا أن تياري الانتشار للإلكترونات و الثقوب لا يستمران بسبب أن جزء المنطقة (p) القريب من الوصلة سرعان ما يكتسب شحنة سالبة بسبب انتقال جزء من إلكترونات المنطقة (n) إليه واتحادها مع الثقوب تاركة الأيونات الآخذة السالبة . وكذلك الأمر يمكن القول إن جزء المنطقة (n) القريب من الوصلة يكتسب شحنة موجبة ، ويكون الأثر النهائي هو تشكل طبقة مزدوجة مشحونة سلبا في الجانب (p) ، ومشحونة إيجابا في الجانب (n) ، سببها الشوائب المتأينة ، لذلك تدعى بمنطقة الشحنة الفراغية ، وبما أنها شبه خالية من حاملات الشحنة الحرة (الإلكترونات و الثقوب) ، فهي تدعى كذلك بمنطقة النفاد . ينشأ في هذه المنطقة حقل كهربائي قوي يمنع استمرار انتشار حاملات الشحنة الحرة ، ويحافظ على انفصال النوعين عن بعضهما .

لدراسة مثل هذه الوصلة نعتمد التمثيل الأحادي البعد الذي تدرس فيه تغيرات تركيز الشوائب وحاملات الشحنة الكهربائية والحقل الكهربائي وغيرها ... باعتبارها توابع لمتحول واحد هو المسافة x التي تتغير وفقها التراكيز . فإذا اعتبرنا التقريب المسمى بالوصلة الفجائية أو الحادة abrupt junction ، حصلنا عندئذٍ على المخططات المبينة على الشكل (2) . يمثل المخطط العلوي تغير توزع الشحنات الموجبة والسالبة في المنطقتين n و p المتجاورتين . إن وجود الأيونات المانحة الموجبة وعدد مساوٍ لها من الإلكترونات الحرة في المنطقة n البعيدة عن منطقة الوصل يجعل المادة في المنطقة n معتدلة كهربائياً ، ويمكن قول الشيء ذاته بالنسبة للمنطقة p .



الشكل (2) : تركيز حاملات الشحنة وكثافة الشحنة والحقل الكهربائي في الوصلة .

أما في منطقة الوصلة بالذات (المنطقة الحدودية بين n و p) فلا تكون المادة معتدلة كهربائياً بسبب هجرة إلكترونات المنطقة الحدودية من الجزء n إلى المنطقة الحدودية المجاورة p ، وهجرة الثقوب من المنطقة الحدودية p إلى المنطقة المجاورة n ، وتكون منطقة الوصلة إذن مشحونة إيجاباً في الجانب n (بسبب بقاء الايونات الموجبة دون إلكترونات تعدلها) ومشحونة سلباً في الجانب p (بسبب بقاء الايونات السالبة دون ثقوب تعدلها) ، وهذا ما يمثله المخطط في الشكل (2) .

تتشكل إذن في المنطقة الحدودية بين الجانب n والجانب p منطقة مشحونة (بأيونات الذرات الشائبة) تدعى كما أسلفنا بمنطقة النفاد أو النضوب depletion region .
وبسبب وجود طبقتي الشحنات المتعاكستين بالإشارة تعمل هذه المنطقة عمل مكثفة ، ودراسة وسعيتها هو موضوع هذه التجربة .
سندرس في هذه التجربة كيفية الاستفادة من قياس وسعية المكثفة الناشئة عن وجود الشحنات المتعاكسة على جانبي الوصلة لتعيين تركيز الذرات الشائبة .
تعطى العلاقة بين الشحنة q والكمون الكهربائي U في أية نقطة x بمعادلة بواسون :

$$\frac{d^2U}{dx^2} = -\frac{q(x)}{\varepsilon_0} \qquad (1)$$

والتي يمكن كتابتها لدى تطبيقها على إحدى نقاط البلورة كما يلي :

$$\frac{d^2U}{dx^2} = -\frac{e}{\varepsilon}\left(N_d - N_a + p - n\right) \qquad (2)$$

حيث : ε : ثابتة العزل الكهربائي لنصف الناقل
N_d : لتركيز الذرات المانحة (التي يفترض أنها متأينة في درجة الحرارة المعتبرة)
N_a : لتركيز الذرات الآخذة (المتأينة كلها كذلك)
p : تركيز الثقوب الحرة ، n : تركيز الالكترونات الحرة .

إلا أنه يمكننا أن نفترض (بتقريب مقبول) أن ($p = n = 0$) في منطقة الشحنة الفراغية ، فإذا اعتبرنا تقريب الوصلة الفجائية الذي من أجله:

$$N_d \neq 0 \ , \ N_a = 0 \ : \ x > 0 \qquad (3)$$
$$N_a \neq 0 \ , \ N_d = 0 \ : \ x < 0$$

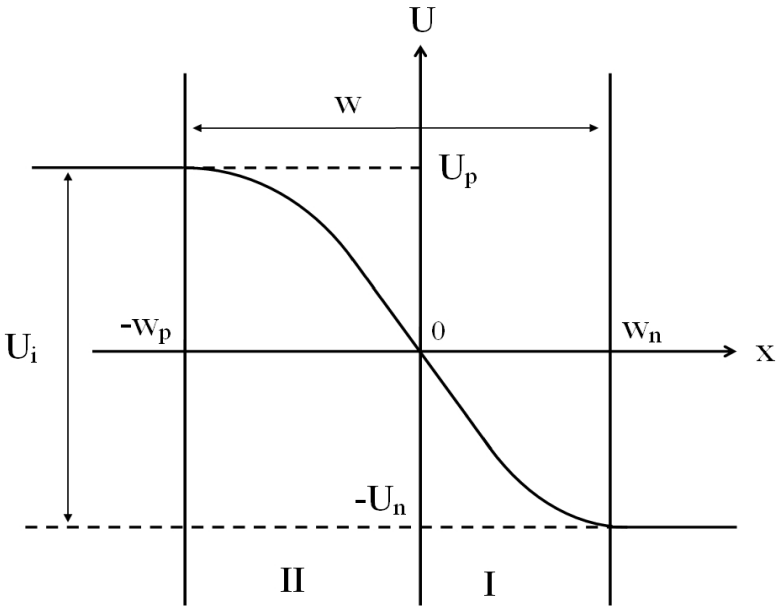
أصبحت لدينا المعادلتان التفاضليتان التاليتان التي تصلح الأولى منهما في المنطقة I من الوصلة والثانية في المنطقة II منها الشكل (3) . في المنطقة I :

$$\frac{dU_I}{dx^2} = -\frac{e}{\varepsilon} N_d \qquad w_n \geq x \geq 0 \qquad (4)$$

وفي المنطقة II :

$$\frac{dU_{II}}{dx^2} = + \frac{e}{\varepsilon} N_a \qquad 0 \geq x \geq -w_p \qquad (5)$$

حيث : ($x = w_n$) و ($x = -w_p$) هما حدا منطقة الشحنة الفراغية .



الشكل (3) : تغير الكمون الكهربائي عبر الوصلة .

إذا اخترنا مبدأ قياس الكمون في النقطة $x = 0$ بحيث تكون $U_I(0) = U_{II}(0) = 0$ أمكننا عندها إجراء تكامل للمعادلتين للسابقتين ، والتوصل إلى أن عرض منطقة النفاد w يعطى بالعلاقة :

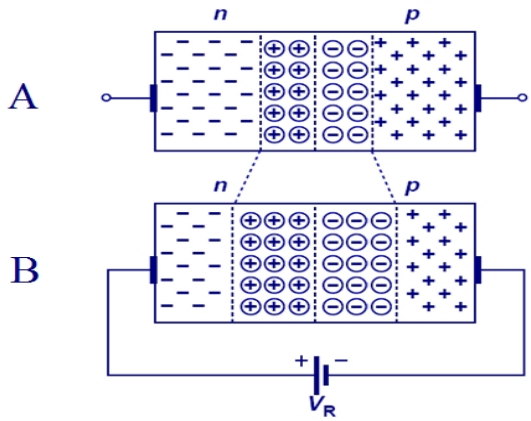
$$w = \sqrt{\frac{2\,\varepsilon\,U}{e\,N^*}} \qquad (6)$$

حيث : $N^* = \frac{N_d N_a}{N_d + N_a}$: التركيز المختزل لحاملات الشحنة .

وإذا تذكرنا أن سعة مكثفة مستوية سطح لبوسيها (A) والمسافة بينهما (w) تعطى بالعلاقة ($C = \frac{\varepsilon}{w} A$) ، أمكننا إيجاد العلاقة بين الكمون U ووسعية منطقة النفاد ، بسهولة :

$$C = \frac{\varepsilon A}{\sqrt{\frac{2 \varepsilon U}{e N^*}}} \qquad (7)$$

أي أن C تتناسب مع مقلوب جذر U التربيعي . إذا طُبّق فرق كمون خارجي U_a بين طرفي البلورة فإنه يظهر بكامله تقريباً في منطقة النفاد ، أما هبوط الكمون في باقي أجزاء البلورة فيمكن إهماله لصغره .



الشكل (4) : أثر الوصل العكسي على عرض منطقة النفاد .

السبب في ذلك هو أن مقاومة منطقة النفاد عالية جداً بسبب خلوها عملياً من حاملات الشحنة الحرة. يمكن إذن اعتبار البلورة التي تحتوي على الوصلة p - n وكأنها مقاومات موصولة على التسلسل إحداها كبيرة جداً (منطقة النفاد) ، ولذلك فإن هبوط الكمون سيكون بشكل أساسي عند هذه المقاومة الكبيرة ولذلك يمكننا أن نكتب:

$$U = U_i - U_a \qquad (8)$$

حيث :

U : محصلة فرق الكمون بين طرفي الوصلة

U_i : فرق الكمون الداخلي أو الذاتي (كمون التماس) قبل تطبيق الكمون الخارجي

U_a : فرق الكمون الخارجي المطبق على الوصلة ، ويكون موجباً في حالة الوصل الأمامي (التغذية الأمامية : وصل المربط الموجب بالمنطقة p) ، ويكون سالباً في حالة الوصل العكسي (التغذية العكسية : وصل المربط الموجب بالمنطقة n) .

يصح هذا التقريب في حالة الوصل العكسي أكثر منه في الوصل الأمامي ، ويبين الشكل (4) أثر الوصل العكسي على منطقة النفاد . يمكن إذن تعميم النتائج السابقة على الحالة اللاتوازنية ، وذلك بالتعويض عن فرق الكمون U بـ ($U_i - U_a$) في حالة الوصل الأمامي و ($U_i + |U_a|$) في حالة الوصل العكسي . وهكذا يكون عرض منطقة النفاد في حال الوصل العكسي مثلا (سنأخذ القيمة المطلقة لـ U_a) :

$$w = \sqrt{\frac{2\varepsilon (U_i + U_a)}{e N^*}} \qquad (9)$$

وتكون الوسعية :

$$C = \sqrt{\frac{e\varepsilon A^2 N^*}{2 (U_i + U_a)}} \qquad (10)$$

ومنه :

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2 U_a}{e\varepsilon A^2 N^*} + \frac{2 U_i}{e\varepsilon A^2 N^*} \qquad (11)$$

من الواضح أنه إذا كان أحد التركيزين (N_a , N_d) أقل كثيراً من الآخر ، فإن قيمة التركيز N^* تكون مساوية تقريباً التركيز الأقل ، فمثلا إذا كان $N_d << N_a$ فإن :

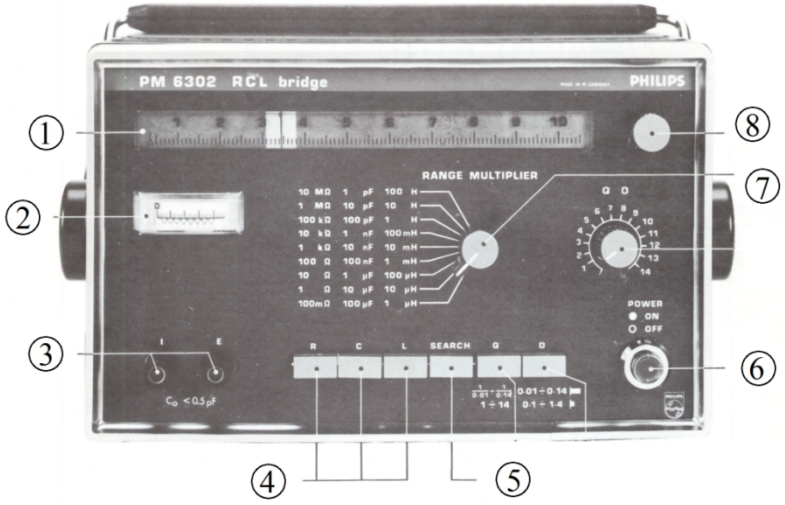
$$N^* = \frac{N_d}{1+\frac{N_d}{N_a}} \approx N_d \left(1 + \frac{N_a}{N_d}\right) \approx N_d \qquad (12)$$

وهذا ما نصادفه في حالة الوصلة (p-n) حيث التركيز $N_d << N_a$.

3 - أدوات القياس و طرائق العمل :

✯ - الأجهزة و الأدوات التجريبية :

- جسر قياس (RCL) نوع : Philips PM 6302 RCL Bridge .
- منبع تيار مستمر متغير 0 - 7.5 V . - أسلاك توصيل .
- ثنائي من السيلكون .



الشكل (5) : جسر قياس الممانعات .

1: مسطرة القياس ، 2: مؤشر التوازن ، 3: مأخذ لوصل العنصر المقاس 4: اختيار نوع المقدار المقاس ، 5: زر البحث ، 6: زر التشغيل 7: ناخب مجال القياس ، 8: مفتاح التغيير للمركبة المقيسة ، 9: مفتاح التغيير للمركبة المتممة .

☆ - الإعداد التجريبي:

1 - قم بوصل طرفي المنبع بالمأخذين خلف جهاز جسر قياس الممانعات .

2 - قم بوصل الثنائي المدروس بالمأخذ (3) في جسر قياس الممانعات .

☆ - ملاحظات مهمة :

1 - بما أن المقياس المستخدم هو جسر قياس الممانعات التي تحتوي مركبتين حقيقية وتخيلية ، فإن التوازن يتطلب تغيير في كلا المركبتين حتى تحصل على أقل انحراف للمؤشر ، أي تغيير كل من المفتاحين (8) و (9) * .

* : راجع تجربة " قياس الممانعات بالطريقة السمعية " - كتاب الفيزياء العملية 2 .

☆ - الإجراء التجريبي :

1 - شغل الأجهزة وطبق على الثنائي فرقا في الكمون قيمته (2.5 V) .

2 - حدد مجال القياس وذلك بالضغط على زر البحث (5) وتغيير الناخب (7) إلى أن يقع مؤشر التوازن (2) على المنطقة المشار إليها بخط منكسر .

3 - دوّر المفتاح (8) وراقب مؤشر التوازن حتى يستقر عند الوضع الذي نحكم فيه على أنه أقل انحراف ممكن للمؤشر ، ثم جرب تغيير المفتاح (9) لإكمال موازنة الجسر حتى تحصل على أقل انحراف من كلا المفتاحين (8 و 9) .

4 - اقرأ القيمة على مسطرة القياس (1) ، فتكون قيمة الوسعية هي جداء تلك القيمة بمعامل ضرب المجال الذي يحدده الناخب (7) .

5 - قم بزيادة الكمون تدريجياً حتى (7 V) وبخطوة (0.5 V) وابحث في كل مرة عن وضع التوازن ، وسجل قيمة الوسعية ، ثم رتب نتائجك في جدول كالتالي :

U_a(V)	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7
C (F)										
$\frac{1}{C}$ (F^{-1})										
$\frac{1}{C^2}$ (F^{-2})										

6 - ارسم منحني تغيرات (C) بدلالة (U) .

7 - ارسم تغيرات ($\frac{1}{C^2}$) بدلالة (U) ، واستنتج من المستقيم الناتج كمون التماس للوصلة (U_i) وقيمة التركيز الفعال لحاملات الشحنة (N^*) من العلاقة (11) ، وقدّر الارتياب فيهما ، حيث ($\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$) ، وللسيلكون ($\varepsilon_r = 11.7 \pm 0.1$) ، بينما تختلف مساحة سطح الوصلة (A) باختلاف الثنائي ، وقيمتها في الثنائي المدروس هي ($A = 1.00 \pm 0.05\ mm^2$) .

4 - تقييم العمل التجريبي :

1 - هل هناك علاقة بين سعة منطقة النفاد للوصلة (p-n) والمادة المصنوعة منها؟

2 - هل تزداد أم تنقص وسعية منطقة النفاد مع زيادة الكمون العكسي المطبق ؟

5 - الكلمات المرجعية :

- الوصلة المفاجئة - Abrupt Junction
- منطقة حدودية - Boundary Region
- وسعية - Capacitance
- مكثفة - Capacitor
- تركيز - Concentration
- كمون التماس - Contact Potential
- منطقة النفاد - Depletion Region
- انتشار - Diffusion
- شوائب - Dopants
- الوصلة المتدرجة - Gradient Junction
- أيونات - Ions
- وصلة - Junction
- معتدل - Neutral
- التركيز المختزل - Reduced Concentration

6 - المراجع :

1- المرجع 1 - الفصل الثامن .

2- المرجع 2 - الفصل الثامن .

3 - المرجع 5 .

التجربة 14 :

قياس العمر الوسطي لحاملات الشحنة في الوصلة p - n

1- الغاية من التجربة :

1- قياس العمر الفعال للحاملات الأقلية للشحنة (زمن اتحادها مع الحاملات الأكثرية) في نصف الناقل .

2- المبدأ النظري :

يحوي نصف الناقل من النوع n مثلاً في درجة الحرارة العادية وفي حالة التوازن ، نوعي حاملات الشحنة :

أولاً : الإلكترونات ، وهي الحاملات الأكثرية للشحنة ، ومنشؤها تأين الذرات المانحة من جهة ، والتولد المستمر للأزواج إلكترون - ثقب بسبب التهيج الحراري من عصابة التكافؤ إلى عصابة النقل .

ثانياً : الثقوب ، وهي الحاملات الأقلية للشحنة ، ومنشؤها تولد الأزواج الحراري .

بوجود عملية إعادة الاتحاد التي يزول بنتيجتها زوج الإلكترون - ثقب ، يكون تركيز كل من نوعي حاملات الشحنة ثابتاً في درجة حرارة العينة .

نرمز للتركيزين التوازنيين للإلكترونات والثقوب في نصف الناقل من النوع (n) بالرمزين (n_{n_0}) و (p_{n_0}) على الترتيب ، بينما في النوع (p) نعطيهما الرمزين (n_{p_0}) و (p_{p_0}) على الترتيب أيضا .

يمكن زيادة تركيز الحاملات الأقلية للشحنة في الوصلة (p - n) بشكل مصطنع بوساطة حقن حاملات الشحنة بعدة طرق ، منها تطبيق فرق كمون في الاتجاه الأمامي على الوصلة (p-n) ، أو تسليط ضوء طول موجته مناسب عليها أو ....

إن الحاملات الأقلية المحقونة في نقطة ما ، أو في مستوى ما ، (ولنقل $x = 0$) من نصف الناقل ستنتشر فيه ، ويعبر عن تغير تركيز الثقوب في المنطقة n وفق المحور X مثلاً بالعلاقة :

$$\Delta p_n(x) = p_n - p_{n_0} = \Delta p_n(x = 0)\, e^{-\frac{x}{L_p}} \quad (1)$$

$$; \; L_p = \sqrt{D_p \tau} \quad , \quad D_p = \mu_p \frac{kT}{e} \quad (2)$$

حيث:

$\Delta p_n(x)$: التغير في تركيز الثقوب في النقطة (x) .

p_n : تركيز الثقوب في المنطقة n بعد الحقن .

p_{n_0} : التركيز التوازني للثقوب في المنطقة (n) .

L_p : طول الانتشار للثقوب ، D_p : معامل الانتشار للثقوب

μ_p : حركية الثقوب ، k : ثابت بولتزمان

T : درجة الحرارة المطلقة ، e : شحنة الإلكترون

τ : الزمن الوسطي لاتحاد الإلكترونات مع الثقوب (زمن إعادة الاتحاد) .

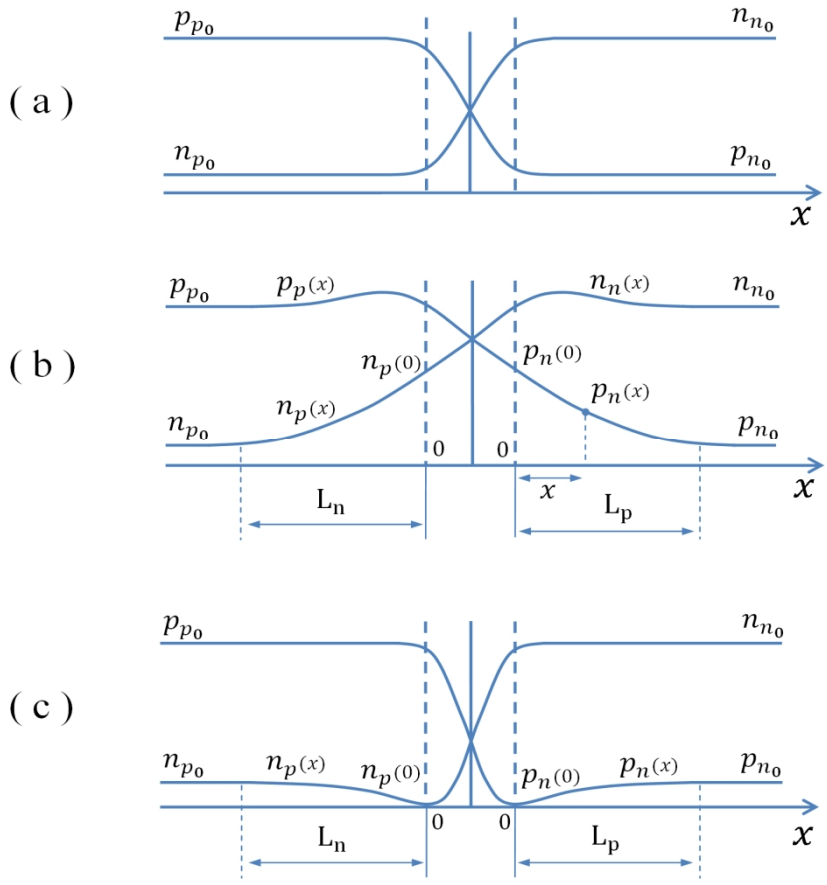
يؤدي تطبيق فرق كمون في الاتجاه الأمامي على الوصلة (p - n) إلى انخفاض حاجز الكمون مما يؤدي بدوره إلى حقن الحاملات الأقلية للشحنة (تنتقل بعض الثقوب إلى المنطقة n وبعض الإلكترونات إلى المنطقة p) ، ويصبح تركيز الثقوب عند حدود منطقة الشحنة الفراغية في المنطقة n هو :

$$p_n(x = 0) = p_{n_0}\, e^{\frac{eU}{kT}} \quad (3)$$

إن هذه الثقوب الأقلية المحقونة في المنطقة n ستجذب الإلكترونات الأكثرية مما يؤدي إلى زيادة في تركيز الإلكترونات بجوار منطقة النفاد في المنطقة n ، ويكون

أثر ذلك أن تحجب شحنة الإلكترونات السالبة شحنة الثقوب الموجبة الزائدة المحقونة ولذلك لا تؤدي الثقوب الزائدة المحقونة (أو الإلكترونات الزائدة المحقونة) إلى نشوء حقل كهربائي إضافي ، يمكن أن يؤثر في انتشار الحاملات الأقلية داخل البلورة أي أن حركة هذه الحاملات تتم بفضل عملية الانتشار فقط ، ويتعين عمق انتشار هذه الحاملات بعملية إعادة الاتحاد فقط.

الشكل (1) ثلاثة مخططات تبين تغير تركيز كل من نوعي حاملات الشحنة بدلالة المسافة في منطقة الوصلة (p-n) من أجل الحالة التوازنية (a : U = 0) ومن أجل التغذية الأمامية (b) ثم التغذية العكسية (c) .



الشكل (1)

لقياس العمر الفعال لحاملات الشحنة في الوصلة (p - n) يمكن اللجوء لحقن الحاملات الأقلية للشحنة بوساطة تطبيق نبضات كمون في الاتجاه الأمامي . فخلال زمن النبضة يزداد تركيز الحاملات الأقلية للشحنة على جانبي منطقة الشحنة الفراغية (الشكل b - 1) ، وحين تنتهي النبضة (توقف الكمون المطبق) لا تعود الوصلة إلى حالتها التوازنية التي كانت عليها قبل تطبيق الكمون مباشرة ، إنما تدريجياً خلال زمن يتعلق بعملية اتحاد الثقوب والإلكترونات ، الشكل (1) . يعطى تناقص الثقوب الإضافية مع الزمن بسبب عملية الاتحاد بالعلاقة :

$$\frac{\partial \mathrm{p}}{\partial \mathrm{t}} = -\frac{p_n - p_{n_0}}{\tau} \qquad (4)$$

أي أن التركيز يتناقص أسياً مع الزمن :

$$\Delta p_n = \Delta p_{n_0}\, e^{-\frac{\mathrm{t}}{\tau}} \qquad (5)$$

$$\Delta p_n = p_n(\mathrm{t}) - p_{n_0} \ , \ \Delta p_{n_0} = p_n(\mathrm{t}=0) - p_{n_0} \qquad (6)$$

حيث :

Δp_n : التركيز الإضافي في اللحظة (t) ، Δp_{n_0} : التركيز الإضافي الابتدائي .

يمكن اعتبار الزمن المميز لزوال الشحنات في منطقة الشحنة الفراغية τ مساوياً عمر الحاملات الأقلية للشحنة ضمن شروط معينة ، أهمها أن يكون تركيز حاملات الشحنة المحقونة صغيراً أي :

$$n_p \ll p_p \quad , \quad n_p \ll p_p \qquad (7)$$

وضمن هذه الشروط يمكن اعتماد النظرية المبسطة التالية :

في التوازن الحراري يكون تركيز الحاملات الأقلية للشحنة ، (ولتكن الثقوب في المنطقة n) على حدود منطقة الشحنة الفراغية يتناسب طرديا مع $\left(e^{\frac{\mathrm{eU}}{\mathrm{kT}}} \right)$ أي:

$$p_n(t) = p_{n_0} e^{\frac{eU}{kT}} , p_n(t=0) = p_{n_0} e^{\frac{eU_0}{kT}} \quad (8)$$

بالتعويض في العلاقة (6) ثم في العلاقة (5) والاختصار نجد :

$$e^{\frac{eU}{kT}} - 1 = \left(e^{\frac{eU_0}{kT}} - 1 \right) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (9)$$

إن قيمة الكمون الحراري ($\frac{kT}{e}$) في درجة حرارة المخبر هي تقريبا 25 mV بينما تكون كل من U و U_0 من رتبة عدة فولطات ، مما يسمح لنا بإهمال (1-) أمام التابعين الأسيين ونستطيع أن نكتب :

$$e^{\frac{eU}{kT}} = e^{\frac{eU_0}{kT}} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (10)$$

وبالتالي :

$$U = U_0 - \frac{kT}{e} \frac{t}{\tau} \quad (11)$$

مما يدل على أن U تتغير بشكل خطي مع الزمن عندما يصح التقريب المذكور ويكون :

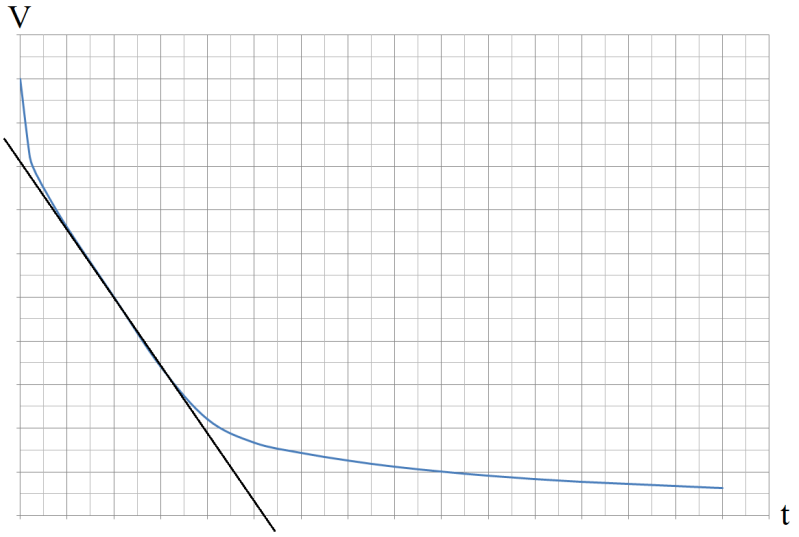
$$\frac{dU}{dt} = -\frac{kT}{e\tau} \quad , \quad \tau = -\frac{kT}{e} \frac{dt}{dU} \quad (12)$$

ومنه :

$$\tau = \frac{kT}{e} \left| \frac{\Delta t}{\Delta U} \right| \quad (13)$$

وعلى هذا يمكن تعيين τ (عمر حاملات الشحنة) من منحني تغير U مع الزمن .
تسمح لنا العلاقة (13) بتعيين τ تجريبياً ، وذلك بقياس ميل الجزء المستقيم من الخط البياني لتحول U بدلالة الزمن بعد انتهاء النبضة (أي بعد اللحظة t = 0)

الشكل (2) . وبما أن تناقص U سريع جداً لصغر الثابتة τ فلابد من تكرار العملية عدداً كبيراً من المرات ومراقبتها على راسم الاهتزاز المهبطي . لذلك تطبق نبضات كمون مستطيلة دورية (ذات تواتر مناسب) ويُفحص المنحي الحاصل لتغير U مع الزمن على شاشة راسم الاهتزاز . وتحسب من ميل الجزء المستقيم منه كما هو واضح بالشكل (2) قيمة الثابتة τ .

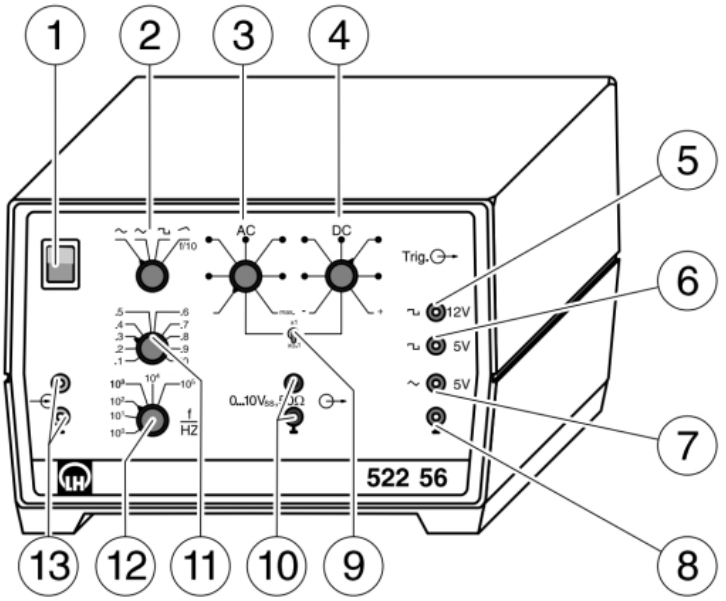


الشكل (2)

3 - أدوات القياس و طرائق العمل :

☆ - الأجهزة والأدوات التجريبية :

- جهاز مولد النبضات أو الاهتزازات .
- مجموعة من الثنائيات .
- راسم اهتزاز مهبطي .
- لوحة يثبت عليها عدد من الثنائيات .



الشكل (3) : مولد النبضات (الاهتزازات) الكهربائية

1- زر التشغيل ، 2- ناخب انتقاء شكل النبضة ، 3- مفتاح التحكم بسعة النبضة

4- مفتاح التحكم بالسوية الثابتة للنبضة ، 5- خرج لنبضة مربعة بسعة 12 V

6- خرج لنبضة مربعة بسعة 5 V ، 7- خرج لنبضة مثلثية بسعة 5 V

8- أرضي ، 9- زر مضاعف خرج النبضة ، 10- طرفا الخرج المتغير

11- مفتاح تغيير قيمة تواتر النبضة ، 12- ناخب لتغيير مرتبة تواتر النبضة .

تستخدم في هذه التجربة النبضات المستطيلة التي يتم اختيارها بمفتاح انتقاء شكل النبضة (2) . نحصل على نبضة مربعة ذات سعة ثابتة (5 V) أو (12 V) بين المربطين (6-8) أو (5-8) على الترتيب . أما إذا أريد التحكم بسعة النبضة فتؤخذ بين المربطين (10) ، ويتم عندئذ تغيير سعتها بالمفتاح (3) ، ويتم التحكم بتواترها بناخب المجال (12) والمفتاح المستمر(11) . أما المفتاح (4) فيمكننا من التحكم بالسوية الثابتة DC للنبضة .

☆ - الإعداد التجريبي:

1 - قم بوصل مولد الاهتزازات مع الثنائي المدروس وراسم الاهتزاز المهبطي .

☆ - ملاحظات مهمة :

1 - انتبه إلى المأخذ المناسب للإشارة ، وتجنب تطبيق تواترات عالية على الثنائي .

☆ - الإجراء التجريبي :

1 - شغل منبع الإشارة وراسم الاهتزاز المهبطي وطبق النبضات المستطيلة على الثنائي نصف الناقل في الاتجاه الأمامي .

2 - افحص الإشارة على راسم الاهتزاز واختر تواترات مناسبة (500 Hz مثلا) وسعات مناسبة للنبضة حتى حصولك على شكل مشابه للشكل (2) .

3 - انقل بدقة على ورقة مليمترية الشكل الذي حصلت عليه على راسم الاهتزاز المهبطي لتغيرات (U) بدلالة (t) .

4 - عين ميل الجزء المستقيم من المنحني الممثل لتناقص U مع الزمن في نهاية النبضة وذلك بقياس Δt , ΔU على شاشة الراسم . يلاحظ مع بدء زوال النبضة قطعة مستقيمة شاقولية تأخذ نهايتها بدء المستقيم الممثل للتغير ($\Delta t/\Delta U$) والمماس له يعين الميل ، ثم قدّر الارتياب في قياساتك .

5 - احسب العمر الفعال τ لحاملات الشحنة من العلاقة (12) ، ثم قدّر الارتياب فيه بشكل مناسب .

6 - كرر القياس من أجل تواتر مختلف آخر ، واحسب τ وقارنها بالقيمة السابقة .

7 - ادرس بقية الثنائيات بنفس الطريقة ، وقارن قيم τ الناتجة .

4- تقييم العمل التجريبي:

1 - هل يتغير العمر الوسطي لحاملات الشحنة مع التواتر ؟

2 - ما سبب اختيار النبضة المستطيلة لدراسة الثنائيات ؟ وهل تصلح الإشارة المثلثية أو الجيبية مثلا ؟

5 - الكلمات المرجعية :

- حالة التوازن - Balance State
- عمر حاملات الشحنة - Charge Carriers Lifetime
- تركيز - Concentration
- العمر الفعال - Effective Lifetime
- إثارة - Excitation
- تولد - Generation
- حقن - Injection
- تأين - Ionization
- الأكثرية - Majority
- الأقلية - Minority
- زوج - Pair
- حاجز الكمون - Potential Barrier
- نبضة - Pulse
- إعادة الاتحاد - Recombination

6 - المراجع :

1- المرجع 1 - الفصل الثامن .
2- المرجع 2 - الفصل الثامن .
3 - المرجع 5 .

التجربة 15 :

دراسة تأثير درجة الحرارة في المنحني المميز للوصلة (p - n)

1- الغاية من التجربة :

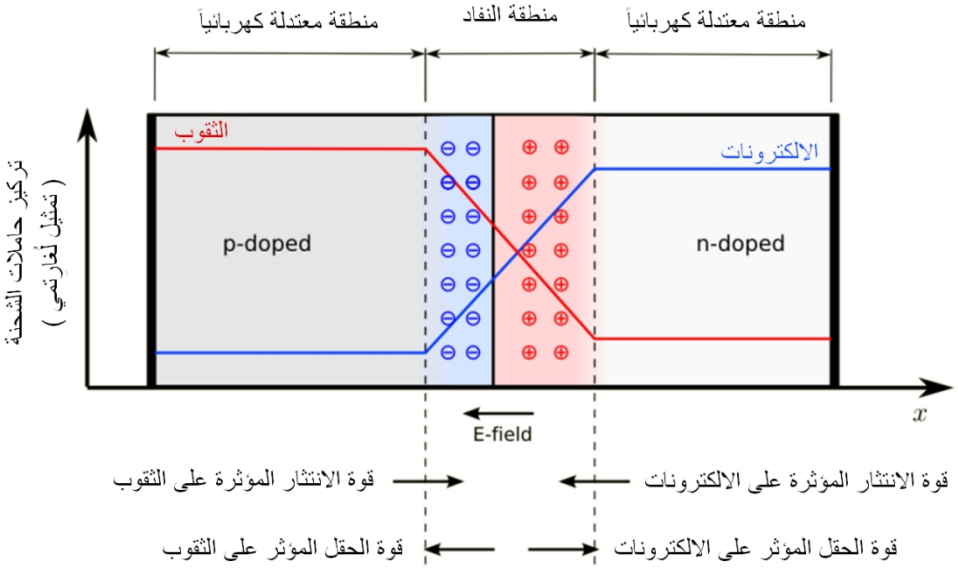
1- دراسة المنحنيات المميزة للوصلة (p - n) في حالة التغذية الأمامية والعكسية عند درجات حرارة مختلفة .

2- دراسة علاقة تيار الإشباع بدرجة حرارة الثنائي .

3- تعيين فاصل الطاقة للمادة نصف الناقلة المكونة للوصلة (p-n) .

2- المبدأ النظري :

يطلق على جزأي بلورة نصف ناقلة ، مشوبين إشابة مختلفة بحيث إن أحد الجزأين يكون من النوع n والآخر من النوع p ، اسم الوصلة (p - n) ، وتنشأ في هذه المنطقة الحدودية بينهما تيارات وحقول كهربائية موضعية تحدد عمل الوصلة .



الشكل (1) : الوصلة p-n .

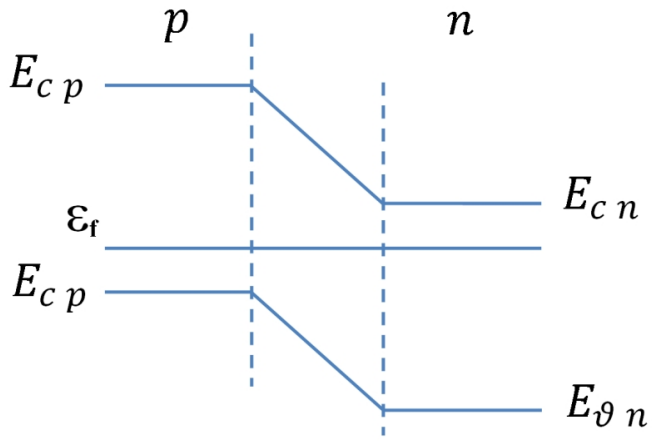
بعد تشكل الوصلة بوقت طويل ، وبالرغم من تكوّن منطقة الشحنة الفراغية ، فإنها تظل في حالة توازن ديناميكي حيث تستمر الإلكترونات والثقوب باجتياز الوصلة من n إلى p وبالعكس .

إذا حصرنا اهتمامنا بالإلكترونات وحدها في البداية ، وجدنا أن هنالك تيارين يمران عبر الوصلة :

1 - تيار من (n) إلى (p) بسبب تركيز الإلكترونات العالي في المنطقة (n) ويعرف هذا التيار بتيار الاتحاد ، لأن الإلكترونات التي تنتقل إلى المنطقة (p) غالبا ما تتحد مع الثقوب هناك ، ويرمز له بالرمز (J_r) .

2 - تيار التولد (J_g) ، الذي يجري من الجانب (p) إلى الجانب (n) ، والناشئ عن تولد الإلكترونات حراريا وانجذابها بفضل حقل منطقة النفاد .

يتم التوازن حين يتساوى هذان التياران ($J_r = J_g$) . إن وضع التوازن هذا هو وضع ديناميكي ، حيث تسري التيارات باستمرار عبر الوصلة ، لكنها توازن بعضها بالنسبة إلى كل نوع من نوعي حاملات الشحنة على حدة .



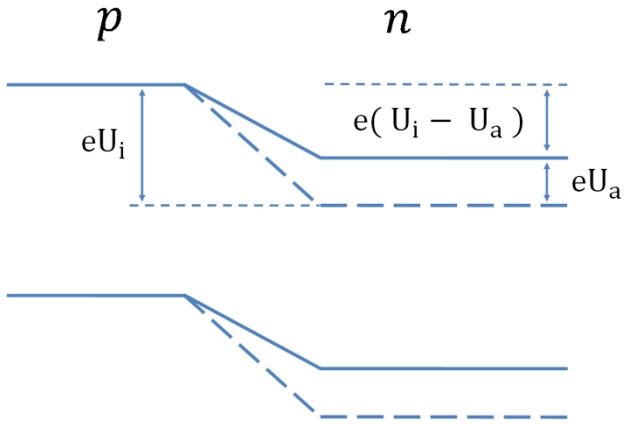
الشكل (2) : مخططات الطاقة في الوصلة (p-n) .

ينبغي أن تكون لسوية فيرمي القيمة الثابتة ذاتها في كل أجزاء البلورة ، بما في ذلك منطقة الوصلة ، ويبين الشكل (2) أثر الوصل على مخططات سويات الطاقة ،

حيث نرى كيف أن سويات الطاقة في الجانب (p) قد ارتفعت بالنسبة إلى السويات في الجانب (n) ، وذلك بسبب انتقال الشحنات ، فإذا فرضنا أن كمون التماس الناشئ (الذاتي) هو (U_i) ، فإن فرق الطاقة بين الجانبين هو (eU_i) .

يمكننا أن نرى بوضوح أن تلك الإلكترونات فقط من إلكترونات عصابة النقل في المنطقة (n) التي طاقتها الحركية تفوق حاجز الكمون (U_i) تستطيع الانتشار من الجانب (n) إلى الجانب (p) .

لنفرض الآن أنه طبق توتر خارجي ($U_a < U_i$) على الوصلة (p - n) بحيث تكون المنطقة (p) موجبة كما في الشكل (3) ، تدعى طريقة الوصل هذه بالتغذية الأمامية. نلاحظ ارتفاع سويات الطاقة في الجانب (n) بالمقدار (eU_i) وبالتالي انخفاض حاجز الكمون بالمقدار نفسه . لنناقش أثر ذلك في تياري الانتشار و التوليد.



الشكل (3) : مخططات الطاقة من أجل تغذية أمامية .

إن تيار التوليد لا يتأثر بتطبيق (U_a) لأنه لا يزال هنالك حقل شديد في المنطقة يجذب الإلكترونات من الجانب (p) . أما تيار الاتحاد (J_r) فيتأثر بشكل قوي لأنه يصبح أمام الإلكترونات في الجانب (n) حاجز كمون أخفض بالمقدار (eU_a) مما كان عليه قبل تطبيق الكمون (U_a) ، فيزداد بالتالي هذا التيار متناسبا مع المضروب ($e^{\frac{eU_a}{kT}}$) ، وهكذا يكون لدينا :

$$I_f = I_0 \left(e^{\frac{eU_a}{kT}} - 1 \right) \qquad (1)$$

حيث :

I_0 : تيار الإشباع وهو مستقل عن فرق الكمون المطبق U_a

U_a : الكمون المطبق ، T : درجة الحرارة المطلقة .

يدعى I_0 أيضا بالتيار العكسي (لأنه يمثل تقريباً قيمة عليا للتيار في حالة التغذية العكسية قبل انهيار الثنائي) ، أو تيار التولد لأن منشأه هو تولد الأزواج إلكترون - ثقب في منطقة الشحنة الفراغية ، فهو يتعلق إذن كثيراً بدرجة الحرارة .

إن الدراسة المفصلة لـ (I_0) تبين أنه يتناسب طرديا مع (n_i^2) حيث (n_i) : هو التركيز الذاتي و يُعطى بالعلاقة :

$$n_i = 2 \left(\frac{kT}{2\pi\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} (m_e m_h)^{\frac{3}{4}} e^{\frac{-E_g}{2kT}} \qquad (2)$$

حيث : m_e : الكتلة الفعالة للإلكترونات ، m_h : الكتلة الفعالة للثقوب .

وبالتالي :

$$I_0 \propto e^{\frac{-E_g}{kT}} \qquad (3)$$

إذا كان الكمون المطبق من رتبة عدة أجزاء من الفولط يكون ($U_a \gg \frac{kT}{e}$) حيث أنه في درجة حرارة المخبر ($kT \approx 0.025\ eV$) ، عندها يمكن إهمال الواحد ، ويأخذ التيار الأمامي الشكل التالي :

$$I_f \propto e^{\frac{eU_a - E_g}{kT}} \qquad (4)$$

$$\ln(I_f) = \frac{eU_a - E_g}{k} \frac{1}{T} + C_1 \qquad (5)$$

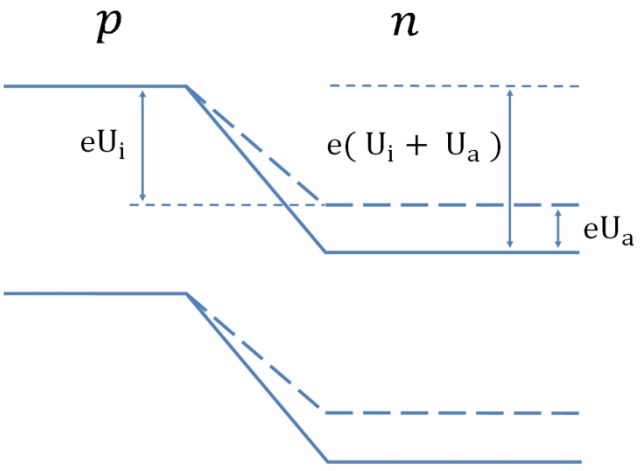
$$\ln(I_f) = \frac{e}{kT} U_a + C_2 \qquad (6)$$

لننظر الآن في التغذية العكسية التي يكون فيها (p) موصولا بالقطب السالب كما في الشكل (4) . يؤدي هذا الوصل إلى انخفاض سويات الطاقة في الجانب (n) بالمقدار (eU_a) وبالتالي ارتفاع حاجز الكمون بالمقدار نفسه . نجد أن تيار التوليد هنا كذلك لا يتأثر بفرق التوتر (U_a) . من ناحية أخرى ، يؤدي ازدياد ارتفاع حاجز الكمون إلى انخفاض تيار الاتحاد بشكل يتناسب مع ($e^{\frac{-eU_a}{kT}}$) ، وهكذا يكون لدينا :

$$I_r = I_0 \left(1 - e^{\frac{-eU_a}{kT}} \right) \qquad (7)$$

وبالمثل ، ومن أجل كمون ($|U_a| \gg \frac{kT}{e}$) ، يمكن إهمال المضروب الأسي أمام الواحد ، ويصبح التيار العكسي على الشكل :

$$I_r \propto e^{\frac{-E_g}{kT}} \quad \Rightarrow \quad \ln(I_r) = \frac{-E_g}{k} \frac{1}{T} + C \qquad (8)$$



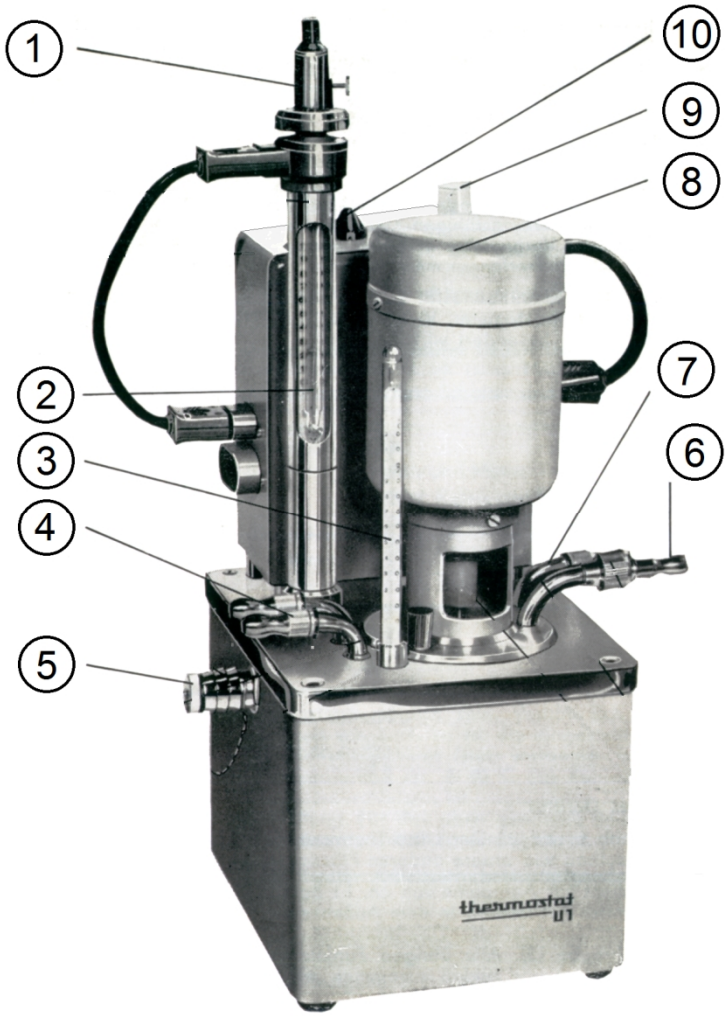
الشكل (4) : مخططات الطاقة في التغذية العكسية .

سندرس المنحني المميز (I-U) للوصلة p - n في هذه التجربة ، أي سندرس تغير التيار بدلالة فرق الكمون المطبق في حالتي التغذية الأمامية والتغذية العكسية ، في درجات حرارة مختلفة (ثابتة من أجل كل منحن مميز) وذلك بغية التوصل لمعرفة تغير تيار الإشباع I_o مع درجة الحرارة .
يستدل من العلاقات السابقة ، أن مثل هذه القياسات تسمح بتعيين فاصل الطاقة للمادة المصنوع منها الثنائي ، كما تسمح بإيجاد قيمة الثابتة k (ثابتة بولتزمان) .

3- أدوات القياس و طرائق العمل :

✯ - الأجهزة و الأدوات التجريبية :

- منبع تغذية مستمر قابل لتغيير الكمون .
- ثنائي نصف ناقل (الوصلة p-n) موضوع في جهاز تثبيت درجة الحرارة.
- معدلة 320 Ω .
- مقياس فولت مستمر .
- مقياس تيار مستمر .
- جهاز تثبيت درجة الحرارة .



الشكل (5) : الأجزاء الرئيسية لجهاز تثبيت درجة الحرارة .

1 - مقبض يُدوَّر لضبط درجة الحرارة بعد تحرير برغي التثبيت .

2 - ميزان حرارة (ميزان الضبط) لضبط درجة الحرارة المراد التثبيت عندها .

3 - ميزان حرارة يقيس درجة حرارة الماء الفعلية .

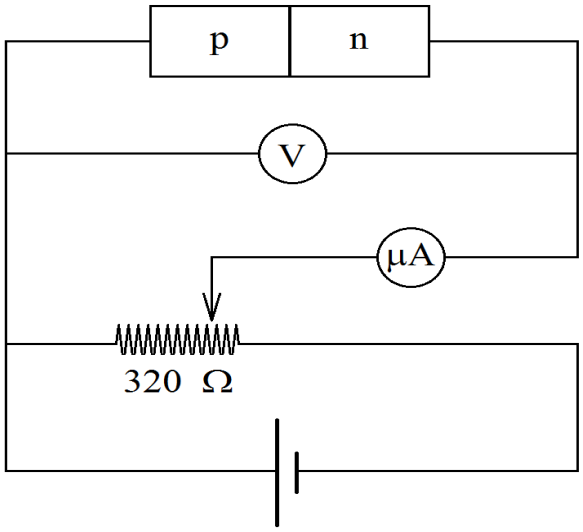
4 - ممر معزول ضمن الماء للتبريد . 5 - فتحة لإدخال الماء إلى خزان الماء .

6 - مخرج . 7 - مدخل . 8 - جسم المضخة .

9 - مفتاح لاختيار سرعة التسخين . 10 - مؤشر ضوئي يضيء عند التسخين .

☆ - الإعداد التجريبي:

يبين الشكل (6) التوصيل العام للتجربة :



الشكل (6) : توصيل التجربة من أجل التغذية الأمامية .

1 - صل مربطي المنبع المستمر إلى مربطي المعدلة .

2 - صل أحد مربطي المعدلة إلى مقياس الميكروأمبير ، ومن ثم إلى نقطة على اللوحة ، وصل زالقة المعدلة إلى نقطة أخرى على اللوحة .

3 - صل الثنائي بين النقطتين على اللوحة ، وصل مقياس فرق الكمون المستمر على التفرع بين طرفي الثنائي .

☆ - ملاحظات مهمة :

1 - اقرأ درجة الحرارة من الميزان وليس من ضابط درجة الحرارة .

2 - انتبه إلى عدم تجاوز قيمة التيار الأمامي (I = 200 mA) ، لأن ذلك يؤدي إلى تسخين نصف الناقل عن طريق التيار ، ولن تكون بذلك القيم دقيقة .

☆ - الإجراء التجريبي :

1 - قس درجة حرارة الماء ، والتي يفترض أن تكون قريبة من درجة حرارة المخبر (من 20 إلى 30) ، وتأكد من استقرارها .

1 - ضع المعدلة (والتي سنستخدمها كمجزئ كمون) على أقل قيمة لها ، ثم طبق بين طرفي المعدلة فرقا في الكمون قيمته (6V) .

2 - حرك زالقة المعدلة بحيث تطبق على الثنائي (الوصلة p-n) فرقا في الكمون قيمته (0.1 V) ، وسجل قيمة التيار الأمامي (I_f) المقابلة .

3 - قم بزيادة الكمون تدريجياً حتى (0.7 V) وبخطوة (0.1 V) ، وسجل في كل مرة قيمة (I_f) .

4 - أعد المعدلة إلى أقل قيمة لها ، ثم قم بعكس طرفي الثنائي على اللوحة .

5 - طبق فرقا في الكمون قيمته (1 V) ، وسجل قيمة التيار العكسي المقابلة (I_r)

6 - قم بزيادة الكمون تدريجياً حتى (5V) وبخطوة (1 V) ، وسجل في كل مرة قيمة (I_r) .

7 - شغل جهاز التسخين بوضع المفتاح (9) على الخيار (H-3) ، واضبط درجة الحرارة بتدوير المقبض (1) بعد تحرير برغي التثبيت لتحريك المؤشر في ميزان الضبط (2) إلى الدرجة $40\ ^oC$ ، ثم ثبت البرغي عندئذ .

8 - انتظر حتى ينطفئ المصباح (10) مما يدل على وصول درجة الحرارة إلى القيمة المطلوبة ، وانتظر حتى تستقر قراءة ميزان الحرارة (3) ، ثم سجلها .

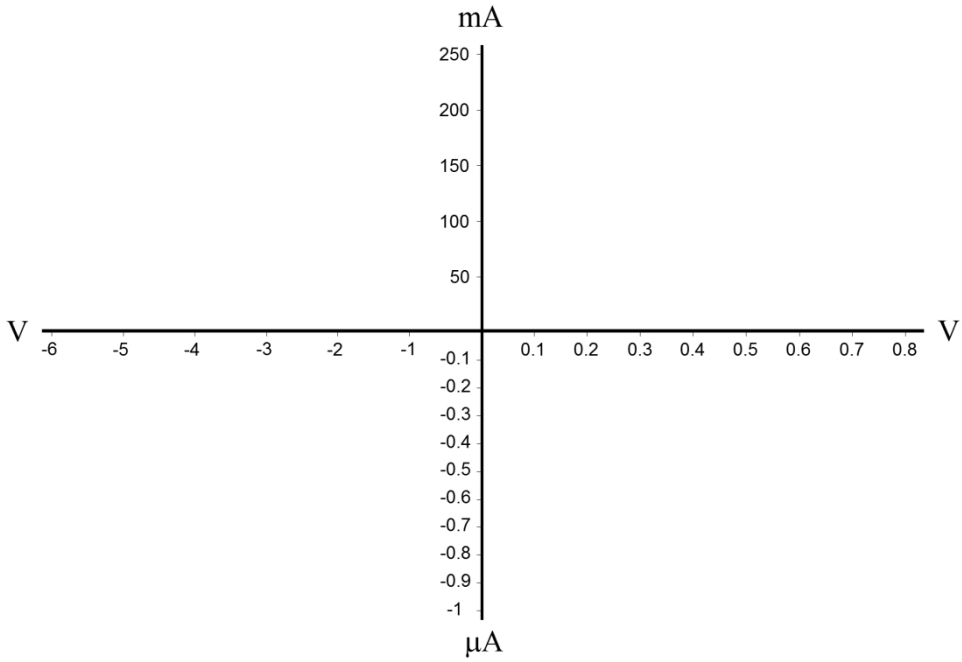
9 - قم بتسجيل قيم (I-U) في حالتي التغذية الأمامية والعكسية عند درجة الحرارة الجديدة ، وذلك بتكرار الخطوات (1 - 6) .

10 - أعد ضبط درجة حرارة الماء عند قيمتين مختلفتين أخريين (50 و 60 مثلا) على الأقل ، وسجل عند كل درجة قيم (I-U) في حالتي التغذية الأمامية والعكسية .

11 - رتب قيمك في جدول كالتالي :

T = ... K				T = ... K				T = ... K				T = ... K			
V_f	I_f	V_r	I_r	V_f	I_f	V_r	I_r	V_f	I_f	V_r	I_r	V_f	I_f	V_r	I_r
0.1		1		0.1		1		0.1		1		0.1		1	
0.2		2		0.2		2		0.2		2		0.2		2	
0.3		3		0.3		3		0.3		3		0.3		3	
0.4		4		0.4		4		0.4		4		0.4		4	
0.5		5		0.5		5		0.5		5		0.5		5	
0.6				0.6				0.6				0.6			
0.7				0.7				0.7				0.7			

12 - ارسم على ورق مليمتري المنحنيات المميزة (I - U) للوصلة (p - n) من أجل درجات الحرارة المختلفة على نفس الورقة البيانية ، مختارا تقسيمات مناسبة من أجل كل محور كالشكل (7) .



الشكل (7) .

13 – ارسم على ورق نصف لغارتمي تحولات (I_f)ln بدلالة $\frac{1}{T}$ من أجل قيم ثابتة لفروق الكمون ، واستنتج من الرسم قيمة (E_g) وفق العلاقة (5) ، وقدّر الارتياب فيها .

14 – ارسم على ورق نصف لغارتمي تحولات (I_f)ln بدلالة (U_0) ، واستنتج من الرسم قيمة ثابت بولتزمان (k) من العلاقة (6) وقارنها بالقيمة المعروفة لهذه الثابتة ، وقدّر الارتياب فيها .

15 – ارسم على ورق نصف لغارتمي تحولات (I_r)ln بدلالة $\frac{1}{T}$ من أجل قيم ثابتة لفروق الكمون ، واستنتج من الرسم قيمة (E_g) وفق العلاقة (8) ، وقدّر الارتياب فيها .

4- تقييم العمل التجريبي:

1 - لماذا يفضل السيلكون على الجرمانيوم في الثنائيات التي تخصص لإمرار تيارات عالية فيها ؟

2 - ما الشكل الدقيق للعلاقة بين تيار الإشباع و درجة الحرارة ؟

---

5 - الكلمات المرجعية :

- انهيار - انقطاع	- Breakdown
- المنحنيات المميزة للثنائي	- Diode Characteristics
- توازن ديناميكي	- Dynamic Equilibrium
- فاصل الطاقة	- Energy Gap
- سوية فيرمي	- Fermi Level
- انحياز أمامي	- Forward bias
- تيار التولد	- Generation Current
- التركيز الذاتي	- Intrinsic Concentration
- وصلة	- Junction
- حقل موضعي	- Local Field
- تيار إعادة الاتحاد	- Recombination Current
- انحياز عكسي	- Reverse bias
- تيار الإشباع	- Saturation Current
- الشحنة الفراغية	- Space Charge

6 - المراجع :

1- المرجع 1 - الفصل الثامن .

2- المرجع 2 - الفصل الثامن .

3 - المرجع 5 .

التجربة 16 :

قياس الطواعية المغنطيسية بطريقة غاي

1- الغاية من التجربة:

1 - قياس الطواعية المغنطيسية لبعض المواد ذات المغنطيسية الطردية (Paramagnetic) ، والأخرى ذات المغنطيسية العكسية (Diamagnetic) ومقارنتها مع ما تتنبأ به النظرية .

2- المبدأ النظري:

عادة ما يوصف الحقل المغنطيسي في الفيزياء بأحد شعاعين ، الأول يدعى الحقل المغنطيسي $\vec{H}$ (Magnetic Field Intensity) ، والثاني حقل التحريض المغنطيسي $\vec{B}$ (Magnetic Induction , Magnetic Flux Density) ، ويرتبطان أحدهما بالآخر في الخلاء بالعلاقة :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \qquad (1)$$

حيث μ_0: النفوذية المغنطيسية للخلاء . إذا وضعت مادة في حقل مغنطيسي $\vec{H}$ فإنها ستتأثر بهذا الحقل ، ويأخذ شعاع التحريض المغنطيسي فيها الشكل التالي :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{M} \qquad (2)$$

يعبر الحد الثاني عن استجابة المادة للحقل المغنطيسي المطبق عليها ، حيث $\vec{M}$ هو محصلة عزوم ثنائيات الأقطاب المغنطيسية ($\vec{\mu}$) في واحدة الحجوم ، ويدعى بشعاع العزم المغنطيسي أو شدة التمغنط (Magnetization) ويعطى بالعلاقة :

$$\vec{M} = N \vec{\mu} \qquad (3)$$

حيث N : عدد ثنائيات الأقطاب المغنطيسية في واحدة الحجوم .

يكون شعاع التمغنط ، في حالة الحقول الضعيفة ، في المواد متماثلة المناحي موازياً للحقل الخارجي المطبق $\vec{H}$ ، ومرتبطاً معه بعلاقة خطية أي :

$$\vec{M} = \chi_v \vec{H} \qquad (4)$$

يسمى ثابت التناسب χ_v الطواعية المغنطيسية الحجمية ، وغالباً ما تدعى اختصارا بالطواعية المغنطيسية وتعطى الرمز χ ، وهي ثابت نوعي لا أبعاد له ، يعبر عن مدى استجابة المادة للحقل المغنطيسي الخارجي المطبق عليها . يمكن إعادة صياغة العلاقة (2) بالشكل :

$$\vec{B} = \mu_0(1+\chi)\vec{H} = \mu\vec{H} = \mu_r\mu_0\vec{H} \qquad (5)$$

$$\mu = \mu_0(1+\chi) = \mu_r\mu_0 \quad , \quad \mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \qquad (6)$$

حيث :

μ : النفوذية المغنطيسية للوسط ، μ_r : النفوذية المغنطيسية النسبية .

من الواضح أنه إذا كانت χ موجبة يكون اتجاه $\vec{M}$ بنفس اتجاه $\vec{H}$ وعندها فإن حقل التحريض المغنطيسي $\vec{B}$ داخل المادة يقوى بها ، وتدعى المادة عندئذ مادة ذات مغنطيسية طردية ، أما إذا كانت χ سالبة يكون اتجاه $\vec{M}$ بعكس اتجاه $\vec{H}$ وعندها فإن حقل التحريض $\vec{B}$ يضعف بوجود المادة وتدعى عندئذ مادة ذات مغنطيسية عكسية .

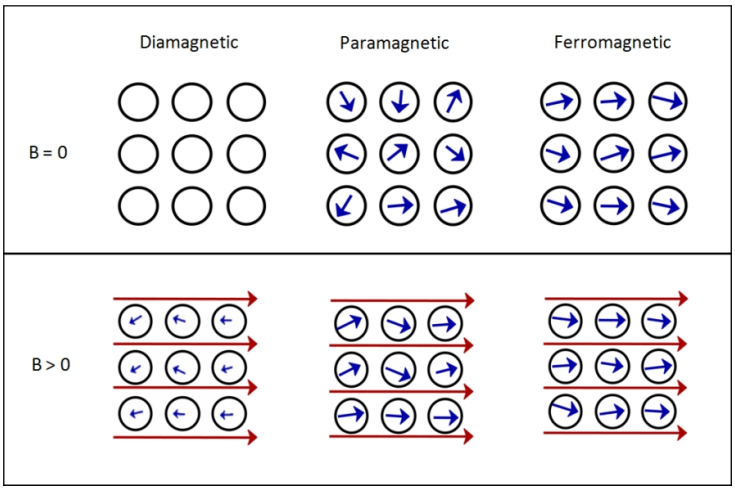
☆ - منشأ المغنطيسية الطردية و العكسية :

ترتبط الخواص المغنطيسية الجهرية بالخواص الذرية المجهرية ، وهي في الواقع حصيلة لها . يرتبط منشأ العزم المغنطيسي للذرة الحرة بثلاثة أمور :

1. وجود سبين لكل إلكترون .
2. وجود اندفاع زاوي مداري لكل إلكترون يرتبط بحركته حول النواة .
3. تغير العزم المداري عند تطبيق حقل مغنطيسي خارجي .

تعطي الحالة الثالثة إسهاماً عكسياً للطواعية المغنطيسية بسبب التحريض المعاكس للمسبب (قانون لينز) . غير أن هذه الآثار العكسية تغطى بآثار أقوى منها في حالة المواد الطردية و المواد الحديدية المغنطة . فإذا كانت الذرات والأيونات ذات سبين كلي معدوم و عزم مغنطيسي معدوم ، كانت المادة المكونة منها عكسية المغنطة ، أما الذرات أو الأيونات التي لها ثنائيات عزم مغنطيسية دائمة أي لها عزم مغنطيسي فيكون تأثير الحقل عليها هو محاولة توجيهها باتجاه الحقل مما يجعل إسهام التوجيه موجباً وهو أكبر من الإسهام العكسي في حال وجوده .

تتميز الحالتان الطردية والعكسية بزوالها مع زوال الحقل المطبق خلافا لما يحدث في المواد حديدية المغنطة .



الشكل (1) : استجابة المواد المغنطيسية للحقل الخارجي المطبق .

يعطى الإسهام العكسي بالعلاقة :

$$\chi = \frac{M}{H} = \frac{\mu_0 N \mu}{B} = -\frac{\mu_0 N Z e^2}{6m} < r^2 > \qquad (7)$$

حيث: $< r^2 >$: وسطي مربع البعد بين النواة و الإلكترونات

e: شحنة الإلكترون ، Z : عدد الإلكترونات في الذرة

m: كتلة الإلكترون ، N : عدد الذرات في واحدة الحجم .

تعبر العلاقة (6) عن نظرية لانجفان الكلاسيكية ، وهي تتوافق بشكل كبير مع النتائج التجريبية ، وحتى باستخدام ميكانيك الكم نحصل على نتائج مشابهة .

في حالة المواد الطردية ، تعطى الطواعية المغنطيسية من أجل حقول ضعيفة ودرجات حرارة غير منخفضة بالعلاقة :

$$\chi = \frac{\mu_0 N \mu^2}{3kT} \qquad (8)$$

حيث :

k: ثابت بولتزمان ، T: درجة الحرارة المطلقة .

تعرف العلاقة الأخيرة بالطواعية المغنطيسية الطردية للانجفان ، أما باستخدام النظرية الكمومية للمغنطيسية الطردية ، فنحصل على العلاقة التالية :

$$\chi = \frac{\mu_0 N (g\mu_B)^2}{kT} \qquad (9)$$

حيث :

g: عامل لانده ، $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m}$: مغنطون بور .

تدعى النسبة ($\frac{e}{2m}$) النسبة الجيرومغنطيسية لأنها تربط العزم المغنطيسي بالاندفاع الزاوي المداري ($\vec{M} = -\frac{e}{2m}\vec{L}$) ، وتعرف العلاقة (8) بقانون كوري .

في النظرية الكمومية التي تدخل الاندفاع الزاوي المداري الكلي $\vec{L}$ و السبين الكلي $\vec{S}$ ليكون الاندفاع الزاوي الكلي ($\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$) يصبح شكل الطواعية المغنطيسية :

$$\chi = \frac{\mu_0 N \mu_{eff}^2}{3kT} = \frac{N(p\mu_B)^2}{kT} = \frac{C}{T} \qquad (10)$$

$$\mu_{eff} = p\,\mu_B \quad , \quad p = g[j(j+1)]^{\frac{1}{2}}$$

حيث :

C: ثابت كوري ، p: العدد الفعال لمغنطون بور في الذرة ، ويحتوي على أثر الحقل البلوري ، وهو قريب من قيمته في حالة الأيونات الحرة شريطة استخدام قواعد هوند لتعيين قيمة j .

☆ - طريقة غاي في قياس الطواعية المغنطيسية :

تعتمد طريقة غاي على قياس القوة المطبقة على عينة عند وضعها في حقل مغنطيسي غير منتظم وفق الاتجاه الشاقولي ، ومنتظم في المستوي الأفقي ، إذ تسبب هذه القوة تغيرا في وزن العينة وبالتالي تغيرا ظاهريا في كتلتها . تعلق العينة بخيط مربوط بميزان حساس ويقاس وزنها قبل تطبيق الحقل ، ثم يطبق الحقل المغنطيسي ، ويقاس الوزن من جديد ويحسب الفرق بينهما ، كما هو واضح في الشكل (2) . إن هذا التغير الظاهري في الكتلة سببه القوة المغنطيسية المرتبطة بتأثير الحقل المغنطيسي على العينة . لاستنتاج علاقة تغير الكتلة بالحقل المغنطيسي نبدأ من الطاقة المغنطيسية المختزنة في واحدة الحجم من العينة والتي تعطى بالعلاقة :

$$E_M = -\frac{1}{2}\chi\,\mu_0 H^2 \qquad (11)$$

وبالتالي ، فالطاقة المختزنة في عينة حجمها V هو :

$$U = -\frac{1}{2}\chi\,\mu_0 V\,H^2 \qquad (12)$$

من المعلوم أن القوة هي تدرج الطاقة ، ومنه :

$$F_x = -\frac{\partial\left(\frac{1}{2}\chi\mu_0 H^2\right)}{\partial x}V\ ,\ F_y = -\frac{\partial\left(\frac{1}{2}\chi\mu_0 H^2\right)}{\partial y}V,\ F_z = -\frac{\partial\left(\frac{1}{2}\chi\mu_0 H^2\right)}{\partial z}V$$

بما أن العينة موضوعة في حقل مغنطيسي غير منتظم ويتغير من نقطة لأخرى ، إذن لابد من حساب القوة العنصرية dF المطبقة على حجم عنصريdV من العينة ثم نكامل على الحجم كله .

توضع العينة عادة في أنبوب أسطواني منتظم مساحة مقطعه A صغيرة ، وطوله L أكبر بكثير من نصف قطر مقطعه بحيث يمكن إهمال تغير الحقل على سطح المقطع ، ويبقى التغير في الاتجاه الشاقولي Z ، فيكون ($dV = A\,dz$) ، وبالتالي :

$$dF_z = -\frac{\partial\left(\frac{1}{2}\chi\mu_0 H^2\right)}{\partial z} A\, dz \qquad (13)$$

فتكون القوة الكلية في هذا الاتجاه :

$$F_z = \int_{z_1}^{z_2} dF_z = \frac{1}{2}\chi\mu_0 A\left[H^2\right]_{H_1}^{H_2} = \frac{1}{2}\chi\mu_0 A(H_2^2 - H_1^2)$$

حيث :

H_2 : شدة الحقل المغنطيسي عند الطرف السفلي للعينة .

H_1 : شدة الحقل المغنطيسي عند الطرف العلوي للعينة .

إذا كانت العينة طويلة نوعا ما ، أصبح بالإمكان إهمال H_1 أمام H_2 وبالاستفادة من العلاقة (1) والتعويض عن القوة بما يساويها نحصل أخيراً على العلاقة :

$$\Delta m = \frac{\chi A}{2\mu_0 g} B^2 \qquad (14)$$

حيث :

g : تسارع الجاذبية الأرضية ، B : شدة حقل التحريض المغنطيسي المطبق .

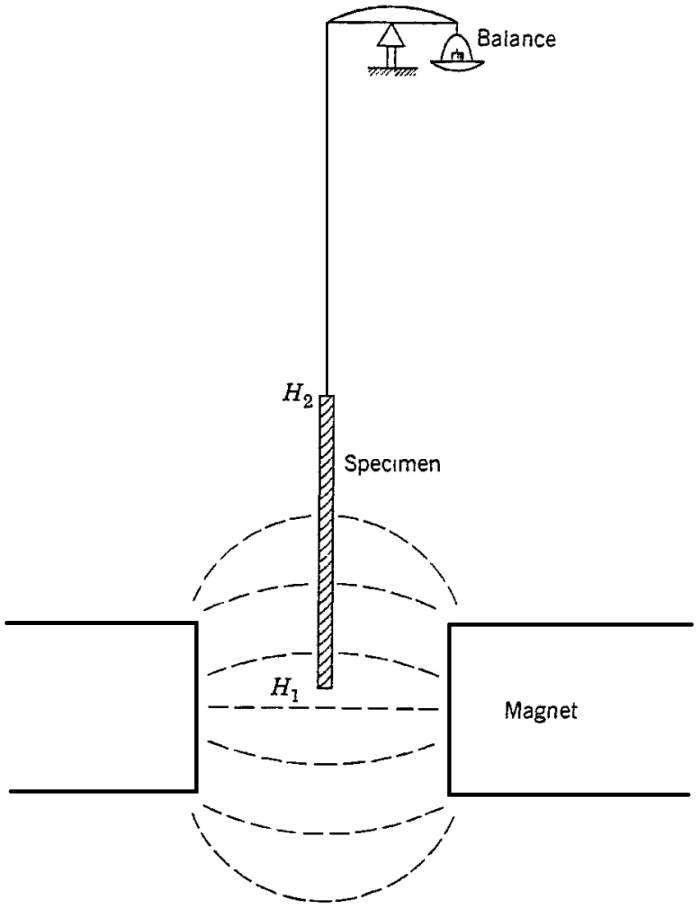
تبين المعادلة السابقة أن العلاقة بين Δm و B^2 هي علاقة خطية ، ويتم حساب الطواعية المغنطيسية من ميل هذه العلاقة . في معظم التجارب الفيزيائية تكون الطواعية المغنطيسية الحجمية χ_v هي المقدار الأساسي المقاس ، غير أن طواعية المادة تقدر بكميتين أخريين هما : الطواعية المغنطيسية الكتلية χ_m ، والطواعية المغنطيسية المولية χ_{mol} وفق العلاقتين :

$$\chi_m = \frac{\chi_v}{\rho} = \frac{V\chi_v}{m} \qquad (15)$$

$$\chi_{mol} = \frac{M\chi_v}{\rho} = \frac{MV\chi_v}{m} \qquad (16)$$

حيث :

ρ: كتلة واحدة الحجوم ، m: كتلة العينة ، M: الكتلة المولية للعينة ، V: حجم العينة



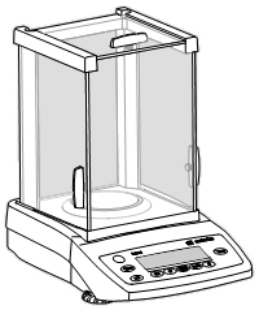
الشكل (2) : طريقة غاي في قياس الطواعية المغنطيسية .

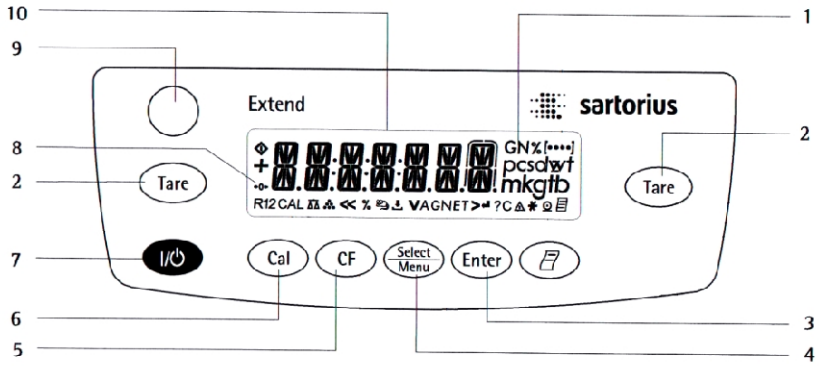
في هذه التجربة سنستخدم طريقة غاي في حساب الطواعية المغنطيسية لعدة مواد طردية المغنطة ، وأخرى عكسية المغنطة ، ونقارنها بالقيم المعروفة لهذه المواد .
إن أغلب مراجع الثوابت الفيزيائية تعطي قيم الطواعية المغنطيسية المولية χ_{mol} كما تفضل جملة الواحدات السغثية (CGS) التي تختلف عن الدولية بالثابت 4π .

3- أدوات القياس و طرائق العمل :

✯ - الأجهزة والأدوات التجريبية :

- منبع تيار للوشائع .
- ميزان حساس من رتبة 0.1 mg .
- وشائع لتوليد حقل مغنطيسي .
- عينات مواد طردية .
- مقياس تيار مستمر .
- عينات مواد عكسية .





الشكل (2) : اللوحة الأساسية للميزان الحساس

1- واحدة قياس الكتلة المستخدمة ، 2- زر التصفير ، 3- زر الاختيار

4- زر القائمة ، 5- زر الإلغاء ، 6- زر المعايرة ، 7- زر التشغيل

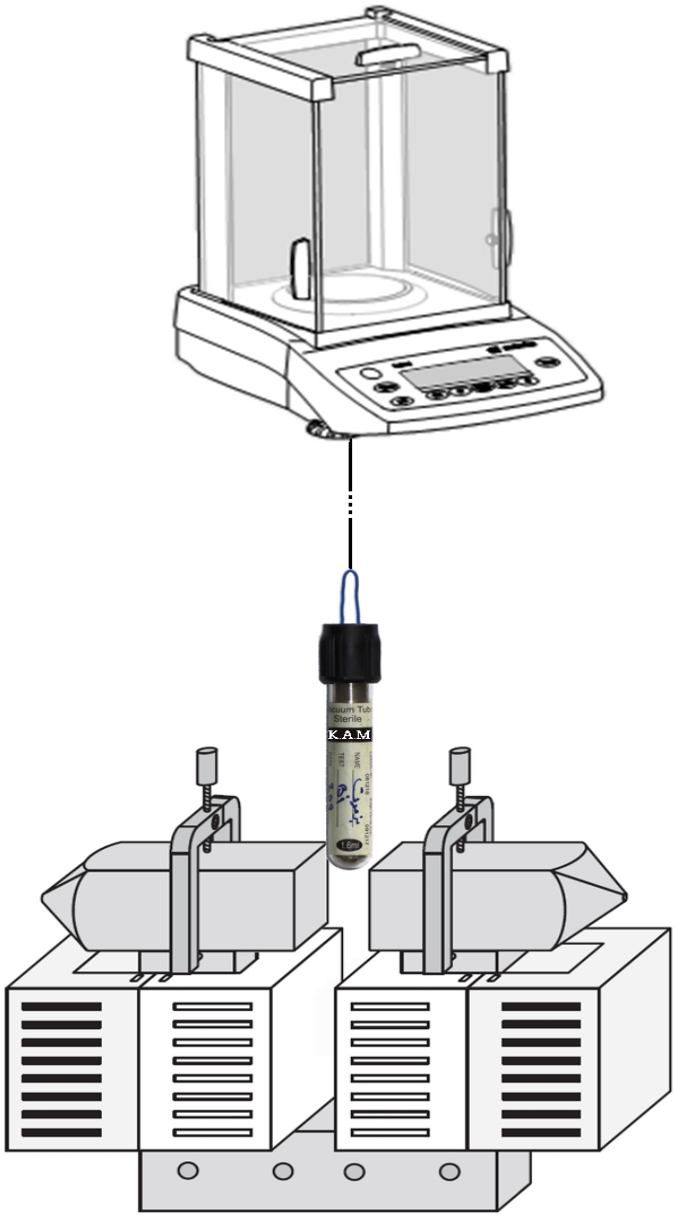
8- إشارة تغير الكتلة ، 9: ميزان سائل لضبط استواء الميزان

10- شاشة العرض .

☆ - الإعداد التجريبي:

يبين الشكل (3) الإعداد العام للتجربة .

1 - صل منبع التيار المستمر مع الوشائع ومقياس التيار على التسلسل .



الشكل (3) : الإعداد العام للتجربة .

☆ - ملاحظات مهمة :

1 - إن الميزان المستخدم حساس جدا ، وتتأثر قراءته حتى بمجرد حركة الهواء ، لذلك يجب توفير الشروط المناسبة لإجراء قياس دقيق وصحيح .

☆ - الإجراء التجريبي :

أولاً: المواد طردية المغنطة :

1 - قس كتلة الأنبوب العياري ، وهو أنبوب زجاجي فارغ مماثل للأنبوب الحاوي على المواد المغنطيسية ، وليكن (m_2) .

2 - اختر إحدى المواد طردية المغنطة (أكسيد النحاس مثلا) وعلق الأنبوب الذي يحوي العينة على السلك المربوط بالميزان من الأسفل ، ثم انتظر حتى تستقر العينة وقم بقياس كتلتها مع الأنبوب الزجاجي الحاوي لها ولتكن (m_1) .

3 - قم بحساب كتلة المادة ($m = m_1 - m_2$) .

4 - تأكد من أن النهاية السفلية للأنبوب في منتصف المسافة بين قطبي المغنطيس ، وأن جزءاً صغيراً من نهاية الأنبوب فقط واقع بين القطبين كما في الشكل (3) ، ثم اضغط في الميزان على زر التصفير (Tare) .

5 - انتظر حتى تصبح الأرقام على الشاشة كلها أصفاراً وتستقر قراءة الميزان ، لاحظ أنه بدءاً من هذه اللحظة سيُظهر الميزان قيمة التغير في الكتلة (Δm) بشكل مباشر .

6 - شغل منبع ومقياس التيار ثم مرر في الوشائع تياراً قيمته ($I = 3\ A$)، وانتظر قيمة (Δm) حتى تستقر ثم سجلها مع الانتباه إلى إشارتها (موجبة أو سالبة) .

7 - قم بزيادة التيار تدريجياً حتى القيمة ($7\ A$) وبخطوة ($0.5\ A$) ، وسجل في كل مرة قيمة تغير الكتلة ، ورتب نتائجك في جدول .

8 - أعد التيار إلى ($0\ A$) بعد الانتهاء من التجربة ، تفادياً للإضرار بالوشائع .

9 - أوجد قيم شدة الحقل المغنطيسي (B) الموافقة للتيار المطبق (I) ، وذلك بالاستفادة من منحني المعايرة في حالة البعد بين القطبين المغنطيسيين (16 mm) (الشكل 4) .

I (A)	Δm (Kg)	B (T)	B^2 (T^2)
3.0			
3.5			
4.0			
4.5			
5.0			
5.5			
6.0			
6.5			
7.0			

الجدول (1)

10 - قم برسم الخط البياني لتغيرات (Δm) بدلالة (B^2) واستنتج قيمة الطواعية المغنطيسية للمادة χ وذلك بحساب ميل الخط المستقيم من العلاقة (14) ، وقدّر الارتياب فيها .

11 - قم بحساب كل من الطواعية المغنطيسية الكتلية χ_m ، والطواعية المغنطيسية المولية χ_{mol} من العلاقتين (15 و 16) ، وقدّر الارتياب فيهما .

12 - كرر الخطوات السابقة من أجل عينة طردية أخرى (من الجدول 2) .

ثانياً: المواد عكسية المغنطة :

1 - كرر نفس الخطوات السابقة على إحدى المواد ذات المغنطيسية العكسية (البزموت مثلا) ، مع ملاحظة إشارة تغير الكتلة ، و احسب الطواعية المغنطيسية الحجمية والكتلية والمولية لها .

2 - أعد الخطوات من أجل مادة عكسية أخرى .

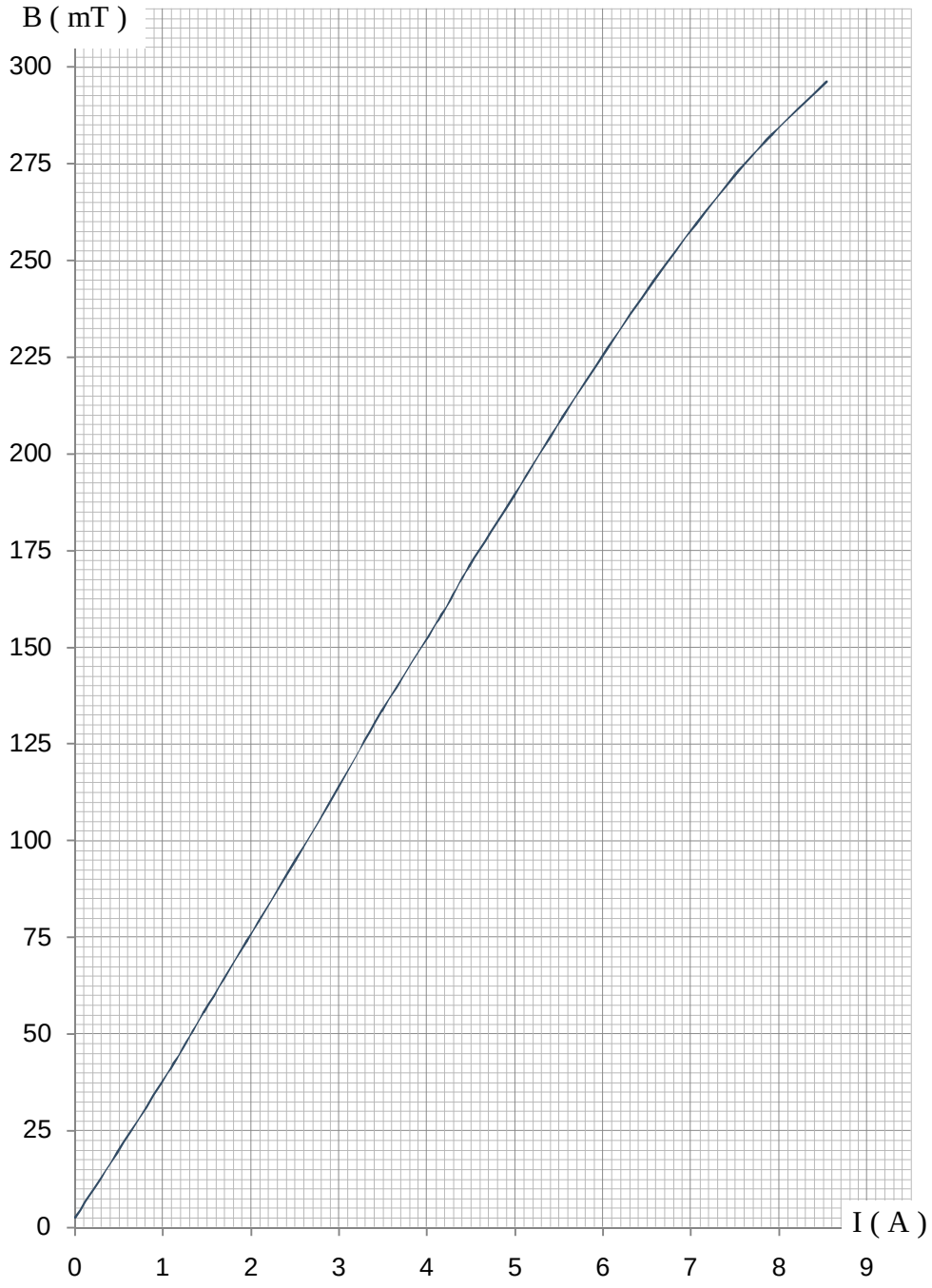
المواد الطردية			
اسم المادة	الصيغة الكيميائية	الكتلة المولية $M\ (g.mol^{-1})$	اللون
أكسيد النحاس	CuO	79.5	أسود
كبريتات النحاس المائية	$CuSO_4.5H_2O$	250	أزرق فاتح
الكروم	Cr	52	فضي إلى رمادي
المواد العكسية			
اسم المادة	الصيغة الكيميائية	الكتلة المولية $M\ (g.mol^{-1})$	اللون
البزموت	Bi	209	برونزي لامع
الأنتموان	Sb	122	فضي لامع
اليود	I_2	254	رمادي إلى بنفسجي

الجدول (2) : المواد المغنطيسية المتوفرة في المخبر .

4- تقييم العمل التجريبي:

1 - هل دقة قياس طواعية المواد عكسية المغنطة هي بنفس الدقة للمواد طردية المغنطة وفق هذه الطريقة ؟ ناقش ذلك .

2 - هل تصلح طريقة غاي لقياس طواعية المواد حديدية المغنطة ؟ ولماذا ؟



الشكل (4) : منحني تغيرات B بدلالة I من أجل المسافة 16 mm بين القطبين المغنطيسيين

5 - الكلمات المرجعية :

- Balance	- ميزان
- Diamagnetic	- مغنطيسية عكسية
- Ferromagnetic	- مغنطيسية حديدية
- Gyro-Magnetic ratio	- النسبة الجيرومغنطيسية
- Macroscopic properties	- الخواص الجهرية
- Magnetic field	- الحقل المغنطيسي
- Magnetic flux density	- كثافة تدفق الحقل المغنطيسي
- Magnetic induction	- التحريض المغنطيسي
- Magnetic moment	- العزم المغنطيسي
- Magnetic susceptibility	- الطواعية المغنطيسية
- Magnetization	- شدة التمغنط
- Microscopic properties	- الخواص المجهرية
- Paramagnetic	- مغنطيسية طردية
- Permeability	- النفوذية المغنطيسية

6 - المراجع :

1- المرجع 1 - الفصل التاسع .

2- المرجع 2 - الفصلان الحادي عشر و الثاني عشر .

3 - المرجع 8 .

التجربة 17 :

التجاوب المغنطيسي النووي NMR

1- الغاية من التجربة :

1- دراسة التجاوب النووي المغنطيسي للبروتونات والفلورين في العينات السائلة والصلبة .

2- تحديد النسبة الجيرومغنطيسية g لكل من البروتون والفلورين .

2- المبدأ النظري:

اكتشف العالمان بلوخ *Bloch* و بورسل *Purcell* ظاهرة التجاوب المغنطيسي النووي (NMR: Nuclear Magnetic Resonance) عام 1945 ، واليوم تُعدّ مطيافية (NMR) إحدى الطرق الرئيسية المهمة لدراسة المواد والتعرف عليها في الكيمياء وعلم الحياة كما تدخل بشكل أساسي في التطبيقات الطبية كالتصوير بالتجاوب المغنطيسي (MRI: Magnetic Resonance Imaging) لاكتشاف الأورام الخبيثة . توضح هذه التجربة الظاهرة والفكرة الأساسية للتجاوب المغنطيسي النووي للعينات الصلبة و السائلة .

التجاوب المغنطيسي النووي تقنية تعتمد على الخواص المغنطيسية للنوى ، فنوى الذرات التي تمتلك سبين نووي L ، يكون لها عزم مغنطيسي μ يعطى بالعلاقة :

$$\boldsymbol{\mu} = -g\,\mu_N \boldsymbol{L} \qquad (1)$$

حيث :

$\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p}$: المغنطون النووي ، g : النسبة الجيرومغنطيسية .

يكون في البدء لكل النوى الطاقة الوسطية (E) نفسها ، لكن عند وضع العينة ضمن حقل مغنطيسي خارجي ثابت (B_0) يصبح من الممكن توجيه العزوم المغنطيسية

للنوى μ في اتجاهات معينة مختلفة بالنسبة للحقل المغنطيسي B_0 ، ويتوجه كل سبين بحسب مستوى الطاقة الجزئية E_K الخاصة به :

$$E_K = -g\,\mu_N B_0 K \quad , \quad K = -l\,, -l+1\,, \dots\,, +l-1\,, +l \qquad (2)$$

وتتوزع السبينات على مستويات الطاقة حسب معادلة بولتزمان:

$$\frac{N_K}{N_{K+1}} = e^{-\frac{E_{K+1}-E_K}{kT}} \qquad (3)$$

حيث :

k : ثابت بولتزمان ، N_K : عدد السبينات في المستوي K .

أي أن تطبيق الحقل المغنطيسي يفصم السويات الطاقية المنطبقة ، ويلاحظ أن عدد المستويات يساوي ($K = 2l + 1$) حيث l هو مركبة سبين النواة . في الواقع ، تشير الدراسة التحريكية لتغير العزم المغنطيسي للنوى عند تطبيق حقل مغنطيسي خارجي عليها إلى قيام العزم بمبادرة precession حول الحقل المغنطيسي بتواتر يتناسب مع شدة الحقل يدعى تواتر لارمور ، وهو التواتر الذاتي للجملة المغنطيسية المدروسة ، ويعطى بالعلاقة :

$$\omega = \frac{e\,B_0}{2\,m} \qquad (4)$$

ويكون لمسقط العزم باتجاه الحقل قيم منفصلة وطاقات مقابلة معينة موضحة بالعلاقة (2) ويكون متوسط المسقط في المستوي العمودي على الحقل مساويا الصفر . إذا أضفنا الآن حقلاً مغنطيسياً B_1 عالي التردد ν ، بشكل معامد للحقل المغنطيسي السكوني B_0 ، تثار السبينات وتنتقل بين مستويات الطاقة المتجاورة E_K لذلك فان شرط حدوث انتقال (شرط التجاوب) هو أن يكون جداء ثابتة بلانك h بالتواتر ν مساويا تماما للتباعد الطاقي من أجل ($\Delta K = 1$) :

$$|\,E_{K+1} - E_K\,| = h\nu \qquad (5)$$

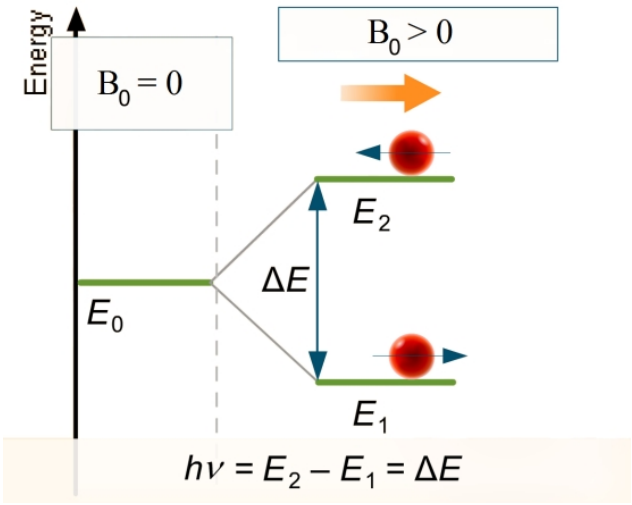
$$h\nu = g\,\mu_N\,B_0 \qquad (6)$$

إذا كان السبين يساوي $\frac{1}{2}$ ، كما في حالة البروتون والذي هو نواة الهيدروجين ، أو الفلورين وهو نواة ذرة الفلور ، يكون عدد سويات الطاقة المنفصلة يساوي اثنين ، أي يكون هنالك توجهان ممكنان فقط بالنسبة للعزم المغنطيسي للنواة : باتجاه الحقل أو بعكس اتجاه الحقل (B_0) ، وتكون هنالك سويتان فقط E_1 و E_2 موضحتان في الشكل (1) . إذا طُبِّق حقل مغنطيسي ثابت (B_0) وحقل (B_1) عمودي على الحقل الأول ، ومتغيِّر بصورة دورية فإن هذا الحقل الجديد يغير طاقة الجملة وبالتالي ، وعندما يتساوى التواتران الذاتي والمطبق يتحقق شرط التجاوب أي تمتص الجملة طاقة بشكل أعظمي وينعكس اتجاه المبادرة .

تشير الدراسة التحريكية إلى إمكان حدوث مثل هذه الانتقالات فيما يعرف بمعادلات بلوخ ، ففي حالة مركبتين للحقل إحداهما B_0 وفق المحور oz مثلاً ، والأخرى B_1 وفق المحور ox مثلاً ، تمثل طاقة تفاعل العزوم مع الحقلين بالتالي :

$$E_{tot} = - g \mu l_z B_0 - g \mu l_x B_1 \cos \omega t \qquad (7)$$

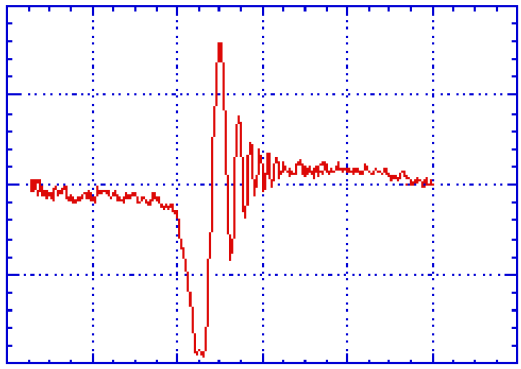
يمكن النظر إلى هذه التأثرات من وجهة نظر تبادل الطاقة ، على أن تطبيق الحقل



الشكل (1) : انتقال السبينات النووية بين السويتين .

المغنطيسي B_1 لمدة زمنية نبضية يعطي جملة السبينات طاقة ، ولكن بسبب تفاعل هذه الجملة مع جملة اهتزازات الذرات ، أي جملة الفونونات ، تفقد هذه الطاقة بزمن استرخاء مقابل ، وهو ما يسمى بزمن استرخاء السبين والشبكة T_1. بينما إذا أثيرت جملة السبينات ليكون لها مركبة غير معدومة في المستوي المعامد للحقل الساكن ، فإن هذه المركبة ستنعدم عند غياب الحقل المعامد بزمن استرخاء آخر T_2 يسمى زمن استرخاء (سبين - سبين) ، وذلك لأن التآثرات بين السبينات المغنطيسية والكهربائية هي المهيمنة في هذه الحالة ، وبالتالي يمكن أن تولد قوة محركة كهربائية في الاتجاه المعامد وهذا مايكشفه المجس .

لكي نتمكن من دراسة انتقال السبين بين هذين المستويين الطاقيين ، توضع العينة في هذه التجربة ضمن وشيعة r_f موضوعة بدورها ضمن الحقل المغنطيسي الثابت B_0 والحقل المغنطيسي B_1 المتغير بتواتر ν . يتم تغيير قيمة هذا التواتر ν من أجل حقل مغنطيسي B_0 ثابت حتى نحصل على إشارة التجاوب المغنطيسي عندما يتساوى تواتر الحقل مع تواتر لارمور لجملة السبينات (النوى) ، وإذا أزيل الحقل المغنطيسي المتغير التواتر ، تتخامد الإشارة الناتجة عن التجاوب وفق الشكل (2) الذي يبين حدوث التجاوب.



الشكل (2) : شكل إشارة التجاوب على راسم الاهتزاز المهبطي .

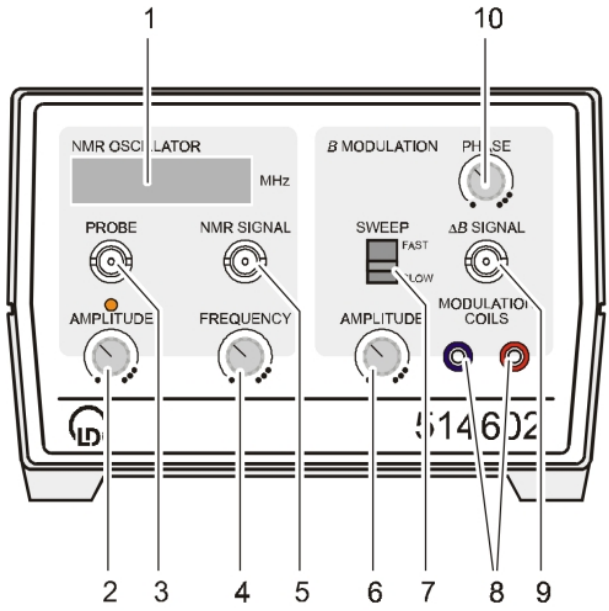
في الواقع ، يتأثر العزم المغنطيسي النووي بالحقل المحلي مكان وجوده ، أي بالحقل المغنطيسي الثابت B_0 مضافاً إليه الحقل المغنطيسي الناتج عن العزوم المجاورة ، ويظهر إضافة لذلك حد ناتج من إيجاد حلول لمعادلات بلوخ نتيجة الانتقال من الجملة الإحداثية الدوّارة إلى جملة إحداثيات المختبر وبالتالي يجب كتابة حقل مغنطيسي فعال B_{eff} في المعادلة (2) مكان B_0 ، فيكون انزياح التواترات عن التواتر الأصلي مؤشراً إلى تأثير الجوار ليعطي معلومات إضافية عما يعطيه عرض خط NMR الذي يتأثر أيضا بطبيعة العناصر المحيطة وبدرجة الحرارة ، لذلك فإن تحليل ودراسة عرض الخط باعتباره تابعاً لهذه العوامل يعطي معلومات للمقارنة عن التركيب الكيميائي والفيزيائي لعناصر العينة المختلفة . يعبر العرض الكامل لنصف الشدة العظمى في بعض الأحيان وتحت بعض الشروط عن قياس زمن استرخاء (سبين- سبين) T_2 .

$$\Delta B \propto \Delta\nu \propto \frac{1}{T_2} \qquad (8)$$

3- أدوات القياس و طرائق العمل :

☆ - الأجهزة و الأدوات التجريبية :

- منبع تيار مستمر متغير (0 - 5 A) .
- نواة حديدية على شكل U .
- وحدة مجس NMR .
- عينتا الغليسرين و الفلورين .
- وحدة تغذية NMR .
- راسم اهتزاز مهبطي .
- وشائع (10 A , 480 t) .
- كابلات توصيل للراسم .



الشكل (3) : وحدة تغذية (NMR) .

1: شاشة العرض .
2: مفتاح التحكم بسعة التواتر .
3: مأخذ إلى الوشيعة (rf) .
4: مفتاح التحكم بالتواتر .
5: مأخذ إشارة التجاوب المضخمة .
6: مفتاح التحكم بسعة الحقل المتغير .
7: زر اختيار سرعة المسح .
8: مأخذا وشائع الحقل المتغير .
9: مأخذ إشارة (ΔB) .
10: مفتاح التحكم بالطور .

☆ - الإعداد التجريبي:

يبين الشكل (4) التوصيل العام للتجربة :

1 - صل منبع التيار بالوشائع .

2 - صل الوشيعتين على التسلسل مع المأخذ 8 في وحدة تغذية NMR .

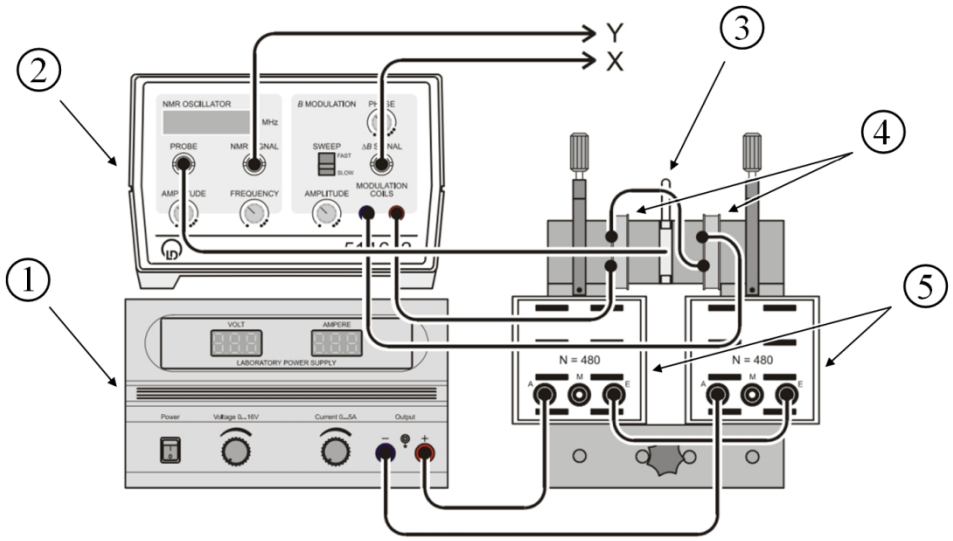
3 - صل المجس NMR إلى المأخذ 3 .

4 - صل المأخذ 5 بالقناة العمودية (Y) لراسم الاهتزاز المهبطي .

5 - صل المأخذ 9 بالقناة الأفقية (X) لراسم الاهتزاز المهبطي .

6 - ضع الزر 7 على الخيار fast sweep .

7 - ضع الزر 6 على قيمة سعة كبيرة .



الشكل (4) : التوصيل العام للتجربة .

1: منبع تيار الوشائع ، 2: وحدة NMR ، 3: العينة المدروسة

4: وشيعتان لتوليد الحقل B_1 ، 5: وشيعتان لتوليد الحقل B_0 .

☆ - ملاحظات مهمة :

1 - لا تنزع عينة الغليسرين من مكانها إلا للضرورة .

2 - انتبه إلى عدم تجاوز التيار الذي يعطيه منبع تيار الوشائع (5 A) .

☆ - الإجراء التجريبي :

1 - شغل الأجهزة ، واضبط إعدادات راسم الاهتزاز المهبطي بشكل مناسب لإظهار إشارة التجاوب .

2 - ثبت قيمة التواتر على قيمة قريبة من (18.4 MHz) وتأكد من إضاءة المؤشر الواقع فوق المفتاح (2) في منبع تغذية NMR ، وإن لم يكن المؤشر مضيئاً ، حرّك المفتاح (2) مع عقارب الساعة حتى يضيء .

3 - زد تيار الوشائع ببطء وابحث عن إشارة التجاوب بجوار القيمة (3.60 A) .

4 - سجل قيمة تيار الوشائع وتواتر الحقل المغنطيسي عند ظهور إشارة التجاوب ، مكتفيا بالعدد المناسب من الأرقام بعد الفاصلة .

5 - قم بزيادة التواتر إلى القيمة (18.5 MHz) ، وابحث من جديد على إشارة التجاوب ، ثم سجل قيمة التيار والتواتر المقابلة .

6 - أعد البحث وتسجيل القياس من أجل 5 تواترات أخرى على الأقل .

7 - قم بإيجاد قيم الحقل المغنطيسي الساكن المطبق (B_0) من خلال عملية الاستقراء من منحني المعايرة الخاص بالتجربة ، والموضح بالشكل (5) .

8 - أعد التجربة مرتين على الأقل ، ثم رتب نتائجك في جدول كالتالي :

Experiment 1			Experiment 2			Experiment 3		
I (A)	B (T)	ν (Mhz)	I (A)	B (T)	ν (Mhz)	I (A)	B (T)	ν (Mhz)

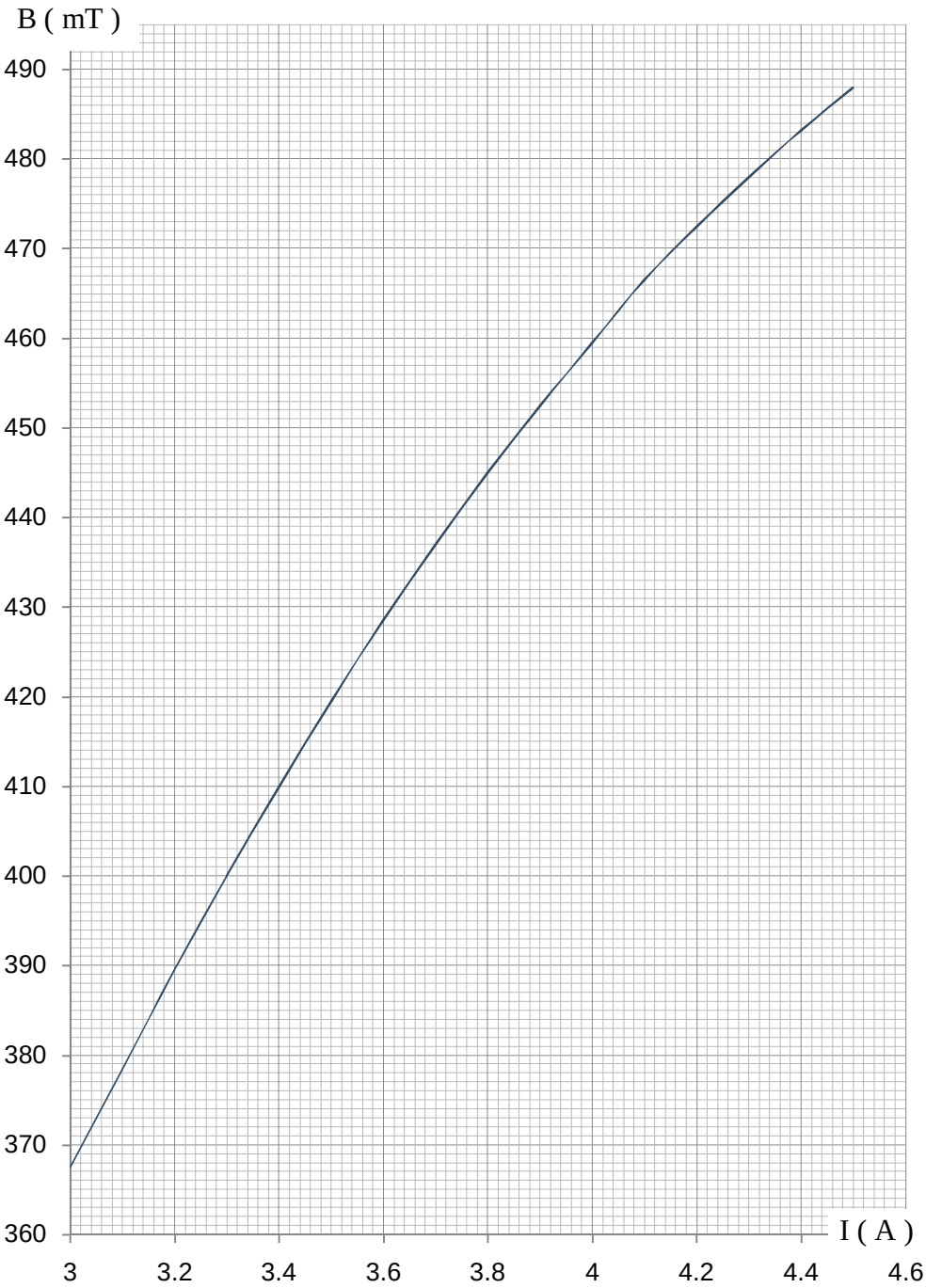
9 - ارسم على ورق مليمتري تغيرات (ν) بدلالة (B_0) من أجل سلاسل قياساتك الثلاث ، واستنتج من كل منحنٍ بيانيٍ قيمة النسبة الجيرومغنطيسية g مستفيدا من العلاقة (6) ، وقدّر الارتياب فيها من خلال مجال الحقل المغنطيسي الذي تبقى فيه إشارة التجاوب واضحة .

4- تقييم العمل التجريبي:

1 – ما هو تفسير ثبات إشارة التجاوب على مجال للحقل المغنطيسي (أو مجال من التواترات في حال تثبيت الحقل المغنطيسي) ، مع أن شرط التجاوب يتحقق فقط من أجل قيمة محددة ؟

2 - هل وجدت إعادة القياسات متطابقة أم تغيرت ؟ ناقش أسباب التغير إن وجد .

3 - هل يصلح إجراء تجربة التجاوب المغنطيسي النووي على أي مادة دون استثناء ؟



الشكل (5) : منحني تغيرات الحقل المغنطيسي B_0 بدلالة تيار الوشائع .

5 - الكلمات المرجعية :

- Demonstration	- توضيح - إثبات
- Gyroscope	- جيروسكوب
- HF : High Frequency	- تردد عالٍ
- Larmor Frequency	- تواتر لارمور
- Magnetic Momentum	- عزم مغنطيسي
- Phenomena	- ظاهرة
- Precession	- مبادرة
- Relaxation Time	- زمن الاسترخاء
- Resonance	- تجاوب
- Resonance Frequency	- تواتر التجاوب
- Resonance Sign	- إشارة تجاوب
- Sensor	- مجس
- Spectroscopy	- مطيافية
- Spin	- سبين

6 - المراجع :

1- المرجع 2 - الفصل الثالث عشر .

2- النشرة التجريبية (P6.5.3.1) من شركة ليبولد " Leybold didactic " .

التجربة 18 :

الناقلية الفائقة

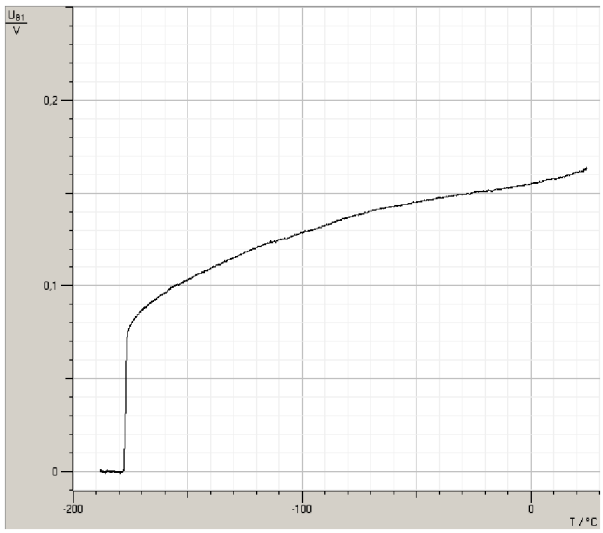
1- الغاية من التجربة :

1- تحديد درجة الحرارة الحرجة (T_C) لناقل فائق .

2- التعرف على ظاهرة مايسنر .

2- المبدأ النظري :

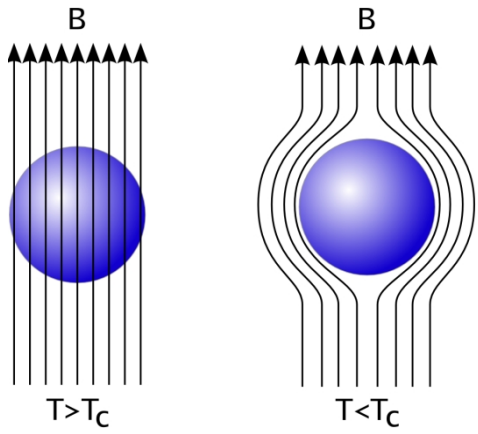
تهبط المقاومة الكهربائية لعدد من المعادن والخلائط فجأة إلى الصفر حين تبرد إلى درجة حرارة منخفضة بشكل كافٍ . كان العالم الهولندي *أونس* ، وبعد ثلاث سنوات فقط من تمكنه من إسالة الهيليوم ، أول من اكتشف هذه الظاهرة عام 1911 حين برد الزئبق إلى درجة حرارة الهيليوم السائل (4.19 K) ، فوجد أن مقاومته الكهربائية انخفضت فجأة إلى الصفر ، فاستنتج أن الزئبق قد انتقل إلى حالة جديدة دعاها بطور الناقلية الفائقة ، كما أطلق على درجة حرارة الانتقال بدرجة الحرارة الحرجة T_C .



الشكل (1) : تغير مقاومة الناقل الفائق باعتبارها تابعاً لدرجة الحرارة .

فيما بعد وُجدَ تحوّل مشابه للقصدير والرصاص ، وتتالت الاكتشافات لتحولات مماثلة في مواد أخرى وبدرجات حرارة حرجة مختلفة ، وبذلك بدأت فيزياء درجات الحرارة القرّية (المنخفضة) Cryogenics .

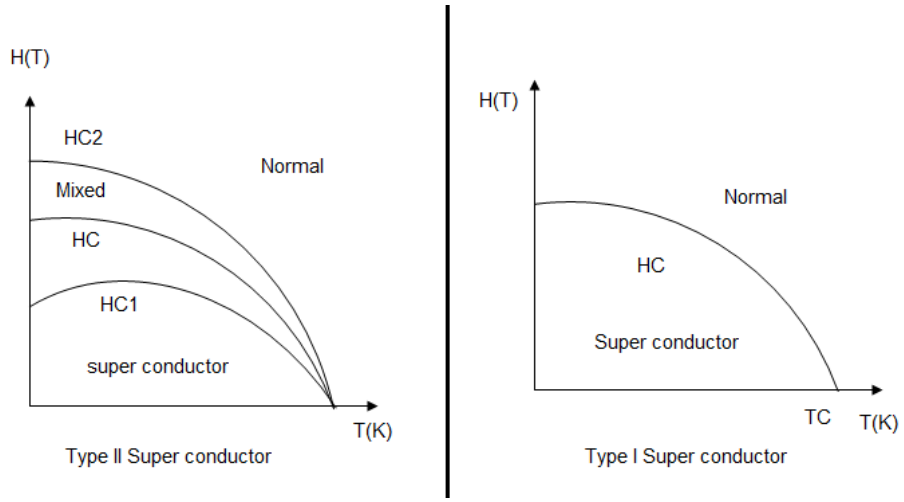
بعد ذلك وفي العام 1933 لاحظ *مايسنر* Meisner أنه بمجرد أن تنخفض درجة حرارة المادة التي تتمتع بالناقلية الفائقة والموضوعة في حقل مغنطيسي إلى الدرجة (T_C) فإن خطوط الحقل تُطرد كليا وفجأة من العينة ، كما بين *مايسنر* أن هذا الأثر عكوس ، بمعنى أنه حين ترفع درجة الحرارة فوق (T_C) يعود التدفق المغنطيسي فجأة ليخترق العينة ، وتعرف هذه الحادثة باسم أثر مايسنر (شكل 2) .



الشكل (2) : أثر مايسنر .

لقد وجد أيضا أن تطبيق حقل مغنطيسي قوي يؤدي إلى عودة العينة فائقة الناقلية إلى حالتها العادية واستعادتها لمقاومتها حتى في درجات الحرارة الأخفض من T_C ، وهذه القيمة الحدية أو الحرجة للحقل المغنطيسي لتخريب طور الناقلية الفائقة تدعى بالحقل الحرج ويرمز لها بـ (H_C) ، وقيمته تعتمد على درجة الحرارة (H_C (T) ، إلا أنه وجدت نواقل فائقة تحتوي مناطق بعضها ناقل فائق وآخر عادي بمعنى أن العينة تدخل ضمن الحالة المختلطة ، وذلك من أجل قيمة أولى للحقل المغنطيسي (H_{C1}) ، مع بقاء مقاومتها الكهربائية معدومة ، وإذا ازداد الحقل متجاوزاً قيمة

معينة يرمز لها بـ (H_{C2}) فإن العينة تعود إلى حالة الناقل العادي ، شكل (3) وسميت هذه النواقل الفائقة من النوع الثاني لتمييزها عن النوع الأول منها .



الشكل (3) : النواقل الفائقة من النوع الأول على اليمين والنوع الثاني على اليسار.

يُفسر انعدام الحقل الداخلي بوجود تيارات سطحية على الناقل الفائق ، وإذا أزيل الحقل المغنطيسي فإن هذه التيارات السطحية تختفي ، وتدعى هذه التيارات بتيارات الإعاقة وتحسب من العلاقة :

$$J_A = n \times (H - H_i) \qquad (1)$$

حيث :

H : الحقل المغنطيسي خارج الجسم ، μ_0 : ثابت النفاذية المغنطيسية في الخلاء

H_i : الحقل المباشر داخل السطح ، n : الناظم على السطح .

إذا كان الحقل داخل السطح معدوماً فإن :

$$J_A = n \times H \qquad (2)$$

وهي علاقة صحيحة حتى في النواقل الفائقة العادية الجيدة .

كان الفيزيائيون يعتقدون أن ظهور طور الناقلية الفائقة فوق الدرجة 30 K هو أمر غير ممكن ، وذلك حتى العام 1986 عندما اكتشف العالمان *بيندز* Bednerz و *مولر* Muller مركباً جديداً مكوناً من خليط لأكاسيد النحاس والباريوم واللانتانيوم LaBaCuO ، والذي يتمتع بدرجة حرارة حرجة تبلغ (35 K) ، وبعدها بسنة اكتشفا مركب الإيبكو YBaCaO ، الذي بلغت درجة حرارته الحرجة (92 K) فحصلا بذلك على جائزة نوبل ، ومنذ ذلك الحين وجد العديد من النواقل الفائقة ذات درجة حرارة حرجة T_C عالية التي يمكن تبريدها باستخدام الآزوت (النتروجين) السائل . بالطبع ، من المفيد جدا من الناحية العملية إيجاد مواد ناقلة ذات درجة حرارة حرجة عالية قريبة من درجة حرارة الغرفة ، إلا أن الجهود المبذولة في هذا السبيل لم تثمر حتى الآن (سوى نظريا) .

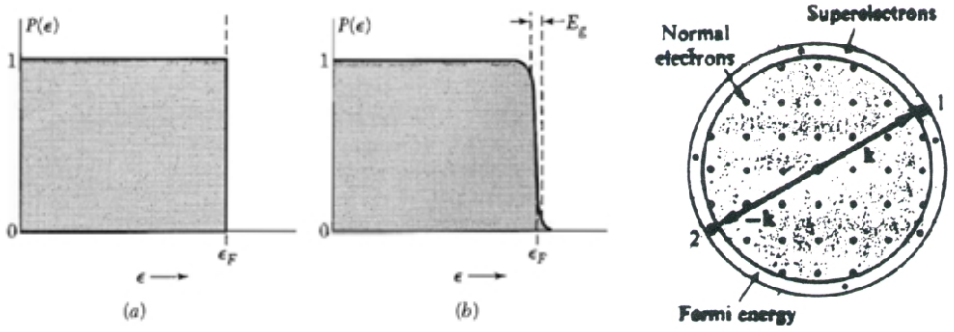
إن أعلى درجة حرارة حرجة تم التوصل إليها حتى الآن هي (133 K) وهي تحدث في المركب ($HgBa_2Ca_2Cu_3O_8$) .

تفسير الناقلية الفائقة :

فسرت النواقل الفائقة بنظرية باردين - كوبر - شريفر (BCS) التي استندت على مفاهيم متقدمة في الميكانيك الكوانتي ، ولكن يمكن إيجازها كالتالي :

كما هو معلوم تكون سوية فيرمي في درجة الصفر المطلق أعلى سوية مملوءة بالإلكترونات ، لنعتبر معدنا إلكترونات الناقلية فيه تقع ضمن كرة فيرمي بالقرب من الصفر المطلق ، ولننظر إلى إلكترونين من هذه الإلكترونات . إن حركة أحدهما ستؤدي إلى اضطراب في أيونات البلورة الموجبة ، أي إلى نشوء فونون ينتشر في البلورة فيتأثر الإلكترون الثاني بالأول لدى امتصاصه لهذا الفونون . بيّن كوبر أنه من أجل زوج من الإلكترونات فوق سطح فيرمي تماما يمكن أن تنشأ حالة ترابط إذا أدى تبادل الفونون بين هذين الإلكترونين إلى تأثير متبادل جاذب ، وعلى هذا الأساس من الممكن حدوث تكاثف للإلكترونات بشكل أزواج مترابطة ، وأمكن

عندها معاملة أزواج الإلكترونات معاملة بوزونات ، وسميت هذه الأزواج بأزواج كوبر . إن طاقة الترابط بين هذين الإلكترونين تساوي فاصل طاقة يقع فوق سوية فيرمي مباشرة وتمثل الفرق بين طاقة زوج كوبر وطاقة الإلكترونين المفردين ، ويفسر إذن اختفاء الناقلية الفائقة من أجل درجة حرارة أعلى من (T_C) بأن الحركة الحرارية للإلكترونات تزداد مما يسبب تحطم التزاوج القائم بين أزواج كوبر معيداً إياها إلى حالة إلكترونات عادية تتنافر فيما بينها ، وقد فسرت هذه النظرية وتطوراتها خواص النواقل الفائقة ذات درجات الحرارة الحرجة المنخفضة ، لكنها فشلت في تفسير النواقل الفائقة ذات درجات الحرارة الحرجة العالية لكبر الطاقة الحرارية المقابلة لها ، ولا يزال تفسيرها قيد الدراسة .



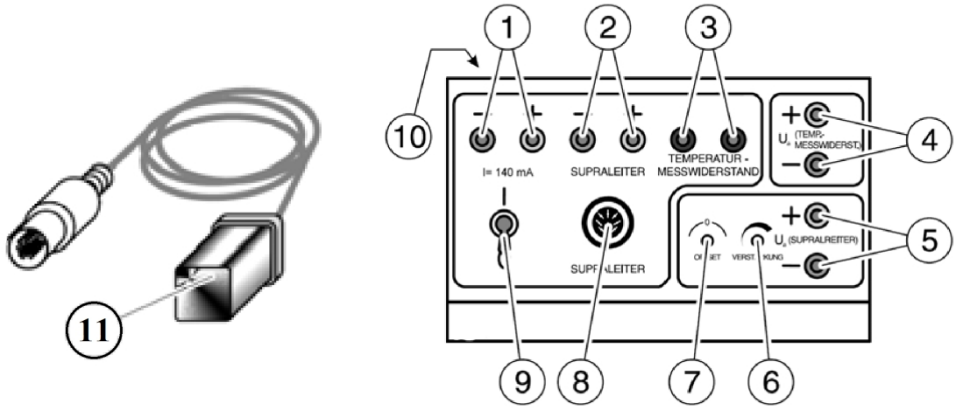
الشكل (4) : سوية فيرمي وكرة فيرمي بالقرب من الصفر المطلق .

في هذه التجربة سنحدد درجة الحرارة الحرجة لناقل فائق ذي درجة حرارة حرجة عالية ، حيث نقوم بتبريد المادة باستخدام النتروجين السائل ، ونقوم بدراسة تغير مقاومتها بدلالة درجة الحرارة ، أما في الجزء الثاني نراقب أثر مايسنر على عينة $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ بوضع قطعة مغنطيسية على العينة ، ومن ثم تبريدها إلى درجة حرارة أقل من الدرجة الحرجة لها ، فتصبح ناقلاً فائقاً فتطرد الحقل المغنطيسي للمغنطيس المستمر المستخدم .

3- أدوات القياس و طرائق العمل :

☆ - الأجهزة و الأدوات التجريبية :

- عينة الناقل الفائق في حافظة ألمنيوم مع سلك وقابس DIN .
- محول البيانات (205 666) .
- ديوار لاحتواء الآزوت السائل والعينة .
- وحدة الكاسي .
- حاسب مع برنامج Cassy Lab .
- وعاء من البولي - ايتيلين .
- قطعة مغنطيس صغيرة مع ماسك .



الشكل (3) : محول البيانات (205 666) .

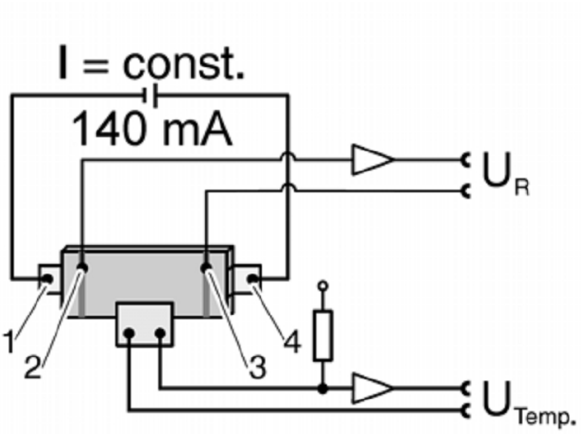
1: منبع تغذية بتيار ثابت ، 2: مدخل قياس الكمون (إذا كان الناقل الفائق خارجياً)

3: مدخل مجس درجة الحرارة (إذا كان الناقل الفائق خارجياً)

4: مخرج قياس درجة الحرارة ، 5: مخرج قياس فرق الكمون

6: مفتاح لضبط معامل التضخيم ، 7: ضبط التصفير ، 8: مدخل لقابس (DIN) .

9: زر التشغيل ، 10: مدخل التغذية لمحول البيانات ، 11 : العينة الناقلة مع حافظة



الشكل (4) : المخطط التفصيلي لعمل محول البيانات : يتم تطبيق تيار ثابت بين النقطتين (1 و 4) وتؤخذ قيمة فرق الكمون بين النقطتين (2 و 3) .

☆ - ملاحظات مهمة :

1 - النتروجين السائل شديد الخطورة ، وفي حال تلامسه أو تلامس أي قطعة مبرّدة به مع الجلد يتسبب بحروق شديدة ، لذا كن حذرا عند التعامل معه ، ولا تقم بتحريك الأوعية الحاوية على الآزوت السائل إلا بحذر شديد .

2 - الآزوت السائل سريع التبخر ، لذلك يجب حفظه في الأوعية الخاصة به أو في أوعية من البوليستر أو الفلين ، ويجب ألا يغلق عليه بإحكام إلا في العبوات الخاصة المصنوعة لذلك ، وإلا سيتسبب ذلك بانفجار العبوة وحدوث أضرار بالغة .

3 - إن الوعاء الداخلي للديوار يمكن أن ينفجر نحو الداخل عند ملئه بالنتروجين السائل بشكل فجائي ، لذا كن حذرا عند التعامل معه .

4 - لا تقم بتجارب غير مسؤولة باستخدام الآزوت السائل ، تفادياً للإضرار بك وبزملائك .

☆ - الإعداد التجريبي:

1 - صل قابس العينة (11) شكل (3) بالمدخل (8) .

2 - صل مخرج قياس درجة الحرارة (4) بالمدخل Input (A) في وحدة الكاسي.

3 - صل مخرج قياس فرق الكمون (5) بالمدخل Input (B) في وحدة الكاسي .

☆ - الإجراء التجريبي :

1 - تأكد من التوصيل ثم شغل محول البيانات .

2 - شغل برنامج الكاسي من أيقونته على سطح المكتب ، واضبط الإعدادات التالية :

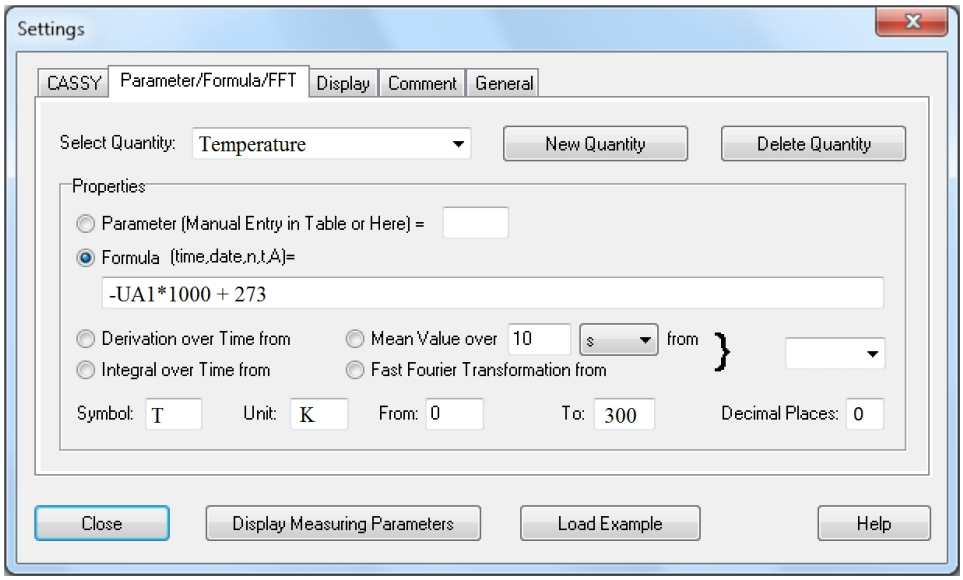
3 - انقر بالزر الأيسر الماوس على Input (A) واختر :

Quantity: current U_{A1} , Meas. Range: -0.3 .. +0.3 V

4 - انقر بالزر الأيسر الماوس على Input (B) واختر :

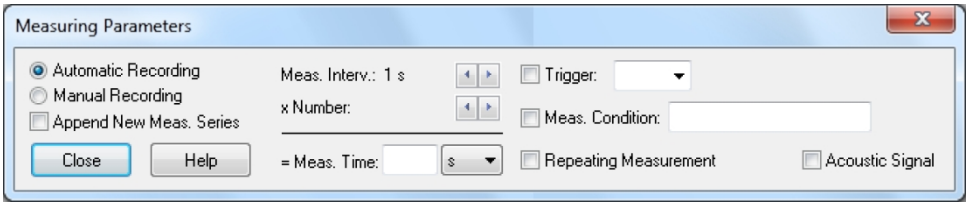
Quantity: voltage U_{B1} , Meas. Range: -0.3 V .. +0.3 V

5 - لتعريف درجة الحرارة المطلقة انتقل إلى علامة التبويب Parameter/FFT ثم اضغط على (New Quantity) ، وأدخل المعطيات كما في الشكل التالي :



6 - انتقل إلى علامة التبويب Display واختر على المحور X تمثيل درجة الحرارة T ثم اختر على المحور Y تمثيل الكمون U_{B1} .

7 - انتقل إلى النافذة الفرعية Measuring Parameters ، واختر تسجيل القيم بشكل تلقائي كل ثانية ، وذلك بتفعيل الخيار Automatic Recording ، وضبط الإعدادات الموضحة في الشكل التالي ، ثم عد إلى النافذة الأساسية .



8 - اسكب بعناية كبيرة وبطء شديد كمية كافية من الآزوت السائل (حوالي 250 mL) في الديوار المخصص لذلك .

9 - ضع العينة الناقلة في الآزوت السائل ببطء بحيث تكون مغمورة بالكامل ، وابدأ فورا عملية القياس بالضغط على زر تسجيل القيم ( ) أو بالضغط على F9

10 - تأكد من تغطية الديوار بشكل جزئي للحفاظ على الآزوت قدر الإمكان .

11 - راقب منحني تغير الكمون بدلالة درجة الحرارة ، وأوقف القياس عند وصول درجة الحرارة إلى القيمة (85 K) تقريبا . ذلك سيستغرق 10 دقائق تقريبا .

12 - حدد من الرسم القيمة الأولى لدرجة الحرارة الحرجة للناقل الفائق ، وقدّر الارتياب فيها .

13 - أخرج الناقل الفائق بحذر وضعه في وعاء البولي-ايتيلين حتى يعود لدرجة الحرارة العادية ، وقم بتكرار عملية القياس لكن هنا بالتسخين وليس بالتبريد .

14 - حدد من الرسم القيمة الثانية لدرجة الحرارة الحرجة للناقل الفائق ، هل حصلت على نتيجة مطابقة ؟

ثانيا : التعرف على أثر مايسنر :

1 - ضع عينة $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ في قاع وعاء البولي- ايتيلين .

2 - ضع مغنطيساً صغيراً على العينة .

3 - قم بتبريد العينة إلى درجة حرارة أخفض من درجة الحرارة الحرجة لها (والتي تفوق الدرجة 133 K) وذلك بسكب القليل من الآزوت السائل عليها .

4 - لاحظ ماذا يحدث . ماهو تفسير ذلك ؟

5 - استمر في مراقبة العينة حتى تبخر الآزوت ، ماذا حدث ؟ وما هو تفسير ذلك ؟

4- تقييم العمل التجريبي:

1 - هل كل المواد الناقلة كهربائيا تتمتع بخاصة الناقلية الفائقة ؟

2 - ابحث عن أهم تطبيقات الناقلية الفائقة .

---

5 - الكلمات المرجعية :

- Bosons	- بوزونات
- Critical Field	- حقل حرج
- Critical Temperature	- درجة حرارة حرجة
- Coupling	- تزاوج
- Dewar	- ديوار
- Fermions	- فرميونات
- Liquefying	- إسالة
- Meisner Effect	- أثر مايسنر
- Pairs of electrons	- أزواج الإلكترونات
- Repulsion	- تنافر
- Superconductivity	- ناقلية فائقة
- Superconductor	- ناقل فائق
- Transition Temperature	- درجة حرارة الانتقال
- Voltage Drop	- هبوط الكمون

6 - المراجع :

1 - المرجع 2 - الفصل العاشر .

2 - المرجع 9 .

3 - النشرة : Faten Alfeel,Fakhri katot,2003, master thesis "Preparing of superconductor sample and measuring It's T_C و I_C و H_C", Damascus university-physics department.

1 - الثوابت الفيزيائية في الجملة الدولية :

الكمية الفيزيائية	الرمز	القيمة العددية	الوحدة الدولية
سرعة الضوء في الخلاء	c , c_0	299792458	$m.s^{-1}$
النفوذية المغنطيسية	μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$	$N.A^{-2}$
العازلية الكهربائية	ε_0	8.85419×10^{-12}	$F.m^{-1}$
ثابت التجاذب الكوني	G	6.67429×10^{-11}	$m^3.kg^{-1}.s^{-2}$
ثابتة بلانك	h	6.62607×10^{-34}	J.s
ثابتة بلانك المشطوبة		1.05457×10^{-34}	J.s
شحنة الإلكترون	e	1.60218×10^{-19}	C
كتلة الإلكترون السكونية	m_e	9.10938×10^{-31}	kg
كتلة البروتون السكونية	m_p	1.67262×10^{-27}	kg
كتلة النترون السكونية	m_n	1.67493×10^{-27}	kg
وحدة الكتل الذرية	amu	1.66054×10^{-27}	kg
ثابت البنية الدقيقة	α	7.29735×10^{-3}	-
ثابت ريدبيرغ	R_∞	10973731.5685	m^{-1}
عدد أفوكادرو	N_A	6.02214×10^{23}	mol^{-1}
ثابت الغازات العام	R	8.31447	$J.mol^{-1}.K^{-1}$
ثابت بولتزمان	k	1.38065×10^{-23}	$J.K^{-1}$
مغنتون بور	μ_B	9.27401×10^{-24}	$J.T^{-1}$
المغنتون النووي	μ_N	5.05078×10^{-27}	$J.T^{-1}$
ثابت ستيفان بولتزمان	σ	5.67040×10^{-8}	$W.m^{-2}.K^{-4}$
نصف قطر بور	a_0	0.52918×10^{-10}	m

2 – بعض الخصائص الفيزيائية لعناصر الجدول الدوري :

H																	**He**
hcp																	hcp
3.75																	3.57
6.12																	5.83
Li	**Be**											**B**	**C**	**N**	**O**	**F**	**Ne**
bcc	hcp											rhomb	diamond	cubic	complex		fcc
3.491	2.27												3.567	5.66			4.46
	3.59																
Na	**Mg**											**Al**	**Si**	**P**	**S**	**Cl**	**Ar**
bcc	hcp											fcc	diamond	complex	complex	complex	fcc
4.225	3.21											4.05	5.430				5.31
	5.21																
K	**Ca**	**Sc**	**Ti**	**V**	**Cr**	**Mn**	**Fe**	**Co**	**Ni**	**Cu**	**Zn**	**Ga**	**Ge**	**As**	**Se**	**Br**	**Kr**
bcc	fcc	hcp	hcp	bcc	bcc	cubic	bcc	hcp	fcc	fcc	hcp	complex	diamond	rhomb	hex	complex	fcc
5.225	5.58	3.31	2.95	3.03	2.88	complex	2.87	2.51	3.52	3.61	2.66		5.658		chains		5.64
		5.27	4.68					4.07			4.95						
Rb	**Sr**	**Y***	**Zr**	**Nb**	**Mo**	**Tc**	**Ru**	**Rh**	**Pd**	**Ag**	**Cd**	**In**	**Sn**	**Sb**	**Te**	**I**	**Xe**
bcc	fcc	hcp	hcp	bcc	bcc	hcp	hcp	fcc	fcc	fcc	hcp	tetr	diamond	rhomb	hex	complex	fcc
5.585	6.08	3.65	3.23	3.30	3.15	2.74	2.71	3.80	3.89	4.09	2.98	3.25	6.49		chains		6.13
		5.73	5.15			4.40	4.28				5.62	4.95					
Cs	**Ba**	**La****	**Hf**	**Ta**	**W**	**Re**	**Os**	**Ir**	**Pt**	**Au**	**Hg**	**Tl**	**Pb**	**Bi**	**Po**	**At**	**Rn**
bcc	bcc	hex	hcp	bcc	bcc	hcp	hcp	fcc	fcc	fcc	rhomb	hcp	fcc	rhomb	sc		
6.045	5.02	3.77	3.19	3.30	3.16	2.76	2.74	3.84	3.92	4.08		3.46	4.95		3.34		
		ABAC	5.05			4.46	4.32					5.52					
Fr	**Ra**	**Ac**															
		fcc															
		5.31															

***Ce**	**Pr**	**Nd**	**Pm**	**Sm**	**Eu**	**Gd**	**Tb**	**Dy**	**Ho**	**Er**	**Tm**	**Yb**	**Lu**
fcc	hex	hex		complex	bcc	hcp	hcp	hcp	hcp	hcp	hcp	fcc	hcp
5.16	3.67	3.66			4.58	3.63	3.60	3.59	3.58	3.56	3.54	5.48	3.50
	ABAC					5.78	3.70	5.65	5.62	5.59	5.56		5.55
****Th**	**Pa**	**U**	**Np**	**Pu**	**Am**	**Cm**	**Bk**	**Cf**	**Es**	**Fm**	**Md**	**No**	**Lw**
fcc	tetr	complex	complex	complex	hex								
5.08	3.92				3.64								
	3.24				ABAC								

البنية البلورية

الثابت (a) بالأنغستروم

الثابت (c) بالأنغستروم

H																	He
0.088																	0.205
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
0.542	1.82											2.47	3.516	1.03			1.51
4.700	12.0											13.0	17.6				4.36
3.023	2.22												1.54			1.44	3.16
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
1.013	1.74											2.70	2.33			2.03	1.77
2.652	4.30											6.02	5.00				2.66
3.659	3.20											2.86	2.35			2.02	3.76
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
0.910	1.53	2.99	4.51	6.09	7.19	7.47	7.87	8.9	8.91	8.93	7.13	5.91	5.32	5.77	4.81	4.05	3.09
1.402	2.30	4.27	5.66	7.22	8.33	8.18	8.50	8.97	9.14	8.45	6.55	5.10	4.42	4.65	3.67	2.36	2.17
4.525	3.95	3.25	2.89	2.62	2.50	2.24	2.48	2.50	2.49	2.56	2.66	2.44	2.45	3.16	3.32		4.00
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
1.629	2.58	4.48	6.51	8.58	10.22	11.50	12.36	12.42	12.00	10.50	8.65	7.29	5.76	6.69	6.25	4.95	3.78
1.148	1.78	3.02	4.29	5.56	6.42	7.04	7.36	7.26	6.80	5.85	4.64	3.83	2.91	3.31	2.94	2.36	1.64
4.837	4.30	3.55	3.17	2.86	2.72	2.71	2.65	2.96	2.75	2.89	2.98	3.25	2.81	2.91	2.86	3.54	4.34
Cs	Ba	La*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
1.997	3.59	6.17	13.20	16.66	19.25	21.03	22.58	22.55	21.47	19.28	14.26	11.87	11.34	9.80	9.31		
0.905	1.60	2.70	4.52	5.55	6.30	6.80	7.14	7.06	6.62	5.90	4.26	3.50	3.30	2.82	2.67		
5.235	4.35	3.73	3.13	2.86	2.74	2.74	2.68	2.71	2.77	2.88	3.01	3.46	3.50	3.07	3.34		
Fr	Ra	Ac**															
		10.07															
		2.66															
		3.76															

*Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
6.77	6.78	7.00		7.54	5.25	7.89	8.27	8.53	8.80	9.04	9.32	6.97	9.84
2.91	2.92	2.93		3.03	2.04	3.02	3.22	3.17	3.22	3.26	3.32	3.02	3.39
3.65	3.63	3.66		3.59	3.96	3.58	3.52	3.51	3.49	3.47	3.54	3.88	3.43
**Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lw
11.72	15.37	19.05	20.45	19.81	11.87								
3.04	4.01	4.80	5.20	4.26	2.96								
3.60	3.21	2.75	2.62	3.1	3.61								

الكثافة مقدرة بـ $x\ 10^{3}\ kg\ .\ m^{-3}$

تركيز الذرات مقدرة بـ $x\ 10^{28}\ m^{-3}$

المسافة مع أقرب ذرة مجاورة مقدرة بالأنغستروم

H																	**He**
-0.00223																	-0.00105
-259.2 tp																	-268.93
-252.76																	
Li	**Be**											**B**	**C**	**N**	**O**	**F**	**Ne**
3.37	-23.28											-21.4	-14	-0.01251	1.90772		-0.00369
180.50	1287											2075	4489 tp	-210.0	-218.79	-219.7 tp	-248.6 tp
1342	2471											4000	3825 sp	-195.798	-182.953	-188.12	-246.053
Na	**Mg**											**Al**	**Si**	**P** [w]	**S**	**Cl**	**Ar**
6.2	12											21.1	-3.73	-20.6	-12.2	-0.0231	-0.0107
97.794	650											660.32	1414	44.15	115.21	-101.5	-189.4 tp
882.94	1090											2519	3265	280.5	444.61	-34.04	-185.847
K	**Ca**	**Sc**	**Ti**	**V**	**Cr**	**Mn**	**Fe**	**Co**	**Ni**	**Cu**	**Zn**	**Ga**	**Ge**	**As**	**Se**	**Br**	**Kr**
21.39	26.27	262.7	180.7	383.7	317.7	9.3.87	-	-	-	-9.63	-15.8	-17.7	-7.98	-22.3	-19.3	-15.3	-0.0165
63.5	842	1541	1668	1910	1907	1246	1538	1495	1455	1084.62	419.53	29.77 tp	938.25	817 tp	220.8	-7.2	-157.4 tp
759	1484	2836	3287	3407	2671	2061	2861	2927	2913	2562	907	2204	2833	616 sp	685	58.8	-153.34
Rb	**Sr**	**Y**	**Zr**	**Nb**	**Mo**	**Tc**	**Ru**	**Rh**	**Pd**	**Ag**	**Cd**	**In**	**Sn**	**Sb**	**Te**	**I**	**Xe**
3.98	-6.58	297.8	108.1	240.8	120.3	393.3	66.8	164.3	789.9	-24.1	-19.9	-10.2	-22.7	-73	-24.3	-22.2	-0.0254
39.30	777	1522	1854.7	2477	2623	2157	2333	1964	1554.8	961.78	321.069	156.60	231.93	630.628	449.51	113.7	-111.7 tp
688	1382	3345	4409	4744	4639	4265	4150	3695	2963	2162	767	2072	2602	1587	988	184.4	-108.09
Cs	**Ba**	**La***	**Hf**	**Ta**	**W**	**Re**	**Os**	**Ir**	**Pt**	**Au**	**Hg**	**Tl**	**Pb**	**Bi**	**Po**	**At**	**Rn**
-5.26	39.66	67.61	70.5	178.2	75.1	96.7	14	52.1	257.3	-34.7	-28.4	-35.6	-17	-170			
28.5	727	920	2233	3017	3422	3185	3033	2446	1768.5	1064.18	-38.829	304	327.462	271.406	254	302	-71
671	1897	3464	4603	5458	5555	5596	5012	4428	3825	2856	356.62	1473	1749	1564	962		-61.7
Fr	**Ra**	**Ac****															
27	696	1050															
		3198															

x 10^{-6} الطواعية المغنطيسية الحجمية

درجة حرارة الانصهار بالسيليزيوس

درجة حرارة الغليان بالسيليزيوس

***Ce**	**Pr**	**Nd**	**Pm**	**Sm**	**Eu**	**Gd**	**Tb**	**Dy**	**Ho**	**Er**	**Tm**	**Yb**	**Lu**				
1471.6	2808.7	3364.8		816.18	1447.3		111778.4	46603	48284.5	34178.8	18548.8	38.8	11.8				
799	931	1016	1042	1072	822	1313	1359	1412	1472	1529	1545	824	1663				
3443	3520	3074	3000	1794	1529	3273	3230	2567	2700	2868	1950	1196	3402				
****Th**	**Pa**	**U**	**Np**	**Pu**	**Am**	**Cm**	**Bk**	**Cf**	**Es**	**Fm**	**Md**	**No**	**Lr**				
62.1	499.5	409.6		622.2													
1750	1572	1135	644	640	1176	1345	986	900	860	1527	827	827	1627				
4788		4131		3228	2011	3100											

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
2.9	4.98											4.45	5.0				
8.53	3.02																
9.47	3.7																
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
2.75	3.66											4.28	4.85				
4.33	4.05											2.417					
4.88	4.48											2.709					
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
2.30	2.87	3.4	4.33	4.3	4.5	4.1	4.5	5.0	5.15	4.51	4.33	4.15	5.0	4.77	5.9		
6.49	3.11		39	18.1	11.8	143	8.57	5.6	6.16	1.543	5.46	13.6					
7.39	3.42	56.2		20.1	12.6	144	9.87		7.12	1.712	6.01						
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
2.16	2.59	3.1	4.05	4.3	4.6	4.9	4.71	4.98	5.12	4.26	4.22	4.12	4.42	4.55	4.95		
11.5	12.3		38.8	15.2	4.85		7.1	4.3	9.78	1.467	6.8	8	11.5	39			
13.1	13.4	59.6	42.9		5.47				10.73	1.617							
Cs	Ba	La*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
2.14	2.7	2.96	3.9	4.25	4.55	4.87	4.83	5.27	5.65	5.1	4.49	3.84	4.25	4.22	5.0		
18.7	30.2		30.4	12.2	4.82	17.2	8.1	4.7	9.6	2.051		15	19.2	107	40		
20.8	34	61.5	33.7	13.4	5.39				10.7	2.255	96.1		21.1				
Fr	Ra	Ac**															
2.1	2.8	3.2															

*Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
2.97	2.96	3.2	3.1	2.85	2.5	3.17	3.15	3.25	3.22	3.25	3.1	3.0	3.3
β: 82.8													
γ: 74.4	70	64.3	75 est	94	90	131	115	92.6	81.4	86	67.6	25	58.2
**Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lw
3.4	3.7	3.63	3.9	3.6	3.7	3.9	3.8	4.0	3.3				
14.7	17.7	28											

تابع العمل بـ (eV) .

المقاومية عند الدرجة (298 K) x $10^{-8}\Omega.m$

المقاومية عند الدرجة (273 K) x $10^{-8}\Omega.m$

3- بعض المقادير الفيزيائية المشتقة مع وحداتها ، وما يعادلها بالوحدات الأساسية :

المقدار الفيزيائي	الرمز الشائع	الوحدة الدولية	تقابل بالوحدات الأساسية
التواتر	f	Hz	s^{-1}
القوة	F	N	$m.kg.s^{-2}$
الضغط	p	Pa , $N.m^{-2}$	$m^{-1}.kg.s^{-2}$
الطاقة	*E*	J , N.m	$m^{2}.kg.s^{-2}$
الاستطاعة	P	W , $J.s^{-1}$	$m^{2}.kg.s^{-3}$
الشحنة	q	C	s.A
الكمون	U	V , $W.A^{-1}$	$m^{2}.kg.s^{-3}.A^{-1}$
السعة الكهربائية	C	F , $C.V^{-1}$	$m^{-2}.kg^{-1}.s^{4}.A^{2}$
المقاومة الكهربائية	R	Ω , $V.A^{-1}$	$m^{2}.kg.s^{-3}.A^{-2}$
الناقلية الكهربائية	σ	S , $A.V^{-1}$	$m^{-2}.kg^{-1}.s^{3}.A^{2}$
التدفق المغنطيسي	Φ	Wb , V.s	$m^{2}.kg.s^{-2}.A^{-1}$
شدة حقل التحريض المغنطيسي	B	T , $Wb.m^{-2}$	$kg.s^{-2}.A^{-1}$
التحريضية	L	H , $Wb.A^{-1}$	$m^{2}.kg.s^{-2}.A^{-2}$
شدة الإضاءة	*P*	lm , cd.sr	cd
الإنارة	*J*	lx , $lm.m^{-2}$	$m^{-2}.cd$
النشاط الإشعاعي	A	Bq	s^{-1}
المساحة	s	m^{2}	m^{2}
الحجم	V	m^{3}	m^{3}

المقدار الفيزيائي	الرمز الشائع	الوحدة الدولية	تقابل بالوحدات الأساسية
السرعة	ϑ	$m.s^{-1}$	$m.s^{-1}$
التسارع	a	$m.s^{-2}$	$m.s^{-2}$
السرعة الزاوية	ω	$rad.s^{-1}$	s^{-1}
الاندفاع	P	N.s	$m.kg.s^{-1}$
الاندفاع الزاوي	L	N.m.s	$m^2.kg.s^{-1}$
العزم	Γ	N.m	$m^2.kg.s^{-2}$
العدد الموجي	K	m^{-1}	m^{-1}
الكثافة	ρ	$kg.m^{-3}$	$kg.m^{-3}$
الفعل	S	J.s	$m^2.kg.s^{-1}$
السعة الحرارية	Q	$J.k^{-1}$	$m^2.kg.s^{-2}.K^{-1}$
كثافة الطاقة	U	$J.m^{-3}$	$m^{-1}.kg.s^{-2}$
التوتر السطحي	γ	$N.m^{-1}$	$kg.s^{-2}$
كثافة التدفق الإشعاعي	Φ	$W.m^{-2}$	$kg.s^{-3}$
الناقلية الحرارية	κ	$W.m^{-1}.k^{-1}$	$m.kg.s^{-3}.K^{-1}$
كثافة التيار الكهربائي	J	$A.m^{-2}$	$A.m^{-2}$
العازلية الكهربائية	ε	$F.m^{-1}$	$m^{-3}.kg^{-1}.s^4.A^2$
النفوذية المغنطيسية	μ	$H.m^{-1}$	$m.kg.s^{-2}.A^{-2}$
شدة الحقل الكهربائي	E	$V.m^{-1}$	$m.kg.s^{-3}.A^{-1}$
شدة الحقل المغنطيسي	H	$A.m^{-1}$	$A.m^{-1}$
المقاومية	ρ	$\Omega.m$	$m^3.kg.s^{-3}.A^{-2}$

✍ - المراجع :

1 - كتاب : " المدخل إلى فيزياء الجسم الصلب " د.فخري كتوت و د.بسام معصراني .

2 - "Introduction to solid state physics, 7^{th} edition, Kittel . "

3 - "The Science and Engineering of Materials , Sixth Edition 2010 , R. Askeland & P. Fulay & J. Wright " .

4 - كتاب " فيزياء المواد " د.توفيق قسام و د.فوزي عوض و د.يحيى حمود .

5 - "Survey of Semiconductor Physics: Volume II Barriers, junctions, Surfaces, and Devices , Karl W. Böer " .

6 - " Fundamentals of Materials Science and Engineering, 5e , Callister " .

7 - " Solar Cells - Research and Application Perspectives , Morales-Acevedo " .

8 - "MAGNETIC MATERIALS Fundamentals and Applications Second edition , NICOLA A. SPALDIN " .

9 - " Introduction to superconductivity, rose-innes ".

اللجنة العلمية :

- ا.د فـوزي غـالـب عـوض

- ا.د محمد سعيد محاسنة

- ا.م.د سـهـام الـطـرابـيـشـي

المدقق اللغوي :

- الدكتور علي الكردي .

حقوق الطبع و الترجمة والنشر محفوظة لمديرية الكتب والمطبوعات

سعر المبيع : (٢٤٥) ل.س

مطبعة جامعة دمشق